РАДИОФИЗИКА, ФОТОНИКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

I Российской научной конференции

РФИВ 2020

6–8 октября

г. Омск

Институт радиофизики и физической электроники
Омского научного центра СО РАН

Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

Омский государственный педагогический университет

РАДИОФИЗИКА, ФОТОНИКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА

Тезисы докладов
I Российской научной конференции

Омск, 6–8 октября 2020 г.

РФИВ-2020

© АО «ОНИИП», 2020

ISBN 978-5-6041917-6-7

ОМСК
2020

УДК 53:621.383:544.03
ББК 32.95:32.84:24.5
Р15

Р15 **Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества** [Электронный ресурс]: тезисы докладов I Российской научной конференции (Омск, 6–8 октября 2020 года). – Электрон. текст. дан. – Омск : ОНИИП, 2020. – 216 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; 12 см.

ISBN 978-5-6041917-6-7

УДК 53:621.383:544.03
ББК 32.95:32.84:24.5

Текстовое электронное издание.
Самостоятельное электронное издание

Минимальные системные требования:
процессор с частотой 1,3 ГГц или выше ; ОЗУ 512 Мб ;
Microsoft Windows XP/Vista/7/8/10 ; Adobe Acrobat Reader 8.0 и выше ; CD-ROM; мышь

ISBN 978-5-6041917-6-7
© АО «ОНИИП», 2020

Издано в авторской редакции.

Дата выпуска: 20.10.2020.
1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. Тираж 7 копий. Объем 2,16 Mb.

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
644009, Омская область, г. Омск, ул. Масленникова, 231. Тел. (3812) 53-66-73

Программный комитет

Гуляев Ю.В.,	академик РАН, д-р физ.-мат. наук, научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Москва), *сопредседатель,*
Березовский В.А.,	генеральный директор АО «ОНИИП» (Омск), *сопредседатель,*
Асеев А.Л.,	академик РАН, д-р физ.-мат. наук, НИ НГУ (Новосибирск), *сопредседатель,*
Багдасарян А.С.,	академик НАН Республики Армении, д-р техн. наук ФГУП НИИР (Москва),
Башкуев Ю.Б.,	д-р техн. наук, Институт физического материаловедения СО РАН (Улан-Удэ),
Бобров П.П.,	д-р физ.-мат. наук, ОмГПУ (Омск),
Гошин Г.Г.,	д-р физ.-мат. наук, ТУСУР (Томск),
Карпов В.В.,	д-р экон. наук, ОНЦ СО РАН (Омск),
Козлов А.Г.,	д-р техн. наук, ОмГТУ (Омск),
Романов А.Н.,	д-р техн. наук, Институт водных и экологических проблем РАН (Барнаул),
Сороцкий В.А.,	д-р техн. наук, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург),
Струнин В.И.,	д-р физ.-мат. наук, ОмГУ им. Ф.М. Достоевского (Омск),
Якубов В.П.,	член-корр. МАН ВШ, академик РАЕН, д-р физ.-мат. наук, НИ ТГУ (Томск).

Организационный комитет

Кривальцевич С.В.,	канд. физ.-мат. наук, АО «ОНИИП» (Омск);
Доберштейн С.А.,	канд. техн. наук, АО «ОНИИП» (Омск);
Доля Е.А.,	АО «ОНИИП» (Омск);
Зачатейский Д.Е.,	канд. физ.-мат. наук, АО «О Н И И П» (Омск);
Машинская С.Г.,	АО «ОНИИП» (Омск);
Миллер М.А.,	д-р экон. наук ОНЦ СО РАН (Омск);
Сафонова О.А.,	АО «ОНИИП» (Омск);
Сидоренко К.А.,	канд. техн. наук, АО «ОНИИП» (Омск);
Торгаш Т.Н.	канд. техн. наук, АО «ОНИИП» (Омск);
Ященко А.С.,	канд. физ.-мат. наук, ИРФЭ ОНЦ СО РАН (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНАЯ ЧАСТЬ

Багдасарян А. С., Гуляев Ю. В., Доберштейн С. А., Синицына Т. В.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН (STW) – ОДИН ИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ РАБОЧИХ ЧАСТОТ УСТРОЙСТВ НА ПАВ 13

Вайнер Б. Г.

ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ФОТОНИКАВ ИССЛЕДОВАНИИ СВОЙСТВ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ 15

ФИЗИКА ИЗЛУЧЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН, ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ

Аппалонов А. М., Масленникова Ю. С.

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АНОМАЛИИ ПО ДАННЫМ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ 17

Базарова А. С., Атутов Е. Б., Базаров А. В., Башкуев Ю. Б.

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ИНДЕКСА РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН НА ВИТИМСКОМ ПЛОСКОГОРЬЕ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ 19

Барабашов Б. Г., Анишин М. М., Лаврентьев О. А., Радио Л. П.

ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ МПЧ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ IRI-2016 21

Башкуев Ю. Б., Ангархаева Л. Х., Буянова Д. Г.

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ИМПЕДАНС СТРУКТУР «ТОНКИЙ ЛЕД – МОРЕ» И «ТОЛСТЫЙ ЛЕД – МОРЕ» В СДВ-УКВ ДИАПАЗОНАХ РАДИОВОЛН 23

Боровик И. А., Кудрин О. И., Бекишев Р. А., Селиванова Г. Н.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ АНТЕНН ДИАПАЗОНОВ 435 И 2400 МГц ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ БОРТОВЫХ РАДИОСРЕДСТВ НАНОСПУТНИКОВ ФОРМАТА CUBESAT 25

Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНО НАБЛЮДАЕМОЙ ЧАСТОТЫ В УСЛОВИЯХ МИНИМАЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ 27

Виноградов А. Г., Теохаров А. Н.

ВЛИЯНИЕ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ НА КОГЕРЕНТНОСТЬ ОТРАЖЕННОГО ОТ ОБЪЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ СИГНАЛА В РАЗНЕСЕННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РСА 29

Гильфанова А. Ф., Веденькин Д. А.

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ КАНАЛА СВЯЗИ С КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ 31

Костычов Ю. А.

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АПЕРИОДИЧЕСКИХ АНТЕНН ДИАПАЗОНА ДКМВ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ В ИХ КОНСТРУКЦИЮ ВТОРИЧНЫХ ПРИЗЕМНЫХ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ФАЗОВЫХ КОРРЕКТОРОВ 32

Кривальцевич С. В., Ященко А. С., Немчанов К. В.
ВЛИЯНИЕ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА НА НАПРАВЛЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ 34
Luo Y., Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Guo Q., Zheng Y.
РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАГНИТО-ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ БУРИ 5–6 АВГУСТА 2019 ГОДА 36
Майненгер К. А.
ВЛИЯНИЕ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ВХОДНОЙ ИМПЕДАНС ПРИЗЕМНОЙ АНТЕННЫ КВ ДИАПАЗОНА 38
Майненгер К. А., Ященко А. С.
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН 40
Пелевин А.О., Лерер А.М., Заргано Г.Ф.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ 42
Рябов А. О., Фролов В. Л.
ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ПОТЕНЦИАЛОМ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ И ТЕМПЕРАТУРОЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ 44
Рябов А. О., Фролов В. Л.
ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В МАГНИТНО-СОПРЯЖЕННОЙ ОБЛАСТИ 46
Рябов А. О., Фролов В. Л.
ИССКУСТВЕННЫЕ ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ 48
Сахтеров В. И.
ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН ГЕОРАДАРА 50
Терещенко П. Е.
ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ВОЗБУЖДАЕМОГО ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДИПОЛЕМ 52
Титова М. А., Захаров В. И., Пулинец С. А.
ОБНАРУЖЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ И ВЗАИМОСВЯЗЬ С ОПРЕДЕЛЕННЫМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ИСТОЧНИКАМИ В ПЕРИОДЫ МАСШТАБНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В НАЧАЛЕ 2010 ГОДА 53
Хазан В. Л.
КВАДРАТУРНАЯ ВНУТРИИМПУЛЬСНАЯ ФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ 55
Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q., Zheng Yu.
РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ СЕЙСМОИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА НАКЛОННЫХ РАДИОТРАССАХ 57
Эшпай Р. А., Степущенко О. А., Морозов О. Г., Сарварова Л. М., Тяжелова А. А.
ВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПАЦИЕНТА В ИНВАЛИДНОЙ КОЛЯСКЕ НА ОСНОВЕ ЧИРПИРОВАННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА С ФАЗОВЫМ π-СДВИГОМ 60
Ященко А. С., Кривальцевич С. В.
ЭФФЕКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ПРОВОДИМОСТИ ПОЧВ ЕСТЕСТВЕННОГО СЛОЖЕНИЯ 62

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА, ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

Акселевич В. И., Мазуров Г. И.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ИМ 64

Басанов Б. В., Базаров А. В., Гармаев Б. З., Башкуев Ю. Б., Коровин Е. Ю., Атутов Е. Б.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ПРИ ЧАСТОТЕ 30 ГГц 66

Бобров П. П., Беляева Т. А., Крошка Е. С., Родионова О. В.

О ПАРАМЕТРАХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЧВ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В АЛГОРИТМЕ SMOS 67

Бобров П. П., Беляева Т. А., Крошка Е. С., Родионова О. В.

СВЯЗЬ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ С ПРОВОДИМОСТЬЮ СЛАБОЗАСОЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ПЕСКА 69

Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Венславский В. Б., Ведров М. В.

ОСОБЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛЕДЯНЫХ ПОКРОВОВ ИВАНО-АРАХЛЕЙСКИХ ОЗЕР ПО ДАННЫМ SENTINEL-1A 71

Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Балтухаев А. К., Кирбижекова И. И.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ РАДАРНЫХ ДАННЫХ, НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛЬНЫХ ОЦЕНОК 73

Ишкаев Т. М., Насыбуллин А. Р., Фархутдинов Р. В., Нуриев Ф. Ф.

НЕПЛАНАРНЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ БРЭГГОВСКИЕ СВЧ СТРУКТУРЫ 75

Козлов А. Г., Голубятникова Н. О., Загородных О. В.

МОДЕЛЬ ИМПЕДАНСА ВЧ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА КАК ОСНОВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО СОСТОЯНИЯ 77

Кручинина М. В., Громов А. А., Щербакова Л. В., Кручинина Э. В., Генералов В. М., Генералов К. В., Кручинин В. Н., Рыхлицкий С. В., Яковина И. Н., Баннова Н. А., Минин О. В., Минин И. В.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ВЯЗКОУПРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭРИТРОЦИТОВ В МОДЕЛЯХ ДИАГНОСТИКИ АДЕНОМАТОЗНЫХ ПОЛИПОВ И СТАДИЙ КОЛОРЕКТАЛЬНОГО РАКА 79

Лагутин А. А., Мордвин Е. Ю.

ЭМИССИЯ МЕТАНА ПРЕДПРИЯТИЯМИ НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: РЕЗУЛЬТАТЫ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ 81

Мазуров Г. И., Акселевич В. И.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧАЕМОЙ С ПОМОЩЬЮ ДМРЛ-С В МЕТЕОРОЛОГИИ 83

Мордвин Е. Ю., Лагутин А. А., Ревякин А. И.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ AIRS/AMSU/ATMS 85

Мягков А. С., Фомин Д. А., Зоркин А. С., Соловьев А. В.

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТИ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ 87

Насыбуллин А. Р., Ишкаев Т. М., Фархутдинов Р. В., Вазиев Т. О.

БРЭГГОВСКИЕ СТРУКТУРЫ КАК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В УСТРОЙСТВАХ СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ 89

Насыбуллин А. Р., Фархутдинов Р. В., Ишкаев Т. М., Вазиев Т. О.
КОАКСИАЛЬНЫЕ БРЕГГОВСКИЕ СВЧ СТРУКТУРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТЕЙ 91
Орлов А. О., Лукьянов П. Ю., Харин Ю. В.
ПРОПУСКАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ СВЕРХТОНКИМИ ПЛЁНКАМИ ЛЬДА 0, ОБРАЗОВАННЫМИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ 93
Пщелко Н. С.
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНОГО КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ 95
Пщелко Н. С.
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КЕРАМИКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ЕЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ И НА ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ 96
Репин А. В.
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ГЛИНАХ, НАСЫЩЕННЫХ ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИЕЙ, В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ПРИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ 97
Репин А. В., Родионова О. В.
ВЛИЯНИЕ СОЛЕНОСТИ УВЛАЖНЯЮЩЕГО РАСТВОРА НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГЛИН В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 1 МГц ДО 8 ГГц 99
Суслов К. Н., Родионова О. В., Кривальцевич С. В.
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ОБРАЗЦА ГРУНТА АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА 101
Шакиров Р. Ф., Насыбуллин А. Р.
АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ СВЧ СТРУКТУР 102
Ященко А. С., Кривальцевич С. В.
КАРТИРОВАНИЕ МЁРЗЛЫХ ПОЧВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ И РАДИОМЕТРОВ 104
Ященко А. С., Ященко Ю. И.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ВЛАЖНОСТИ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗ СПУТНИКОВЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ 106

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА

Козлов А. Г., Фадина Е. А.
ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ С ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВЫМИ МИКРОЭЛЕКТРОДАМИ 108
Левин К. Л., Рябоконь Д. В., Ханин С.Д., Назарова Е. А., Джеламо Р. В., Доронин В. А.
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ГРАФЕНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА 110
Лысенко Н. И., Половинкин В. Г.
РЕАЛИЗАЦИЯ ДВУХЧАСТОТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОИЗВОДНОЙ ВОЛЬТ-ФАРАДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ 112
Спирюхин А. С., Нуреев И. И.
КОМПАКТНЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНОК 114

Струнин В. И., Худайбергенов Г. Ж.
ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ-ТЕРМОСТАТОВ 116
Шарафеев А. Р., Насыбуллин А. Р.
СВЧ ДАТЧИК НА ПОЛОСКОВЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУРАХ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ВЕЩЕСТВ 117
Шашкина А. С., Ханин С. Д.
МЕТОДЫ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ 119

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

Батенков К. А.
ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ С ИМПУЛЬСНЫМИ ПОМЕХАМИ 121
Буткевич Ю. Р., Афанасьев В. В.
СЕЛЕКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДИСКРЕТНО-НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ ДУФФИНГА-ХОЛМСА С ДИНАМИЧЕСКИМ ХАОСОМ 123
Ветлужский А. Ю.
ЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ 124
Давыдов В. Г., Афанасьев В. В.
ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ РЕЖЕКТИРОВАНИЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДМИТРИЕВА-КИСЛОВА 126
Дереча Е. В., Привалов Д. Д.
ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ НЕСУЩЕЙ НА ОШИБКУ ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ГММС-СИГНАЛА 127
Кесель Л. Г., Ведерникова К. О.
РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОЙ ШИРИНЫ КОЛЬЦА ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 129
Козлов С. В., Ву Тхань Ха
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕГРАДАЦИИ ПРИЕМНЫХ КАНАЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ СО СКАНИРУЮЩЕЙ МНОГОКАНАНАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ 130
Панков Д. А.
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 132
Патронов Д. Ю., Крживокольский Д. В., Сергеев Д. Д.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НА СОВМЕЩЕННЫХ УЗЛОВЫХ РАДИОЦЕНТРАХ СЕТИ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИОСВЯЗИ 134
Раупов Р. Р., Афанасьев В. В.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ПСВЕДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОЛЕПЕСТКОВОЙ СИСТЕМЫ ПО СХЕМЕ JERK С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ 136
Семисошенко М. А.
МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛЬНОЙ И ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ В ИОНОСФЕРНЫХ РАДИОКАНАЛАХ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА 138
Ситдиков Д. Д., Веденькин Д. А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МУЛЬТИФОКУСИРОВКИ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ИЗЛУЧЕННОГО ПОЛЯ 140

Терехов Л. С., Лаврухин А. А.
О ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА СВЯЗИ 141
Фадеева Л. Ю., Ибрагимов Р. В.
ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ НЕОДНОРОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ 143
Фадеева Л. Ю., Абдулкина Н. В.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ, ВОЗБУЖДАЕМОГО ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ, В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ 145
Хацевский К. В., Сидоренко А. А., Беляков В. Е., Стельмахович Е. М., Крюков В. В.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФИЛЬТРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ 147
Ходенков С. А., Шепета Н. А., Гаипов К. Э., Назаров Г. Г.
ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ СВЧ ФИЛЬТР НА МНОГОМОДОВОМ РЕЗОНАТОРЕ 149
Шлома Д. Н., Степанов Ю. А.
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ СБОРА МЕТЕОДАННЫХ 151

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Альмеев А. А., Нуреев И. И.
ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ЛАЗЕР В СИСТЕМАХ DWDM 153
Гарипов Н. И.
МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ВОСХОДЯЩИХ ПОТОКОВ В СЕТЯХ WDM-PON ТРАНСПОРТНЫХ ДОМЕНОВ МОБИЛЬНЫХ 5G СИСТЕМ 155
Ефимов В. А., Фархутдинов Р. В.
КОАКСИАЛЬНАЯ БРЭГГОВСКАЯ СВЧ СТРУКТУРА С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАПОЛНЕНИЯ 156
Кац Б. М., Мещанов В. П., Саяпин К. А.
КОМПАКТНЫЙ ДВУХДИАПАЗОННЫЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР 158
Кац Б. М., Мещанов В. П., Саяпин К. А.
УГОЛКОВЫЕ КОАКСИАЛЬНО-ВОЛНОВОДНЫЕ ПЕРЕХОДЫ ИНДУКТИВНОГО ТИПА 159
Кидяров Б. И.
СИСТЕМАТИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ПОЛЯРНЫХ ОКСИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ 161
Ковивчак В. С.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЛОЕВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА НА ПОЛИМЕРНОЙ ПОДЛОЖКЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГИБКИХ МИКРОСУПЕРКОНДЕНСТОРОВ 163
Корж И. А.
МИКРОИНИЦИАТОР, РЕАЛИЗОВАННЫЙ НА ОСНОВЕ НАНОПЛЕНОК С ЭФФЕКТОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА 164
Корж И. А., Ковивчак В. С.
СОСТАВ НАНОПЛЕНОК Ni/Al, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ 166
Корж И. А., Косарев Б. А.
ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ НАНОПЛЕНОК Ni/Al 168

Корж И. А., Кузнецов А. Н., Зонова Ю. С.
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИОННЫХ НАНОПЛЕНОК Ni/Al С ЭФФЕКТОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА С ПРОСЛОЙКАМИ ИЗ НАНОПЛЕНОК Ti 170
Коровин Н. С.
АЛГОРИТМЫ АППРОКСИМАЦИИ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ СПЕКТРОВ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК 172
Кузнецов А. Н., Доберштейн С. А.,. Веремеев И. В
ЧАСТОТНАЯ ПОДСТРОЙКА STW-РЕЗОНАТОРОВ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ ДО 1 ГГц .. 173
Курносов Д. А.
ОПТИЧЕСКИЙ ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗАТОР НА ОСНОВЕ ДВУХПОЛОСНОЙ МОДУЛЯЦИИ С ПОДАВЛЕННОЙ НЕСУЩЕЙ И ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКИ С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ 175
Лихачев Л. В., Фархутдинов Р. В.
КОАКСИАЛЬНАЯ БРЭГГОВСКАЯ СВЧ СТРУКТУРА С ВНЕШНИМ ПРОВОДНИКОМ В ВИДЕ СТЕРЖНЕЙ 176
Мещанов В. П., Саяпин К. А., Шерстюков Д. Н.
НОВЫЕ СТРУКТУРЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ НА БАЗЕ ОДИНОЧНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ 178
Михальцов В. Е., Семенова З. В., Степанова Е. А.
ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ УЛУЧШЕНИЯ ДИАРИЗАЦИИ КЛАССОВ В СИСТЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ГОЛОСОВЫХ ПОДДЕЛОК 180
Насыбуллин А. Р., Вазиев Т. О.
РЕЗОНАНС ФАНО В ДИАПАЗОНЕ СВЧ, РЕАЛИЗОВАННЫЙ В ПЛАНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУРАХ 182
Торгаш Т. Н., Козлов А. Г.
ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ОАВ-РЕЗОНАТОРА НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА ОТ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СЛОЕВ БРЭГГОВСКОГО ОТРАЖАТЕЛЯ 183
Тюменцев А. И., Тимошенко Т. С., Забегайло И. В.
МИНИАТЮРНЫЙ ТРИПЛЕКСЕР ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ СВЯЗИ 185

ФОТОНИКА

Алюшина С. Г., Анучин В. О., Курбиев И. У., Макаров И. А., Мисбахов Р. Ш., Л. М. Сарварова, Тяжелова А. А.
ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ВОСХОДЯЩЕГО ПОТОКА ТРАНСПОРТНОГО WDM-PON ДОМЕНА РАДИОСЕТЕЙ ДОСТУПА МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G 187
Болецкая Т. К., Киселева Е. В.
РАСЧЕТ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ СВЕТОВЫХ ВОЛН В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ 189
Бухаров Д. Н., Кучерик А. О., Аракелян С. М.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОСТРОВКОВЫХ НАНОПЛЕНОК 190
Зверев А. В., Ипатов Д. Е.
ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ВИДЕОСИГНАЛА СЕНСОРА ИК ДИАПАЗОНА В ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ 192

Кесель Л. Г., Смирнова А. С.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАТОРА КОАКСИАЛЬНОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОГО ДИАМЕТРА КОЛЬЦА ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 194

Кесель Л. Г., Сулейманов А. Р.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЪЮСТИРОВОК ЗЕРКАЛ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛУЧЕВЫХ ПОТОКОВ В КОАКСИАЛЬНОМ ЛАЗЕРЕ 195

Копонен М. Э.

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ВЫХОДОМ 196

Кузнецов С. А., Лазорский П. А., Гельфанд А. В., Федоринин В. Н., Николаев Н. А.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТГЦ-ФОТОНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ 197

Куликов Е. В., Сахабутдинов А. Ж., Нуреев И. И., Сарварова Л. М., Тяжелова А. А

СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНОК ИЗНОСА СТВОЛА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЯ ЕГО ДЕФОРМАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДРЕСНЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК 199

Курбиев И. У., Морозов О. Г., Сахабутдинов А. Ж.

АДРЕСНЫЕ ЛИНЕЙНО-ЧИРПИРОВАННЫЕ ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ КАК БАЗОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ МНОГОСЕНСОРНЫХ РАДИОФОТОННЫХ СИСТЕМ 201

Муратшин И. Р., Кузнецов А. А.

НЕОБХОДИМОСТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ПЕРВОГО ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ 203

Останин С. А., Жумадилов М. Д.

РАДИОФОТОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПОРНЫХ СИГНАЛОВ ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА 205

Степущенко О. А., Морозов О. Г., Морозов Г. А., Муравьева Е. В., Сарварова Л. М., Тяжелова А. А.

ПРОТОТИП БИОСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ LAB-ON-CHIP НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНО-ЧИРПИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С МНОЖЕСТВОМ ФАЗОВЫХ π-СДВИГОВ 207

Суранов А. Я.

СИСТЕМА ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ С ИК-ПОДСВЕТКОЙ И АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ИАМЕТРА ЗРАЧКА ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА 209

Ханин С. Д., Ванин А. И., Кумзеров Ю. А., Соловьев В. Г., Цветков А. В., Яников М. В.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВ 211

Швец В. А.,. Марин Д. В, Якушев М. В., Рыхлицкий С. В.

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ КАДМИЙ-РТУТЬ-ТЕЛЛУРА И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ IN SITU КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА ПЛЁНОК 213

Эшпай Р. А.,. Степущенко О. А, Морозов О. Г., Сарварова Л. М., Тяжелова А. А.

РАДИОФОТОННАЯ СИСТЕМА СБОРА ИНФОРМАЦИИ О ПОЛОЖЕНИИ ПАЦИЕНТА В ИНВАЛИДНОЙ КОЛЯСКЕ 215

А. С. Багдасарян[1, 2, 4], Ю. В. Гуляев[1], С. А. Доберштейн[3], Т. В. Синицына[4]
[1] Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Москва)
[2] Научно-исследовательский институт радио (Москва)
[3] Омский научно-исследовательский институт приборостроения (Омск)
[4] ООО «БУТИС» (Москва)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН (STW) – ОДИН ИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ РАБОЧИХ ЧАСТОТ УСТРОЙСТВ НА ПАВ

Аннотация. Представлен эффективный метод повышения рабочих частот устройств на ПАВ – использование поверхностных поперечных волн (STW) с большой скоростью распространения акустической волны V=5000 м/с на стандартном пьезоматериале из кварца. Рассмотрены подходы к реализации STW-резонаторов с высокой добротностью и STW-фильтров с малыми потерями. Для каждого подхода приведены количественные и качественные характеристики STW-устройств на частоты > 1 ГГц.

Ключевые слова: поверхностные поперечные волны, резонатор, фильтр, добротность, вносимые потери.

A. S. Bagdasaryan[1, 2, 4], Yu. V. Gulyaev[1], S. A. Dobershtein[3], T. V. Sinitsina[4]
[1] Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics (Moscow)
[2] Radio Research and Development Institute (Moscow)
[3] Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)
[4] LLC «BUTIS» (Moscow)

USE OF THE SURFACE TRANSVERSE WAVES (STW) – ONE OF EFFICIENT METHODS FOR ENHANCEMENT OF THE SAW DEVICES OPERATING FREQUENCIES

Abstract. This paper presents an efficient method for enhancement of the operating frequencies of the SAW devices - use of surface transverse waves (STW) with high propagation velocity V = 5000 m/s on a standard piezomaterial quartz. The approaches for a realization of the STW resonators with the high quality factor and STW filters with the low insertion loss were considered. The quantitative and qualitative characteristics of above 1 GHz STW devices for each approach were given.

Keywords: surface transverse waves, resonators, quality factor, filter, insertion losses.

Фильтры, линии задержки, резонаторы на рэлеевских поверхностных акустических волнах (ПАВ) на стандартных пьезоматериалах из кварца, $LiTaO_3$, $LiNbO_3$ со скоростью распространения V=3150-4000 м/с имеют диапазон рабочих частот от десятков до сотен мегагерц. Однако современные системы обработки информации требуют освоения все более высоких частот. Рабочая частота f_0 любого ПАВ-устройства определяется по формуле $f_0=V/\lambda$, где V – скорость ПАВ в пьезоматериале, λ – период электродов встречно-штыревого преобразователя (ВШП). Повышение рабочих частот устройств на ПАВ связано с решением следующей задачи: использовать пьезоматериалы с высокой скоростью ПАВ или уменьшать период электродов ВШП λ. Массовое применение в мировой практике нашел первый метод, когда используется акустические волны с большой V в стандартных пьезоматериалах.

Известны поверхностные поперечные волны (surface transverse waves – STW) на кварце с направлением распространения акустической волны перпендикулярным кристаллографической оси X. Для этого направления скорость распространения акустической волны V = 5000 м/с, а ширина электрода и зазора ВШП составляет 0,83–1,25 мкм для рабочих частот 1000–1500 МГц, что

облегчает фотолитографию при изготовлении STW-устройств. Наименьший ТКЧ имеет STW на срезе YX/36° кварца, который в основном и используется для резонаторов и фильтров.

В данном докладе рассмотрены различные подходы к реализации STW-резонаторов с высокой добротностью и STW-фильтров с малыми потерями, представлены современные количественные и качественные характеристики как зарубежных, так и отечественных разработчиков и производителей подобной техники STW на частоты более 1 ГГц. Резонаторы на STW подобно обычным резонаторам на ПАВ выполняются по одновходовой схеме, когда ВШП располагается между двумя отражательными решетками (ОР), или по двухвходовой схеме, когда между двумя ОР размещены входной и выходной ВШП. Причем в последнем случае используется топология с центральной ОР между ВШП или с максимально сближенными ВШП. Построение фильтров на основе двухвходовых STW-резонаторов осуществляется непосредственно, поскольку двухвходовой резонатор – это уже фильтр, либо за счет каскадирования для получения высокой избирательности в полосе задерживания.

Одной из основных характеристик STW-резонаторов является добротность Q, а для STW-фильтров – вносимые потери (ВП). Q STW-резонаторов определяется отражательной способностью ОР, потерями на распространение и на проводимость электродов ВШП, совпадением по частоте центра полосы задерживания и максимума коэффициента отражения ОР с максимумом проводимости ВШП. ВП в STW-фильтрах определяются Q входящих в них резонаторов, а также потерями на рассогласование с нагрузками и потерями в элементах согласования. Для обеспечения максимума Q в резонаторах и малых ВП в фильтрах необходимо учесть все перечисленные факторы. Для этого проводят конструктивную, топологическую и технологическую оптимизацию резонаторов и фильтров на STW.

Одновходовые резонаторы и фильтры на STW выполняются по синхронной (шаг электродов в ВШП и ОР одинаковые) и асинхронной топологии (шаг электродов ВШП и ОР отличаются на небольшую величину, либо при постоянном шаге электродов ВШП и ОР коэффициенты металлизации ВШП и ОР отличаются на небольшую величину). При выполнении асинхронного одновходового резонатора с определенным соотношением между шагом электродов ВШП и ОР при постоянном коэффициенте металлизации добротность STW-резонатора увеличивается. Это объясняется тем, что в этом случае центр полосы задерживания и максимума коэффициента отражения ОР совпадает с максимумом проводимости ВШП.

ТКЧ STW-устройств составляет $-0{,}05\cdot10^{-6}$ 1/°C^2, что хуже, чем у ST-среза кварца для рэлеевской ПАВ, у которой ТКЧ= $-0{,}03\cdot10^{-6}$ 1/°C^2. Однако это не является препятствием для эффективного использования STW для устройств генерации и селекции частоты. Метод перевёрнутого кристалла (МПК) позволяет устранить влияние клея и золотых проводников при монтаже STW-кристаллов в SMD-корпус и уменьшить старение STW-устройств. По разным данным относительный сдвиг частотных характеристик МПК STW-резонаторов составляет $< 10^{-6}$ за год и $< 5\cdot10^{-6}$ за 3500 часов при температуре испытаний +85°C. В диапазоне частот 1 ГГц двухвходовые STW-резонаторы в схеме генератора обеспечивали выдерживание СВЧ сигнала мощностью 1–2 Вт. Это объясняется сдвиговой природой STW, в результате чего сильные механические колебания частиц из-за большой подводимой мощности постепенно уходят в объем пьезоматериала, а не остаются на поверхности как у рэлеевской ПАВ.

В диапазоне частот до 1000 МГц высокие Q = 4600–8600 достигаются на синхронных и асинхронных одновходовых STW-резонаторах, а сравнительно малые ВП = 2–6 дБ и избирательность 20–30 дБ обеспечиваются в STW-фильтрах на двухвходовых резонаторах.

В диапазоне частот 1,5–2,5 ГГц в STW-фильтрах применяют балансно-мостовые схемы на одновходовых резонаторах и двухвходовые резонаторы с максимально сближенными ВШП, а в STW-резонаторах – одновходовые асинхронные схемы, достигая высоких характеристик STW-устройств, близких к характеристикам устройств на рэлеевских и вытекающих ПАВ: ВП = 3 дБ, избирательность > 30 дБ, Q = 7200–8300, малые размеры SMD-корпусов: 3x3x1,2 мм.

Миниатюрные STW-резонаторы с высокой Q, надёжностью для частотной стабилизации СВЧ-генераторов с малым уровнем шумов в передатчиках и для гетеродинов в приемниках СВЧ-аппаратуры связи успешно конкурируют с наиболее массовыми аналогами по другим известным технологиям.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 18-07-00282).

Б. Г. Вайнер[1, 2]
[1] Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (Новосибирск)
[2] Новосибирский государственный университет (Новосибирск)

ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ФОТОНИКА В ИССЛЕДОВАНИИ СВОЙСТВ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Аннотация. В обзорном докладе детально представлены многочисленные возможности тепловидения нового поколения для изучения физико-химических свойств поверхности твердого тела, взаимодействующей с молекулами газовой среды. Приведены оригинальные результаты исследований сорбционных процессов и каталитических реакций. Показано, что тепловизионная фотоника является многообещающей технологией, которая может быть использована при решении разнообразных задач физики и химии поверхности твердого тела.

Ключевые слова: инфракрасная термография, тепловидение, адсорбция, катализ, поверхность, динамические тепловые исследования.

B. G. Vainer[1, 2]
[1] Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (Novosibirsk)
[2] Novosibirsk State University (Novosibirsk)

THERMAL IMAGING PHOTONICS IN THE SOLID SURFACE STUDIES

Abstract. The numerous capabilities of new-generation infrared thermography as applied to the studies of the physicochemical properties of a solid surface interacting with molecules of a gas medium are demonstrated in this review. The original results obtained at the investigation of sorption processes and catalytic reactions are presented. It is shown that thermal imaging photonics is a promising technology that can be used to solve a variety of physical and chemical problems in the solid surface science.

Keywords: infrared thermography, thermal imaging, adsorption, catalysis, surface, dynamic thermal investigations.

Метод инфракрасной (ИК) термографии (тепловидение) приобретает в последние десятилетия всё большую популярность. Он обладает рядом неоспоримых преимуществ перед контактной термометрией, калориметрией и другими технологиями, предназначенными, как и сам он, для изучения тепловых процессов и связанных с ними температурных изменений. Выгодной стороной тепловидения является, в первую очередь, бесконтактность измерительной процедуры. Метод характеризуется высоким пространственным, температурным (~ 0,01 °C) и временным (~ 0,01 с) разрешением и, что особенно важно, обзорностью, позволяющей регистрировать распределение температуры одновременно на всей видимой поверхности исследуемого объекта.
Семейства тепловизионных камер подразделяют на три поколения. Первое – основанное на использовании одноэлементного детектора ИК излучения. Второе – где применяются детекторы, построенные на базе многоэлементной линейки фотоприемников. И, наконец, третье – содержащие двумерную фокальную матрицу фотоэлементов. Камеры ранних поколений требовали встроенного в прибор оптико-механического сканера. В матричных тепловизорах подобные подвижные системы отсутствуют. При этом матричные системы обладают на порядки более высокими совокупными техническими характеристиками (быстродействие) + (температурная чувствительность) + (пространственное разрешение). Сегодня для решения научных проблем преимущественно применяют тепловизоры третьего поколения.

Прогресс в полупроводниковой электронике обеспечил широкую доступность тепловизоров нового поколения для их использования в разных научных приложениях, в том числе, в физике и химии поверхности твердого тела. Привлекательным моментом здесь служит то, что большинство поверхностных химических реакций и сорбционных процессов сопровождается весьма заметным тепловыделением и поглощением тепла. Подробный обзор современного состояния дел в этом направлении был недавно опубликован в журнале ChemPlusChem (Vainer B. G. *ChemPlusChem.* 2020. 85:1438-1454). Интересно отметить, что широкие перспективы для изучения каталитических реакций были предписаны тепловизионному методу ещё в конце 80-х годов

прошлого века, когда ИК техника находилась на крайне низком уровне развития по сравнению с ее нынешним состоянием.

Свойство обзорности тепловидения используют с высокой эффективностью для исследования, так называемых, библиотек образцов в режиме, когда физико-химические процессы, протекающие во множестве ячеек, заполненных разнотипными образцами, сравнивают синхронно, регистрируя тепловизионной камерой в одних и тех же условиях эксперимента.

Температурные эффекты, возникающие при взаимодействии молекул разных фаз в гетерогенной системе “газ – твердое тело”, вызваны выделением (поглощением) теплоты адсорбции и теплоты химической (в том числе, каталитической) реакции. При этом затравкой для многих поверхностных процессов является адсорбция. Нами было показано, что с помощью современного тепловизионного метода возможно регистрировать самые начальные стадии взаимодействия молекул газа с твердым телом, когда осаждена всего лишь десятая и даже сотая доля монослоя (Vainer B. G. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. 41:065102). Этот результат предопределяет широкие перспективы тепловидению нового поколения для изучения с его помощью поверхностных химических реакций еще на стадии их зарождения.

В гетерогенных системах «газ-твердое тело» с помощью матричного тепловидения мы успешно визуализировали и осуществляли количественный анализ адсорбции и десорбции паров воды на поверхности твердых материалов разной структуры и химического состава, а также изучали экзотермические проявления каталитической реакции окисления CO на золотых и других катализаторах. Неоспоримая значимость каталитической реакции окисления «тихого убийцы», угарного газа, $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ понятна, пожалуй, каждому.

Нами впервые было продемонстрировано, что благодаря тепловидению можно с высокой эффективностью использовать сильные температурные эффекты, обусловленные адсорбцией и десорбцией молекул воды на твердой поверхности, в биомедицинской сфере. Такие возможности были применены для прецизионного количественного мониторинга динамики дыхания у людей и животных с помощью оригинального метода SEIRT (sorption-enhanced infrared thermography) (Vainer B. G. *Ann. Biomed. Eng.* 2018. 46:960-971).

Помимо упомянутых выше, в обзорном докладе даны многие другие примеры применения тепловизионной фотоники к изучению поверхностных свойств твердых тел. Продемонстрированы динамические температурные портреты, связанные с технологией вакуумной короткоцикловой адсорбции. Показано распространение тепловых волн в слоях адсорбентов и катализаторов. Представлена температурная эволюция в экспериментах серии «сорбция+катализ» и «катализ после сорбции», зарегистрированная с применением тепловидения в условиях комнатной температуры образцов. Примеры служат элегантной демонстрацией того, как тепловидение позволяет по-разному «видеть» сорбционные и каталитические эффекты в физико-химических исследованиях.

Экспериментальными результатами, представленными в настоящем докладе, продемонстрировано, что после соответствующей калибровки тепловизионный метод обладает потенциалом объективно выступать в качестве претендента, способного заменить собой некоторые стандартные измерения каталитической активности катализаторов. Наглядно показано, что тепловизионные данные могут иметь важное значение для лучшего понимания реальной кинетики и физико-химических механизмов взаимодействия молекул газа с твердой поверхностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-08-00956.

ФИЗИКА ИЗЛУЧЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН, ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ

А. М. Аппалонов, Ю. С. Масленникова
Казанский федеральный университет (Казань)

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АНОМАЛИИ ПО ДАННЫМ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

Аннотация. Показана возможность прогнозирования глобальных значений полного электронного содержания ионосферы на 2 и более часов вперед. Для прогнозирования предложен подход на основе предварительного разложения глобальных карт полного электронного содержания по главным компонентам и применения методов на основе искусственных нейронных сетей разных архитектур. Показано, что после исключения доминирующих периодичностей (суточной и сезонной) карты полного электронного содержания отражают динамику экваториальной аномалии. В работе представлен сравнительный анализ указанных подходов.

Ключевые слова: нейронные сети, полное электронное содержание, временные ряды, анализ главных компонент, экваториальная аномалия.

NEURAL NETWORK FORECASTING THE DYNAMICS OF THE EQUATORIAL ANOMALY ON THE DATA OF THE TOTAL ELECTRONIC CONTENT

Abstract. The possibility of forecasting the global values of the total electron content of the ionosphere 2 or more hours ahead is shown. For forecasting, an approach to the preliminary use of methods based on artificial neural networks of different architectures is proposed. It is shown that after excluding the dominant periodicities (daily and seasonal), the maps of the total electron abundance reflect the dynamics of the equatorial anomaly. The paper presents a representative analysis of the mentioned approaches.

Keywords: neural networks, total electronic content, time series, principal components, equatorial anomaly.

Распространение радиоволн в ионосферной плазме зависит как от локальной концентрации электронов, так и от полного электронного содержания (ПЭС) электронов вдоль траектории распространения радиоволны. Главной причиной возникновения дополнительной погрешности координатных определений является фазовое опережение и групповое запаздывание сигналов навигационных спутников, величина которого пропорциональна ПЭС вдоль траектории распространения радиоволн. Повышение эффективности и качества функционирования спутниковых систем радионавигации требует наличия достоверной и оперативной информации о величине ПЭС над различными точками земного шара.

Существующие эмпирические модели ПЭС обеспечивают достаточную точность прогнозирования глобального распределения величин ПЭС в спокойных магнитных условиях. Однако спонтанные всплески магнитной возмущенности вызывают резкое снижение качества прогноза.

Таким образом, задача совершенствования методов анализа и прогнозирования глобальной динамики ПЭС для повышения эффективности и качества функционирования современных спутниковых радионавигационных систем остается актуальной.

Нелинейный характер динамики ионосферы порождает нестационарные и неоднородные данные. Применение к ним классических статистик второго порядка, которые лежат в основе традиционных авторегрессионных схем, в этой ситуации не является обоснованным. Необходимы иные подходы и более гибкие вычислительные алгоритмы, которые можно было бы адаптировать к нестационарным и нелинейным процессам.

В последнее время существенных прорывов в качестве прогнозирующих моделей добились различные архитектуры искусственных нейронных сетей (ИНС). Благодаря способности к обобщению, нейронная сеть, обученная на примерах из прошлой истории процесса, генерирует возможный ответ на предъявленные новые данные. В данной работе представлен подход, основанный на предварительном разложении глобальных карт ПЭС по главным компонентам и использовании ансамбля нейросетевых прогностических моделей.

В качестве первого шага был проведен анализ главных компонент глобальных карт ПЭС за определенный период времени. При анализе главных компонент были предварительно исключены доминирующие периодичности (суточная и сезонная), а также учтены особенности сферической системы координат, которая используется при построении карт ПЭС. По результатам разложения показано, что наибольший вклад в динамику ПЭС (более 80% всей энергии флуктуаций) вносит экваториальная аномалия. Последующее прогнозирование производилось независимо для каждой компоненты разложения. Для выбора оптимальной прогностической модели были протестированы следующие архитектуры нейронных сетей: рекуррентная (LSTM), сверточная (CNN), а также их комбинация (LSTM-CNN).

Для обучения и тестирования ансамбля прогностических моделей использовались глобальные карты ПЭС, представленные лабораторией JPL (Jet Propulsion Laboratory) за период с 2004 по 2011 г.

Использование методов глубокого обучения позволяет снизить относительная ошибка прогноза глобальных значений ПЭС на 2 часа вперед до 7% (наилучшая архитектура при этом – комбинация слоев CNN-LSTM) по сравнению с ансамблем линейных авторегрессионных моделей, показавших суммарную относительную ошибку более 15%. Полученные результаты показывают перспективность применения указанного подхода для прогнозирования глобальных карт ПЭС и на более длительные интервалы времени.

А. С. Базарова, Е. Б. Атутов, А. В. Базаров, Ю. Б. Башкуев
Институт физического материаловедения СО РАН (Улан-Удэ)

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ИНДЕКСА РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН НА ВИТИМСКОМ ПЛОСКОГОРЬЕ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Аннотация. Нарастающие темпы эксплуатации радиоэлектронных систем GPS и GSM в различных физико-климатических регионах Земли предопределяют актуальность проблемы изучения рефракционных свойств тропосферы. Для использования радиометеорологических параметров при проектировании и эксплуатации радиоэлектронных систем перед специалистами стоит необходимость изучить закономерности распространения УКВ и СВЧ радиоволн с учетом влияниях всех слоев атмосферы как среды с переменным показателем преломления. В работе приведен расчет индекса преломления N на основе метеоданных атмосферно-почвенного измерительного комплекса. Показано, что в летнее время суточная амплитуда вариаций N значительно больше, чем зимой.

***Ключевые слова*:** индекс рефракции, атмосферно-почвенный измерительный комплекс (АПИК), Еравна.

A. S. Bazarova, **E. B. Atutov, A. V. Bazarov, Yu. B. Bashkuev**
Institute of Physical Materials Science SB RAS (Ulan-Ude)

DAILY VARIATIONS OF RADIOWAVES REFRACTION INDEX ON VITIM PLATEAU OF WESTERN TRANSBAIKALIA

Abstract. The growing rates of operation of GPS and GSM electronic systems in various physical and climatic regions of the Earth determine the urgency of the problem of studying the refractive properties of the troposphere. To use radio meteorology parameters in the design and operation of electronic systems, specialists need to study the laws of propagation of VHF and microwave radio waves taking into account the effects of all layers of the atmosphere as a medium with a variable refractive index. This article presents the calculation of the refractive index N based on meteorological data of the atmospheric soil measuring complex. It is shown that in summer, the daily amplitude of N variations is much greater than in winter.

***Keywords*:** refractive index, atmospheric soil measuring complex (ASMC), Eravna.

Среди метеорологических параметров на рефракцию УКВ радиоволн в атмосфере в основном влияют температура и влажность воздуха, а также атмосферное давление. В Еравнинской котловине на мерзлотно-экологическом стационаре ИОЭБ СО РАН мониторинг метеопараметров проводится атмосферно-почвенным измерительным комплексом АПИК-007. АПИК выполняет автоматические измерения вертикального профиля температуры и влажности в системе “почва–атмосфера” с глубины 3.2 м до высоты 10 м. Одновременно измеряются климатические параметры в точке измерений: атмосферное давление, скорость и направление ветра, уровень солнечной радиации, количество жидких осадков и высота снега. Данные считываются дистанционно через GSM-модем по сотовому каналу связи. Автономная работа системы обеспечивается использованием солнечной батареи и аккумулятора. Измерения проводятся восемь раз в сутки каждые три часа с условным началом в 7:00 утра по местному времени, то есть в 7:00, 10:00, 13:00, 16:00, 19:00, 22:00, 01:00, 04:00 и так далее. Для определения вариаций индекса рефракции N нам необходимы ряды данных по температуре, влажности воздуха и атмосферному давлению.

Сдвоенные датчики температуры и влажности воздуха размещены на 10-метровой мачте на высотах 1, 2, 4, 6 и 10 м. В данной работе мы использовали данные на высотах 1 и 10 м. Датчик атмосферного давления находится в кейсе электроники на поверхности Земли. Для использования данных АПИК необходимо перевести миллиметры ртутного столба в миллибары, градусы Цельсия в Кельвины, проценты влажности воздуха в миллибары упругости водяного пара. Вычисления N проведены согласно Рекомендациям МСЭ-R P.453-12 «Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции». Проведено сравнение поведения индекса рефракции

N в самый холодный день 22 января и в самый знойный день 9 июля 2016 года на высоте 1 и 10 метров.

Результаты измерений показывают, что в летние дни амплитуда вариаций индекса рефракции N в течение суток больше, чем в зимние время. Зимой в дневные час (11:00–16:00) происходит инверсия *N*: значение на 1 м становится меньше, чем на 10 м. 9 июня такого изменения не происходит, хотя это, возможно, из-за повышенной турбулентности в рассмотренный день. Амплитуда зимних вариаций составляет 22 *N*-единицы, а летних – 60 *N*-единиц.

Далее проанализирована степень влияния отдельных метеопараметров на вариации индекса рефракции *N*. Анализ показал, что в Еравнинской котловине на вариации *N* большее влияние оказывают температура и влажность воздуха, по сравнению с атмосферным давлением, которое держится практически на одном уровне. Бóльшая амплитуда суточных колебаний *N* в летнее время, объясняется, вероятно, более резкими флуктуациями влажности воздуха.

По результатам метеорологических измерений АПИК и расчетам индекса рефракции *N* можно сделать следующие выводы.

1. Индекс рефракции *N* в приземном слое атмосферы имеет ярко выраженные суточные колебания.

2. Суточные вариации индекса рефракции *N* на юге Витимского плоскогорья в большей степени определяются вариациями температуры и влажности воздуха, чем атмосферным давлением.

3. В дневные часы наблюдается инверсия *N* с высотой в отсутствие атмосферной турбулентности.

Работа проведена в рамках бюджетного проекта 0336-2020-0006 «Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

Б. Г. Барабашов[1], М. М. Анишин[2], О. А. Лаврентьев[1], Л. П. Радио[1]
[1] Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону)
[2] Омский научно-исследовательский институт приборостроения (Омск)

ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ МПЧ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ IRI-2016

Аннотация. Приводятся результаты оценки погрешности оперативного прогнозирования на базе модели IRI максимальной применимой частоты (МПЧ) ВЧ канала. Рассмотрены варианты прогноза как без коррекции модели, так и с коррекцией по данным вертикального зондирования (ВЗ).

Ключевые слова: оперативный прогноз, наклонное зондирование (НЗ), КВ-радиотрасса, максимальная наблюдаемая частота (МНЧ), максимальная применимая частота (МПЧ).

B. G. Barabashov[1], M. M.Anishin[2], O. A. Lavrentyev[1], L. P. Radio[1]
[1] Southern Federal University (Rostov-on-Don)
[2] Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)

REAL-TIME FORECAST OF MAXIMUM USABLE FREQUENCY BASED ON IRI-2016 MODEL OF IONOSPHERE

Abstract. The paper reports the error estimates for real-time forecasting of a maximum usable frequency (MUF) of HF radio channel. The forecasts are made based on IRI-2016 model of ionosphere that can be adjusted using the data from vertical sounding (VS). The results show that the errors are smaller when IRI-2016 is corrected by data obtained by VS in one point along a path.

Keywords: real-time forecast, oblique sounding, HF radio path, maximum observable frequency (MOF), maximum usable frequency (MUF).

Эффективность планирования ВЧ радиосвязи определяется прежде всего точностью используемого ионосферного прогноза. Для долгосрочного прогнозирования состояния ВЧ канала, как правило, используются глобальные модели ионосферы. Среди них большое распространение получила справочная модель ионосферы IRI (International Reference Ionosphere), рекомендованная для международного использования Комитетом по космическим исследованиям (COSPAR) и Международным союзом URSI. В модели предусмотрена возможность внешней корректировки её параметров. В частности, такая коррекция может осуществляться по результатам текущей диагностики.

Для повышения точности Международный союз электросвязи ITU рекомендует повсеместный переход от долгосрочного прогноза к оперативному с периодом упреждения (с промежутком времени, на который разрабатывается прогноз) 1–2 часа.

В докладе приводятся результаты оценки погрешности оперативного прогнозирования на базе модели IRI ключевого параметра ВЧ канала ─ максимальной применимой частоты (МПЧ). Рассмотрены варианты прогноза как без коррекции модели, так и с коррекцией по данным вертикального зондирования (ВЗ) в одной точке трассы.

Способ оценки: прогнозируемые оперативные значения МПЧ сопоставлялись с измеренными максимальными наблюдаемыми частотами (МНЧ), полученными при наклонном зондировании (НЗ) на среднеширотной трассе протяженностью 1740 км. Характеристики трассы наклонного зондирования следующие. Координаты передатчика: 53,5^{o}N; 2,5^{o}W, приемника: 41,8^{o}N; 12,5^{o}E; азимут трассы 133^{o}; мощность излучения 100 Вт. Измерения проводились круглосуточно с интервалом между сеансами зондирования 5 минут. Значения МНЧ с ионограмм снимались вручную. Обработано 20 суток сентября и октября 2005 года. Общее число обработанных ионограмм составило 6000, что позволяет говорить о статистической значимости полученных результатов.

Последовательность обработки результатов НЗ была следующей. Суточные сеансы были разбиты на интервалы по 4 часа каждый: 00:00–04:00, 06:00–10:00, 12:00–16:00, 19:00–23:00. Далее для каждого временного интервала вычислялось скользящее среднее значений МНЧ с окном 2 часа и шагом следования 5 минут. Считалось, что таким образом исключались быстрые и мед-

ленные флуктуации, а полученные зависимости от времени усредненных МНЧ принимались базовыми для дальнейшей обработки. Следует также отметить, что под флуктуациями понимались отклонения МНЧ от соответствующих скользящих средних значений вне зависимости от каких-либо геомагнитных или ионосферных критериев. Амплитуда вариаций оценивалась среднеквадратичным отклонением мгновенных МНЧ от значений, усредненных со скользящим средним за 2 часа.

Прогноз МПЧ выполнялся с помощью авторской программы «Трасса». Ионосфера вдоль трассы задавалась моделью IRI-2016.

В качестве текущей диагностики использовались отдельно данные трех станций вертикального зондирования. Две из них находились вблизи соответственно пунктов передачи и приема. Третья - располагалась на удалении ~ 400 км от середины трассы НЗ. Для коррекции использовались измеренные значения критической частоты слоя F2.

Основные результаты:

1. На протяжении всего времени зондирования практически всегда наблюдались быстрые, с квазипериодом до 30 минут, и медленные, с квазипериодом до 3 часов, вариации МНЧ. Амплитуда быстрых флуктуаций МНЧ ~ в 3 раза меньше амплитуд медленных.

2. Амплитуды вариаций МНЧ практически не зависели от времени суток. Величина суммарных (быстрых и медленных) среднеквадратичных отклонений находилась в пределах 3,0–4,9 при максимуме 4,9% в часы восхода.

3. Усредненные за 20 суток абсолютные отклонения МПЧ, рассчитанные с использованием модели IRI-2016, от МНЧ составили 11–16%. Максимальные значения погрешности наблюдались в ночные часы и достигали 30%. Минимальные – в полдень (~ 13%). Отсюда сделан очевидный вывод, что для снижения погрешности оперативного прогноза необходима коррекция базовой модели IRI по результатам текущей диагностики.

4. Применение коррекции базовой модели по данным НЗ позволяло уменьшить среднюю абсолютную погрешность оперативного прогноза МПЧ ~ 2–3 раза. В дневные часы погрешность прогноза после коррекции параметров модели была в пределах 5–7%.

5. Положение зонда ВЗ, по которому осуществлялась коррекция, не являлось определяющим.

Ю. Б. Башкуев, Л. Х. Ангархаева, Д. Г. Буянова
Институт физического материаловедения СО РАН (Улан-Удэ)

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ИМПЕДАНС СТРУКТУР «ТОНКИЙ ЛЕД – МОРЕ» И «ТОЛСТЫЙ ЛЕД – МОРЕ» В СДВ-УКВ ДИАПАЗОНАХ РАДИОВОЛН

Аннотация. Для расчетов распространения электромагнитного поля над структурой «лед – море» определены области применимости импедансных граничных условий в диапазоне 0,01–420 МГц в зависимости от толщины льда и угла падения вертикально-поляризованной волны. Рассмотрены структуры «тонкий лед– море» и «толстый лед– море» (шесть моделей ледяного покрова). Толщина льда изменялась от 0,03 до 9 м. Показано, что для структуры «лед – море» учет зависимости поверхностного импеданса от угла падения важен для систем загоризонтной радиолокации в КВ диапазоне радиоволн. Результаты необходимы для расчетов функции ослабления и уровня поля в СДВ-ДВ-СВ-КВ-УКВ диапазонах радиоволн.

Ключевые слова: граничные условия, двухслойные структуры «лед – море», функция ослабления.

Yu. B. Bashkuev, L. Kh. Angarkhaeva, D. G. Buyanova
Institute of Physical Materials Science SB RAS (Ulan-Ude)

THE SURFACE IMPEDANCE OF THE "THIN ICE – SEA" AND "THICK ICE – SEA" STRUCTURES IN THE VLF-VHF RADIO WAVE BANDS

Abstract. To calculate the propagation of the electromagnetic field over the structure "ice – sea", the areas of applicability of the impedance boundary conditions are determined depending on the thickness of the ice and the angle of incidence of the vertically polarized wave in the range 0,01–420 MHz. The structures "thin ice – sea" and "thick ice – sea" (six models of ice cover) are considered. The ice thickness varied from 0,03 to 9 m. It is shown that, for the “ice – sea” structure, taking into account the dependence of the surface impedance on the angle of incidence is important for over-the-horizon radar systems in the HF radio wave range. The results are needed to calculate the attenuation function and the field level in the VLF-LF-MF-HF-VHF radio wave bands.

Keywords: boundary conditions, two-layer structures «ice – sea», attenuation function.

Цель доклада – определить особенности частотной зависимости поверхностного импеданса δ для структуры «лед – море» в диапазонах СДВ-ДВ-СВ-КВ и УКВ (0,01– 420 МГц) для толщины льда от 0,03 м до 9 м и различных моделей ледяной структуры (учет солености льда). Кроме анализа зависимости импеданса от толщины льда для модели «тонкий лед–море» рассмотрена также его зависимость от угла падения вертикально-поляризованной волны. Приведенный поверхностный импеданс δ подстилающей среды (далее – импеданс) определяется как отношение тангенциальных составляющих электрического E_τ и магнитного H_τ полей на границе раздела «воздух – подстилающая среда». Расчеты частотной зависимости импеданса двухслойной среды «лед – море» проведены в широком диапазоне радиоволн (от километровых до дециметровых). При создании карт импеданса δ для Северного Ледовитого океана установлены большие области круглогодичного существования двухслойной среды «лед – море». Расчеты импеданса δ для морского льда в широком диапазоне радиоволн показали ряд интересных электродинамических свойств таких импедансных структур. На Северном Морском пути наиболее сложные ледовые условия встречаются в его восточной части. Толщина льда 3–6 м, иногда доходит до 8–9 м. В наших публикациях по гранту РНФ № 14-19-01079 рассмотрены условия распространения радиоволн над структурой «лед – море» в широком диапазоне частот при толщине льда до 2,7 м. Анализ расчетных данных показал, что необходимо провести численное моделирование импеданса и условий распространения ДВ-СВ-КВ радиоволн для модели «толстый лед – море». При

этом главное внимание следует уделить диапазону частот от 300 кГц до 2 МГц. Задача для «толстого» льда возникла также при создании карт поверхностного импеданса для центральной части Северного Ледовитого океана.

Расчеты частотных зависимостей импеданса для структуры «тонкий лед – море» проведены для двух моделей: а) толщина льда 0,15 м; б) толщина льда 0,8 м. В качестве модели «тонкий лед – море» принята двухслойная среда с параметрами для льда $\sigma_л = 10^{-5}$ См/м, $\varepsilon_л = 5$, для морской воды $\varepsilon_в = 87$, $\sigma_в = 3{,}3$ См/м. Анализ зависимости импеданса δ от угла падения волны θ (от 90° до 0°) в диапазоне 1 – 420 МГц показал, что для тонкого льда она достаточно слабая и определяется величиной $|\varepsilon_{1к}|$. При $|\varepsilon_{1к}| \approx 1{,}2 \div 9$ зависимость от угла падения существует. При $|\varepsilon_{1к}| >> 1$ зависимость от угла падения слабая. Для льда толщиной 0,15 м фаза импеданса попадает в сильно-индуктивную область (φ_δ° от –62° до –85°). Согласно предложенного нами частотного критерия появления поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ), при таких фазах импеданса возможно появление ПЭВ до частоты 100 МГц. Учет зависимости импеданса от угла падения важен для систем загоризонтной радиолокации в КВ диапазоне радиоволн. Следовательно, при расчетах распространения импульсных КВ радиосигналов в импедансном канале «Земля – ионосфера» необходимо учитывать и дисперсионные свойства нижней стенки волновода – ледяной поверхности.

Расчеты импеданса структуры «толстый лед – море» проведены для 6 различных моделей морского льда, которые учитывают слой снега и изменение электропроводимости льда. В качестве «базовой» модели принята среда «толстый лед – море» с типичными параметрами для льда $\sigma_л = 10^{-4}$ См/м, $\varepsilon_л = 4$. Для морской воды $\varepsilon_в = 87$, $\sigma_в = 3$ См/м. Для модели «снег – лед – море» принята толщина снега 0,3 м, $\sigma_с = 10^{-5}$ См/м; $\varepsilon_с = 1{,}5$. Параметры льда и его толщину не меняли. Для модели «составной лед – море»: $\sigma_{л1} = 10^{-4}$ См/м, $h_{л1} = 0{,}5$ м; для среднего слоя $\sigma_{л2} = 10^{-3}$ См/м, $h_{л2} = 1{,}0$ м; для нижнего слоя $\sigma_{л3} = 10^{-2}$ См/м, $h_{л3} = 0{,}5$ м. Для модели «соленый лед – море» принимаем два значения электропроводимости слоя льда: $\sigma_л = 10^{-3}$ См/м и $\sigma_л = 10^{-2}$ См/м при его толщине $h_л = 2$ м. Для модели «градиентный лед» рассмотрены две зависимости изменения электропроводимости льда: линейная и экспоненциальная. Электропроводимость на верхней границе равна $\sigma_л = 10^{-4}$ См/м, на нижней границе равна электропроводимости моря $\sigma_в = 3$ См/м. Диэлектрическую проницаемость льда для всех моделей приняли равной $\varepsilon_л = 4$. Установлено, что для льда толщиной от 2 м до 9 м фаза импеданса попадает в сильно-индуктивную область (φ_δ° от –67° до –86°) в полосе частот от 0,01 МГц и до 2–8 МГц. Чем толще лед, тем ниже верхняя граница попадания фазы импеданса в сильно-индуктивную область. Выделено два частотных критерия возможного появления ПЭВ: 1) фаза импеданса попадает в сильно-индуктивную область; 2) модуль импеданса удовлетворяет применимости импедансных граничных условий $|\delta| < 0{,}316$. Появление ПЭВ возможно до частоты 8 МГц. Установлено, что практически для всех рассмотренных моделей фаза импеданса φ_δ° попадает в сильно-индуктивную область, а модули импедансов близки между собой. Значения модуля импеданса для структуры «толстый лед–море» для рассмотренных моделей среды на частотах от 300 кГц и до 8–9 МГц близки между собой. Они существенно больше (до 10–20 раз и более) модуля импеданса для чистого моря. Фаза импеданса φ_δ° на рассмотренных частотах попадает в сильно-индуктивную область, то есть по электрическим параметрам трасса распространения соответствует слоистой среде «диэлектрик на проводнике». При значениях модуля импеданса, удовлетворяющего импедансным граничным условиям и сильно-индуктивных фазах импеданса следует ожидать появления ПЭВ. Уровень ПЭВ будет зависеть от толщины льда, а поле возбуждаться в полосе частот от 0,3 до 9 МГц. Учет зависимости импеданса от толщины льда важен для систем радионавигации, связи и радиолокации в ДВ-СВ-КВ диапазонах радиоволн. Для расчетов электромагнитного поля над структурой «лед – море» определены области применимости импедансных граничных условий в зависимости от толщины льда и угла падения вертикально-поляризованной волны.

Доклад подготовлен по госбюджетному проекту 0336-2019-0006 «Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах» и частично по гранту РФФИ № 18-47-030006-р_а.

И. А. Боровик, О. И. Кудрин, Р. А. Бекишев, Г. Н. Селиванова
АО «Центральное конструкторское бюро автоматики» (Омск)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ АНТЕНН ДИАПАЗОНОВ 435 И 2400 МГЦ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ БОРТОВЫХ РАДИОСРЕДСТВ НАНОСПУТНИКОВ ФОРМАТА CUBESAT

Аннотация. В данной работе выполнены теоретические исследования малогабаритных антенн для частотных диапазонов 435 и 2400 МГц. Для частоты 435 МГц проработаны варианты одного и двух вибраторов, размещённых на корпусе наноспутника формата CubeSat, при этом рассмотрены различные положения вибратора на самом корпусе наноспутника, формируемая диаграмма направленности и обоснован выбор конструкции. Проведён краткий обзор и обоснование выбора малогабаритной антенны для диапазона 2400 МГц. Выполнены измерения выбранных малогабаритных антенн для диапазонов 435 и 2400 МГц на макетном образце.

Ключевые слова: CubeSat, электродинамическая модель, антенно-фидерные устройства, пико- и наноспутники, пространственно-поляризационные свойства антенн, ленточная антенна, диаграмма направленности, патч-антенна, спиральная антенна.

I. A. Borovik, O. I. Kudrin, R. A. Bekishev, G. N. Selivanova
JSC "Central Design Bureau of Automatics" (Omsk)

THEORETICAL AND PRACTICAL STUDIES OF SMALL-SIZED ANTENNAS OF 435 AND 2400 MHZ BANDS FOR USE IN ON-BOARD RADIO DEVICES OF NANOSATELLITE FORMAT CUBESAT

Abstract. In this work, theoretical studies of small-sized antennas for the frequency ranges of 435 and 2400 MHz are carried out. For a frequency of 435 MHz, variants of one and two vibrators located on the body of a CubeSat nanosatellite have been worked out, while various positions of the vibrator on the nanosatellite body itself, the directional pattern formed, and the rationale for choosing a design are considered. A brief review and justification of the choice of a small-sized antenna for the 2400 MHz range is carried out. Measurements of the selected small-sized antennas for the 435 and 2400 MHz bands were performed on a prototype.

Keywords: CubeSat, electrodynamic model, antenna-feeder devices, pico and nanosatellites, spatial polarization properties of antennas, ribbon antenna, radiation pattern, patch antenna, helical antenna.

Основной величиной, необходимой для анализа системы в целом, будет являться коэффициент передачи мощности от разъёма антенны на спутнике (от передатчика либо приёмника) до антенного разъёма на наземной станции. При анализе рассматриваются соотношения только для одночастотного монохроматического сигнала. Определено, что мощность сигнала на входе приёмника будет составлять от –120 до –135 дБВт, что будет соответствовать напряжению в единицы мкВ (при нагрузке на 50-омный тракт).

Составлена электродинамическая модель УКВ вибратора для определения лучшего положения вибратора на корпусе НС, его вид и состав. По результатам математического моделирования определено следующее:

1. Все рассмотренные варианты имеют практически одинаковые характеристики с точки зрения обеспечения приёма/передачи с неориентированного спутника.

Для выбора мощности передатчиков спутника и наземной станции и коэффициента усиления антенны наземной станции можно произвести оценку расчётного коэффициента усиления антенны спутника.

Для обеспечения 90% вероятности приёма/передачи при всех возможных положениях спутника в пространстве коэффициент усиления антенны спутника можно считать равным 0,1 (минус 10 дБі). Для обеспечения 82% вероятности – 0,2 (минус 7 дБі). Для обеспечения 78% вероятности – 0,25 (минус 6 дБі). Для обеспечения 57% вероятности – 0,5 (минус 3 дБі)

2. С точки зрения диаграмм направленности и вероятностей приёма на неориентированном спутнике антенные системы с использованием двух излучателей практически ничем не отличаются от антенн с одним излучателем. Для построения наиболее простой антенной системы достаточно одного излучателя.

3. Место расположения излучателя на корпусе также мало влияет на направленность. Антенну этого диапазона можно размещать на корпусе, исходя прежде всего из удобства компоновки спутника в целом.

4. Согласование антенны с 50-омным трактом питания ощутимо зависит от места размещения и наклона излучателя относительно корпуса. Большинство проектов при первоначальном моделировании на упрощённой модели показывают, что, скорее всего, удастся обеспечить прямое подключение излучателя к кабелю питания с обеспечением значения КСВН не более 1,25 в рабочем диапазоне частот. Окончательный вывод может быть сделан только при моделировании точной модели спутника (или создании и измерении макета спутника), включающей в себя все наружные выступающие детали на корпусе, а также конструкцию и точное положение излучателя на корпусе.

Выбор антенного элемента для радиоканала 2,4 ГГц производился на основе анализа технических характеристик малогабаритных антенн, представленных на рынке. Наиболее подходящей выбрана металлокерамическая спиральная SMD-антенна фирмы MOLEX Part Number: 47948-0001, имеющая наименьшие габаритно-массовые характеристики (3х3х4 мм) при хороших электрических параметрах. Излучаемая мощность – 2 Вт. Диаграмма направленности антенны зависит от площади платы для установки антенны и места её установки на плате и корпусе аппарата. Площадь платы для установки антенны и место расположения платы под установку антенны 2,4 ГГц уточняется по результатам испытаний изделия 02АФУ.

По результатам теоретических исследований и математического моделирования был сформирован предварительный облик антенн для УКВ и УВЧ диапазонов НС, подготовлен макетный образец с проведением экспериментальных замеров на автоматизированном измерительно-вычислительном комплексе (АИВК) в безэховой камере. Полученный КСВН для частоты 435 МГц составляет 1,91, для частоты 2,4 ГГц – 1,26. Имеются небольшие расхождения ДН от расчётных (измерения проводились в вертикальной плоскости антенн, при вертикальной и горизонтальной поляризации облучающего поля), вызванные отклонениями в изготовленной плате. На данном этапе подтверждены характеристики расчётного варианта антенн. Необходимо изготовить плату в соответствии с выданными требованиями.

Вывод

Проведённые теоретические исследования, а также математическое моделирование позволили определить особенности конфигурации АФУ, применяемых на НС, места их расположения и влияния корпуса аппарата на формируемую ДН. Адекватность математической модели подтверждается экспериментальными замерами, проведёнными на макетном полноразмерном образце.

Работа выполнена в рамках государственного контракта Федерального космического агентства с ПАО «РКК «Энергия» от 24.06.2013 г. №351-8641/13/205 и решения ГК «Роскосмос» от 08.02.2018 г. №АН-447-р.

Г. Г. Вертоградов[1], В. Г. Вертоградов[2]
[1] Южный федеральный университ (Ростов-на-Дону)
[2]ОАО «ВНИИ» Градиент» (Ростов-на-Дону)

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНО НАБЛЮДАЕМОЙ ЧАСТОТЫ В УСЛОВИЯХ МИНИМАЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований вариаций максимально наблюдаемой частоты в 2016–2019 гг. на среднеширотной трассе Кипр – Ростов-на-Дону. Оценена точность прогнозирования МПЧ при задании состояния ионосферы с помощью модели IRI-2016. Показано, что в спокойных геофизических условиях типичные значения среднеквадратичных отклонений МПЧ от МНЧ достигают 2,6 МГц.

Ключевые слова: максимально наблюдаемая частота, максимально применимая частота, наклонное ЛЧМ-зондирование, ионосферное распространение.

G. G. Vertogradov[1], V. G. Vertogradov[2]
[1]Southern Federal University (Rostov-on-Don)
[2]OAO "VNII "Gradient" (Rostov-on-Don)

ESTIMATION OF THE ERROR IN PREDICTING THE MAXIMUM OBSERVED FREQUENCY IN CONDITIONS OF MINIMAL SOLAR ACTIVITY

Abstract. The results of experimental studies of variations of the maximum observable frequency (MOF) in 2016–2019 for middle-latitude path Cyprus-Rostov. The comparison of predicted median daily dependences of MUF with experimentally MOF was carried. The accuracy of the MUF forecast for the ionosphere is estimated using the International Reference Ionosphere IRI-2016 model. It is shown that in undisturbed geophysical conditions typical values of mean square deviations of MOF from MUF reach 2,6 MHz.

Keywords: maximum usable frequency, maximum observable frequency, International Reference Ionosphere.

В работе представлены результаты регулярных наблюдений условий ионосферного распространения КВ на среднеширотной радиолинии Кипр–Ростов-на-Дону в течение четырех лет 2016–2019 гг. Протяжённость трассы 1433 км, азимут из Ростова-на-Дону 201.5°. Измерения проводились круглосуточно с интервалом съема одной ионограммы каждые 5 минут, скорость перестройки частоты 100 кГц/с. Передатчик принадлежит системе загоризонтной радиолокации. В измерениях использовался многоканальный ЛЧМ-зонд/радиопеленгатор, работающий с 16-элементной антенной решеткой, размещенной на площадке 100 х 100м.

Измерение углов прихода отдельных лучей облегчает окончательную очистку результатов зондирования от шумов естественного происхождения и станционных помех, а также селекцию регулярных отражений от F-слоя ионосферы и фильтрацию отражений от спорадического Es-слоя.

За каждый месяц наблюдений было получено не менее 60000 многомерных ионограмм, очищенных от помех. По каждой ионограмме оценивалась максимально наблюдаемая частота (МНЧ) для регулярных отражений от ионосферы. Среднеквадратичные значения отклонения МНЧ от их среднемесячных математических ожиданий возрастают в летние месяцы. В спокойных геофизических условиях оценены типичные значения СКО, которые достигают ~2,0 МГц зимой и ~3,5–4,5 МГц летом.

Практически всегда МНЧ испытывают короткопериодические вариации с квазипериодами от 30 минут до 2 часов. Амплитуда флуктуаций может достигать в спокойных ионосферных условиях в полуденные часы суток 2 МГц; в восходно-заходные часы суток при прохождении терминатора флуктуации могут увеличиваться до 5–6 МГц. Указанные вариации связаны с распространением перемещающихся ионосферных возмущений на высотах F области ионосферы.

Для интерпретации полученных экспериментальных результатов и подтверждения

высказанных предположений выполнено имитационное моделирование на основе траекторных расчетов с использованием имитационной модели широкополосного ионосферного радиоканала. В основе моделирования лежит решение расширенной системы характеристических уравнений в ионосфере, заданной Международной справочной моделью IRI-2016.

Особый интерес представляет оценка эффективности использования модели IRI-2016 для прогнозирования наиболее значимой характеристики КВ канала – максимально наблюдаемой частоты (МПЧ). Вопрос о применимости модели IRI-2016 для достоверного прогнозирования МПЧ решался на основе сравнения рассчитанных среднемесячных значений МПЧ с аналогичными экспериментальными суточными зависимостями МНЧ.

Расчеты МПЧ отдельных мод распространения показали, что модель IRI-2016 в условиях минимальной солнечной активности, как правило, дает заниженные результаты на величину от 1 до 1,4 МГц. Среднеквадратичные отклонения расчетных МПЧ и измеренных МНЧ в случае использования прогнозных уровней солнечной активности достигает 2,6 МГц, а средняя относительная погрешность достигает 13%. При коррекции индекса солнечной активности (эффективное число солнечных пятен) так, чтобы он никогда не становился меньше числа солнечных пятен, среднеквадратичные отклонения снижаются до 1,8 МГц, а средняя относительная погрешность составила 9%.

Таким образом, при прогнозировании МПЧ с использованием модели IRI-2016 в минимуме солнечной активности целесообразно корректировать индекс солнечной активности и выбирать его не меньше, чем число солнечных пятен. После операции коррекции модели IRI-2016 по индексу солнечной активности, прогнозируемые значения МПЧ на среднеширотной трассе средней протяженности, как правило, укладываются в доверительный интервал, ограниченный снизу и сверху относительно математического ожидания значением среднемесячного среднеквадратичного отклонения вариаций МНЧ.

А. Г. Виноградов[1, 2], А. Н. Теохаров[1]
[1] Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца (Москва)
[2] Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН (Москва)

ВЛИЯНИЕ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ НА КОГЕРЕНТНОСТЬ ОТРАЖЕННОГО ОТ ОБЪЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ СИГНАЛА В РАЗНЕСЕННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РСА

Аннотация. Проанализировано влияние неоднородности земной атмосферы на когерентность сигналов в бистатической космической системе РСА, отслеживающей земную поверхность. Получены оценки остаточной фазы, нарушающей когерентность сигналов. Приведены численные оценки потенциально возможного времени синтезирования для радиосигналов X, L, UHF и VHF диапазонов в случае сильных и слабых возмущений атмосферы.
Ключевые слова: радиолокационный сигнал, когерентность, РСА, земная поверхность.

A. G. Vinogradov[1, 2], A. N. Teokharov[1]
[1] Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute (Moscow)
[2] Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS (Moscow)

EFFECT OF EARTH ATMOSPHERE ON THE COHERENCE OF THE SIGNAL REFLECTED FROM OBJECTS ON EARTH'S SURFACE IN THE SPACED-APART SAR SYSTEM

Abstract. Effect of Earth atmosphere inhomogeneity on signal coherence in a bistatic space SAR system observing Earth's surface is analyzed. The residual phase breaking signal coherence is estimated. The feasible synthesis time is estimated for signals of X, L, UHF, and VHF bands for both, strongly and weakly disturbed atmosphere.
Keywords: radar signal, coherence, SAR, Earth's surface.

В разнесенной системе РСА передатчик излучает в сторону сложного объекта на земной поверхности последовательность радиосигналов на определенной несущей частоте (диапазона X, L, UHF или VHF) и определенной шириной полосы. Приемник же согласованно принимает отраженный сигнал и обрабатывает его по выбранному алгоритму обработки РСА с фокусировкой. Считаем, что объект расположен в дальней зоне передатчика и приемника. При этом как передатчик, так и приемник могут двигаться относительно облучаемого объекта. Тогда потенциальная разрешающая способность элементов объекта по дальности определяется шириной полосы отдельного радиосигнала (импульса), тогда как разрешение по кросс-дальности – когерентным накоплением сигнала в течение времени синтезирования.

Основные искажения, которые вносит земная атмосфера в радиолокационные сигналы, сводятся к следующим эффектам: 1) дополнительный набег фазы, вызванный отличием диэлектрической проницаемости атмосферы от единицы и приводящий к нарушению когерентности сигналов; 2) задержка сигнала, дающая ошибку при измерении дальности до объекта; 3) искривление лучевой траектории сигнала (рефракция) в атмосфере, ответственная за искажение угловых координат; 4) дисперсионные искажения структуры (формы) широкополосного сигнала, вызванные частотной зависимостью диэлектрической проницаемости ионосферы.

Главную роль в этих эффектах играют дополнительный набег фазы и дисперсионные искажения. Влияние дисперсионных искажений можно существенно уменьшить с помощью «антидисперсионного» согласованного фильтра. Здесь мы рассматриваем влияние дополнительного набега фазы.

В качестве модели регулярной компоненты диэлектрической проницаемости атмосферы мы используем экспоненциальную модель тропосферы с приземным значением поправки $0{,}5–0{,}8\cdot10^{-3}$ и высотным масштабом спадания от 7 до 9 км, а также случаи слабо и сильно возмущенной ионосферы с полным электронным содержанием от 1 до 20.

Для описания флуктуационной компоненты мы используем анизомерную степенную мо-

дель подобия с интервалом пространственных масштабов от миллиметров до сотен метров, удовлетворительно описывающей как колмогоровскую локально однородную изотропную турбулентность, так и развитую (устойчивую) стратифицированную приземную турбулентность (вызванную внутренними гравитационными волнами) и промежуточные состояния. Считаем также, что приемник и передатчик расположены на высотах от 0,6 до 40 тыс. км от поверхности Земли с углами места от 30° с линейными размерами апертур антенн ~ 12 м. При обработке принятых сигналов члены разложения фазы в ряд Тейлора по времени вплоть до квадратичного компенсируются алгоритмом синтезирования с фокусировкой, поэтому мы оцениваем некомпенсируемый остаток фазы сигнала.

Показано, что искажение фазы регулярной компонентой неоднородностей атмосферы связано с изменением ракурсов облучения и приема объекта в процессе синтезирования. Оценки показывают, что для слабо возмущенной ионосферы в случае геосинхронной орбиты РЛС время синтезирования практически неограниченно (от 40 мин. до 2 час.), тогда как в случае низколетящих аппаратов оно составляет от 0,5 до 2 мин. В случае сильно возмущенной ионосферы допустимое время синтезирования уменьшается почти в 3 раза. При этом в обоих случаях основной вклад в некомпенсируемую поправку вносит ионосфера.

Для оценки искажение фазы флуктуационной компонентой используем статистические методы. Показано, что среднеквадратичная некомпенсируемая поправка к фазе может быть представлена с помощью ограниченного числа (трех) полиномов Лежандра в виде интеграла от структурной функции фазы сигнала в турбулентной атмосфере (временной или пространственной). Оценки же времени когерентности сигнала при синтезировании проводим по условию ограничения этой поправки на основе анизомерной степенной модели подобия для изотропной колмогоровской и для стратифицированной приземной моделей спектра флуктуаций.

Фазовые флуктуации, вызванные тропосферой, существенны только в X-диапазоне в условиях сильной турбулентности (с дисперсией диэлектрической проницаемости $\sim 7 \cdot 10^{-12}$) как для колмогоровского спектра с внешним масштабом турбулентности ~ 100 м, так и для стратифицированного спектра с характерным масштабом турбулентности ~ 30 м. При этом с уменьшением несущей частоты сигнала влияние турбулентностей тропосферы падает.

Оценка влияния ионосферных флуктуаций проведена для слабой и сильной турбулентности со стандартами флуктуаций электронной концентрации $\sim 2 \cdot 10^3$ см$^{-3}$ и $\sim 5 \cdot 10^4$ см$^{-3}$ соответственно. На характерной трассе в ионосфере ~ 400 км с внешним масштабом турбулентности ~ 30 км оказывается, что ионосферные флуктуации фазы существенны во всех частотных диапазонах и ограничивают допустимое время синтезирования. При этом в отличие от тропосферы с уменьшением несущей частоты сигнала влияние турбулентностей ионосферы возрастает.

Найдено, что в условиях сильной турбулентности ионосферы допустимое время синтезирования для геосинхронной орбиты РЛС ограничено 300 с. в X-диапазоне и 3 с. в VHF-диапазоне; тогда как для низколетящих аппаратов оно составляет 2,5 с. (X-диапазон) и 0,04 с. (VHF-диапазон). Оценки же времени синтезирования в условиях слабой турбулентности ионосферы дают: для геосинхронной орбиты РЛС – 200 мин (X-диапазон) и 2,5 мин (VHF-диапазон); для низколетящих аппаратов – 2 мин (X-диапазон) и 1,5 сек (VHF-диапазон).

Работа выполнена в рамках НИР «Геосар» по заказу ГК «Роскосмос».

А. Ф. Гильфанова, Д. А. Веденькин
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (Казань)

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ КАНАЛА СВЯЗИ С КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Аннотация. Описан метод повышения помехозащищенности канала связи с КАМ-16. Рассмотрен алгоритм, который изменяет сигнальное созвездие в зависимости от действующего на сигнал шума. Проведена оценка результатов исследования.
Ключевые слова: помехозащищенность, модуляция, КАМ-16, сигнальное созвездие.

A. F. Gilfanova, D. A. Vedenkin
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (Kazan)

IMPROVEMENT OF THE NOISE IMMUNITY OF THE COMMUNICATION CHANNEL WITH QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION

Abstract. A method for increasing the noise immunity of a communication channel with QAM-16 is described. An algorithm is considered that changes the signal constellation depending on the noise acting on the signal. The results of the study were evaluated.
Key words: noise immunity, modulation, QAM-16, signal constellation.

В современном мире используется большое количество электронных устройств, излучения которых действуют друг на друга как шум. Чтобы уменьшить их влияние, необходимо повысить помехозащищенность каналов связи.

В данной работе было проведено моделирование канала связи с квадратурной амплитудной модуляцией. Для этого был написан код в программной среде, который реализует смесь сигнала КАМ-16 с аддитивным белым шумом. Для повышения помехозащищенности канала связи и устранения ошибок при приеме сигнала точку сигнального созвездия, на которую шум воздействует больше остальных, переносим в область созвездия, где влияние шума меньше. То есть изменяем амплитуду и фазу сигнала, что дает повышение помехозащищенности канала связи.

В результате исследования было определено, что при воздействии шума на сигнал, амплитуда и фаза сигнала на приемнике отличаются от амплитуды и фазы переданного сигнала, таким образом, сигнал может быть принят неправильно. Для повышения помехозащищенности изменяем положение точек в сигнальном созвездии относительно действующего на сигнал шума (амплитуду и фазу переданного сигнала). Были посчитаны коэффициент ошибок для стандартного сигнального созвездия КАМ-16 и измененного сигнального созвездия. Исходя из этого, было выявлено, что при изменении сигнального созвездия коэффициент ошибок уменьшается, следовательно, повышается помехозащищенность канала связи.

Таким образом, чтобы принять всю переданную информацию, необходимо точки сигнального созвездия, которые подверглись воздействию шума, перенести в область за пределами сигнального созвездия, где воздействие шума минимально, и он не влияет на сигнал. Однако для этого необходимо увеличить амплитуду, т.е. увеличить мощность передаваемого сигнала.

Ю. А. Костычов
(Омск)

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АПЕРИОДИЧЕСКИХ АНТЕНН ДИАПАЗОНА ДКМВ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ В ИХ КОНСТРУКЦИЮ ВТОРИЧНЫХ ПРИЗЕМНЫХ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ФАЗОВЫХ КОРРЕКТОРОВ

Аннотация. Предложен метод повышения эффективности апериодических антенн, выполненных с замещением оконечных нагрузок вторичными антенными элементами. Отличительной особенностью метода является введение в конструкцию излучателя фазового корректора. Представлен сравнительный анализ коэффициента усиления апериодической антенны, построенной по предлагаемому методу и оригинальному. Приведены результаты электродинамического моделирования и экспериментальных исследований апериодической антенны, построенной по предлагаемому методу.

Ключевые слова: антенно-фидерные устройства, коэффициент усиления, апериодическая антенна, коррекция фазы.

Y. A. Kostychov
(Omsk)

METHOD OF INCREASING THE EFFICIENCY OF APERIODIC HF ANTENNAS BY IMPROVEMENT THEIR DESIGN BY SECONDARY SURFACE ANTENNA ELEMENTS AND PHASE CORRECTORS

Abstract. A method for increasing the efficiency of aperiodic antennas made with the replacement of terminal loads by secondary antenna elements is proposed. A distinctive feature of the method is the introduction in radiator of the phase correctors. A comparative analysis of gain of aperiodic antenna constructed according to the proposed method and the original is presented. The results of electrodynamic modeling and experimental studies of an aperiodic antenna constructed by the proposed method are presented.

Keywords: antenna-feeder devices, radiation pattern, aperiodic antenna, phase corrector.

При работе радиолиний многих диапазонов длин волн (ПВ, КВ, УКВ) на трассах различной протяженности применяют апериодические антенны, представляющие собой систему токонесущих проводников, размещенных на некоторой высоте над землей и нагруженных на сопротивление, равное волновому сопротивлению излучателя. Радиоцентры, обеспечивающие работу на протяженных трассах (от 1000 км и более), зачастую оснащены ромбическими антеннами и различными модификациями двухпроводной (например, антенны типа V-образной наклонной) и однопроводной апериодических антенн (предназначенных для обеспечения излучения под низкими (близкими к 15˚) углами возвышения от подстилающей поверхности).

Широкое распространение апериодические антенны с оконечными нагрузками получили благодаря малым (относительно наибольшей длины волны рабочего диапазона) установочным и габаритным размерам; простоте конструкции; обеспечению высокого уровня согласования с фидерным трактом в широкой полосе рабочих частот.

Всем апериодическим антеннам свойственен такой недостаток, как снижение направленности и эффективности (соответственно, как в приёмном режиме, так и в передающем) при снижении рабочей частоты ввиду возрастающей доли рассеиваемой мощности полезного сигнала в оконечном нагрузочном сопротивлении.

Большинство способов повышения эффективности апериодической антенны заключаются в следующем:

а) снижении входного сопротивления антенны и, как следствие, увеличении КПД;

б) выполнении апериодической антенны по так называемой схеме Неймана, обеспечивающей повышение КПД апериодической антенны за счет повторного использования мощности,

подводимой к оконечной нагрузке, т.е. подключения вместо оконечной нагрузки второго излучающего антенного элемента (АЭ), в связи с чем та доля энергии, которая у одиночной апериодической антенны поглощалась оконечным сопротивлением, подавалась бы во вторичный АЭ и излучалась.

Известным способам повышения эффективности присущи следующие недостатки:

– усложненная конструкция, требующая возвратных фидерных линий для подключения вторичных антенных элементов или дополнительных излучателей для снижения волнового сопротивления антенны;

– увеличенный габаритный размер, требуемый для развертывания полноразмерных вторичных АЭ или введения дополнительных излучателей;

– необходимость наличия в конструкции диссипативных сосредоточенных или распределенных элементов, ограничивающих максимальную подводимую мощность;

– некогерентное сложение мощностей в пространстве, излученных первичным и вторичными АЭ, обуславливающее развал диаграммы направленности (ДН) системы первичного и вторичных излучателей. Причем негативное влияние на коэффициент усиления (КУ) и форму ДН развала тем больше, чем ниже частотное положение развала.

Сущность предлагаемого метода, а также его отличительные особенности заключаются в следующем:

а) замещение оконечных резистивных нагрузок и электрических противовесов приземными/подземными вторичными антенными элементами, подводимая мощность к которым ограничена лишь напряжением пробоя изоляции провода и его сечением. Это обеспечивает сохранение не только уровня согласования и допустимой подводимой мощности (за счет вторичного излучения и рассеяния в подстилающей поверхности), но и установочного и габаритного размера (ввиду того, что габаритный размер приземной антенны не превышает размера электрического противовеса);

б) повышение эффективности в низкочастотном диапазоне с помощью коррекции фазового набега, обеспечивающей смещение развала ДН вверх по частоте, обуславливает минимизацию негативного влияния последнего. Фазовый корректор в предлагаемом методе представляет собой фильтр высоких частот, реализованный на сосредоточенных LC элементах;

в) повышенная защищенность от грозовых наведенных разрядов и помехозащищенность вообще за счет фильтрующих свойств цепей фазового корректора, введенных в конструкцию излучателя.

Проведенные натурные относительные измерения КУ по земной волне макета апериодической антенны, представляющей собой симметричный диполь (длина плеча 15 метров), работающий в диапазоне 3–30 МГц, показали возможность достижения выигрыша относительно оригинальной антенны по КУ от 5 до 10 дБ в области низких частот. Измеренный КУ антенны, построенной по предлагаемому методу, снижен на 20 дБ (относительно оригинальной антенны) на частоте 0,95 МГц (частоте работы приводного маяка). Это говорит о повышенной относительно оригинальной антенны защищенности от внеполосных преднамеренных и случайных сигналов и помех. Таким образом, результаты натурных испытаний макета апериодической антенны, построенной по предлагаемому методу, позволяют полагать последний эффективным и целесообразным к применению.

С. В. Кривальцевич, А. С. Ященко, К. В. Немчанов
Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН (Омск)

ВЛИЯНИЕ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА НА НАПРАВЛЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Аннотация. В работе приводятся результаты исследования влияния сезонной изменчивости диэлектрических характеристик почвы Арктического региона на направленные характеристики диполя Герца. Вид диаграммы оценивался при двух значительно отличающихся значениях объёмной влажности почвы, находящейся в талом и мёрзлом состоянии. Обнаружено заметное изменение вида диаграммы направленности при изменении состояния подстилающей поверхности.

Ключевые слова: коротковолновая связь, диаграмма направленности, комплексная диэлектрическая проницаемость.

S. V. Krivaltsevich, A. S. Yashchenko, K. V. Nemchanov
Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center SB RAS (Omsk)

EFFECT OF SEASONAL VARIABILITY OF SOIL DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF ARCTIC REGION ON DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF ELEMENTARY EMITTER

Abstract. The paper presents the results of a study of the effect of seasonal variability in the dielectric characteristics of the soil of the Arctic region on the directional characteristics of the Hertz dipole. The view of the diagram was estimated at two significantly different values of volumetric moisture of the soil, which is in a melt and frozen state. A noticeable change in the directional pattern was detected when the underlying surface state changed.

Keywords: high frequency communication, directional pattern, complex dielectric permittivity.

При разработке комплексов радиосвязи традиционными являются задачи по увеличению скорости передачи информации (пропускной способности), охвата территории, мобильности. В зависимости от приоритета решаемой задачи используют технологии спутниковой, волоконно-оптической, коротковолновой (КВ) связи. Пропускная способность канала связи в КВ диапазоне волн невелика, однако её применение оправдано при организации систем передачи данных на большие расстояния. Применение современных технологий обработки информации позволяет значительно повысить надежность КВ связи. Эти факты определяет привлекательность данного вида связи при освоении Арктической зоны и районов севера Сибири, что на данный момент является одной из ключевых задач развития современной экономики.

Размеры передающих и приемных антенн КВ диапазона могут достигать десятков и сотен метров. Антенные устройства КВ связи располагаются, как правило, на небольшой, относительно длины волны, высоте над поверхностью земли, а некоторые конструкции антенн размещаются непосредственно на ее поверхности. При таком расположении антенн постилающаяся поверхность оказывает заметное влияние на направленные характеристики излучающих систем. Радиофизические характеристики подстилающей поверхности (в данном случае почвы) в основном определяются объёмным содержанием и состоянием почвенной влаги, а также гранулометрическим составом. Объёмная влажность почв может существенно изменяться в процессе выпадения осадков, инфильтрации влаги и её испарения. Кроме того, радиофизические характеристики почв существенно изменяются при её замерзании. Эти факты обуславливают актуальность исследований влияния подстилающей поверхности, находящейся в разных физических состояниях, на направленные характеристики излучающих систем. Несмотря на то что общие вопросы влияния подстилающей поверхности на процесс излучения радиоволн элементарным излучателем рассмотрены в пионерских работах, опубликованных в начале 20-го века, оценка влияния подстилающей поверхности с конкретными значениями комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) до сих пор представляет определённый научный интерес.

В работе приводятся результаты исследования влияния сезонной изменчивости КДП почвы Арктического региона на диаграмму направленности (ДН) диполя Герца. Данный вид излучателя является эталоном при исследовании влияния того или иного параметра на характер процесса излучения радиоволн. Моделирование направленных характеристик осуществлялось в свободно распространяемом программном пакете MMANA-GAL. В данном пакете любая антенна представляется в виде совокупности тонких проводов конечной длины. Несмотря на простоту и даже некоторую примитивность MMANA-GAL по сравнению с коммерческими продуктами, данный пакет вполне пригоден для определения направленных характеристик простых с конструктивной точки зрения антенных систем.

Габаритные размеры излучателя составляли: длина плеча $l = 0{,}01\lambda$, общая длина соответственно $L = 0{,}02\lambda$. Материал проводника: медь толщиной $0{,}0008\lambda$. Высота подвеса $h1 = 0\lambda$ (расположен на земле), $h2 = 0{,}25\lambda$ (приподнят над землей) относительно нижней точки. В процессе моделирования использовались данные о КДП на частотах 3 МГц и 30 МГц, объёмной влажности 3,6% и 90% при термодинамической температуре минус 10 и плюс 25 градусов Цельсия, полученные в результате лабораторных измерений. Значения действительной части КДП при температуре плюс 25 градусов составляет 1,7287 и 81,9581 для влажности 3,6% и 30% соответственно на частоте 3 МГц, 1,6719 и 59,9175 на частоте 30 МГц. При температуре минус 10 градусов значение КДП составляет 1,6660 и 9,4745 на частоте 3 МГц и 1,6005, 8,0233 на частоте 30 МГц.

Полученные в результате моделирования направленные характеристики элементарного излучателя, расположенного на земной поверхности, демонстрируют усиление излучение под малыми углами места 5, 10, 15 градусов для температуры почвы +25 ℃ при высокой влажности на частоте 3 МГц. При отрицательных температурах данное явление не наблюдается. На частоте 30 МГц такой эффект также не наблюдается. При расположении диполя Герца на высоте h2 от поверхности земли лепестки ДН значительно уже по сравнению с ДН диполя, расположенного непосредственно на земле, для обеих температур. По уровню 3 Дб и 10 Дб сужение составило около 18% и 9% соответственно. При увеличении влажности заметно изменяется форма ДН. Её вид становится близок в ДН диполя, расположенного над идеально проводящей плоскостью. Этот эффект объясняется ростом отражательных характеристик подстилающей поверхности с повышением влажности и, как следствие, КДП как при положительной, так и отрицательной температурах. Стоит отметить, что вид ДН мало изменяется при изменении частоты моделирования, что объясняется близкими значениями КДП на частотах 3 и 30 МГц.

Таким образом, в результате проведённого численного моделирования обнаружено, что ДН элементарного излучателя заметно изменяется при сезонных вариациях КДП почв Арктического региона.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (номер госрегистрации проекта в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А19-119052890058-2).

Y. Luo[1], К. П. Гармаш[1], Л. Ф. Черногор[1], Q. Guo[2], Y. Zheng[3]
[1] Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина (Харьков, Украина)
[2] Харбинский инженерный университет (Харбин, Китайская Народная Республика)
[3] Университет Циндао (Циндао, Китайская Народная Республика)

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАГНИТО-ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ БУРИ 5–6 АВГУСТА 2019 ГОДА

Аннотация. Приведены результаты комплексных наблюдений за возмущениями главного магнитного поля, его флуктуаций, ионосферы и характеристик радиоволн. Показано, что главная фаза магнитной бури наблюдалась 5 августа 2019 г. с 06:00 до 08:30, фаза восстановления продолжалась не менее 4 суток. Магнитная буря проявлялась в существенных вариациях всех компонент геомагнитного поля, в увеличении на порядок уровня колебаний геомагнитного поля в диапазоне 400–950 с. В течение ионосферной бури наблюдались значительные возмущения F-области ионосферы. Установлено, что имели место значительное уширение доплеровских спектров, вариации доплеровского смещения частоты и его квазипериодические изменения.

Ключевые слова: геокосмическая буря, магнитная буря, ионосферная буря, комплекс наклонного зондирования ионосферы, доплеровские спектры, квазипериодические вариации, концентрация электронов.

Y. Luo[1], K. P. Garmash[1], L. F. Chernogor[1], Q. Guo[2], Y. Zheng[3]
[1] V. N. Karazin Kharkiv National University (Kharkiv, Ukraine)
[2] Harbin Engineering University (Harbin, People's Republic of China)
[3] Qingdao University (Qingdao, People's Republic of China)

RADIOPHYSICAL OBSERVATIONS OF THE MAGNETIC AND IONOSPHERIC GEOSPACE STORM EFFECTS FROM 5 TO 6 AUGUST 2019

Abstract. Cluster observation results for main magnetic field, its fluctuation, ionosphere and radio wave characteristics disturbances are presented. It is shown the main phase of the magnetic storm took place on August 5, 2019 from 06:00 a.m. to 08:30 a.m., the recovery phase lasted at no less than 4 days. The magnetic storm shows significant variations of all components of the geomagnetic field, and there is an increase by an order of magnitude of the oscillations level of the geomagnetic field in the range from 400 s to 950 s. During the ionospheric storm, significant disturbances occurred in the F region of the ionosphere. It is established the Doppler spectra is significantly broadened, and the Doppler frequency shift and its quasi-periodic change.

Keywords: geospace storm, magnetic storm, ionospheric storm, ionosphere oblique-incidence system, Doppler spectra, quasi-periodic variations, electron content.

Введение

Геокосмические бури представляют собой синергетически взаимодействующие бури в магнитном поле, в ионосфере, атмосфере и электрическом поле. Целью работы является изложение сведений о геокосмической буре 5–6 августа 2019 г., результатов анализа особенностей магнитной и ионосферной бурь.

Средства и методы

Для наблюдения использовались магнитометр-флюксметр, размещенный в Магнитометрической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина (49.64°N, 36.93°E) и измеряющий флуктуации H- и D-компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов $T = 1 – 1000$ с; магнитометр, дислоцированный в Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ (49.93°N, 36.95°E); многочастотный многотрассовый комплекс наклонного зондирования ионосферы, размещенный на территории Харбинского инженерного университета (КНР) (45.78°N, 126.68°E), который осуществляет непрерывный мониторинг состояния ионосферы на 14 радиотрассах, и использующий излучение радиостанций, дислоцированных в Китае, Монголии, России, Южной Корее и Японии в диапазоне частот 5 – 10 МГц; ионозонд, расположенный в Японии вблизи г. Wakkanai (45.16°N, 141.75°E).

Состояние космической погоды

4 и 5 августа 2019 г. наблюдался рост концентрации частиц n_{sw} в солнечном ветре от ~$2{,}5\cdot10^6$ до $10\cdot10^6$ м$^{-3}$. Увеличение скорости V_{sw} частиц от ~350 до 715 км/с отмечалось 5 августа 2019 г. Далее V_{sw} постепенно уменьшалась от 715 до 450 км/с. Резкий рост температуры частиц от ~10^4 до $4{,}5\cdot10^5$ K имел место в первой половине суток 5 августа 2019 г., за ним последовало постепенное уменьшение до ~10^5 K. Рост n_{sw} и V_{sw} привел к увеличению динамического давления p_{sw} в солнечном ветре от ~0,5 до 5 нПа, которое наблюдалось 5 августа 2019 г. За ним последовало постепенное уменьшение p_{sw} от 5 до 1–2 нПа. 5 августа 2019 г. имело место увеличение от ~0 до 11,1 нТл азимутальной (B_y) составляющей межпланетного магнитного поля. Почти синхронно с этим наблюдалось уменьшение от 0 до –7,5 нТл его вертикальной (B_z) компоненты. Отмечались мощные всплески (до 10 ГДж/с) энергии в единицу времени, поступающей от солнечного ветра в магнитосферу. Примерно с 00:00 и до 04:00 5 августа 2019 г. (здесь и далее – UT) значения индекса D_{st} увеличились от 0 до 27 нТл. Регистрировалось внезапное начало магнитной бури. За этим последовало резкое падение D_{st}-индекса от 27 до –53 нТл. Главная фаза магнитной бури длилась примерно с 06:00 до 08:30 5 августа 2019 г. Далее в течение более чем четырех суток наблюдалась фаза восстановления. 3 и 4 августа 2019 г. значения K_p-индекса не превышали 1–2. В течение 5 августа 2019 г. он изменялся от 3 до 5,3.

Магнитная буря

Поведение X-, Y- и Z-компонент во все контрольные дни было сходным. Уровень H-компоненты, флуктуируя, сначала уменьшался от положительных значений до –(20–40) нТл, затем увеличивался до 0–20 нТл. Уровень D-компоненты сначала увеличивался от 0 до 30 нТл, затем уменьшался примерно до –30 нТл, далее, флуктуируя, приближался к 0 нТл. Уровень Z-компоненты изменялся в пределах от –20 до 20 нТл. Среднеквадратическое отклонение для всех трех компонент не превышало единиц нанотесла. В день магнитной бури вариации H-компоненты значительно увеличились (от 60 до –100 нТл). Уровень D-компоненты изменялся от ~40 до –55 нТл. Заметно изменился и уровень Z-компоненты. Среднеквадратическое отклонение для всех компонент увеличилось на порядок (до 10–20 нТл). 5 августа 2019 г. наблюдались внезапное начало и главная фаза бури, а после 09:00 5 августа, 6 августа и до конца суток 9 августа 2019 г. – фаза восстановления. 2 августа 2019 г. уровень флуктуаций D- и H-компонент магнитометра-флюксметра не превышал ~0,5 – 1 нТл. Наибольшую энергию имели составляющие с $T \approx 800 – 900$ с. 5 августа 2019 г. в интервале времени 03:00 – 07:00 уровень флуктуаций D- и H-компонент вырос до 5–7 нТл. В спектре преобладали периоды 400–600 и 700–900 с соответственно. 6 августа 2019 г. с 00:00 до 07:00 уровень флуктуаций D- и H-компонент не превышал 2–3 нТл. Наибольшую энергию имели колебания с $T \approx 400–800$ с для D-компоненты и 700–900 с для H-компоненты.

Ионосферная буря

2, 5 и 6 августа 2019 г. частота f_{oE} в дневное время достигала 3,0–3,3 МГц, а утром и вечером была около 2 МГц. Из-за присутствия слоя E_s частоту f_{oF2} удавалось измерять очень редко. В течение главной фазы магнитной бури регистрировались ее флуктуации от ~5 до 10 МГц. В течение фазы восстановления $f_{oF2} \approx 6$ МГц. После 13:30 5 августа 2019 г. отмечалось ее падение до 3 МГц. Высота h'_E изменялась от 90 до 120–130 км. В течение главной фазы магнитной бури наблюдалось ее увеличение от ~95 до 120 км. Это продолжалось около 60 мин. Высота h'_{Es} 5 августа 2019 г. флуктуировала в пределах от 90 до 120–130 км. В течение главной фазы бури отмечался резкий рост h'_{F2} от 210 до 280 км.

Основные результаты

Ионосферная буря существенно повлияла на доплеровские спектры радиоволн в диапазоне частот 5–10 МГц. Имели место значительное уширение доплеровских спектров, вариации доплеровского смещения частоты и его квазипериодические изменения с периодом 20–40 мин и длительностью 120–240 мин. Амплитуда квазипериодических вариаций относительных возмущений концентрации электронов δ_{Na} их изменялась от 3 до 16%. На одной из трасс амплитуда доплеровского смещения частоты достигала 0,7 Гц. При этом $\delta_{Na} \approx 80–90\%$. Ионосферная буря незначительно повлияла на амплитуду сигнала на большинстве радиотрасс.

К. А. Майненгер
Омский научно-исследовательский институт приборостроения (Омск)

ВЛИЯНИЕ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ВХОДНОЙ ИМПЕДАНС ПРИЗЕМНОЙ АНТЕННЫ КВ ДИАПАЗОНА

Аннотация. Рассмотрено изменение входного сопротивления приземных антенн, связанного с влиянием сезонных колебаний радиофизических характеристик подстилающей поверхности. Проведено численное моделирование влияния подстилающей поверхности на приземную антенну. Приведена методика измерения входного сопротивления антенны. В результате работы получены значения входного сопротивления антенны при различных состояниях подстилающей поверхности с помощью электродинамического моделирования и экспериментальных измерений, проводимых в различные времена года.

Ключевые слова: входное сопротивление, приземная антенна, наклонный луч, комплексная диэлектрическая проницаемость, согласование.

K. A. Maynenger
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)

INFLUENCE OF SEASONAL FLUCTUATIONS IN THE RADIOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE UNDERLYING SURFACE ON THE INPUT IMPEDANCE OF A GROUND-LEVEL HF ANTENNA

Abstract. The change in the input resistance of ground-level antennas associated with the influence of seasonal fluctuations in the radiophysical characteristics of the underlying surface is considered. Numerical simulation of the influence of the underlying surface on the receiving antenna is performed. A method for measuring the input resistance of the antenna is given. As a result of the work, the values of the input resistance of the antenna for different States of the underlying surface are obtained using electrodynamic modeling and experimental measurements carried out at different times of the year.

Keywords: input impedance, receiving antenna, inclined beam, complex permittivity, matching.

В процессе выполнения работ оценивались входные характеристики приземной антенны при значениях комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) подстилающей поверхности, соответствующей реальной почве нашего региона, находящейся в различных физических состояниях.

Антенны, расположенные вблизи поглощающей энергию поверхности земли, относятся к приземным антеннам, свойства которых определяются не только их конструкцией, но и электрическими характеристиками подстилающей поверхности. Простейшей и наиболее распространенной антенной такого типа является антенна «Наклонный луч» (НЛ). Несимметричное включение такой антенны само по себе предопределяет существенное влияние земли на характеристики антенны, так как ее ответная часть тем или иным способом непосредственно связана с землей. Изменение электрических параметров земли заметным образом влияет на активную составляющую входного сопротивления. В связи с этим определенный практический интерес представляет выяснение зависимости антенны по ее входным сопротивлениям от изменений параметров почвы.

Результаты исследований, посвященных измерениям входного сопротивления, полученным в ходе экспериментальных работ, показали, что составляющие входного сопротивления антенны претерпевают значительные изменения с частотой и варьируются в пределах от десятков Ом до нескольких кОм. Достичь хорошего согласования с фидером в данном случае является сложной задачей и без дополнительного автоматического согласующего устройства вряд ли возможно.

Для синтеза согласующей цепи АнСУ необходимы исходные данные в части импедансных характеристик подключаемых антенн и их изменения из-за влияния дестабилизирующих факторов, в частности таких, как сезонные колебания. Влияние сезонных колебаний на электрические характеристики поверхности почвы (а косвенно и на характеристики антенны) обусловлено главным образом изменением содержания влаги и температуры верхнего слоя почвы. Измерения проводились в различные времена года, что позволило оценить влияние сезонных изменений параметров почвы на входное сопротивление антенны. Наименьшая величина активного сопротивления наблюдается в осенний и весенний период времени при относительно влажной почве. Соответственно в при более сухой почве наблюдается наибольшее значение величины активного сопротивления антенны.

К. А. Майненгер, А. С. Ященко
Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН (Омск)

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН

Аннотация. Построена электродинамическая модель элементарного излучателя, расположенного непосредственно вблизи поверхности земли. Проведено численное моделирование влияния подстилающей поверхности на элементарный излучатель. В результате работы получены значения направленных характеристик излучателя при различных состояниях подстилающей поверхности.

Ключевые слова: вертикальный элементарный излучатель, диаграмма направленности, комплексная диэлектрическая проницаемость, метод конечных элементов.

K. A. Maynenger, A. S. Yashchenko
Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center SB RAS (Omsk)

ELECTRODYNAMIC MODELING OF THE INFLUENCE OF THE UNDERLYING SURFACE ON THE CHARACTERISTICS OF ANTENNAS

Abstract. An electrodynamic model of an elementary emitter located directly at the Earth's surface is constructed. Numerical simulation of the influence of the underlying surface on the elementary radiator is performed. As a result, the values of the emitter directivity characteristics for various States of the underlying surface are obtained.

Keywords: the basic vertical radiator, radiation pattern, complex dielectric permittivity, the finite element method.

В процессе выполнения работ оценивались характеристика направленности вертикального электрического диполя (ВЭД) при различных значениях комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) подстилающей поверхности, непосредственно вблизи которой располагался ВЭД. Выбранные значения КДП соответствовали органической почве Арктического региона, находящейся в различных физических состояниях. Выбор ВЭД как объекта исследования обусловлен необходимостью оценки общего характера влияния подстилающей поверхности на процесс излучения вертикально поляризованных волн.

Как известно, антенны ДВ, СВ, КВ и УКВ диапазонов размещаются в непосредственной близости от подстилающей поверхности. В этом случае подстилающая поверхность становится частью излучающей системы и, как следствие, оказывает заметное влияние на процесс излучения радиоволн. Оценка влияния подстилающей поверхности на направленные характеристики излучающих систем в натурных условиях сопряжена с рядом трудностей. Так, работа с готовым изделием позволяет определять характеристики устройства лишь при текущем состоянии окружающей среды. Полученные таким образом результаты носят частный характер. Для проведения достаточно полного исследования характеристик устройства при разных состояниях окружающей среды может потребоваться довольно продолжительный временной промежуток. Исследование цифровой модели антенного устройства позволяет существенно ускорить процесс определения его радиофизических характеристик и направленных свойств.

Значения КДП влажной почвы Арктического региона заметно изменяется при переходе от талого состояния к мёрзлому. Резкое изменение КДП находит отражение в изменении направленных характеристик антенн.

Электродинамическое моделирование ВЭД проводилось с помощью программного комплекса, реализующего метод конечных элементов. Суть метода конечных элементов заключается в том, что все исследуемое пространство разбивается на элементы в виде тетраэдров (для трехмерного пространства). При этом размеры тетраэдра должны быть достаточно малы для того, чтобы описать поле в его пределах простой функцией или системой функций с неизвестными

коэффициентами, которые можно найти из уравнений Максвелла и граничных условий. В результате электродинамическая задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно этих коэффициентов. Выбранный метод представления антенны и подстилающей поверхности кусочно-линейной структурой подходит для решения выбранной задачи.

Результаты моделирование диполя Герца, расположенного над подстилающей поверхностью, показали, что при изменении параметров подстилающей поверхности меняется форма ДН антенны. Так, при увеличении значения проводимости подстилающей поверхности угол максимума ДН (определяющий наибольшую дальность связи) антенны уменьшается, т.е. диаграмма «прижимается» к поверхности земли. И наоборот, при уменьшении проводимости почвы угол максимума ДН антенны возрастает.

Это можно объяснить тем, что, когда проводимость почвы увеличивается, уменьшается глубина проникновения волны в землю, следовательно, уменьшаются потери в ней. Напротив, в плохо проводящую почву волны проникают хорошо, а следовательно, в ней увеличиваются потери.

Работа выполнена в рамках государственного задания Омского научного центра СО РАН в соответствии с программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (номер госрегистрации проекта в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А19-119052890058-2).

А.О. Пелевин[1], А.М. Лерер[2], Г.Ф. Заргано[2]
[1] ФГУП «Главный радиочастотный центр» (Ростов-на-Дону)
[2] Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

Аннотация. Исследовано влияние тонкого сплошного диэлектрического слоя, расположенного непосредственно под широкой стенкой волноводно-щелевой антенной решетки, на ее рабочий диапазон. Показано, что в сочетании с диэлектрическим заполнением щелей введение тонкого диэлектрического слоя позволяет сместить вниз по частоте и расширить рабочий диапазон частот без изменения габаритных размеров волновода при сохранении характеристик направленности антенной решетки.
Ключевые слова: диэлектрический слой, волноводно-щелевая антенна, щелевые излучатели.

A. O. Pelevin[1], A. M. Lerer[2], G. F. Zargano[2]
[1] FSUE “General radio frequency center” (Rostov-on-Don)
[2] Southern Federal University (Rostov-on-Don)

SIMULATION OF A SLOTTED WAVEGUIDE ANTENNA WITH A DIELECTRIC LAYER INSIDE

Abstract. The operating band of a slotted-waveguide antenna with a thin dielectric layer inside was studied. The CST simulation showed that a thin dielectric layer located directly under slots filled by another dielectric shifts the operating band down and makes it broader, with the size, gain and pattern characteristics remaining the same as for air-filled waveguide and slots.
Keywords: dielectric layer, slotted-waveguide antenna, radiating slots.

Известно, что частичное заполнение волновода диэлектриком уменьшает критическую длину волны основного типа. Поэтому при использовании волноводно-щелевой антенной решетки на прямоугольном волноводе с частичным диэлектрическим заполнением можно получить снижение рабочей частоты при таких же размерах волновода, как и при полном воздушном заполнении. При решении такой задачи представляет практический интерес анализ влияния частичного заполнения диэлектриком как внутренней полости прямоугольного волновода, так и полости щелевых излучателей для определения возможностей улучшения некоторых параметров волноводно-щелевой антенной решетки.

За основу была взята щелевая антенная решетка на прямоугольном волноводе с поперечным сечением 23×10 мм с общим количеством щелей равным 20. Диэлектрическое заполнение выполнено в виде тонкого слоя диэлектрика, расположенного непосредственно под широкой стенкой прямоугольного волновода, содержащей прямоугольные излучатели шириной 1,5 мм и длиной 15 мм. Период антенной решетки 22,5 мм, расстояние от центра щелевого излучателя до оси волновода 2,3 мм.

В процессе моделирования определялись рабочий диапазон частот, коэффициент усиления и диаграмма направленности волноводно-щелевой антенной решетки при различных значениях диэлектрической проницаемости слоя, материала заполнения щелей и толщины слоя. Полоса рабочего диапазона частот определялась по значению 3 дБ от максимального значения коэффициента усиления в данной полосе.

С помощью электродинамической компьютерной модели волноводно-щелевой антенной решетки были исследованы различные сочетания диэлектрического заполнения. Так, например, использовался слой диэлектрика толщиной от 1 до 3 мм с диэлектрической проницаемостью от 1 до 2,5. Исследовалось также влияние заполнения щелей материалом с диэлектрической проницаемостью 1,5. С помощью полученных моделей были найдены наиболее эффективные сочетания диэлектрической проницаемости слоя, материала заполнения щелей и толщины слоя с точки зрения зависимости коэффициента усиления от частоты.

По результатам моделирования волноводно-щелевой антенной решетки на прямоугольном волноводе с частичным диэлектрическим заполнением найдено, что введение диэлектрического слоя с диэлектрической проницаемостью 1,5 и толщиной 1–2 мм непосредственно под широкой стенкой, содержащей щели, также заполненные диэлектриком с диэлектрической проницаемостью 1,5, смещает рабочий диапазон частот более чем на 1 ГГц вниз по частоте. Такое смещение рабочего частотного диапазона волноводно-щелевой антенной решетки в сторону нижних частот при наличии описанного диэлектрического заполнения также подтверждается смещением максимального значения КСВН. Ширина рабочего диапазона частот данной модели волноводно-щелевой антенной решетки составляет не менее 1,2 ГГц при КСВН не более 1,5. Кроме того, использование диэлектрического заполнения щелей материалом с диэлектрической проницаемостью 1,5 повышает вероятность защиты антенной системы от неблагоприятных погодных условий без ухудшения согласующих свойств антенной решетки.

Результаты моделирования волноводно-щелевой антенной решетки также показали, что форма диаграммы направленности при заполнении диэлектриком щелей, а также при введении диэлектрического слоя в волновод практически не изменяется по сравнению с волноводно-щелевой антенной решеткой с воздушным заполнением. Уровень боковых лепестков и ширина главного максимума также практически не изменяются.

На основе полученных результатов можно говорить о перспективности применения тонкого диэлектрического слоя для понижения рабочего диапазона частот волноводно-щелевой антенной решетки без изменения сечения прямоугольного волновода, а также для расширения рабочего диапазона с сохранением характеристик направленности.

А. О. Рябов, В. Л. Фролов
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород)

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ПОТЕНЦИАЛОМ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ И ТЕМПЕРАТУРОЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

Аннотация. Обсуждается связь между потенциалом корпуса искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере. Анализируется выражение для потенциала спутника, указываются недостатки и ограничения представленного теоретического расчета.
Ключевые слова: ионосфера, температура электронов, потенциал искусственного спутника Земли.

A. O. Ryabov, V. L. Frolov
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod)

RELATIONSHIP BETWEEN ARTIFICIAL EARTH SATELLITE POTENTIAL AND ELECTRON TEMPERATURE IN THE UPPER IONOSPHERE

Abstract. The relationship between the potential of artificial earth satellite and the electron temperature in the upper ionosphere is discussed. The expression for the satellite potential is analyzed, the disadvantages and limitations of the theoretical calculation are indicated.
Keywords: ionosphere, electron temperature, artificial earth satellite potential.

Введение

В настоящее время натурные эксперименты являются одним из актуальных способов изучения плазменных явлений в ионосфере. Наиболее эффективным методом исследования верхней ионосферы является использование искусственных спутников Земли (ИСЗ), предназначенных для научных целей.

Одной из актуальных задач в исследованиях ионосферы Земли является изучение искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), наблюдаемых в F_2-слое. Условия возникновения этих неоднородней и их ранжирование по размеру исследовалась во многих работах. Главными инструментами для исследования данных явлений представляются значения плотности N_e и температуры электронов T_e. В наиболее результативных случаях ИИН хорошо детектируются и на графиках плотности электронов, и на графиках температуры электронов. Однако в общем случае слабые неоднородности невозможно достоверно идентифицировать по плотности электронов, и единственным инструментов остается электронная температура.

Отличительной особенностью современных ленгмюровских зондов, расположенных на ИСЗ, является возбуждение достаточно больших шумов при измерении температуры электронов, которые не сглаживаются даже программными методами. В то же время бортовая аппаратура многих спутников Земли позволяет получать значения потенциалов корпусов ИСЗ U_s, и эти данные характеризуются значительно меньшим уровнем шума, чем для электронной температуры. В предшествующих работах была обнаружена практически полная антикорреляция T_e и U_s в областях ИИН. Настоящая работа посвящена более детальному анализу данной закономерности.

Результаты экспериментов

В настоящей работе проанализированы результаты 22 сеансов в рамках программы СУРА-DEMETER, а также 10 контрольных сеансов вне рамок этой программы, но в эти же годы.

В 9 рассматриваемых сеансах наблюдалось формирование ИИН. Один из характерных случаев – сеанс за 27.05.2010. В этом сеансе мощная радиоволна излучалась с 17:35 до 17:50 UT на частоте $f_{\text{ВН}}$ = 4,785 МГц ($f_{0F2} \approx$ 5,3 МГц) с мощностью $P_{\text{эфф}}$ = 70 МВт (наклон диаграммы направленности – 12º на юг; высота отражения – 250 км). Измерения выполнялись в очень спокойных геомагнитных условиях: $\Sigma K_p = 4$. Минимальное расстояние между орбитой спутника и центром возмущённой магнитной силовой трубки составляло 27 км для T* = 17:52:42 UT. Для данного сеанса коэффициент корреляции между T_e и U_s равен 0,61. Средний коэффициент корреляции

для 9 сеансов, в которых наблюдались ИИН, составил 0,63, что подтверждает высказанное выше предположение о заметной взаимосвязи между электронной температурой и потенциалом спутника. В 13 сеансах, проведенных по программе СУРА-DEMETER, ИИН не наблюдались. Средний коэффициент корреляции для этого типа сеансов равен 0,37. Кроме сеансов, выполненных по программе СУРА-DEMETER, были рассмотрены 10 сеансов пролетов ИСЗ при выключенном стенде для оценки фонового вклада в рассматриваемое явление. В этих случаях средний коэффициент корреляции равен 0,18.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что взаимосвязь между температурой электронов и потенциалом спутника наиболее заметна в случае наличия ИИН. В противном же случае эта связь значительно меньше.

Заключение

В работе была продемонстрирована закономерность, что связь между отрицательным значением потенциала спутника DEMETER и электронной температурой наиболее заметна в области искусственных ионосферных неоднородностях. В дни, когда наземный стенд СУРА работал, но в ионосфере не удалось добиться формирования ИИН, степень рассматриваемой связи сильно снижалась. Кроме того, были проанализированы контрольные сеансы, когда стенд СУРА не был включен. В эти сеансы коэффициент корреляции был еще ниже.

Помимо фундаментального значения представленных результатов, имеется еще их важное прикладное значение. В некоторых сеансах уровень шумов на графиках концентрации и температуры электронов слишком высок, что осложняет достоверное определение наличия ИИН. В таких ситуациях способом верификации наблюдаемых явлений может служить появление вариаций в значениях потенциала спутника.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ, полученным в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62020X0003. Номер соглашения 075-15-2020-529.

Представленные в докладе исследования В. Л. Фролова выполнялись при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00166.

А. О. Рябов, В. Л. Фролов
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского (Нижний Новгород)

ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В МАГНИТНО-СОПРЯЖЕННОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. На основе результатов экспериментов, выполненных по программе СУРА-DEMETER на нагревном стенде СУРА в 2005–2010 гг., проанализированы свойства высыпаний энергичных электронов в магнитно-сопряженной области относительно области, возмущенной стендом СУРА. Рассмотрены искусственные высыпания с энергиями $E \geq 100$ кэВ из радиационного пояса Земли при модификации F_2-области ионосферы мощными КВ-радиоволнами О-поляризации в режиме их непрерывного излучения. Высыпания детектировались с использованием аппаратуры ИСЗ DEMETER. Определены условия, когда наблюдались высыпания, и установлены их характерные размеры.

Ключевые слова: энергичные электроны; высыпания; магнитно-сопряженная область.

A. O. Ryabov, V. L. Frolov
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod)

PRECIPITATION OF ENERGETIC ELECTRONS IN THE MAGNETICALLY CONJUGATE REGION

Abstract. Based on the results of experiments carried out by the SURA-DEMETER program on the SURA heating stand in 2005–2010, the properties of the precipitation of energetic electrons in the magnetically conjugated region (relative to the region perturbed by the SURA stand) are analyzed. Artificial precipitation with energies $E \geq 100$ keV from the Earth's radiation belt are considered when the F_2-region of the ionosphere is modified by high-power HF radio waves of O-polarization in the mode of their continuous radiation. Precipitation are detected using the equipment of the satellite DEMETER. The conditions when precipitation were observed and their characteristic sizes were determined.

Keywords: energetic electrons; precipitation; magneto-conjugate region.

Введение

Модификация верхней ионосферы мощными коротковолновыми (КВ) радиоволнами О-поляризации приводит к развитию в ней разного рода нелинейных явлений и плазменных неустойчивостей. Это приводит к генерации вблизи высоты отражения мощной радиоволны высокочастотной и низкочастотной плазменной турбулентности. Как результат, в этой области наблюдается сильный разогрев плазмы, ускорение электронов до сверхтепловых энергий, генерация электрических полей и токов, изменение формы профиля плазмы и др., что также приводит к модификации ионосферно-магнитосферных связей. Одной из интересных задач, связанных с модификацией F_2-области ионосферы, является анализ характеристик ионосферы в магнитно-сопряженной области относительно области, возмущенной наземными передатчиками.

В данной работе демонстрируются результаты исследований по стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли при модификации среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами *О*-поляризации, излучаемыми стендом СУРА, и влияние этих электронов на нижние слои ионосферы. Эти исследования основаны на выполненных в 2005–2010 гг. экспериментах по программе СУРА-DEMETER.

При проведении экспериментов по генерации высыпаний в магнитно-сопряженной области (МСО) использовались различные временные режимы по нагреву возмущенной области (ВО), однако обычно нагрев длился 30–45 минут, и включался за 25–40 минут до пролета ИСЗ над стендом через возмущённую магнитную силовую трубку, опирающуюся на область с сильно развитой турбулентностью вблизи высоты отражения волны накачки (ВН). Эти условия сильно отличались от экспериментов, где целью была модификация верхней ионосферы непосредственно над стендом, когда время нагрева составляло около 15 минут.

Полученные результаты

На основании проведенных экспериментов можно сформулировать критерии искусственного характера высыпаний высокоэнергичных электронов в МСО из радиационного пояса Земли, вызванного стимуляцией ионосферы мощными КВ радиоволнами. Итак, эти критерии:

а) энергия высыпающихся электронов составляет $E \geq 250$ кэВ, а потоки $F \geq 10$, даже в случаях относительно спокойных геомагнитных условий;

б) максимум интенсивности высыпаний наблюдается в центре МСО, то есть внутри возмущённой магнитной силовой трубки;

в) наблюдается характерный провал высыпаний между авроральной областью и центром МСО (~ от 46º до 53º южной широты);

г) высыпания наблюдаются, когда эффективная мощность излучения ВН превышает 40 МВт и имеет место эффективное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой F_2-слоя ионосферы.

Выполненные исследования позволили установить, что зона стимулированных модификацией ионосферы высыпаний энергичных электронов в магнитно-сопряженной области может иметь пространственные размеры до 1450 км вдоль геомагнитного меридиана и до 500 км поперёк его с большей её протяжённостью на юг от МСО.

Стоит отметить, что в сравнении с экспериментами по стимуляции высыпаний энергичных электронов в области над стендом СУРА с экспериментами, посвященными высыпаниям в МСО, во втором случае наблюдается значительно больший разброс как в значениях энергий, так и в значениях потоков: больше доля и очень результативных сеансов ($E \geq 300$ кэВ, $F \geq 50$), и неудачных, когда высыпания не отличаются от естественного уровня. Средние значения энергий и потоков в двух рассматриваемых случаях оказываются практически одинаковыми.

Работа выполнена по проекту № 0729-2020-0057 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Представленные в докладе исследования А. О. Рябова выполнялись при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-52-15007.

А. О. Рябов, В. Л. Фролов
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского (Нижний Новгород)

ИССКУСТВЕННЫЕ ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Аннотация. Проанализированы свойства высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли при модификации F_2-области ионосферы мощными КВ-радиоволнами. Определены условия появления высыпаний. Установлено, что область высыпаний вытянута вдоль геомагнитного меридиана на расстояние до 1100 км, размеры области в поперечном направлении составляют до 400 км.
Ключевые слова: энергичные электроны; высыпания.

A. O. Ryabov, V. L. Frolov
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod)

ARTIFICIAL PRECIPITATION OF ENERGETIC ELECTRONS

Abstract. Features of energetic electrons, precipitated from a Earth's radiation belt due to ionosphere F_2 region modification by means of powerful radio waves radiated by the SURA heating facility, have been analyzed. The conditions for the appearance of such precipitations were determined. It has been established that the precipitation region is elongated along the geomagnetic meridian to a distance of up to 1100 km; dimension of the region in the transverse direction is up to 400 km.
Keywords: energetic electrons; precipitation.

Введение

Стимуляция F_2-области ионосферы мощными коротковолновыми радиоволнами (КВ) обыкновенной поляризации приводит к развитию в ней разного рода нелинейных явлений и плазменных неустойчивостей. Это вызывает генерацию вблизи высоты отражения волны накачки (ВН) высокочастотной и низкочастотной плазменной турбулентности, сильный разогрев плазмы, ускорение электронов до сверхтепловых энергий, генерация электрических полей и токов, изменение формы профиля плазмы и др. Кроме того, это приводит к модификации ионосферно-магнитосферных связей, вызывая высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли. Впервые результаты, прямо подтверждающие возможность стимуляции высыпаний энергичных электронов с энергиями $E \approx 100$ кэВ в среднеширотной ионосфере, были получены на стенде СУРА во время эксперимента, выполненного 12 мая 2008 г. В данном докладе представлены результаты исследований по стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли при модификации среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами *О*-поляризации, непрерывно излучаемыми стендом СУРА, и влияние этих электронов на нижние слои ионосферы. Эти исследования основаны на выполненных в 2005–2010 гг. экспериментах по программе СУРА-DEMETER. Модификация ионосферы выполнялась с помощью нагревного стенда СУРА, данные об энергичных электронах получались с помощью спектрометра IDP, установленного на борту французского ИСЗ DEMETER, который мог измерять энергию и поток электронов в диапазоне энергий 70 кэВ – 2,5 МэВ.

Полученные результаты

Результаты выполненных измерений позволяют сформулировать признаки искусственного характера высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли, наблюдающихся при модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами в поздние вечерние и предполуночные часы. Эти признаки заключаются в следующем:

1) максимум интенсивности высыпаний наблюдается внутри возмущённой магнитной силовой трубки (особенно при наличии дакта с увеличенной плотностью плазмы) или вблизи неё;

2) в плоскости геомагнитного меридиана интенсивность высыпаний плавно уменьшается в направлении к северу, простираясь до области авроральных широт, и значительно более резко к югу;

3) энергия высыпающихся электронов в среднем составляет ~ 100 кэВ;

4) высыпания наблюдаются, когда эффективная мощность излучения ВН превышает 40 МВт и имеет место эффективное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой F_2-слоя ионосферы.

Кроме того, выполненные исследования позволили установить, что зона стимулированных модификацией ионосферы высыпаний энергичных электронов имеет пространственные размеры ~ 1100 км вдоль геомагнитного меридиана до 400 км поперёк его с большей её протяжённостью на север от стенда.

Заключение

Выполненные исследования показали, что искусственные высыпания энергичных электронов в ионосферу появляются через 5–10 мин. после включения ВН и исчезают через 5–15 мин. после её выключения, где бóльшие времена отвечают условию «холодного старта» начала нагрева плазмы после длительной паузы её излучения. Величина потоков энергичных электронов с $E \approx 100$ кэВ в среднем составляет $F \approx$ 10–100 эл/(см^2·с·стер·кэВ). Область высыпаний вдоль геомагнитного меридиана имеет размеры до 900 км к северу от стенда и до 400 км к югу от него; размер области высыпаний в ортогональном к меридиану направлении может составлять до 400 км. Полученные экспериментальные данные позволяют оценить полную мощность, вносимую высыпающимися электронами в ионосферу как 60–600 кВт, что сравнимо или даже несколько больше мощности, генерируемой передатчиками нагревного стенда.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ, полученным в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62020X0003. Номер соглашения 075-15-2020-529.

Представленные в докладе исследования А. О. Рябова выполнялись при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-52-15007.

В. И. Сахтеров
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (Москва, Троицк)

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН ГЕОРАДАРА

Аннотация. Приведены характеристики антенн, измеренные на стенде для исследования излучения антенн в подстилающую среду. Стенд позволяет измерить параметры антенн, провести сравнительный анализ по коэффициенту усиления антенны, построить реальные диаграммы направленности. Показано изменение амплитудных соотношений центрального и боковых лепестков в зависимости от ширины антенны.

Ключевые слова: георадар, диаграмма направленности, излучение в подстилающую среду, характеристики антенн георадара.

V. I. Sakhterov
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences (Moscow, Troitsk)

MEASURING CHARACTERISTICS OF GPR ANTENNAS

Abstract. The characteristics of the antennas measured on the stand for the study of radiation in underlying medium by GPR antennas are given. The stand allows one to measure the parameters of antennas, make a comparative analysis of the antenna gain, and plot real radiation pattern. The change in the amplitude ratios of the main and side lobes depending on the antenna width is shown.

Keywords: georadar, GPR, radiation pattern, radiation in underlying medium, characteristics of GPR antennas.

При макетировании систем подземной связи встал вопрос об характеристиках антенно-фидерной системы, в частности о ее диаграмме направленности. Подобные вопросы и раньше рассматривались в георадиолокации, но в основном это теоретические работы или косвенные измерения, проистекающие из съемки георадаром. Учитывая множество параметров среды, характеристики самих антенн получаем в основном сравнительные результаты: эта антенна лучше по этим параметрам, но уступает по другим параметром. Для более точного измерения в ИЗМИРАН был изготовлен стенд, позволяющий провести прямые измерения параметров антенны, конечно с некоторыми ограничениями. Стенд представляет собой вертикальную полуцилиндрическую емкость радиуса R = 0,6 м из радиопрозрачного материала, наполненного влажным песком. Высота емкости равна 4R, вся конструкция приподнята над поверхностью земли на 0,5R.

В центре с плоской прямоугольной стороны стенда устанавливается передатчик с антенной, при экспериментах использовались резистивно-нагруженные антенны длиной 0,5 м. Учитывая, что радиус стенда всего 0,6 м, расстояние по методикам для измерения воздушных антенн, требующих не менее 3–4 длин волны, недостаточно, но в георадиолокации для этих типов антенн это рабочая зона. В качестве передатчика использовался макет импульсного георадара, длительность импульса 4 нс, амплитуда 5 кВ. При измерении по внешнему периметру полуцилиндра фиксируем амплитуду первого полупериода излучаемого сигнала и считаем, что он распространяется по самому короткому пути, равному радиусу, отражения от нижней и верхней границ приходят заведомо позже, расстояние более 4 радиусов, также с большей задержкой наблюдаются отражения, приходящие по воздуху, от внешних строений. Измеряемую антенну можно располагать под различными углами. В плоскости, перпендикулярной прямоугольной стороне стенда, по окружности R с помощью скрещённых коротких диполей производятся замеры сигнала, прошедшего как через среду, так и со стороны воздушной среды. Данный метод позволяет быстро измерить параметры антенны, узнать диаграмму направленности, ее усиление и другие необходимые параметры. Первоначальные представления о диаграмме направленности отталкивались от теоретических оценок со стандартным круговым «бубликом», имеющим амплитудные искажения в сторону подземной части – задний воздушный лепесток по амплитуде в 8 раз меньше главного лепестка. По результатам измерений резистивно-нагруженных антенн длиной 0,5 м и шириной от 5 до 80 мм можно сделать вывод зависимости диаграммы

направленности от ширины антенн, практически как у воздушных диполей диаграмма зависит от высоты подвеса над землей. У некоторых антенн с большой емкостной связью с грунтом есть значительный провал главного лепестка. При ширине 80 мм диаграмма вокруг диполя становится приближенной к круговой. Диаграмма направленности той же антенны, измеренная вдоль диполя, имеет характеристики антенны бегущей волны. Здесь нужно отметить что питание диполей производится от генератора с симметричным выходом, к которому прикладываются два сигнала +2500 В и –2500 В. Вследствие этого при измерении антенной, имеющей размеры в несколько раз меньше размеров передающей антенны, можно заметить эффекты, не наблюдаемые согласованной антенной. Например, при движении вдоль диполя амплитуда принимаемого сигнала меняется на противоположную, но точка перехода через нуль оказалась немного сдвинута относительно физического центра передающей антенны, в градусах она составляет около 5º в сторону положительного напряжения. Сдвиг возникает из-за несогласованности напряжения выходного генератора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-00185 А.

П. Е. Терещенко
Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (Санкт-Петербург)

ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ВОЗБУЖДАЕМОГО ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДИПОЛЕМ

Аннотация. Проанализировано влияние ионосферы на возбуждение сверхнизкочастотного и крайне низкочастотного поля. Использована модель трехслойной изотропной среды (ионосфера, вакуум, литосфера), в которой рассмотрено возбуждение низкочастотного поля горизонтальным заземленным диполем, расположенным на границе между вакуумом и литосферой. По полученным формулам исследована степень влияния ионосферы на вертикальную компоненту магнитного поля.

Ключевые слова: КНЧ; распространение радиоволн; электромагнитное поле; проводимость, ионосфера.

P. E. Tereshchenko
St. Petersburg Branch of the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (Saint Petersburg)

INFLUENCE OF THE IONOSPHERE ON THE VERTICAL COMPONENT OF A MAGNETIC FIELD EXCITED BY A HORIZONTAL ELECTRIC DIPOLE

Abstract. The influence of the ionosphere on the excitation of an ULF and ELF is analyzed. A model of a three-layer isotropic medium (ionosphere, vacuum, lithosphere) is used, in which the excitation of a low-frequency field by a horizontal grounded dipole located at the boundary between the vacuum and lithosphere is considered. The effects of the ionosphere on the vertical component of the magnetic field are investigated.

Keywords: ULF, ELF; radio wave propagation; electromagnetic field; conductivity, ionosphere.

В литературе описано экспериментально обнаруженное влияние ионосферы на тангенциальные составляющие магнитного поля, возбуждаемого активным источником, в ближней зоне. Также известно теоретическое объяснение этого эффекта, связанного с низкой проводимостью литосферы в области генерации и приема низкочастотных электромагнитных волн. Меньшее влияние в исследованиях уделено вертикальной составляющей магнитного поля, возможно в силу ее быстрого, по сравнению с тангенциальными составляющими, уменьшения с расстоянием и фактическим превращением поля в поперечную волну. С появлением достаточно мощных передатчиков и протяженных антенн, например, в экспериментах FENICS-2014 и FENICS-2019, стала возможной уверенная регистрация вертикальной составляющей и, соответственно, ее использование для дистанционного зондирования как литосферы, так и ионосферы Земли. При этом отметим, что если влияние проводимости литосферы на структуру поля исследовалось в ряде работ, то вопрос про влияние ионосферы не рассмотрен.

В настоящей работе проанализировано влияние ионосферы на возбуждение сверхнизкочастотного и крайне низкочастотного поля. Для этого рассмотрена простейшая модель трехслойной изотропной среды (ионосфера, вакуум, литосфера), в которой возбуждается низкочастотное поле горизонтальным заземленным диполем, расположенным на границе между вакуумом и литосферой.

Решение построено с помощью электрического вектор-потенциала с использованием уравнений Максвелла и соответствующими граничными условиями. По полученным формулам выполнены расчеты, показывающие степень влияния ионосферы на вертикальную компоненту магнитного поля в зависимости от частоты излучателя и проводимости литосферы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-00823).

М. А. Титова[1, 2], В. И. Захаров[4, 5], С. А. Пулинец[2, 3]
[1] Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (Москва, Троицк)
[2] Институт космических исследований РАН (Москва)
[3] Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН (Нижний Новгород)
[4] Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова (Москва)
[5] Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (Москва)

ОБНАРУЖЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ И ВЗАИМОСВЯЗЬ С ОПРЕДЕЛЕННЫМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ИСТОЧНИКАМИ В ПЕРИОДЫ МАСШТАБНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В НАЧАЛЕ 2010 ГОДА

Аннотация. На основе анализа данных GPS-наблюдений рассмотрены ионосферные возмущения, выявленные при крупномасштабных землетрясениях, произошедших в начале 2010 года на о. Гаити и в Южной Америке. В выбранном регионе был проведен комплексный анализ данных наземных станций, входящих в международные сети IGS и UNAVCO. Всего в работе использовались фактические данные от 123 наземных станций, было обработано около 15 млн отсчетов фазы. Осуществлена локализация выявленных неоднородных волновых структур ионосферы с источниками сейсмических событий.
Ключевые слова: ионосфера, навигационная система, фаза, полное электронное содержание.

M. A. Titova[1,2], V. I. Zakharov[4,5], S. A. Pulinets[2,3]
[1] Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (Moscow, Troitsk)
[2] Space Research Institute RAS (Moscow)
[3] Federal Research Center Institute of Applied Physics RAS (Nizhny Novgorod)
[4] Department of Physics, Moscow State University (Moscow)
[5] Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS (Moscow)

RECOGNITION AND LOCALIZATION OF IONOSPHERIC IRREGULARITIES BY RADIOPHYSICAL METHODS AND THEIR RELATIONSHIP WITH CERTAIN SEISMIC SOURCES FOR LARGE-SCALE EARTHQUAKES IN EARLY 2010

Abstract. The ionospheric disturbances detected during large-scale earthquakes occurred of early 2010 on the island of Haiti and South America on the base the analysis of data GPS-observations are considered. The complex analysis of the ground-based stations data integrated into the international IGS and UNAVCO networks was carried out the selected region. Data from 123 ground stations were used, that is about 15 million phase measurements were processed. The detected ionospheric irregularities were localized and related with certain sources of seismic events.
Keywords: ionosphere, navigation system, phase, the total electron content.

Введение

По данным USGS (U.S. Geological Survey) крупномасштабные землетрясения в начале 2010 года произошли на острове Гаити с магнитудой M 7.0, в Южной Америке, в Чили с магнитудами от M 6,6 до M 8,8. Согласно данным мирового центра в Kyoto (http://wdc.kugi.kuoto-u.ac.jp/dstae) во время этих сейсмических событий была спокойная до 20 нТл для Гаити, или умеренно-возмущенной до 50 нТл, лишь раз достигнув 86 нТл (18 февраля 2010 г.) для Чили геомагнитная обстановка. Мощности землетрясений в таких геомагнитных условиях позволяют тщательно рассмотреть взаимодействие литосферы – атмосферы – ионосферы. Выделенные ионосферные неоднородности в рассматриваемые периоды продиктованы изменениями в системе литосфера – атмосфера, а не только вариациями магнитного поля Земли и солнечной активностью.

Исследование ионосферы с помощью системы GPS

Групповая задержка и фазовый сдвиг радионавигационных сигналов используются в методе измерения полного электронного содержания – ПЭС (англ. total electron content – TEC, 1TECU = 10^{16} электрон/м^2), вдоль пути распространения от спутника до приемника на двух когерентных рабочих частотах f_1 = 1575,42 МГц, f_2 = 1227,60 МГц. Это позволяет комбинировать измерения фазового пути так, что выделяется основная часть ионосферной компоненты. Погрешность в определении вариаций ПЭС от фазовых измерений составляет менее 0,1% относительно фоновой концентрации. Изменения в поведении радиосигналов, и связанных с ними рядов значений ПЭС при условии, что приемник не зафиксировал первичных данных с длительными пропусками и сбоями, вызваны наличием неоднородностей в ионосфере. Определить направление и скорость перемещения неоднородностей помогает способ приема радиосигнала в нескольких разнесенных точках пространства, такая конфигурация приемников получила название GPS-интерферометр.

Использование данных специализированных сетей станций IGS и UNAVCO

Получение достаточного пространственного разрешения обеспечивается совместным использованием данных от станций международных специализированных сетей IGS (International Geohpysical Survey) и UNAVCO (University Navstar Consortium.

Кластерный анализ по модифицированному алгоритму k-средних

Осуществляется классификация и выделение тождественных неоднородностей. Многомерная фильтрация позволяет получать устойчивые оценки параметров конкретной выделяемой структуры.

Результаты

В районе землетрясения Гаити, рассчитанная по формуле Канамори, накапливается энергия порядка 10 ПДж (10^{15}Дж). Основному толчку предшествовала серия форшоков, начавшихся 02 января с магнитудой 4,2 и продолжавшихся с нарастающей интенсивностью до 09 января. Землетрясение магнитудой 5,1 было зафиксировано 11 января 2010 года. После основного толчка было зарегистрировано более сорока афтершоков с магнитудой 4,2 и выше. Для анализа землетрясений на Гаити за период с 1 по 15 января 2010 года было обработано свыше 7,5 тысяч часов индивидуальных наблюдений, то есть более 4,3 млн отсчетов фазы. Получены по результатам кластерного анализа распределения подионосферных точек, которые локализуются, помимо эпицентра события, согласно границам активных континентальных и океанических разломов, зоны субдукции. Методическая точность локализации подионосферных точек составляет 50–100 км.

Для землетрясения в Чили в период 18 февраля – 21 марта 2010 г. обработаны 43 тыс. час индивидуальных наблюдений, 10,3 млн. измерений фазы на обеих рабочих частотах. В указанный период зарегистрировано 1358 землетрясений с M > 4. Для каждого дня был проведен кластерный анализ, в ходе которого были выделены сходные структуры и исключены неоднородности, которые детектировались неустойчиво. Получено распределение расстояний проекций подионосферных точек от геометрического центра тяжести всех точек, выделенных в области анализа, по средним оценкам составляет порядок 300–400 км, величина модуля проекции вектора скорости на поверхность Земли составляет 347–362 м/с. Результаты показывают, что литосферная активность является источником волноподобных возмущений с характерными акустико-гравитационными параметрами.

Выводы

Источником неоднородных структур в ионосфере на протяжении околоактивных периодов, т.е. до и после землетрясения, включая и основное событие, является вся область подготовки землетрясений, например разломы, зона субдукции.

Установлено, вероятное влияние морфометрических признаков рельефа на неоднородные структуры ионосферы, обнаруженные методом GPS-интерферометрии на выбранной наблюдательной сети.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ №18-12-00441.

В. Л. Хазан
Омский государственный технический университет (Омск)

КВАДРАТУРНАЯ ВНУТРИИМПУЛЬСНАЯ ФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Аннотация. Предлагается новый метод модуляции, который отличается высокой помехоустойчивостью. Квинтэссенция предлагаемого метода заключается в том, что обе квадратуры излучаемого в эфир радиоимпульса манипулируются по фазе взаимно ортогональными бинарными последовательностями, выбор которых из общего достаточно большого их количества обусловливает конкретный вид фрагмента передаваемого дискретного сообщения. На приемной стороне производится деманипуляция сигнала всеми используемыми бинарными последовательностями и определяется конкретная пара этих последовательностей, которая позволяет установить конкретный вид фрагмента принимаемого дискретного сообщения.

Ключевые слова: квадратуры, функции Уолша, внутриимпульсная фазовая манипуляция, деманипуляция.

V. L. Khazan
Omsk State Technical University (Omsk)

SQUARE INTERNAL PULSE PHASE MODULATION

Abstract. A new modulation method is proposed, which is distinguished by high noise immunity. The quintessential method of the present invention consists in the fact that both quadratures of the radiated radio pulse are manipulated in phase by mutually orthogonal binary sequences, the selection of which from the total sufficiently large number of them determines the specific kind of fragment of the transmitted discrete message. At the receiving side, the signal is demanipulated with all the binary sequences used and a specific pair of these sequences is determined, which allows determining the specific type of fragment of the received discrete message.

Keywords: quadratures, Walsh functions, intra-pulse phase manipulation, demanipulation.

Известно большое число различных методов модуляции: амплитудная (АМ), частотная (ЧМ), относительная фазовая (ОФМ), квадратурная амплитудная (КАМ) и множество других. КАМ была внедрена в каналы связи относительно недавно с появлением методов цифровой обработки сигналов.

Сигнальные созвездия КАМ, используемые в декаметровом канале связи, имеют обычно кратность, не превышающую 32. Известно, что в спутниковых системах связи и в телевизионных системах используются сигналы с КАМ-256 и даже с КАМ-1024.

Известно, что приемлемая вероятность ошибки для КАМ-256 требует отношения сигнал/помеха порядка 30 дБ.

Низкая помехоустойчивость систем связи с КАМ объясняется тем, что передача сигнала ведется с постоянным изменением амплитуды от минимального до максимального значения. Это приводит к энергетическим потерям порядка 6 дБ. С увеличением значности кодовой комбинации, передаваемой одним радиоимпульсом, уменьшается векторное расстояние между вершинами сигнального созвездия, что также приводит к увеличению вероятности ошибок в принимаемом сообщении. Кроме всего прочего, с помощью КАМ одним радиоимпульсом без преамбулы невозможно передать какую-либо кодовую комбинацию, например, при работе в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), так как у отдельно взятого радиоимпульса невозможно определить значение его начальной фазы.

Вновь предлагаемый метод квадратурной внутриимпульсной фазовой модуляции (КВИФМ) имеет более высокую помехоустойчивость по сравнению как с методом КАМ, так и с обычными методами АМ, ЧМ и ОФМ.

Квинтэссенция метода КВИФМ заключатся в том, что у радиоимпульса каждая из его квадратур манипулируется по фазе взаимно ортогональными бинарными последовательностями (ВОБП), а на приемной стороне на входе демодулятора производится деманипуляция принимаемого сигнала параллельно и одновременно всеми возможными ВОБП. В качестве ВОБП могут

использоваться функции Уолша. После каждого деманипулятора включается узкополосный фильтр, согласованный с деманипулированным радиоимпульсом. На выходе тех деманипуляторов, которые соответствуют принимаемому сигналу после деманипуляции образуются гармонические колебания, которые обнаруживаются на выходе узкополосных фильтров. Поскольку у радиоимпульса две квадратуры, а количество узкополосных фильтров К, то при приеме каждого радиоимпульса только на выходе двух из них возможно появление гармонических колебаний. Число пар R фильтров при этом будет равно числу сочетаний из К по 2: R = C_K^2. Каждой паре фильтров можно противопоставить соответствующую кодовую комбинацию, общее число которых равно R. Если передается N-значная кодовая комбинация, то необходимо, чтобы выполнялось неравенство R > N.

Для передачи, например, одним радиоимпульсом двух бит информации, соответственно, «00», «10», «01» и «11» могут использоваться четыре функций Уолша W_0, W_1, W_2 и W_3. При передаче сообщения амплитуда сигнала не изменяется. То есть радиопередатчик все время работает с полной отдачей мощности. Поскольку R=$C_4^2 = 6$, то две дополнительных команды могут использоваться в качестве управляющих, например, в качестве команд «СТАРТ» и «СТОП».

На передающей стороне формируются две квадратуры радиоимпульса (косинусоидальная и сдвинутая по фазе на 90º – синусоидальная). Квадратуры радиоимпульса с помощью фазовых манипуляторов манипулируются взаимно ортогональными бинарными последовательностями, в данном случае функциями Уолша. Конкретный вид функций Уолша определяется фрагментом сообщения, который передается соответствующим радиоимпульсом. Манипулированные по фазе функциями Уолша квадратуры радиоимпульса суммируются и подаются на вход возбудителя передающего устройства для последующей передачи в эфир.

Принимаемый сигнал поступает на переманипуляторы фазы. К выходу каждого переманипулятора подключен узкополосный фильтр. На выходах тех фильтров, которые соответствуют определенным функциям Уолша, которые содержат в себе информацию о передаваемом фрагменте дискретного сообщения, появляются радиоимпульсы. Устройство цифровой обработки сигналов определяет пару фильтров с максимальными уровнями сигналов на их выходах и выносит решение о виде принимаемого фрагмента дискретного сообщения. Естественно, что принятые решения могут быть ошибочными. Но, как показали исследования, вероятность ошибок в каналах связи с КВИФМ во много раз меньше вероятности ошибок как в каналах связи с КАМ, так и в каналах связи с АМ, ЧМ и ОФМ.

Результаты аналитических расчетов вероятностей ошибок при передаче байтов методами манипуляции КАМ, ЧМ и КВИФМ показали, что метод КВИФМ выигрывает энергетически как у метода ЧМ (4,8 дБ), так и у метода КАМ (21 дБ). Так как одиночным импульсом с КВИФМ возможно передавать достаточно большое количество бит сообщения, то этот метод манипуляции является наиболее целесообразным, например, при передаче сообщений в режиме ППРЧ.

Л. Ф. Черногор[1], К. П. Гармаш[1], Q. Guo[2], Yu. Zheng[3]
[1] Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина (Харьков, Украина)
[2] Харбинский инженерный университет (Харбин, Китайская Народная Республика)
[3] Университет Циндао (Циндао, Китайская Народная Республика)

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ СЕЙСМОИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА НАКЛОННЫХ РАДИОТРАССАХ

Аннотация. Приведены результаты наблюдений за возмущениями в ионосфере, сопровождавшими умеренные (M ≈ 5,9–6,6) землетрясения в Японии 7 июля и 5 сентября 2018 г. и 11 апреля 2019 г. Обнаружено, что характер вариаций доплеровских спектров, доплеровского смещения частоты основной моды и амплитуды сигнала в день землетрясения и в контрольные дни заметно отличался. Выявлены две характерные кажущиеся скорости распространения возмущений: около 3 км/с и 300–1000 м/с.

Ключевые слова: землетрясения, наклонное зондирование ионосферы, доплеровские спектры.

L. F. Chernogor[1], K. P. Garmash[1], Q. Guo[2], Yu Zheng[3]
[1] V. N. Karazin Kharkiv National University (Kharkiv, Ukraine)
[2] Harbin Engineering University (Harbin, People's Republic of China)
[3] Qingdao University (Qingdao, People's Republic of China)

RADIOPHYSICAL OBSERVATIONS OF SEISMIC AND IONOSPHERIC EFFECTS ON OBLIQUE RADIO PROPAGATION PATHS

Abstract. The observation results for disturbances in ionosphere during moderate (M ≈ 5,9 – 6,6) earthquakes on July 7, 2018, and September 5, 2018, and April 11, 2019 in Japan are described. It is discovered, Doppler spectra variations, main mode Doppler shift of frequency and signal amplitude on earthquake day and on reference days was differently. Two characteristic apparent speeds of disturbances propagation was found (~3 km/s for seismic waves and 300–1000 m/s.

Keywords: earthquakes, ionosphere oblique-incidence, Doppler spectra.

Введение

Целью работы является изложение результатов наблюдения за вариациями характеристик радиоволн в диапазоне 5–10 МГц динамических процессов в ионосфере, сопутствовавших землетрясениям в Японии.

Средства наблюдения

Для непрерывного наблюдения за состоянием ионосферы на высотах ~100– 300 км использовался многочастотный многотрассовый радиотехнический комплекс наклонного зондирования ионосферы, разработанный специалистами ХНУ им. В. Н. Каразина (Украина) и Харбинского инженерного университета (КНР) (45.78°с.ш., 126.68°в.д.). В основе функционирования комплекса лежат измерения величины доплеровского смещения частоты f_d и амплитуды отраженных от ионосферы радиоволн. Доплеровские спектры вычисляются на интервале времени 20 с. Разрешающие способности по частоте 0,02 Гц, по времени – 7,5 с.

Сведения о землетрясениях

Первое землетрясение в Японии произошло 07 июля 2018 г. в 11:23:50 UT. Координаты эпицентра 35.107° с.ш., 140.42° в.д. Глубина $h \approx 40$ км, эпицентр находился под водой. Магнитуда M ≈ 5,9. Второе землетрясение с M ≈ 6,6 имело место в Японии 5 сентября 2018 г. в 18:07:59 UT. Глубина $h \approx 35$ км. Его координаты: 42.686°N, 141.929°E. Третье землетрясение (подводное) с M ≈ 6,0 произошло в 08:18:21 UT 11 апреля 2019 г. вблизи берегов Японии. Координаты эпицентра следующие: 40.41°N, 143.298°E, $h \approx 18$ км.

Результаты наблюдений. Трасса Hohhot – Harbin

Китайская радиостанция излучает на частоте 9520 кГц, $R \approx 1343$ км, $D \approx 2060$ км. В день землетрясения 9 июля 2018 г. доплеровские спектры были сильно диффузными и занимали полосу частот примерно в 3–3,5 Гц. В интервале времени 11:50–13:20 спектры были смещены в основном в сторону положительных значений, а с 13:20 и до 14:00 – в сторону отрицательных значений. Примерно в 11:41 произошло разрушение квазипериодического колебания с $T \approx 5$ мин и $f_{da} \approx 0{,}2$ Гц. Новое колебание с $T \approx 12$ мин и $f_{da} \approx 0{,}25 – 0{,}30$ Гц регистрировалось в интервале времени 12:30–13:10.

Радиотрасса Hwaseong – Harbin

Радиопередающее устройство, излучающее на частоте 6015 кГц, дислоцировано в Южной Корее, $D \approx 1279$ км. 5 сентября 2019 г., в день землетрясения, до 17:50 $f_D(t) \approx 0$ Гц. В интервале времени 17:20 – 18:00 наблюдалась вторая, более слабая, мода. В 17:50 $f_D(t)$ основной моды резко увеличилось от 0 до 0,20–0,25 Гц. Первое изменение характера вариаций $f_D(t)$ имело место около 18:20, второе – около 18:56. Далее наблюдались квазипериодические вариации $f_D(t)$ с периодом $T \approx 30$ мин, амплитудой $f_{Da} \approx 0{,}20 – 0{,}25$ Гц и длительностью около 150 мин. Кроме того, отмечались слабые (с $f_{Da} \approx 0{,}05–0{,}10$ Гц) квазипериодические вариации с $T \approx 3$ мин. С 18:30 до 19:30 имели место значительные (до 30 дБ) вариации амплитуды сигнала, отсутствующие в контрольные дни.

Радиотрасса Goyang – Harbin

Радиостанция, излучающая на частоте 6600 кГц, расположена также в Южной Корее, $R \approx 907$ км, $D \approx 1272$ км. В день землетрясения 5 сентября 2019 г. примерно в 18:30 доплеровские спектры стали диффузными, доплеровское смещение частоты основной моды, флуктуируя с периодом около 3 мин, сначала уменьшалось от 0 до –0,2 Гц, а затем увеличивалось от –0,2 до 0 Гц. Это продолжалось около 60 мин. С 19:30 до 20:00 для основной моды $f_D(t) \approx 0$ Гц. После 20:00 имели место значительные (до 0,3 Гц) вариации $f_D(t)$. В интервале времени с 17:50 до 19:25 наблюдались сильные (до 30 дБ) вариации уровня амплитуды сигнала.

Радиотрасса Hwaseong – Harbin

Радиостанция Hwaseong, излучающая на частоте 6015 кГц, находится на территории Южной Кореи, $D \approx 1415$ км. 11 апреля 2019 г., в день землетрясения, наблюдалось два отличия в доплеровских спектрах. Во-первых, в интервале времени 08:55 – 09:25 резко уменьшилось значение f_D от –(0,20 – 0,25) Гц до –(0,50 – 0,55) Гц. Во-вторых, с 09:25 до 10:40 в доплеровском спектре четко наблюдались 4 моды, отстоящие друг от друга на 0,2 – 0,3 Гц. Флуктуации амплитуд в течение всех трех суток практически не отличались. С 08:50 до 09:50 обнаружены квазипериодические вариации $f_D(t)$ с $T \approx 15$ мин и $f_{Da} \approx 0{,}10 – 0{,}12$ Гц. Кроме того, $\overline{f}_D(t)$ уменьшалось от –0,1 до –0,2 Гц. В интервале времени 09:55 – 10:50 доплеровские спектры стали диффузными. Одновременно с этим амплитуда сигнала уменьшалась на 10 дБ, чего не наблюдалось в контрольные дни.

Радиотрасса Shijiazhuang – Harbin

Радиопередающее устройство, функционирующее на частоте 9500 кГц, дислоцировано на территории КНР, $R \approx 1310$ км, $D \approx 1950$ км. С 08:50 до 09:50 11 апреля 2019 г. обнаружены квазипериодические вариации $f_D(t)$ с $T \approx 15$ мин и $f_{Da} \approx 0{,}10 – 0{,}12$ Гц. Кроме того, $\overline{f}_D(t)$ уменьшалось от –0,1 до –0,2 Гц. В интервале времени 09:55 – 10:50 доплеровские спектры стали диффузными. Одновременно с этим амплитуда сигнала уменьшалась на 10 дБ, чего не наблюдалось в контрольные дни.

Основные результаты

Сейсмическая активность 7 июля 2018 г. в Японии сопровождалась апериодическими процессами в ионосфере на удалениях не менее 1–2 тыс. км от эпицентра, усилением многомодовости и значительным уширением доплеровских спектров. Также выявлены волновые возмущения в диапазоне инфразвуковых колебаний (период 4–5 мин), генерируемые сейсмической волной (скорость ~3 км/с). Относительная амплитуда δ_N квазипериодических вариаций концентрации электронов N при этом составляла 4,5–9 %. Длительность цуга колебаний была в пределах 24–55 мин. Относительная амплитуда δ_{Na} с $T \approx 15 – 30$ мин, вызванная распространением атмосферной гравитационной

волны (АГВ), составляла 30–55 %. Длительность волнового цуга достигала примерно 100 мин, скорость – около 0,3 км/с. Обнаружено, что характер вариаций доплеровских спектров, доплеровского смещения частоты основной моды и амплитуды сигнала в день землетрясения в Японии 5 сентября 2018 г. и в контрольные дни заметно отличался. Выявлено две характерные кажущиеся скорости распространения возмущений: 3,3 км/с и около 500 м/с. Первая скорость близка к скорости сейсмических волн, а вторая – к скорости АГВ в ионосфере Земли. Относительная амплитуда δ_{Na} в поле инфразвуковой волны и АГВ была ~0,15–9% и 7–55% соответственно. Землетрясение 11 апреля 2019 г. сопровождалось уширением доплеровских спектров на 1–1,5 Гц в диапазоне частот 5–9,8 МГц, генерацией АГВ, имеющей скорость 0,5–1 км/с и период 8–20 мин и генерацией инфразвука с периодом 2–5 мин, имеющего скорость 0,3–0,4 км/с.

Р. А. Эшпай, О. А. Степущенко, О. Г. Морозов, Л. М. Сарварова, А. А. Тяжелова
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

ВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПАЦИЕНТА В ИНВАЛИДНОЙ КОЛЯСКЕ НА ОСНОВЕ ЧИРПИРОВАННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА С ФАЗОВЫМ π-СДВИГОМ

Аннотация. В работе представлены результаты проектирования системы сбора информации, предназначенной для предотвращения пролежней у пациента, большую часть времени находящегося в инвалидной коляске. В основе сенсорной части системы используются датчики давления на основе линейно-чирпированных волоконных брэгговских решеток с фазовым π-сдвигом. Применение таких решеток позволит снизить стоимость системы опроса датчиков, которая ограничивает применение аналогичных волоконно-оптических систем в медицинской практике.

Ключевые слова: линейно-чирпированная волоконная брэгговская решетка, пролежни, инвалидная коляска, датчики давления, система опроса датчиков, система контроля состояния пациента.

R. A. Eshpai, O. A. Stepushchenko, O. G. Morozov, L. M. Sarvarova, A. A. Tyazhelova
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

FIBER PRESSURE SENSOR FOR ASSESSING THE POSITION OF A PATIENT IN A WHEELCHAIR BASED ON CHIRPED BRAGG GRATING WITH PHASE π-SHIFT

Abstract. The paper presents the results of designing an monitoring system designed to prevent pressure ulcers in a patient who most of the time are in a wheelchair. The sensor part of the system is based on pressure sensors based on linear-chirped fiber Bragg gratings with a phase π-shift. The use of such gratings will reduce the cost of the sensor interrogation system, which limits the use of similar fiber-optic systems in medical practice.

Keywords: linear-chirped fiber Bragg grating, ulcers, wheelchair, pressure sensor, sensor interrogation system, patient monitoring system.

Все пациенты, которые постоянно или даже временно обездвижены, например, после операции, подвержены высокому риску развития пролежней. Среди них основная группа риска – пациенты, сидящие в инвалидной коляске более восьми часов в день. При этом основные зоны тела, контактирующие с коляской, – лопатки, седалищные зоны и пятки.

Предлагаемая система контроля состояния пациентов включает шесть датчиков, установленных в стратегических зонах инвалидной коляски (спинка, сиденье и подставка для ног с обеих сторон), соединенных со спектральным оптико-электронным интеррогатором (СОЭИ). Информация, полученная с помощью системы, позволит контролировать давление, с которым пациент давит на указанные зоны коляски, длительность нахождения в коляске, движения пациента и, кроме того, оценить частоту дыхания, возможную потерю сознания и другую информацию для раннего выявления ухудшения состояния.

В то время как типичная однородная волоконная брэгговская решетка (ВБР) составляет в длину до 5 мм, а минимальное расстояние между чувствительными элементами обычно ограничено 10 мм, типичная длина линейно-чирпированной ВБР (ЛЧВБР) составляет 15–50 мм, и потенциально может иметь пространственное разрешение в пределах одного миллиметра. С этой точки зрения датчики ЛЧВБР могут стать хорошей альтернативой точечным ВБР с π-сдвигом, которые отличаются от ВБР более высокой разрешающей способностью, поскольку в одной ЛЧВБР можно сформировать несколько таких сдвигов.

Формирование фазовых сдвигов или окон прозрачности в отражающем спектре ЛЧВБР позволит осуществить функцию переноса информации о воздействии на датчик, формируемой в

оптическом диапазоне, в радиочастотный микроволновый диапазон. Обработка информации в микроволновом диапазоне существенно выигрывает по точности и разрешающей способности у оптического. Кроме того, создание радиофотонного интеррогатора позволит создать устройство на 2–3 порядка более дешевое, чем СОЭИ.

Для реализации в датчиках давления радиофотонных принципов можно использовать и две ЛЧВБР без фазовых сдвигов, так и две ЛЧВБР с записью фазового сдвига, например, по центру решеток. Рассмотрим оба варианта, при этом решетки соединены последовательно, одна из них является опорной, а вторая измерительной. Зондируются пары решеток ЛЧМ сигналом.

Система на основе ЛЧВБР без фазовых сдвигов

Для защиты целостности измерительная ЛЧВБР встраивается в специальную упругую капсулу. Таким образом, когда на капсулу давит пациент, капсула растягивается, вызывая деформацию в оптическом волокне, и, следовательно, сдвиг отраженной длины волн Брэгга ЛЧВБР.

Известно, что сдвиг длины волны Брэгга в зависимости от величины приложенной деформации к ЛЧВБР можно выразить как прямо-пропорциональную зависимость от величины деформации.

Для ЛЧВБР с известной скоростью чирпа можно получить связь между временной задержкой, вызванной сдвигом центральной (брэгговской) длины волны в силу приложенной деформации и частотой биений между ее положением для опорной решетки и смещенным положением для измерительной решетки, зависящим от величины приложенной деформации и скорости изменения зондирующего ЛЧМ сигнала.

Путем измерения с помощью электронного векторного анализатора спектра (ЭВАС) сдвига частоты сигнала биений, вызванного изменением временной задержки, можно определить величину приложенной деформации и соответствующего ей давления, с каким пациент опирается на контрольные зоны коляски. Дополнительным преимуществом является тот факт, что схема не чувствительна к температуре, в силу близкого расположения решеток друг к другу.

Несмотря на полученные преимущества схемы радиофотонной интеррогации и возможность получить погрешность измерения давления с разрешением 0,25 με по вызванной им деформации, схема достаточно сложна в реализации и конструктивно позволяет опрашивать только один-два датчика в условиях конечного коэффициента отражения решеток.

Система на основе ЛЧВБР с одним фазовым π-сдвигом

Для упрощения схемы было предложено записать ЛЧВБР с одним фазовым π-сдвигом, расположенным в центре решеток.

В этом случае частота биений, соответствующая сдвигу брэгговской длины волны измерительной решетки, вычисляется как разностная частота между положениями окон прозрачности π-ЛЧВБР1 и π-ЛЧВБР2, которое пропорционально давлению, приложенному ко второму датчику. Система опроса датчиков существенно упрощается, может использоваться не ЛЧМ сигнал, а широкополосный источник, ширина которого определяется температурой хождения датчиков. Разрешающая способность будет определяться разрешающей способностью ЭВАС, которая в принципе может быть на два порядка выше, чем у ВБР.

В работе представлены результаты проектирования системы сбора информации, предназначенной для предотвращения пролежней у пациентов, находящихся в инвалидной коляске. В основе сенсорной части системы впервые используются датчики давления на основе π-ЛЧВБР. Применение таких решеток и разработанных радиофотонных методов их опроса позволило как увеличить точность контроля положения пациента, так и снизить стоимость системы опроса датчиков на 2–3 порядка по сравнению с СОЭИ.

Работа выполнена в рамках государственного задания КНИТУ-КАИ в соответствии с Соглашением № 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020).

А. С. Ященко, С. В. Кривальцевич
Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН (Омск)

ЭФФЕКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ПРОВОДИМОСТИ ПОЧВ ЕСТЕСТВЕННОГО СЛОЖЕНИЯ

Аннотация. Приведены результаты оценки эффективной диэлектрической проницаемости почв для нескольких профилей влажности, измеренных контактными методами. Найдено, что величина эффективной диэлектрической проницаемости зависит от влажности почв в слое до двух метров. Показано, что в процессе испарения почвенной влаги эффективные диэлектрические характеристики почв существенно изменяются.
Ключевые слова: распространение радиоволн, земная волна, подстилающая поверхность.

A. S. Yashchenko, S. V. Krivatsevich
Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center SB RAS (Omsk)

THE EFFECTIVE VALUE OF SOIL'S DIELECTRIC PERMETTIVITY AND CONDUCTIVITY IN NATURE STATE

Abstract. The results of estimate of the soil's effective dielectric permittivity for several moisture profiles measured by contact methods are presented. It was found that the value of the effective dielectric permittivity depends on the soil moisture content in the layer up to 2 meters. It is shown that during the process of evaporation of soil moisture, the effective dielectric characteristics of soils change significantly.
Keywords: wave propagation, ground wave, underlying surface.

Известно, что актуальная и своевременно полученная информация о состоянии подстилающей поверхности востребована в таких научных направлениях, как климатология, метеорология, гидрология и др. Так, влажность поверхности почвы является одной из климатических переменных, рекомендованной Всемирной метеорологической организацией для постоянного наблюдения. Ввиду этого факта достоверные и актуальные данные о характере и направлении потоков влаги являются одними из главных входных параметров климатических моделей. Также данные о запасах продуктивной влаги в почве находят применение в такой отрасли экономики, как сельское хозяйство. Однако информация о влажности почвы может быть полезна при прогнозировании распространения радиоволн, что на первый взгляд не является очевидным фактом.

Характер взаимодействия электромагнитных волн с поверхностью того или иного объекта определяется радиофизическими характеристиками веществ его слагающих. К основным радиофизическим характеристикам веществ и материалов можно отнести диэлектрическую и магнитную проницаемости, а также величины, с ними связанные. Поскольку значения магнитной проницаемости природных сред мало отличаются от единицы, основным параметром, определяющим особенности взаимодействия электромагнитных волн с природными объектами, является комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП). Данные о КДП подстилающей поверхности позволяют прогнозировать характер распространения земной электромагнитной волны, отражения пространственных электромагнитных волн от подстилающей поверхности, излучения волн антенно-фидерным устройством (АФУ) и др.

Известно, что величина КДП почв и грунтов является функцией многих переменных, основными из которых являются объёмная доля влаги, гранулометрический состав и содержание солей. Гранулометрический состав почв – квазипостоянный параметр, не изменяющийся в течение десятков и сотен лет. Солевой состав почв изменяется при колебании среднегодового уровня грунтовых вод, что обычно происходит в течение нескольких лет или десятилетий. Значения влажности почв могут измениться крайне быстро, например, в результате выпадения осадков. Однако известные на данный момент модели взаимодействия электромагнитных волн СВ и КВ диапазонов с подстилающей поверхностью рассматривают её как однородную изотропную диэлектрическую среду. Так, значения КДП или проводимостей почв, приведённые на соответствующих тематических картах, считаются неизменной величиной для данного участка поверхности.

Тематические карты могут содержать данные, соответствующие незамёрзшим и полностью промёрзшим почве или грунту, но они не описывают изменчивость проводимости или КДП в течение того или иного сезона.

В данной работе предлагается метод оценки эффективного значения КДП подстилающей поверхности по значению коэффициента отражения от поверхности почвы с известным профилем влажности. В процессе расчётов использовались данные о реальных профилях влажности. Отбор проб проводился в слое толщиной 2 метра. Точка отбора проб влажности находилась на юго-западе Омской области вблизи с. Гвоздёвка и имела координаты 54° 35’ 25’’ с.ш. и 71° 53’ 17’’ с.ш. Извлечение почвенных образцов осуществлялось с помощью бура Качинского. Влажность почв определялась термостатно-весовым методом. Для определения профиля КДП использовались диэлько-влажностные зависимости, измеренные в лабораторных условиях. При расчётах почва в пределах глубины отбора проб влажности представлялась в виде плоскослоистой среды с усреднёнными в пределах слоя значениями КДП. Оценка коэффициента отражения осуществлялась с помощью итерационного применения модели, позволяющей определить коэффициент отражения от двухслойной среды. В дальнейшем найденное значение коэффициента отражения использовалось для определения КДП однородной среды, имеющей такой же коэффициент отражения. Найденное таким образом значение КДП мы определяли как эффективное.

Проведённый анализ данных об эффективных значениях КДП показал, что они определяются значениями влажности почв в слое от 0,5 до 2 м для почв с высокой и низкой влажностями соответственно. При испарении эффективные значения КДП заметно изменяются, что объясняется изменением вида профиля влажности в поверхностном слое почв. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учёта изменчивости эффективных значений КДП при прогнозировании распространения радиоволн.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (номер госрегистрации проекта в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А19-119052890058-2).

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА, ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

В. И. Акселевич, Г. И. Мазуров
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (Санкт-Петербург)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ИМ

Аннотация. Рассматриваются средства дистанционного зондирования на предмет их использования в технологии прогнозирования природных пожаров и организации противодействия им. Исследуются возможности инструментов дистанционного зондирования для определения интегральных параметров влагосодержания безоблачной атмосферы и облаков: влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. Обсуждаются методы оценки влагозапаса подстилающей поверхности.

Ключевые слова: влагозапас атмосферы, водозапас облаков, СВЧ-радиометрия, беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

V. I. Akselevich, G. I. Mazurov
Voeikov Main Geophysical Observatory (Saint Petersburg)

PROSPECTS FOR THE USE OF REMOTE SENSING MEANS FOR THE FORECAST OF NATURAL FIRES AND ORGANIZATION OF THEIR RESISTANCE

Abstract. Remote sensing devices are considered for their use in technology for predicting natural fires and organizing counteraction to them. The possibilities of remote sensing instruments for determining the integral parameters of the moisture content of a cloudless atmosphere and clouds are studied: atmospheric moisture content and cloud water reserve. Methods for assessing the moisture content of the underlying surface are discussed.

Keywords: atmospheric moisture reserve, cloud water reserve, microwave radiometry, unmanned aerial vehicles (UAVs).

Современные методы и средства дистанционного зондирования весьма разнообразны и многочисленны, что существенно расширяет предполагаемый диапазон их применения. Для осуществления важной государственной задачи прогноза природных пожаров и организации противодействия им целесообразно обеспечить определение интегральных характеристик влагосодержания атмосферы и влагозапаса подстилающей поверхности. Для этого необходимо привлечь радиометры различных вариантов базирования, радиозонды, радиосигналы космических аппаратов, профилемеры и радиолокаторы. С помощью радиометров на спутниках и БПЛА оценивается влагозапас подстилающей поверхности, уточняются размеры и координаты опасных зон.

СВЧ-радиометрия (СВЧ-РМ) основана на приеме собственного излучения подстилающей поверхности. Это эффективный способ дистанционного зондирования, позволяющий определять такие важные для прогноза природных пожаров и организации противодействия им геофизические параметры, как влажность почвы, пожароопасность лесов и торфяников. Общепризнанными достоинствами СВЧ-РМ являются всепогодность, относительная дешевизна и простота аппаратуры, а главным недостатком – низкая разрешающая способность, ограниченная размерами апертур используемых антенн.

СВЧ-радиометрические приборы широко используются в дистанционных исследованиях окружающей среды. Это связано с тем, что с их помощью можно получить в любое время суток и независимо от погодных условий такие данные, которые невозможно или очень трудно получить другими методами. В настоящее время получили развитие и широкое применение СВЧ-

радиометрическне методы дистанционного определения влажностных характеристик почвогрунтов. В теоретическом и экспериментальном плане наиболее полно изучены особенности взаимосвязи характеристик поля СВЧ-излучения (коэффициента излучения и толщины эффективно излучающего слоя) однородно увлажненных почвогрунтов с влажностью, плотностью, температурой, степенью минерализации почвенного раствора. Получены теоретические оценки и выполнены эксперименты по влиянию переменно увлажненных слоев на характеристики СВЧ-излучения. Использование в качестве платформ беспилотных летающих аппаратов (БПЛА) позволяет за счет малой высоты полета (50–300 м) повысить разрешение на местности. За счет более низкой стоимости платформ и их эксплуатации можно существенно повысить рентабельность работ.

Исследована зависимость интенсивности излучения от уровня залегания грунтовых вод в характерных почвенно-климатических зонах, а также изучено экранирующее влияние различных типов сельскохозяйственных культур. Результаты научных и опытно-производственных исследований показали, что методами СВЧ-радиометрии обеспечивается получение оценок 7–10 градаций влажности в почвенном слое толщиной (0,1–1,0)λ, в зависимости от особенностей увлажнения и 3–7 градаций уровня грунтовых вод в интервале глубин от 0 до 1,5–3,5 м в зависимости от почвенно-климатической зоны.

Полученные результаты показали высокую эффективность совместного использования данных спектральных СВЧ-радиометрических измерений и дополнительной информации о водно-физических свойствах почвогрунтов для оценки параметров профиля влажности и интегральных значений влагосодержания в метровом слое почвы. С достаточно хорошей точностью эта методика позволяет получать оценки профиля влажности, что открывает реальные возможности решения важной прикладной задачи – оперативного получения информации о влагозапасах метрового слоя почвы. Однако эффективная реализация предложенной методики возможна лишь при автоматизированной обработке результатов дистанционных измерений и дополнительной информации.

Мониторинг термоаномалий и очагов пожаров осуществляет оператор российских космических средств дистанционного зондирования Земли Госкорпорации «Роскосмос» (Научный центр оперативного мониторинга Земли «Российские космические системы»).

В 2020 году с целью решения задач космического мониторинга территорий, подверженных лесным пожарам используется отечественная система ДЗЗ в следующем составе: космические аппараты «Метеор-М» № 1, 2, 2-2; «Электро-Л» № 2, 3; «Ресурс-П» № 1, 3; «Канопус-В» № 1, 3, 4, 5, 6 и «Канопус-В-ИК». Для решения задач мониторинга пожаров может привлекаться Белорусский космический аппарат, а при активации Международной Хартии по космосу и крупным катастрофам в интересах МЧС России возможно одновременно задействовать до двадцати спутников с оптико-электронной аппаратурой с разрешением 1 м, до тринадцати — с разрешением 2–30 м и пять радиолокационных аппаратов с разрешением 1–35 м.

Среди перспективных радиометров спутникового базирования необходимо выделить инфракрасный радиометр высокого разрешения (РИВР) для многоцелевого лабораторного модуля «Наука» российского сегмента Международной космической станции (МКС). Радиометр позволит, в частности, обнаруживать очаги лесных и подземных пожаров. По сочетанию основных характеристик РИВР не имеет аналогов среди отечественных и зарубежных инфракрасных систем ДЗЗ: при разрешающей способности в 30 метров одновременно в двух инфракрасных диапазонах он обеспечивает полосу захвата в 70 км. Завершение работ по созданию аппаратуры планируется холдингом «Российские космические системы» в 2022 году.

Говоря об интегральных характеристиках влагосодержания атмосферы в первую очередь выделим влагозапас атмосферы и водозапас облаков. Получение количественной информации о влагозапасе атмосферы связано с использованием измерений наземными и спутниковыми приборами. Эталонным остается измерение влагозапаса атмосферы с помощью радиозондирования. Широко используется оценка влагозапаса по данным наземной регистрации радиосигналов космических аппаратов и измерения времени задержки сигналов. Возможно также восстановление параметров атмосферы по измеренным фазам и амплитудам радиосигналов при использовании радиозатменного метода. Методы оценки влагозапаса атмосферы по данным спутниковых измерений можно разделить на 4 группы: ближний инфракрасный диапазон, микроволновые сканирующие радиометры, инфракрасный спектр и гиперспектральные методы. Это повысит надежность прогноза пожароопасной обстановки.

Работа выполнена по личной инициативе в рамках раздела 6.2.3 Плана НТП на 2020–2024 гг.

Б. В.Басанов[1], А. В. Базаров[1], Б. З. Гармаев[1],
Ю. Б. Башкуев[1], Е. Ю. Коровин[2], Е. Б. Атутов[1]
[1] Институт физического материаловедения СО РАН (Улан-Удэ)
[2] Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ПРИ ЧАСТОТЕ 30 ГГц

Аннотация. Описаны способ и устройство для измерения диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость рассчитывается из условий максимума и минимума измеренной интерференционной зависимости коэффициента отражения от ширины слоя. Приведены теоретические и экспериментальные зависимости мощности отраженного сигнала от глубины погружения пластины на частоте 30 ГГц. Полученные данные хорошо согласуются.
Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость жидкостей.

B. V. Bazanov[1], A. V. Bazarov[1], B. Z. Garmaev[1],
Yu. B. Bashkuev[1], E. Yu.Korovin[2], E. B. Atutov[1]
[1] Institute of Physical Materials Science SB RAS (Ulan-Ude)
[2] National Research Tomsk State University (Tomsk)

DETERMINATION OF THE RELATIVE DIELECTRIC PERMEABILITY OF A TRANSFORMER OIL AT A FREQUENCY OF 30 GHz

Abstract. Described is a method and a device for measuring the dielectric constant of liquid dielectrics. The dielectric constant is calculated from the conditions of the maximum and minimum of the measured interference dependence of the reflection coefficient on the layer width. The theoretical and experimental dependences of the reflected signal power on the immersion depth of the plate at a frequency of 30 GHz, are presented. The obtained data are in good agreement.
Keywords: dielectric constant of liquids.

Ранее авторами был предложен способ определения комплексной диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков. Суть изобретения заключалось в подборе и сравнении теоретической зависимости коэффициента отражения от ширины зондируемого слоя с измеренной. При расчете использовалась формула для трех слоев, где первый слой – это воздух, второй – исследуемая жидкость, а третий – металл. Однако такой подход, как оказалось, малопригоден для определения второго знака после запятой обеих частей комплексной диэлектрической проницаемости: при их различных сочетаниях возможны не плохие совпадения расчетных и измеренных графиков.

Целью данной работы – представить более развитый способ определения диэлектрической проницаемости жидкостей на примере трансформаторного масла как вещества с малым поглощением при частоте облучающего поля 30 ГГц.

Экспериментальная установка представляет собой следующее. В качестве приемо-передающего устройства использовался КСВН Р2-65. Концы открытого волновода излучают и принимают линейно поляризованную электромагнитную волну по нормали к поверхности жидкости. Параллельно поверхности жидкости на разных глубинах фиксируется металлическая пластина. Определяется зависимость коэффициента отражения от глубины погружения металлической пластины. Из условия максимума и минимума интерференционной зависимости отражательной способности вычисляется диэлектрическая проницаемость. Расчетная и экспериментальная зависимость отраженного сигнала от ширины слоя находятся в хорошем согласии: расхождение не превышает 10%.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН. Тема № 0336-2020-0006 «Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

П. П. Бобров, Т. А. Беляева, Е. С. Крошка, О. В. Родионова
Омский государственный педагогический университет (Омск)

О ПАРАМЕТРАХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЧВ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В АЛГОРИТМЕ SMOS

Аннотация. Рассмотрены особенности четырехкомпонентной рефракционной диэлектрической модели влажных почв. Приведены типичные значения параметров модели Дебая связанной воды, получаемые при обработке экспериментальных данных с помощью этой модели. Объяснены причины, по которым параметры модели Дебая свободной почвенной воды в этой модели отличаются от истинных значений этих параметров. Показано, что превышение значений статической проницаемости и удельной проводимости относительно истинных значений вызвано релаксационным процессом Максвелла-Вагнера со временем релаксации в единицы наносекунд.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, удельная электрическая проводимость, рефракционная модель, модель Дебая, релаксация Максвелла-Вагнера.

P. P. Bobrov, T. A. Belyaeva, E. S. Kroshka, O. V. Rodionova
Omsk State Pedagogical University (Omsk)

ABOUT THE PARAMETERS OF THE DIELECTRIC MODEL OF SOILS USED IN THE SMOS ALGORITHM

Abstract. The features of the four-component refractive dielectric model of moist soils are considered. Typical values of the parameters of the Debye model of bound water obtained by processing experimental data using this model are given. The reasons why the parameters of the Debye model of free soil water in this model differ from the true values of these parameters are explained. It is shown that the excess of the static permeability and specific conductivity values relative to the true values is caused by the Maxwell-Wagner relaxation process with a relaxation time of several nanoseconds.

Keywords: dielectric constant, electrical conductivity, refractive model, Debye model, Maxwell-Wagner relaxation.

Запущенный в 2009 г. Европейским космическим агентством аппарат по программе SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) одной из целей имеет измерение влажности почв по их радиотепловому излучению на частоте 1,4 ГГц. Важным элементом алгоритма восстановления значений влажности является модель комплексной диэлектрической проницаемости почв. В первые годы функционирования аппарата использовалась диэлектрическая модель Добсона. В настоящее время используется рефракционная модель Миронова, показавшая более высокую точность связи комплексной диэлектрической проницаемости почв (КДП) с ее влажностью. В этой модели зависимости от влажности определяются не для диэлектрической проницаемости, а для действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления, потому модель и называется рефракционной. Влажная почва представлена как смесь твердой фазы (почвенные частицы), воздуха, связанной воды и свободной воды. При этом предполагается, что межфазное взаимодействие не влияет на диэлектрическую проницаемость на частоте 1,4 ГГц. Показатель преломления почвы определяется как сумма произведений показателей преломления компонент смеси на их объемные доли.

При увлажнении сухой почвы первые порции молекул воды в равновесных условиях занимают наиболее активные адсорбционные центры поверхности. Молекулы воды сильно связаны с центрами, их подвижность и способность к вращению очень мала, поэтому мала и диэлектрическая проницаемость. Это так называемая связанная вода. Ее количество в разных почвах различно и определяется удельной поверхностью почвенных частиц. В песках с крупными зернами удельная поверхность мала и связанная вода практически отсутствует. В глинистых почвах с высокой удельной поверхностью количество связанной воды может достигать 20–22% от общего объема. Свойства следующих порций почвенной влаги близки к свойствам обычной воды. Хотя в действительности и не существует резких границ раздела между слоями, изменение диэлектрических свойств воды при увеличении общего влагосодержания происходит быстро, и на зависимостях

действительной и мнимой частей показателя преломления влажность, соответствующая предельному количеству связанной влаги, определяется достаточно четко. При этом действительная и мнимая части показателя преломления почти линейно зависят от общей влажности, точнее, зависимость является линейно-ломаной. Поскольку показатель преломления связанной воды меньше показателя преломления свободной воды, наклон прямой, соответствующий малой влажности почвы, меньше, чем наклон в области большой влажности.

Параметры модели (показатели преломления твердой фазы, связанной и свободной воды, количество связанной воды) определяются путем подгонки результатов расчетов по модели к экспериментальным данным. Частотные зависимости связанной и свободной воды определяются по модели Дебая. Параметры модели Дебая связанной воды определяются при отсутствии в почве свободной воды. Поскольку связанная вода не может быть отделена от поверхности почвенных частиц, ее диэлектрические параметры можно определить только с помощью моделей диэлектрических смесей. Естественно, что при использовании разных моделей смесей можно получать и разные диэлектрические характеристики связанной воды. Согласно рефракционной модели, в разных почвах статическая проницаемость связанной воды изменяется от 20 до 50 ед., а время релаксации – от 10 до 30 пс. Однако в задачах дистанционного зондирования важнее знать зависимость общей КДП почв от влажности и точной информации о КДП связанной воды не требуется.

Особенностью четырехкомпонентной рефракционной модели является отличие подбираемых для соответствия эксперименту значений параметров модели Дебая свободной почвенной воды от истинных значений модели для свободной воды. В ряде работ, посвященных исследованию этой модели, приводятся разные значения параметров. В одной из статей приведено значение статической проницаемости ε_S =100. Чаще всего приводятся значения КДП свободной почвенной воды на рабочей частоте радиометра SMOS (1,4 ГГц). При температурах 22–25 °С получены следующие значения КДП: для песчаной почвы $\varepsilon^* = 85{,}7 - i12{,}8$, для суглинистой почвы – $\varepsilon^* = 106{,}8 - i29{,}2$, для слабоглинистой почвы (содержание глины 10 %) – $\varepsilon^* = 97{,}3 - i13{,}8$ и при содержании глины 55% – $\varepsilon^* = 97{,}9 - i27{,}1$. Согласно модели Дебая, при температуре 25°С на частоте 1,4 ГГц КДП свободной воды должна быть равной $\varepsilon^* = 77{,}96 - i5{,}21$, а статическая проницаемость равной $\varepsilon_S = 78{,}3$. Кроме того, для подгонки к результатам эксперимента нужно выбирать высокие значения удельной проводимости воды – от 0,4 до 1,4 См/м, хотя при проведении эксперимента почвы увлажнялись дистиллированной водой. Объяснение указанных расхождений в этих работах не дается.

Нами показано, что на частотах ниже 1 ГГц на диэлектрическую проницаемость почв сильно влияют релаксационные процессы, вызванные поляризацией межфазных границ. Высокочастотный процесс со временем релаксации в 10–15 наносекунд (частота релаксации 10–15 МГц) оказывает определенное влияние и на частоты выше 1,4 ГГц, особенно на мнимую часть КДП из-за высокого коэффициента распределения времен релаксации. В используемой нами комбинированной модели, включающей рефракционную и релаксационную части, КДП свободной почвенной воды рассчитывается по модели Дебая при статической проницаемости $\varepsilon_S = 78{,}3$ и времени релаксации 8,1 пс, а удельная проводимость связанной и свободной воды принимается равной нулю. При этом повышенные значения действительной и мнимой частей КДП почв объясняются влиянием релаксационного процесса, описываемого моделью Коула-Коула.

Таким образом, применение комбинированной модели позволяет получить хорошее согласие с экспериментом при использовании в рефракционной ее части модели Дебая для свободной воды.

П. П. Бобров, Т. А. Беляева, Е. С. Крошка, О. В. Родионова
Омский государственный педагогический университет (Омск)

СВЯЗЬ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ С ПРОВОДИМОСТЬЮ СЛАБОЗАСОЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ПЕСКА

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных измерений комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) песка и порошков кварцевых гранул, насыщаемых солевым раствором с проводимостью от 0 до 0,77 См/м. Показано, что в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц диэлектрические характеристики можно моделировать тремя релаксационными процессами. Для двух низкочастотных процессов найдены регрессионные уравнения, связывающие параметры процессов с удельной проводимостью образцов на частоте 5 кГц. С использованием полученных уравнений и результатов измерения КДП на частоте 1 ГГц получены расчетные спектры КДП образцов крупного песка.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, удельная электрическая проводимость, засоленные пески, процессы диэлектрической релаксации.

P. P. Bobrov, T. A. Belyaeva, E. S. Kroshka, O. V. Rodionova
Omsk State Pedagogical University (Omsk)

RELATIONSHIP OF LOW-FREQUENCY DIELECTRIC PERMITTIVITY WITH THE CONDUCTIVITY OF LOW-SALTED SAND SAMPLES

Abstract. The results of experimental measurements of the complex dielectric permittivity (CDP) of sand and powders of quartz granules saturated with a saline solution with a conductivity from 0 to 0,77 S/m are presented. It is shown that in the frequency range from 10 kHz to 100 MHz, the dielectric characteristics can be modeled by three relaxation processes. For two low-frequency processes, regression equations that relate the parameters of the processes with the specific conductivity of the samples at a frequency of 5 kHz are found. Using the obtained equations and the results of CDP measuring at a frequency of 1 GHz, the calculated CDP spectra of coarse sand samples were obtained.

Keywords: dielectric permittivity, specific electrical conductivity, saline sands, dielectric relaxation processes.

Диэлектрические свойства почвы в широком диапазоне частот от единиц килогерц до единиц и десятков гигагерц важны для многих технических применений. Хорошо исследованы свойства почв, не содержащих много глины. В диапазоне частот от 0,1 до 15–25 ГГц их диэлектрические свойства хорошо описываются моделями диэлектрической смеси. В низкочастотном диапазоне от долей герца до десятков килогерц исследованию почв и пород посвящено большое количество работ, что связано с применением явления вызванной поляризации (ВП) для изучения геологических сред. Хорошо известны тесные связи между комплексной проводимостью и геометрией порового пространства, а также высокая чувствительность к даже небольшим изменениям параметров, характеризующих поровое пространство. В песках на спектры комплексной проводимости преобладающее влияние оказывает поляризация двойного электрического слоя (ДЭС), особенно его внутренней части, называемой слоем Штерна, и поляризация Максвелла-Вагнера, по разным данным влияющая на частотах выше 100 Гц или выше 5 кГц. Поляризация ДЭС приводит к частотно-зависимой комплексной поверхностной проводимости. Кроме поверхностной проводимости, существует объемная проводимость, влияние которой становится преобладающим при высокой минерализации порового раствора.

Труднее всего интерпретации поддаются результаты диэлектрических измерений в диапазоне частот от единиц килогерц до десятков мегагерц, где основное влияние оказывают многочастотные процессы диэлектрической релаксации Максвелла-Вагнера.

В настоящей работе проведено исследование спектров диэлектрической проницаемости двух фракций речного песка и порошков кварцевых гранул двух размеров и показано, что в некоторых случаях параметры модели, характеризующей комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) в килогерцовом и мегагерцовом диапазонах, имеют высокую корреляционную связь с удельной проводимостью образцов.

КДП образцов при насыщении флюидами (вода, раствор соли NaCl) измерялась в сплошном спектре от 1 кГц до 5 ГГц с помощью измерителя импедансов E4990A фирмы Keysight Technologies (рабочий диапазон частот 20 Гц – 10 МГц) и векторного анализатора ZNB20 фирмы Rohde & Schwarz (100 кГц – 20 ГГц). Для аппроксимации спектров КДП использовалась модель, включающая измеренную КДП образца на частоте 1 ГГц и формулы Дебая и Коула-Коула для описания трех релаксационных процессов.

Первый релаксационный процесс оказывает влияние на низкочастотную часть диэлектрического спектра (ниже 20–40 кГц). На этих частотах достаточно сильным является влияние релаксации двойного электрического слоя (ДЭС). Второй, среднечастотный, релаксационный процесс имеет широкий спектр времен релаксации и, хотя средние частоты релаксации в разных образцах составляют от 50 до 100 кГц, его влияние проявляется в диапазоне частот от 20 кГц до 10–30 МГц. Третий, высокочастотный, процесс действует на частотах от 10–30 МГц до 0,5–1 ГГц. Его интенсивность невелика, он оказывает существенное влияние на спектр диэлектрической проницаемости в образцах с мелкими частицами и при средней водонасыщенности. Параметры модели определялись путем минимизации невязки между расчетными и экспериментальными данными в диапазоне частот от 10 кГц до 1 ГГц

Измерения удельной проводимости на частоте 5 кГц показали, что в крупном песке проводимость почти линейно возрастает при увеличении объемной доли раствора в образце. Она возрастает также при увеличении концентрации раствора, но в этом случае нет линейной зависимости. В образцах с мелкими частицами зависимость от концентрации раствора очень слабая, но при увеличении объемной доли раствора выше 0,27–0,3 наблюдается явление перколяции, приводящее к резкому возрастанию проводимости образца. Несмотря на разный характер зависимости проводимости от доли раствора в разных образцах интенсивность двух низкочастотных релаксационных процессов имеет тесную корреляционную связь с проводимостью образцов. Это связано с тем, что существенный вклад и в проводимость, и в диэлектрическую релаксацию вносят электрические свойства ДЭС. Однако общая проводимость образца осуществляется как поверхностной, так и объемной проводимостью, а низкочастотные релаксационные процессы зависят в основном от поляризации ДЭС, т.е. только от поверхностной проводимости. Поэтому корреляция КДП не может быть очень высокой, так как и на проводимость, и на диэлектрическую релаксацию по отдельности влияют еще и другие, разные для этих явлений механизмы. Это проявляется в слабой корреляционной связи времен релаксации.

В работе показано, что информация об удельной проводимости образца и диэлектрической проницаемости на частоте около 1 ГГц позволяет восстановить спектр КДП на частотах от 10 кГц до 10 МГц с приемлемой для некоторых задач точностью. Пока это удается сделать только для песчаных пород с небольшой степенью засоления. Средние значения отклонения расчетных данных действительной части КДП от экспериментальных значений в диапазоне частот 10 кГц – 10 МГц составили 10–30%, максимальные – от 20 до 70%. Средние значения отклонений мнимой части КДП составили 6–10%, максимальные 8–15%.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-05-00395.

Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев, В. Б. Венславский, М. В. Ведров
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (Чита)

ОСОБЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛЕДЯНЫХ ПОКРОВОВ ИВАНО-АРАХЛЕЙСКИХ ОЗЕР ПО ДАННЫМ SENTINEL-1A

Аннотация. Показана возможность выявления внутренних неоднородностей в виде различного рода примесей, вмороженных в ледяной покров пресного водоема, по радиоизображениям, полученным с КА Sentinel-1A. Максимальный контраст проявления примесей во льду на радиолокационных снимках наблюдается перед началом деструкции ледяного покрова. Подспутниковые активные и пассивные измерения с наземных носителей показали хорошее совпадение полученных данных с КА и прямых измерений.

Ключевые слова: Sentinel-1, микроволновый диапазон, неоднородности ледяного покрова, пресный водоем, активная радиолокация.

G. S. Bordonskiy, A. A. Gurulev, V. B. Venslavskiy, M. V. Vedrov
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS (Chita)

PECULIARITIES OF RADAR IMAGES OF ICE COVER OF IVANO-ARAKHLEY LAKES ACCORDING TO SENTINEL-1A

Abstract. The possibility of detecting internal inhomogeneities in the form of various kinds of impurities frozen into the ice cover of a fresh water body is shown by radio images obtained from the Sentinel-1A spacecraft. The maximum contrast in the manifestation of impurities in ice on radar images is observed before the beginning of the destruction of the ice cover. Sub-satellite radar measurements from ground carriers showed good match of these and the spacecraft data.

Keywords: Sentinel-1, microwaves, ice cover inhomogeneities, fresh water, radar.

В момент становления ледяного покрова в него происходит захват различного рода включений. К таким включениям относятся: фрагменты высшей водной растительности, солевые капсулы, минеральные частицы и газовые пузыри, выделяющиеся с течением времени со дна водоема, как в результате разложения органических веществ, так и из геологических структур (донные отложения, угольные, нефтяные и газовые месторождения, газы из глубин Земли). При длительном существовании ледяного покрова количество примесей увеличивается, но при этом общее содержание солей в ледяном покрове может сильно уменьшаться. Так на оз. Арахлей (Забайкальский край) количество солей во льду уменьшается с 20 до 1 мг/кг с декабря по февраль. По количеству примесей во льду, а также по их пространственному распределению можно судить о состоянии водоема и его областях загрязнения. Таким образом, ледяной покров пресных водоемов может служить индикатором их состояния.

В работах Г.С. Бордонского с соавторами проведены исследования, которые показывают, что пассивные радиолокационные методы исследования ледяных покровов пресных и слабосоленых водоемов позволяют определить уровень минерализации исходных вод, причем оптимальная частота для этих целей является частота, находящаяся вблизи 10…15 ГГц. Данный диапазон длин волн имеет ряд преимуществ, например, меньшую подверженность атмосферной влаги. Однако при пассивном методе мониторинга водных объектов имеется недостаток, который связан с тем, что при зондировании из космоса получается плохое пространственное разрешение. Эта проблема решается методами синтезирования апертуры. Примером может служить спутник Sentinel-1A, радар которого имеют пространственное разрешение в С-диапазоне при маршрутном режиме съемки 5×5 м^2. Благодаря этому способу с использованием космического аппарата можно решать более широкий круг прикладных задач.

Объектом исследований в нашей работе были выбраны Ивано-Арахлейские озера, расположенные в Забайкальском крае. В зимний период времени толщина ледяного покрова достигает 1,4 м, снежный покров обычно не превышает 0,2 м. Существуют участки льда, свободные от

снежного покрова. Сильные колебания суточных температур приводят к заметному метаморфизму ледяных покровов этих озер и усилению контрастов радиоизображений.

Одно из озер, которое было нами исследовано по радиолокационным снимкам, – оз. Шакшинское, которое является эвтрофным водоемом. На радиолокационных снимках в зимний период времени нами были обнаружены области водоема, которые имеют высокий коэффициент обратного рассеяния. При натурных измерениях в этих областях наблюдаются газовые пузыри, вмерзшие в ледяной покров, а также фрагменты высшей водной растительности. Кроме того, хорошо отслеживаются торосы, которые образуются в результате ветровых и термических воздействий на ледяной покров. Заметно влияние рельефа дна на структуру изображений.

Сравнение серий снимков в течение зимнего периода 2015–2016 гг. показало, что максимальный контраст в радиолокационных снимках, выявляющих внутренние неоднородности, наблюдается в весенний период времени перед началом деструкции ледяного покрова. Активные и пассивные измерения с наземного носителя на волнах сантиметрового диапазона, показали высокую корреляцию наземных измерений со спутниковыми снимками. Следует отметить, что активная радиолокация не заменяет пассивную. Они дополняют друг друга, что ранее было отмечено в работе Г.С. Бордонского с соавторами при исследовании эвтрофированного водоема.

Таким образом, радиолокационные изображения внутренних водоемов в зимний период времени, полученные с космического аппарата Sentinel-1A, позволяют выявлять внутренние неоднородности во льду, сравнимые с длиной волны. Это, в свою очередь, позволяет решать ряд задач, например, выявлять области загрязнения водоемов, подтока и стока вод, образование пропарин, облегчает поиск донных органических отложений, месторождений углеводородов и т.п. Дополнительная информация может быть получена из наземных или самолетных радиометрических измерений.

П. Н. Дагуров, А. В. Дмитриев, Т. Н. Чимитдоржиев,
А. К. Балтухаев, И. И. Кирбижекова
Институт физического материаловедения СО РАН (Улан-Удэ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ РАДАРНЫХ ДАННЫХ, НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛЬНЫХ ОЦЕНОК

Аннотация. Приводятся результаты исследования возможности определения толщины и водного эквивалента снега с помощью данных космических РСА ALOS PALSAR 2 и Sentinel-1 на основе анализа амплитудных, фазовых и поляризационных характеристик радарных сигналов. В докладе также приведены результаты наземных наблюдений снежного покрова и их сопоставление с результатами радарного дистанционного зондирования. Разработана модель дистанционного зондирования, учитывающая обратное рассеяние от границы «воздух – снежный покров», рельеф местности и другие параметры.

Ключевые слова*:* снежный покров, водный эквивалент снега, спутниковый радар.

P. N. Dagurov, A. V. Dmitriev, T. N. Chimitdorzhiev,
A. K. Baltukhaev, I. I. Kirbizhekova
Institute of Physical Materials Science SB RAS (Ulan-Ude)

DETERMINATION OF SNOW COVER PARAMETERS BASED ON ANALYSIS OF SATELLITE RADAR DATA, GROUND MEASUREMENTS AND MODEL ESTIMATES

Abstract. The results of the study of the possibility of determining the thickness and the water equivalent of snow, using the data of the space SAR ALOS PALSAR 2 and Sentinel-1 based on the analysis of the amplitude, phase and polarization characteristics of radar signals, are presented. The report also presents the results of ground-based observations of snow cover and their comparison with the results of radar remote sensing. A remote sensing model has been developed that takes into account backscatter from the air-snow cover, terrain and other parameters.

Keywords: snow cover, snow water equivalent, satellite radar tic.

Определение параметров снега является одной из важных задач космического дистанционного зондирования Земли, осуществляемого в различных диапазонах электромагнитных волн активными и пассивными методами. Существенным достоинством спутникового зондирования как снежного, так и других земных покровов, в отличие от традиционных наземных методов измерения, является возможность охвата больших земных территорий. Микроволновое дистанционное зондирование дает возможность измерения высоты и водного эквивалента снега в отличие от оптического излучения, которое позволяет определить только границы снежного покрытия. Перспективным инструментом для исследования параметров снежного покрова являются активные сенсоры в виде радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) с разрешением «единицы – десятки метров».

Методы изучения характеристик снега с помощью РСА в зависимости от анализируемого параметра радиолокационного сигнала можно разделить на амплитудные, интерферометрические и поляриметрические. Амплитудные методы анализируют значения коэффициента обратного рассеяния. Расчетные оценки амплитуды сигнала РСА основаны на анализе обратного рассеяния от границ «воздух – снег», «снег – почва», а также объемного рассеяния на неоднородностях внутри снежного покрова. Такой анализ достаточно затруднителен ввиду сложности решения прямой и тем более обратной задачи восстановления параметров снега в общей постановке, когда учитывается размер частиц снега и их распределение по размерам, плотность и влажность снега, его слоистость. Экспериментальные данные также не всегда однозначны и показывают как наличие корреляции между коэффициентом обратного рассеяния и массой снега, так и отрицательную корреляцию или, вообще, отсутствие корреляционных связей.

Интерферометрические методы используют фазовую составляющую сигнала. Дифференциальная интерферометрия позволяет обнаружить изменения элементов земной поверхности с большой точностью. Использование метода дифференциальной интерферометрии показало, что он является эффективным инструментом для диагностики и мониторинга различных изменений земных покровов, в том числе и для диагностики параметров снежного покрова.

В докладе приводятся результаты исследования возможности определения толщины и водного эквивалента снега с помощью данных космических РСА ALOS PALSAR 2 и Sentinel-1 на основе анализа амплитудных, фазовых и поляризационных характеристик радарных сигналов. Результаты исследования показали, что наиболее подходящим для определения параметров снега является интерферометрический метод в L-диапазоне (ALOS PALSAR 2). В С-диапазоне (Sentinel-1) использование интерферометрического метода зачастую затруднено отсутствием достаточной когерентности, вызванной заметной декорреляцией между радарными изображениями, формирующими интерферометрическую пару. Из анализа амплитудных сигналов в обоих радарных диапазонах следует, что снежный покров в этих диапазонах практически не вызывает заметных изменений в обратном рассеянии.

Отметим выраженную сезонную зависимость поведения сигнала, обусловленную замерзанием и оттаиванием почвы, полученную с помощью снимков Sentinel-1. При замерзании диэлектрическая проницаемость почвы уменьшается и при температурах ниже –(5–7) °С практически не зависит от температуры. Поэтому уровень сигнала мало меняется в зимние месяцы. В летние месяцы наблюдаются заметные колебания интенсивности радарного сигнала, обусловленные изменение влажности почвы вследствие выпадения дождей и последующего высыхания почвы. Из полученных зависимостей следует вывод, что снежный покров не влияет на амплитуду радарного сигнала. Доказательством этого служит устойчивое уменьшение амплитуды сигнала в октябре-ноябре при замерзании почвы, тогда как снежный покров на тестовом участке вблизи озера Байкал обычно образуется в декабре. Так, снег в 2019 г. начал падать 1 декабря и шел в течение 3 дней, образовав снежный покров толщиной порядка 15–20 см. Однако этот снежный покров не повлиял на уровень радарного сигнала.

В докладе также приведены результаты наземных наблюдений снежного покрова и их сопоставления с результатами радарного дистанционного зондирования. Разработана модель дистанционного зондирования, учитывающая обратное рассеяние от границы «воздух – снежный покров», рельеф местности и другие параметры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-01051 А.

Т. М. Ишкаев, А. Р. Насыбуллин, Р. В. Фархутдинов, Ф. Ф. Нуриев
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

НЕПЛАНАРНЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ БРЭГГОВСКИЕ СВЧ СТРУКТУРЫ

Аннотация. Описаны основные результаты исследования непланарной микрополосковой брэгговской структуры. Приведен сравнительный анализ компьютерного и математического моделирования. Сформированы выводы по проделанной работе.

Ключевые слова: СВЧ, брэгговские структуры, непланарные микрополосковые структуры, периодические структуры, микрополосковые структуры.

T. M. Ishkaev, A. R. Nasibullin, R. V. Farkhutdinov, F. F. Nuriev
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

NONPLANAR MICROSTRIP BRAGG MICROWAVE STRUCTURES

Abstract. This thesis describes the main results of the study of a nonplanar microstrip Bragg structure. A comparative analysis of computer modeling and the results of mathematical modeling is presented. Conclusions on the work done were formed.

Keywords: SHF, bragg structure, non-planar microstrip structures, periodic structures, microstrip structures.

СВЧ устройства, которые можно обобщить определением структуры с периодическими неоднородностями, широко известны в теории и технике направляющих и излучающих систем. Подобные устройства, принцип действия которых основан на резонансном взаимодействии прямых и многократно отраженных от неоднородностей электромагнитных волн, нашли применение при создании фильтрующих схем, формирователей и преобразователей радиочастотных сигналов. Такие структуры принято называть брэгговскими.

Брэгговские структуры – это периодические геометрии, построенные путем повторения элементарной ячейки или конструктивного элемента в одном, двух или трех измерениях. Такие ячейки называют одномерными, двухмерными и трехмерными фотонными кристаллами соответственно. В данном случае рассматриваются исключительно одномерные фотонные кристаллы.

Планарные линии передачи получили широкое применение в устройствах СВЧ диапазона. Этому поспособствовали малые габаритные размеры, незначительная масса, возможность унификации, а также обеспечение интеграции с активными элементами СВЧ со сосредоточенными параметрами. К планарным относят разные виды микрополосковых и щелевых линий передач, а также компланарную линию. Среди всех этих разновидностей и типов на практике наиболее широко используют полосковые линии передач. Однако планарным линиям передачи свойственны некоторые недостатки, которые связаны с излучением в открытое пространство, особенно в области сантиметровых и миллиметровых длин волн. В данном случае была использована несимметричная микрополосковая линия передачи.

Исследуемая линия была реализована в виде периодической структуры Брэгга. Однако исключительность такой структуры была выражена в виде характеров периодичности. Изгибы структуры были реализованы ортогонально плоскости микрополоской линии передачи, тем самым исследуемый объект приобрел объем в двух плоскостях. После реализации такой структуры отнести ее к планарным линиям передачи будет некорректно.

Исследование структуры было реализовано на базе программы электродинамического моделирования CST Studio Suite, а также проведены математические расчеты в программе Mathcad для подтверждения корректности результатов расчетов в CST. В первом случае были проведены расчеты полной модели периодической структуры. Были получены коэффициенты передачи и отражения для частотного диапазона от 0 до 13 ГГц, с проявлениями характерных резонансов для брэгговских структур. Однако из результатов электродинамического моделирования, объективно говорить об отсутствии паразитных связей между близ расположенными микрополосковыми линиями не представляется возможным. Для этого была построена математическая модель

подобной структуры в среде Mathcad. За основу были взяты результаты вычислений CST Studio Suite для единичной «ячейки» микрополосковой непланарной брэгговской структуры и питающих ее линий. Для каждой части были получены коэффициент передачи и отражения, а также фазы сигнала во всем исследуемом диапазоне. В программе Mathcad были сформированы S матрицы рассеяния для ячейки и питающих линий во всех точках исследуемого диапазона. Для проведения вычислений за основу была взята ABCD матрица, следовательно, были проведены преобразования из S матрицы в ABCD, а после необходимых расчетов из ABCD матрицы в S.

После всех преобразований были проведены сравнения рассчитанной структуры в среде Mathcad и модели периодической структуры из CST Studio Suite. Результаты показали высокую точность метода, основанного на использовании ABCD матрицы. Однако было выявлено, наличие паразитных связей в низкочастотной области исследуемого диапазона, который не отражает CST Studio Suite. В дальнейшем будет производиться снижение паразитных связей путем оптимизации структуры.

А. Г. Козлов, Н. О. Голубятникова, О. В. Загородных
Омский государственный технический университет (Омск)

МОДЕЛЬ ИМПЕДАНСА ВЧ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА КАК ОСНОВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО СОСТОЯНИЯ

Аннотация. Предложена модель ВЧ импеданса паяного электрического контакта с трещиной на основе его эквивалентной схемы. Рассмотрены электрофизические параметры контакта с трещиной: сопротивление, емкость и индуктивность. Представлен алгоритм вычисления ВЧ импеданса паяного электрического контакта с трещиной. Определены зависимости импеданса паяного контакта от частоты сигнала и от геометрических размеров трещины.

Ключевые слова: импеданс, ВЧ электрический контакт, трещина паяного соединения, скин-слой.

A. G. Kozlov, N. O. Golubiatnikova, O. V. Zagorodnykh
Omsk State Technical University (Omsk)

HF ELECTRIC CONTACT IMPEDANCE MODEL AS A BASIS FOR INVESTIGATING ITS CONDITION

Abstract. A model of the RF impedance of a soldered electrical contact with a crack based on its equivalent circuit is proposed. The electrophysical parameters of contact with a crack are considered: resistance, capacitance and inductance. An algorithm for calculating the HF impedance of a soldered electrical contact with a crack is presented. The dependences of the impedance of the soldered contact on the signal frequency and on the geometric dimensions of the crack are determined.

Keywords: impedance, HF electrical contact, crack of a solder joint, skin-layer.

Качество передачи сигналов в высокочастотных устройствах в значительной степени зависит от состояния паяных контактных соединений. При прохождении сигнала через поврежденные контактные соединения нарушается его целостность (изменяются его параметры). Причем высокочастотные сигналы (сотни МГц и выше) являются наиболее чувствительными к деградации контактных соединений, и влияние повреждения на эти сигналы проявляется на ранних стадиях его развития.

Традиционно для оценки качества контактного паяного соединения использовалось измерение его сопротивления на постоянном токе. Однако в силу указанных выше причин оценка на основе данных измерений степени деградации контактного соединения, при которой начнется сказываться его влияние на параметры сигнала, не является адекватной. В ряде работ было показано, что высокочастотный импеданс контактного соединения может быть использован для контроля степени его деградации. Вместе с тем, отсутствие моделей, связывающих степень деградации контактного соединения с его импедансом, не позволяет использовать измерение импеданса для оценки его качества. Учитывая различные механизмы деградации контактных соединений при эксплуатации электронного устройства, построение таких моделей является сложной задачей.

Целью данного исследования является разработка и анализ модели импеданса ВЧ паяного электрического контакта с трещиной для ее использования для оценки степени деградации контакта.

Модель импеданса ВЧ электрического контакта с трещиной основана на теории микрополосковой линии передач с распределенными параметрами. Электрический контакт без повреждений рассматривается как участок в форме параллелепипеда (материал припоя) между двумя микрополосковыми линиями передачи с распределенными параметрами. Одна микрополосковая линия контактирует с нижней гранью параллелепипеда, а другая – с верхней гранью. Эквивалентная электрическая схема контакта включает распределенные по длине контакта последовательное активное сопротивление и индуктивность, а также параллельное активное сопротивление и емкость. Импеданс указанной линии определяется как отношение напряжения бегущей волны к

току на участке Δz и равен квадратному корню из отношения комплексного сопротивления последовательного участка эквивалентной схемы линии передачи к комплексной проводимости ее параллельного участка.

В процессе работы паяные соединения испытают тепловые и вибрационные нагрузки. Вследствие этого в местах с наибольшим внутренним напряжением возникают трещины, рост которых приводит к отказу соединения. Трещины, возникающие в контактном паяном соединении, приводят к изменению его электрических характеристик. Эти изменения могут быть отражены в эквивалентной схеме контакта. В частности, в последовательный участок эквивалентной схемы поврежденного контакта включаются измененное сопротивления контакта из-за появления трещины $R_{тр}$ и параллельный контур, состоящий из дополнительной емкости и индуктивности, обусловленных появлением трещины, соответственно, $C_{тр}$ и $L_{тр}$. В процессе зарождения и роста трещины указанные параметры изменяются.

Сопротивление паяного контакта с трещиной, $R_{тр}$, зависит от геометрических размеров контакта и трещины, а также от толщины скин-слоя, которая обратно пропорциональна квадратному корню от рабочей частоты. В случае, когда трещина рассматривается как тонкий прямоугольный слой, сопротивление $R_{тр}$ равно сумме сопротивление двух участков: участка слоя припоя без трещины и тонкого участка припоя, дополняющего трещину до полной ширины микрополосковой линии. Индуктивность паяного контакта с трещиной также равна сумме индуктивностей двух указанных участков. Емкость, вносимая в линию передачи паяным контактным соединением равна емкости плоского конденсатора образованного трещиной. Пластинами конденсатора служат две стороны трещины, а диэлектриком является воздушный промежуток трещины.

На основе приведенного выше анализа предложен алгоритм определения импеданса электрического контакта с трещиной на высоких частотах. Алгоритм содержит следующие шаги:

1) определяются эффективная относительная диэлектрическая проницаемость линии передачи, содержащей паяный электрический контакт;

2) определяются характеристический импеданс линии передачи, содержащей паяный электрический контакт;

3) определяется время задержки сигнала на участке линии передачи с паяным электрическим контактом длиной Δz;

4) используя полученные значения характеристического импеданса линии передачи и время задержки сигнала, вычисляются индуктивность и емкость участка линии передачи с паяным электрическим контактом длиной Δz;

5) в соответствии с текущей частотой сигнала рассчитывается глубина скин-слоя δ в контакте на участке припоя.

6) используя полученное значение глубины скин-слоя и геометрические размеры контакта и трещины, рассчитывается сопротивление паяного контакта с трещиной;

7) используя геометрические размеры контакта и трещины, рассчитывается индуктивность паяного контакта с трещиной;

8) используя геометрические размеры контакта и трещины, рассчитывается емкость, вносимая в линию передачи паяным контактом с трещиной;

9) используя полученные значения параметров элементов эквивалентной схемы паяного контакта с трещиной, вычисляется импеданс данного контакта на текущей частоте сигнала.

Представленная модель импеданса ВЧ электрического контакта с трещиной была использована для вычисления зависимости его импеданса от частоты сигнала и от геометрических размеров трещины.

М. В. Кручинина[1, 4], А. А. Громов[1], Л. В. Щербакова[1], Э. В. Кручинина[4],
В. М. Генералов[2], К. В. Генералов[2], В. Н. Кручинин[3], С. В. Рыхлицкий[3],
И. Н. Яковина[5], Н. А. Баннова[5], О. В. Минин[6], И. В. Минин[6]
[1] Научно-исследовательский институт терапии и профилактической медицины – филиал Института цитологии и генетики СО РАН (Новосибирск)
[2] Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Кольцово, Новосибирская область)
[3] Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск)
[4] Новосибирский государственный медицинский университет (Новосибирск)
[5] Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск)
[6] Томский государственный университет (Томск)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ВЯЗКОУПРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭРИТРОЦИТОВ В МОДЕЛЯХ ДИАГНОСТИКИ АДЕНОМАТОЗНЫХ ПОЛИПОВ И СТАДИЙ КОЛОРЕКТАЛЬНОГО РАКА

Аннотация. С помощью метода диэлектрофореза в неоднородном переменном электрическом поле с системой оптической детекции клеток проведено исследование электрических и вязкоупругих параметров эритроцитов в частотном диапазоне от $5x10^4$ до 10^6 МГц у 129 больных с колоректальным раком различных локализаций опухоли и стадий развития заболевания, 25 человек с аденоматозными полипами и 35 человек группы сравнения. Показано, что величины физических характеристик эритроцитов сильно различны при сопоставлении как групп контроля и пациентов с аденоматозными паолипами и больных колоректальным раком, так и групп больных с различными стадиями онкологического процесса между собой. Предложены модели-рискометры, позволяющие рассматривать метод диэлектрофореза эритроцитов как перспективный при скрининге колоректального рака.

Ключевые слова: диэлектрофорез, эритроциты, диагностика, колоректальный рак, аденоматозные полипы.

M. V. Kruchinina[1, 4], A. A. Gromov[1], L. V. Sherbakova[1], E. V. Kruchinina[4],
V. M. Generalov[2], K. V. Generalov[2], V. N. Kruchinin[3], S. V. Rykhlitskiy[3],
I. N. Yakovina[5], N. A. Bannova[5], O. V. Minin[6], I. V. Minin[6]
[1] Research Institute of Internal and Preventive Medicine – Branch of the Institute of Cytology and Genetics SB RAS (Novosibirsk)
[2] State Research Center of Virology and Biotechnology “Vector”, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being (Koltsovo, Novosibirsk Region)
[3] Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (Novosibirsk)
[4] Novosibirsk State Medical University (Novosibirsk)
[5] Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk)
[6] Tomsk State University (Tomsk)

ELECTRIC AND VISCOELASTIC ERYTHROCYTIC PARAMETERS IN DIAGNOSTIC MODELS OF ADENOMATOUS POLYPS AND STAGES OF COLORECTAL CANCER

Abstract. Using the method of dielectrophoresis in an nonuniform alternating electric field with an optical cell detection system, the electrical and viscoelastic parameters of erythrocytes were studied in the frequency range from $5x10^4$ to 10^6 MHz in 129 patients with colorectal cancer of various tumor localizations and stages of disease development, 25 people with adenomatous polyps and 35 people in the comparison group. It was shown that the values of the physical characteristics of erythrocytes are very different both when comparing the control groups and patients with adenomatous polyps and patients with colorectal cancer, and when comparing the groups of patients with different stages of the oncological process with each other. Risk meter models are proposed that allow considering the method of dielectrophoresis of erythrocytes as promising for screening colorectal cancer.

Keywords: dielectrophoresis, red blood cells, diagnostic, colorectal cancer, adenomatous polyps.

Во всем мире колоректальный рак (КРР) является третьим по распространенности типом онкологических заболеваний. Ранняя скрининговая диагностика КРР является ключом к выживанию пациентов. Диэлектрофорез (ДЭФ) клеток красной крови в неоднородном переменном электромагнитном поле (НПЭП) представляется перспективным методом с этой точки зрения. Он позволяет определить более 20 физических параметров клеток, в том числе ключевые при описании модели появления и развития патологического процесса. Цель работы – изучить возможности использования параметров эритроцитов в качестве компонентов математических моделей для диагностики стадий колоректального рака и аденоматозных полипов.

Обследованы 129 пациентов с КРР (средний возраст 62,8±9,4 лет (68 мужчин, 61 женщина), 25 человек с аденоматозными полипами (средний возраст 62,2±9,4 лет, 12 мужчин, 13 женщин) и 35 человек группы сравнения, сопоставимых по возрасту и полу (средний возраст 58,6±6,9 лет, 19 мужчин, 16 женщин). Всем пациентам и лицам группы сравнения проведено исследование электрических и вязкоупругих параметров взвесей эритроцитов методом ДЭФ с помощью оптической системы детекции клеток в частотном диапазоне от $5x10^4$ до 10^6 МГц. Оценивали средний радиус эритроцитов, доли дискоцитарных, сфероцитарных, деформированных форм эритроцитов, характер поверхности клеток, индексы агрегации и деструкции на различных частотах НПЭП, электропроводность, емкость мембран клеток, скорость движения эритроцитов к электродам, положение равновесной частоты, относительную поляризуемость, величины индуцированного дипольного момента.

Метод позволил выявить факт, что эритроциты пациентов с колоректальным раком отличались от клеток красной крови здоровых лиц снижением доли дискоцитарных за счет увеличения сфероцитарных, деформированных форм с измененным характером поверхности, склонным к образованию агрегатов и деструкции на фоне сниженных показателей поляризуемости, отражающих резистентность клеток.

По мере утяжеления заболевания (отличие ранних стадий от поздних) отмечено достоверное снижение среднего радиуса клеток, доли дискоцитов, амплитуды деформации на высоких частотах электрического поля, поляризуемости на всех частотах поля, емкости мембран, скорости движения клеток к электродам, величины дипольного момента и, напротив, значимое увеличение обобщенных показателей вязкости, жесткости, электропроводности, индексов агрегации и деструкции на всех частотах НПЭП. Продвинутые стадии КРР отличались от ранних значительным смещением равновесной частоты в высокочастотный диапазон.

У пациентов с аденоматозными полипами выявлены особенности параметров эритроцитов по сравнению со здоровыми лицами, причем тренд изменений всех параметров совпадал с таковым у пациентов с КРР, что косвенно свидетельствует о предраковой природе аденоматозных полипов.

В ходе сравнительного анализа результатов, полученных для всего множества параметров эритроцитов, удалось создать пилотные модели-рискометры, позволяющие с высокой степенью диагностической точности (0,95) оценить риск развития КРР.

А. А. Лагутин, Е. Ю. Мордвин
Алтайский государственный университет (Барнаул)

ЭМИССИЯ МЕТАНА ПРЕДПРИЯТИЯМИ НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: РЕЗУЛЬТАТЫ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Аннотация. Представлены технология и результаты оценки эмиссия метана предприятиями нефтяной промышленности на территории Западной Сибири в 2019 г. Экспериментальной базой работы являлись результаты спутниковых наблюдений. Установлено, что эмиссия метана при сжигании нефтяного попутного газа в факельных установках Западной Сибири составляет ~ 0,4 Тг. Эмиссия метана предприятиями нефтяной промышленности на территории Западной Сибири может достигать 3,1 Тг.

Ключевые слова: Западная Сибирь, предприятия нефтяной промышленности, метан, эмиссия, спутниковый мониторинг.

A. A. Lagutin, E. Yu. Mordvin
Altai State Univesity (Baranul)

METHANE EMISSION BY THE PETROLEUM INDUSTRY IN WESTERN SIBERIA: RESULTS OF SATELLITE OBSERVATIONS

Abstract. We present a technology and estimation results of methane emission by petroleum industry in Western Siberia in 2019. The results is based on the satellite observations. It was found that the methane emission from burning associated petroleum gas in the flares in Western Siberia is about 0,3 Tg. Methane emission from the petroleum industry of Western Siberia can reach 3,1 Tg.

Keywords: Western Siberia, petroleum industry, methane, emission, remote sensing.

Актуальность

По данным NOAA, полученным с использованием спутниковых наблюдений, в 2012 г. в мире функционировало 7467 факельных установок (ФУ) в 88 странах мира. В 2015 г. в этих странах установлено уже 13605 ФУ. По оценкам в 2012–2015 гг. в ФУ ежегодно сжигалось около 140 миллиардов кубометров газа, что приводило к выбросу в атмосферу порядка 300 миллионов тонн CO_2.

Следует отметить, что при сжигании нефтяного попутного газа (НПГ) в атмосферу поступают не только парниковые газы CO_2 и метан, но и окись азота, сернистый ангидрид, сажа. Окись азота NO практически сразу же реагирует с кислородом воздуха, образуя диоксид азота NO_2, который, в свою очередь, является предшественником озона и аэрозолей. Выполненные в последние годы самолетные и спутниковые наблюдения зон расположения основных предприятий нефтяной промышленности США также показывают, что дополнительно к вкладу ФУ в атмосферу поступает большое количество метана на этапах переработки нефти и ее транспортировки.

В силу отсутствия регулярных и полных данных по расположению факельных установок, режиму их функционирования, а также о поступающих в атмосферу объемах метана на этапах сжигания НПГ, переработки нефти и ее транспортировки, для оценки воздействия предприятий нефтяной промышленности на биосферу Земли необходимо проведение мониторинга системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в зоне их расположения. Ключевыми характеристиками этого мониторинга являются объем сжигаемого НПГ, а также потери на других технологических этапах.

Целью данного исследования является оценка эмиссии метана предприятиями нефтяной промышленности на территории Западной Сибири в 2019 г. по данным спутниковых наблюдений. Первыми этапами работы являются поиск высокотемпературных (T>1500 K) аномалий региона, а также установление характеристик этих источников.

Экспериментальная база работы

При решении задач работы использовались данные спектрорадиометра TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), а также данные радиометра VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite).

TROPOMI – основной прибор спутника Sentinel–5 Precurcor (Sentinel-5P), который запущен Европейским космическим агентством в октябре 2017 г. Главной задачей этого радиометра является мониторинг содержанием метана в атмосфере Земли по уходящему из атмосферы Земли потоку излучения в ближнем ИК-диапазоне. Сенсор TROPOMI имеет четыре детектора, измеряющих потоки уходящего излучения в ультрафиолетовом (UV), ультрафиолетовом и видимом (UVIS), ближнем ИК (NIR) и среднем ИК (SWIR) диапазонах. Пространственное разрешение TROPOMI – 7 км на 7 км.

Радиометр VIIRS входит в состав измерительной аппаратуры космических платформ Suomi-NPP и NOAA-20. Прибор имеет 22 спектральных канала, регистрирующих уходящее из атмосферы электромагнитное излучение в диапазоне 0,412-11.45 мкм. В отличие от большинства приборов этого класса, несколько каналов видимого и ближнего ИК-диапазонов VIIRS регистрируют уходящее из атмосферы излучение в ночное время суток. Показания этих каналов, превышающие порог шумов канала, могут быть эффективно использованы не только для обнаружения высокотемпературных термальных источников, но и для восстановления их температуры и площади.

Технология поиска и восстановления параметров высокотемпературных термальных аномалий основана на предположении о том, что в темное время суток весь поток уходящего из атмосферы в видимом и ближнем ИК–диапазонах электромагнитного излучения является, в основном, собственным излучением этих аномалий. В силу этого справедливо утверждение, что интенсивность излучения, регистрируемая каналами радиометра VIIRS, можно представить в виде произведения функции Планка при температуре источника и масштабирующего коэффициента, который содержит информацию о доле пикселя, который занимает источник.

Для поиска и восстановления параметров высокотемпературных источников излучения использовался программный комплекс, разработанный в Центре космического мониторинга АлтГУ. По данным VIIRS на территории Западной Сибири в 2019 году было установлено свыше 300 таких источников.

Оценка объема сжигаемого газа. Вклад ФУ. Используя установленные характеристики источников, была проведена оценка объема сжигаемого НПГ. При расчете объема сжигаемого газа использовалось регрессионное соотношение между измеряемой VIIRS мощностью источника и объемом сжигаемого в нем газа, установленное по данным ФУ 47 стран. Выполненные авторами расчеты показали, что по данным VIIRS в 2019 году объем сжигаемого попутного нефтяного газа в ФУ Западной Сибири составляет 14,8 млрд $м^3$. Учитывая, что доля метана в сжигаемом НПГ составляет 60%, а полнота сгорания НПГ – 95%, было также установлено, что в 2019 г. ФУ являлись источником 0,31 Тг метана и 5,9 Тг диоксида углерода.

Метод оценки эмиссии метана предприятиями нефтяной промышленности базируется на разности содержания метана в области источников и в фоновых областях, т. е. в областях, в которых источники отсутствуют. На этом этапе работы использовались результаты наблюдений TROPOMI/Sentinel-5P, а также полученная по данным VIIRS информация о пространственном распределении высокотемпературных источников в регионе. Было установлено, что эмиссия метана предприятиями нефтяной промышленности, включая ФУ, на территории Западной Сибири в 2019 г. может составлять 3,1 Тг.

Г. И. Мазуров, В. И. Акселевич
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (Санкт-Петербург)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧАЕМОЙ С ПОМОЩЬЮ ДМРЛ-С В МЕТЕОРОЛОГИИ

Аннотация. Рассматриваются возможности получения новых видов информации с помощью ДМРЛ-С и их использование при метеорологическом обеспечении полетов авиации, исследованиях в метеорологии. Особо подчеркиваются возможности ДМРЛ-С для определения радиальной составляющей скорости ветра, фиксации параметров грозы и ее перемещения. Обсуждаются возможности разработанного в ГГО ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010».

Ключевые слова: ДМРЛ-С, гроза, радиальная составляющая скорости, гидрометеоры.

G. I. Mazurov, V. I. Akselevich
Voeikov Main Geophysical Observatory (Saint Petersburg)

USING THE INFORMATION RECIVED WITH THE HELP OF DMRL-C IN METEOROLOGY

Abstract. The possibilities of obtaining new types of information using DMRL-C and their use in the meteorological support of aviation flights, research in meteorology are considered. The capabilities of DMRL-C for determining the radial component of wind speed, fixing the parameters of a thunderstorm and its movement are emphasized. The possibilities of the PO WOI “GIMET-2010” developed by the Voeikov Main Geophysical Observatory are discussed.

Keywords: DMRL-C, thunderstorm, radial velocity component, hydrometeors.

В метеорологии для получения оперативной информации широко используются различные РЛС, в том числе метеорологические, а в последние десятилетия и доплеровские, например ДМРЛ-С. Последние позволяют определить скорость и направление воздушных потоков на различных высотах, зоны атмосферной турбулентности, наличие и распределение мощно-кучевой и кучево-дождевой облачности и связанных с ними грозовых явлений. Так, ДМРЛ-С способна фиксировать начало и окончание грозы, скорость ее перемещения и продолжительность в радиусе действия станции. Это крайне необходимо для метеорологического обеспечения полетов авиации, особенно взлета и посадки ЛА.

За последние десятилетия широкое распространение получили данные о ветре и грозах, получаемые МРЛ в режиме доплеровской радиолокации. Анализируя данные о радиолокационной отражаемости, доплеровский МРЛ способен измерять составляющую компоненту скорости движения метеообъекта вдоль линии, проведенной в направлении от радиолокатора к метеоцели. Измеренная радиальная скорость совокупности метеоцелей может при этом быть положительной или отрицательной. Скорость движения метеоцели, направление которой перпендикулярно радиолокационному лучу, не может быть оценена радиолокатором, т.к. в этом случае проекция радиальной скорости на направление визирования равна нулю.

В доплеровском метеорологическом радиолокаторе (ДМРЛ-С) измерение сдвига частоты излучения, отраженного от движущейся метеоцели, а через нее радиальной составляющей скорости проводится путем измерения вариации частоты импульсов, отраженных от метеоцели, относительно частоты излученного зондирующего импульса. Изменение частоты анализируется в каждом бине (дискрете) дальности вдоль оси радиолокационного луча. Размер дискрета дальности в радиальном направлении составляет 250 м, а по углу – равному ширине диаграммы направленности антенны – 1 градус. Вдоль оси луча радиолокатора в радиусе обзора, равном 125 км, таких дискретов дальности будет 500.

Несмотря на то что ДМРЛ-С измеряет только радиальную компоненту скорости ветра, для изучения целого ряда метеорологических явлений (таких как атмосферная турбулентность, мезовихри, грозовые явления и т.д.) большое значение может иметь их пространственное распределение.

Наиболее полное использование доплеровской информации возможно только в том случае,

когда с ее помощью однозначным образом удается определить скорость и направление перемещения облачных образований, т.е. средний вектор скорости ветра в зоне ответственности радиолокатора. Известно, что в системах некогерентных МРЛ в основу метода оценки скорости заложено сопоставление карт отражаемостей двух последовательно выполненных обзоров.

Погрешность метода зависит от тенденции и скорости развития облаков по вертикали и горизонтали. Если временной интервал между обзорами превышает 10 минут, то данный метод чаще всего не применяется. Как следствие, при переходе в штормовой режим работы (учащенного проведения обзоров) получить информацию о скорости смещения выявленного объекта можно только по окончанию второго обзора. При этом теряется оперативность построения штормового прогноза, для которого в первую очередь необходима информация о перемещении объекта.

ДМРЛ-С лишен этого недостатка, т.к. скорость и направление перемещения на основании доплеровской информации могут быть в большинстве случаев вычислены сразу же по окончанию обзора, проведенного в режиме «Скорость», т.е. с вобуляцией зондирующего импульса. Однако метод, основанный на доплеровской информации, нельзя назвать универсальным, дающим правильные результаты расчета скорости в любой синоптической ситуации. Главным ограничением метода является отсутствие информации о тангенциальной компоненте скорости ветра.

Кроме того, расчет скорости должен выполняться в автоматическом режиме без участия оператора, который мог бы при наличии квалификации «помочь программе», например, выделить зоны облачности, наиболее подходящие для расчета скорости, приводящие к более устойчивым результатам расчета. Указанные требования приводят к необходимости разработки нетривиальных методов анализа, которые на основании информации о распределении в пространстве радиальной составляющей скорости движения облачных образований давали бы устойчивые результаты в разных синоптических ситуациях, при различных формах облаков и их количестве в радиусе обзора.

Методы анализа пространственного распределения радиальной составляющей доплеровской скорости позволяют строить карты различного профиля (в координатах скорость – азимут, скорость/направление – высота и т.д.), а для грозовых очагов карты определения их местоположения и перемещения.

Созданное в ГГО программное обеспечение вторичной обработки радиолокационной информации (ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010») в условиях облачной погоды позволяет отображать информацию о скорости и направлении высотного потока в атмосферных слоях с дискретностью высоты 1000 м через каждые 10 минут. В каждом 1000-метровом слое отображается максимальная скорость гидрометеоров, в том числе грозовых образований, с которой они приближаются к ДМРЛ-С и удаляются от нее.

При определении направления перемещения воздушных масс и грозовых облаков наиболее достоверной будет являться информация, полученная в условиях устойчивого воздушного потока, движущегося со скоростью более 10 м/с (36 км/ч). Для уточнения направления потока совокупности гидрометеоров в градусах необходимо переместить курсор в область максимальных скоростей. При этом, справа вверху на сером фоне появится указание азимута, откуда движутся гидрометеоры к ДМРЛ-С и расстояние от точки расположения курсора до ДМРЛ-С (в км), а в месте расположения курсора указывается значение радиальной составляющей скорости гидрометеоров (м/с).

Благодаря данным, получаемым ДМРЛ-С в режиме «Скорость», при наличии в зоне обзора локатора облачности можно определить максимальную радиальную скорость смещения совокупности гидрометеоров по слоям толщиной 1000 метров во всей толще облачного слоя и определить время выхода грозового образования за пределы обзора ДМРЛ-С, отождествляя его со временем прекращения действия грозы. Таким образом, ДМРЛ-С позволяют получить ЛА подробную информацию о наличии грозовых облаков, их перемещении и времени существования, а также о параметрах ветра.

Работа выполнена по личной инициативе в рамках раздела 6.2.3 Плана НТП на 2020–2024 гг.

Е. Ю. Мордвин, А. А. Лагутин, А. И. Ревякин
Алтайский государственный университет (Барнаул)

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ AIRS/AMSU/ATMS

Аннотация. Предложена технология обработки данных AIRS/AMSU с использованием показаний ATMS. Установлено, что среднеквадратичное отклонение значений яркостной температуры при перепроецировании данных ATMS на координатную сетку AMSU-A не превышает 5%. В результате выполненного исследования был создан программный комплекс обработки данных AIRS/AMSU/ATMS.

Ключевые слова: зондировщик AIRS, радиометр AMSU-A, радиометр ATMS, перепроецирование данных.

E. Yu. Mordvin[1], A. A. Lagutin[1], A. I. Revyakin[1]
[1]Altai State University (Barnaul)

PROGRAM COMPLEX OF AIRS/AMSU/ATMS SATELLITE DATA PROCESSING

Abstract. Technology of AIRS/AMSU data processing using ATMS measurements is suggested. It was found that the standard deviation of brightness temperature values when resample ATMS data to AMSU-A swath grid does not exceed 5%. As a result of the research a program complex of AIRS/AMSU/ATMS data processing was created.

Keywords: AIRS, AMSU, ATMS, resample.

Введение

Зондировщик AIRS является одним из шести приборов спутника Aqua, запущенного на околоземную орбиту в 2002 году в рамках проекта EOS (Earth Observing System)/NASA. AIRS представляет собой гиперспектральный прибор с 2378 каналами, которые регистрируют уходящее длинноволновое излучение в диапазоне от 3,74 до 15,4 мкм.

Для корректного восстановления геофизических параметров атмосферы и подстилающей поверхности в присутствии облачных структур в схеме обработки измерений AIRS используются данные 15-канального микроволнового прибора AMSU-A, также установленного на спутнике Aqua. Совместное использование данных этих двух приборов позволило восстанавливать параметры системы даже при 80% закрытии зоны наблюдения облаками.

В 2016 году прибор AMSU-A вышел из строя, и его измерения исключены из схемы обработки данных AIRS. Несмотря на то что результаты обработки современного алгоритма AIRS Only версии 7 в меньшей степени отличаются от результатов AIRS/AMSU версии 7, чем при сопоставлении предшествующих алгоритмов версий 5 и 6, отсутствие микроволновых данных значительно влияет на корректность восстановления характеристик системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в зонах, закрытых облачностью.

Целью данного исследования является разработка технологии обработки данных AIRS/AMSU с использованием показаний микроволнового радиометра ATMS, а также создание вычислительного комплекса восстановления геофизических параметров системы по данным AIRS/AMSU/ATMS.

Следует отметить, что для коррекции показаний некоторых спутниковых приборов в качестве вспомогательных данных уже использовались измерения других сенсоров. Так, например, блок High Temperature Calibration радиометра AMSR-E имел дефект, поэтому для калибровки показаний этого прибора использовались данные AMSU.

22-канальный микроволновый радиометр ATMS установлен на спутниках Suomi-NPP и NOAA-20, которые были запущены в 2011 и 2018 годах соответственно. Ряд каналов СВЧ-радиометра ATMS совпадают с каналами AMSU-A. Конфигурация орбит Suomi-NPP и NOAA-20 незначительно отличается от орбиты Aqua. Эти спутниковые платформы движутся по полярным солнечно-синхронным орбитам; в светлое время суток орбита восходящая, а в темное – нисходящая. Отметим также, что время съемки территории приборами этих платформ близко: временной промежуток между измерениями Aqua и Suomi-NPP/NOAA-20 не превышает 30 минут.

Подход

Основная идея подхода, реализованного в работе, состоит в замене показаний ряда каналов AMSU-A комплекса обработки AIRS/AMSU уровня 1 данными ATMS, последующей обработке показаний каналов зондировщика AIRS и модифицированных данных AMSU до уровня 2 (геофизические продукты) с использованием пакета AIRS/AMSU.

Для проверки корректности перехода между координатными сетками двух приборов проведено поканальное сравнение значений яркостных температур, измеренных AMSU-A, с перепроецированными данными ATMS. Последняя процедура осуществлялась с использованием библиотеки resample, которая интерполировала полученные радиометром ATMS значения яркостной температуры на нерегулярную сетку измерений AMSU-A. Тестирование выполнялось для ближайших по времени витков спутников Aqua и Suomi-NPP за 2015 год, когда радиометр AMSU-A работал в штатном режиме. Было установлено, что среднеквадратичное отклонение значений яркостной температуры при перепроецирование данных ATMS к координатной сетке AMSU-A не превышает 5%.

Верификация

С использованием модифицированных данных AMSU уровня 1 и вычислительного пакета AIRS/AMSU были проведены тестовые восстановления параметров атмосферы и подстилающей поверхности. Анализ полученных данных показал пригодность предложенного метода замены данных СВЧ-радиометра AMSU данными приборов ATMS спутников Suomi-NPP/NOAA-20.

Для более точной оценки корректности использования данных ATMS в схеме восстановления геофизических параметров атмосферы и подстилающей поверхности по данным комплекса AIRS/AMSU/ATMS необходимо, конечно, проведение дополнительных сопоставлений оригинальных данных AIRS/AMSU с результатами AIRS/AMSU/ATMS, которые получены для различных сезонов года и времени суток нескольких лет.

В результате выполненного исследования в Центре космического мониторинга Алтайского государственного университета был создан программный комплекс обработки данных AIRS/AMSU/ATMS, который включает следующие компоненты:

– комплекс обработки ATMS/Suomi-NPP и ATMS/NOAA-20, включающий распаковку сырого потока, геолокацию, калибровку;

– подпрограмму переноса измерений ATMS в данные AMSU-A уровня 1;

– комплекс обработки AIRS/AMSU/ATMS, включающий распаковку сырого потока, геолокацию, калибровку и создание продуктов уровня 2.

А. С. Мягков, Д. А. Фомин, А. С. Зоркин, А. В. Соловьев
Томский научный центр СО РАН (Томск)

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТИ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. Показан практический пример построения сети контактных датчиков метеорологических параметров на территории Томской области в виде двухуровневой цифровой измерительной системы в идеологии «интернета вещей» (IoT).
Ключевые слова: агрометеорология, интернет вещей, цифровая платформа.

A. S. Myagkov, D. A. Fomin, A. S. Zorkin, A. V. Solovev
Tomsk science center (Tomsk)

NETWORK OF AGROMETEOROLOGICAL OBSERVATIONS IN THE TOMSK REGION. CONSTRUCTION FEATURES

Abstract. Shown is a practical example of building a network of contact sensors of meteorological parameters in the form of a two-level digital measuring system in the ideology of the "Internet of Things" (IoT). The network was built in the Tomsk region.
Keywords: agrometeorology, internet of things, digital platform.

Агрометеорология – прикладная часть метеорологии, направленная на обеспечение процесса сельскохозяйственного производства. Представлены метеорологические характеристики, подлежащие измерениям. К таковым относятся температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра, температура и влажность почвы до глубины 60 см, а также количество жидких осадков. Также представлен список особо значимых метеорологических событий, которые являются критически важными для растениеводства, к примеру, почвенные и атмосферные заморозки, ливневые дожди, туманы и т.д.

Характеристики территории и условий размещения сети

Представлена информация о территории Томской области, которая характеризуется наличием существенных территорий, покрытых лесом, наличием болотистой местности. Территория имеет неустойчивые районы покрытия сетями мобильных операторов. Представлены карты территорий, на которых развернута первая очередь сети агрометеорологических наблюдений (Асиновский, Зырянский, Первомайский районы Томской области).

Описание используемого оборудования

Представлены характеристики и технические реализации измерительного оборудования в концепции «метеопост» и «метеозонд». Метеопост – измерительная система на основе ультразвуковых метеостанций серии АМК (производства ООО «Сибаналитприбор», г. Томск). Также на метеопост устанавливается другие измерительные датчики – температуры и влажности воздуха, фотосинтетической активности и датчик жидких осадков. Все измерительные системы объединены в единый блок сбора и передачи информации, реализованный на цифровом контролере (производства ООО «Умиум», г. Томск). Вторая часть измерительной системы – метеозонд – представлен в виде автономного измерительного прибора, который устанавливается непосредственно на полях. Метеозонд ведет сбор и передачу метеорологической информации по каналам GSM следующих метеорологических характеристик – температуры и влажности воздуха (на высоте 2 метра), а также температуры и влажности почвы до глубины 60 см. Данные измерительные приборы реализуют концепцию интернета вещей (IoT), они полностью автономны и передают информацию короткими шифрованными сообщениями через установленные промежутки времени (от 1 до 3 часов).

Описание цифровой платформы

В данной части представлены подходы по организации сбора, хранения и интерпретации получаемой метеорологической информации. Система представляет собой современное платформенное решение с личными кабинетами пользователей, с системой администрирования, системой хранения и резервирования получаемой информации, а также с интегрированной системой визуализации информации в различных форматах.

Примеры и перспективы использования сети агрометеорологических наблюдений

В данной части обсуждаются вопросы построения системы «цифровых помощников». Цифровой помощник – автоматизированный цифровой алгоритм принятия управленческих решений на основе анализа текущих метеоданных. Данный вид алгоритмов является основой дальнейшего эффективного использования сети метеонаблюдений, на основе которых специалистами (агрономами, собственниками) будут корректироваться те или производственные процессы, к примеру выход на посевы, внесение удобрений, поливы и т.п.

Особенности организации и функционирования сети

Представлены результаты практического размещения оборудования на территории трех районов Томской области (Асиновский, Зырянский, Первомайский районы) с учетом существенной разреженности территории по покрытию сетями мобильных операторов. Проанализированы возможные технологические решения для обеспечения более стабильной передачи данных, а также технологии, не связанные с использованием сетей мобильных операторов, в частности технологии LORA.

А. Р. Насыбуллин, Т. М. Ишкаев, Р. В. Фархутдинов, Т. О. Вазиев
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

БРЭГГОВСКИЕ СТРУКТУРЫ КАК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В УСТРОЙСТВАХ СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Аннотация. В докладе освещаются основные принципы использования нового типа преобразовательных элементов в виде СВЧ брэгговских структур в задачах измерительного контроля диэлектрических материалов и веществ. Рассматриваются ключевые особенности, характерные для различных классов периодических и квазипериодических электромагнитных структур в СВЧ диапазоне, позволяющие создавать на их основе измерительные устройства с улучшенными характеристиками.

Ключевые слова: брэгговское отражение, СВЧ периодическая структура, комплексная диэлектрическая проницаемость.

A. R. Nasybullin, T. M. Ishkaev, R. V. Farkhutdinov, T. O. Vaziev
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

BRAGG STRUCTURES AS CONVERSIONAL ELEMENTS IN MICROWAVE DIELECTRIC CONTROL DEVICES

Abstract. The report highlights the basic principles of using a new type of conversion elements in the form of microwave Bragg structures in the tasks of measuring control of dielectric materials and substances. The key features characteristic of various classes of periodic and quasi-periodic electromagnetic structures in the microwave range are considered, which make it possible to create measuring devices with improved characteristics on their basis.

Keywords: Bragg reflection, microwave periodic structure, complex dielectric constant.

Достижения в области радиоэлектроники способствуют появлению и совершенствованию новых направлений применения радиочастотных технологий. Особую роль в развитии современных наукоемких приложений занимают микроволновые технологии, к которым, в широком смысле этого определения, можно отнести многочисленные области использования электромагнитного поля (ЭМП) микроволнового диапазона, не ограничивающиеся традиционными способами передачи информационных сообщений посредством радиосигналов.

Микроволновые технологии открыли перспективы создания сенсорных устройств для всевозможных областей применения. Проблемы разработки датчиков СВЧ диапазона в первую очередь связаны с выбором конфигурации и параметров СВЧ устройства, выступающего в качестве преобразовательного элемента или датчика. В этой связи нахождение новых путей достижения требуемых характеристик сенсорных устройств, основой которых является разработка электродинамической структуры как чувствительного элемента, является актуальной научно-технической задачей.

Периодические структуры с эффектом возникновения запрещенных частотных областей, обусловленных брэгговским отражением, встречаются во многих областях науки и техники. Наибольшее распространение подобные элементы получили в оптическом диапазоне. Именно в оптике впервые создаются измерительные преобразователи на основе волоконно-оптической решетки Брэгга и фотонных кристаллов, являющихся реализациями распределенных брэгговских отражателей. Переложение уже нашедших отражение в ряде прикладных задач принципов анализа и синтеза оптических резонансных сенсоров в область радиочастот позволяет раскрыть новые стороны и области применения известных и хорошо изученных функциональных элементов.

В последнее время рядом ученых ведутся исследования в области анализа и синтеза электромагнитных структур в виде отрезков периодических линий с эффектом брэгговского отражения применительно к вопросам определения электрофизических параметров материалов и сред. Наиболее значимые результаты в этом направлении получены в КНИТУ-КАИ (Казань), СГУ (Саратов), ИФ СО РАН (Красноярск), Университет науки и технологий Миссури (Ролла, США).

Основным преимуществом использования брэгговских структур перед традиционными элементами диэлектрического анализа является увеличение чувствительности измерения. Доказательством данного факта может послужить исследования одномерной периодической структуры в оптическом интегральном исполнении для реализации перестраиваемой линии задержки. Было показано, что благодаря стремлению к нулю групповой задержки (производная от дисперсионной кривой) при приближении к границам запрещенной зоны (полосы заграждения), изменение волнового числа на заданной частоте при малом приращении показателя преломления будет больше, чем для случая отсутствия периодической структуры. Изменение показателя преломления оптической интегральной структуры аналогично изменению диэлектрической проницаемости внешней среды для аналогичной периодической структуры в СВЧ диапазоне. Следовательно, фазовый сдвиг окажется наибольший на границах полосы заграждения и чувствительность к изменению диэлектрической проницаемости будет максимальна. Сказанное подтверждает перспективность рассмотрения вопросов построения новых преобразовательных элементов для СВЧ техники диэлектрических измерений, базирующихся на физике периодических структур в области брэгговского резонанса.

Брэгговская структура в СВЧ диапазоне представляет собой одномерную периодическую систему в волноводе определенного типа. Периодичность может быть реализована как неоднородностями, так и нерегулярностями волноведующей системы. Особое значение нашли структуры с кусочно-однородным или кусочно-регулярным строением, в которых в качестве неоднородности выступает скачкообразный переход между слоями диэлектриков, а в качестве нерегулярности – ступенчатое изменение размеров или формы поперечного сечения проводящих элементов направляющей системы.

Принцип измерения составляющих комплексной диэлектрической проницаемости исследуемого объекта заключается в его помещение во внутреннее пространство замкнутой брэгговской структуры. В первую очередь это применимо для жидкостей или сыпучих, порошковых веществ. В качестве основы для брэгговской структуры используются коаксиальный, цилиндрический или прямоугольный полые волноводы. В полуоткрытых брэгговских структурах, реализованных преимущественно в полосковых или диэлектрических линиях, чувствительность преобразования несколько ниже, чем в предыдущих, но возможно измерение диэлектрических параметров более широкого класса материалов и веществ.

Улучшение измерительных характеристик преобразовательных характеристик элементов на основе СВЧ брэгговских структур достигается оптимизацией конфигурационных параметров структуры. В большинстве случаев оптимизация необходима для расширения диапазона измеряемых значений вещественной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости и задания необходимых частот, на которых производится анализ. Одним из направлений оптимизации является переход к квазипериодическим брэгговским структурам. К ним можно отнести структуры с нарушением периодичности в определенной области или областях направляющей системы.

Брэгговские СВЧ структуры как преобразовательные элементы могут найти широкое применение в устройствах параметрического анализа и контроля материалов и сред, основанных на исследовании диэлектрического отклика в СВЧ диапазоне. При анализе диэлектрических свойств наибольший эффект в данной области электромагнитных колебаний имеют сложные комплексный среды, имеющие в составе как полярные, так и неполярные компоненты.

А. Р. Насыбуллин, Р. В. Фархутдинов, Т. М. Ишкаев, Т. О. Вазиев
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ (Казань)

КОАКСИАЛЬНЫЕ БРЕГГОВСКИЕ СВЧ СТРУКТУРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТЕЙ

Аннотация. В докладе рассматривается класс периодических систем в волноводных устройствах сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона электромагнитных волн, показывающие в данной области частот эффекты резонансного отражения Брэгга. Показаны приоритетные направления использования указанных структур в области измерения электрофизических параметров материалов и веществ. Сформулированы общие принципы работы средств измерительного контроля диэлектрических параметров жидких сред на основе чувствительных элементов в виде брэгговских СВЧ структур, реализованных в коаксиальном волноводе.

Ключевые слова: брэгговская СВЧ структура, комплексная диэлектрическая проницаемость, коаксиальный волновод, коэффициент отражения.

A. R. Nasybullin, R. V. Farkhutdinov, T. M. Ishkaev, T. O. Vaziev
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

COAXIAL BREGGIAN MICROWAVE STRUCTURES FOR ANALYSIS OF DIELECTRIC PARAMETERS OF LIQUIDS

Abstract. The article considers the class of periodic systems in waveguide devices of the microwave frequency (microwave) range of electromagnetic waves, which show the effects of Bragg resonance reflection in this frequency range. The priority areas of using these structures in the field of measuring the electrophysical parameters of materials and substances are shown. The general principles of the operation of measuring instruments for controlling the dielectric parameters of liquid media based on sensitive elements in the form of Bragg microwave structures implemented in a coaxial waveguide are formulated.

Keywords: Bragg microwave structure, complex permittivity, coaxial waveguide, reflection coefficient.

Периодические структуры с эффектом возникновения запрещенных зон, обусловленных брэгговским отражением, встречаются во многих областях науки и техники, но наибольшее распространение получили в оптическом диапазоне. Именно в оптике впервые создаются измерительные преобразователи на основе волоконной решетки Брэгга и фотонных кристаллов. Переложение уже нашедших отражение в ряде прикладных задач принципов анализа и синтеза оптических резонансных сенсоров в область радиочастот может раскрыть новые стороны и области применения известных и хорошо изученных функциональных элементов.

В докладе рассматривается подход к измерительному контролю комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей на основе применения брэгговских структур в СВЧ коаксиальном волноводе.

Для полной информации о диэлектрических свойствах жидкости необходимо знать её комплексную относительную диэлектрическую проницаемость, включающую вещественную часть, характеризующую процессы поляризации в веществе, и мнимую, ответственную за потери. Иногда для характеристики потерь вводят тангенс угла диэлектрических потерь.

Измерительный преобразователь в виде брэгговских СВЧ структур в коаксиальном волноводе (БСВЧСвКВ) предполагает косвенное определение диэлектрических параметров материала по измеренному первичному информационному сигналу, который в данном случае может собой представлять частотную характеристику коэффициента отражения (КО) или передачи (КП) волновода с неоднородностями. Достижение требуемой чувствительности приводит к необходимости заполнения волновода или его части исследуемой средой. В зависимости от диэлектрической проницаемости и тангенс угла диэлектрических потерь исследуемого диэлектрика, ориентировочные значения или диапазон изменения которых считаем известным, можно выделить три класса БСВЧСвКВ:

I. Структуры, представляющие собой воздушную коаксиальную линию с периодическими нерегулярностями во внешнем и/или внутреннем проводнике, а также элементами во внешнем проводнике, позволяющим проникать исследуемой среде в чувствительную область датчика. Примером может служить структура с нерегулярностями в виде ступенчатого изменения диаметра внутреннего проводника и отверстиями определенной формы во внешнем проводнике.

II. Структуры, реализованные в волноводе с диэлектриком и характеризующиеся введением исследуемой среды в периодически расположенные воздушные ячейки, которые представляют собой отрезки волновода без диэлектрика, и включающие элементы во внешнем проводнике для введения и выведения среды.

III. Структуры, отличающиеся от предыдущих тем, что измерительная ячейка заполняет только определенную область в поперечном сечении волновода. Примером может служить отверстия цилиндрической формы, образованные полостью во внутреннем диэлектрике волновода и внешнем проводнике и представляющие собой периодические неоднородности в волноводе.

В структурах, отнесенных ко второму и третьему классам, также могут присутствовать нерегулярности проводников. БСВЧСвКВ, отнесенные к первому классу обладает высокой чувствительностью в силу полного заполнения области волновода, но не пригодна для измерения жидкостей с большим значением тангенс угла диэлектрических потерь (более 0,1). Второй и третий класс, наоборот, способны измерять вещественную и мнимую части сильно поглощающих сред, но обладает меньшей чувствительностью.

Обладая функциональной зависимостью КО БСВЧСвКВ от диэлектрической проницаемости и фактора потерь, можно оценить метрологические характеристики средств измерительного контроля. Основная цель вычислительного эксперимента состояла в определении чувствительности измерения вещественной и мнимой части, оценке погрешности измерения по априорным данным неопределенностей измерения комплексного КО, задаваемых как зависимости от уровня измеряемого КО. Проведенный анализ показал, что максимальная чувствительность при измерении диэлектрической проницаемости исходя из модуля КО, проявляется на частоте, соответствующей середине левого склона полосы заграждения, исходя из фазы – на частоте первого полюса пропускания.

Основным результатом является создание возможности применения брэгговских СВЧ структур в коаксиальных волноведущих системах в задачах измерительного контроля комплексной диэлектрической проницаемости жидких сред.

В частности, при использовании различных конфигураций брэгговских СВЧ структур в коаксиальном волноводе в качестве измерительных преобразователей можно достигнуть значений неопределенности измерения абсолютной погрешности диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков при значениях диэлектрической проницаемости от 1 до 10 и при тангенсе угла диэлектрических потерь от 0 до 0,01 равной ±0,1%, при тангенсе угла диэлектрических потерь от 0,01 до 0,1 равной ±1%.

А. О. Орлов, П. Ю. Лукьянов, Ю. В. Харин
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (Чита)

ПРОПУСКАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ СВЕРХТОНКИМИ ПЛЁНКАМИ ЛЬДА 0, ОБРАЗОВАННЫМИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

Аннотация. Выполнены измерения пропускания электромагнитного излучения через образцы льда нанометровой толщины. Выбран оптический диапазон, длина волны излучателя 0,52 мкм. Лёд был получен при осаждении паров воды на диэлектрических подложках при нагревании после предварительного охлаждения до температур ниже –140 °С. Обнаружено затухание проходящего излучения с минимумом вблизи –23 °С. Предполагается, что эффект связан с образованием сегнетоэлектрического льда 0.

Ключевые слова: лёд 0, переохлаждённая вода, сегнетоэлектричество, оптический диапазон.

A. O. Orlov, P. Yu. Lukyanov, Yu. V. Harin
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS (Chita)

TRANSMITTANCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION BY ULTRAFINE FILMS OF ICE 0 FORMED ON A DIELECTRIC SUBSTRATE

Abstract. The transmittance of electromagnetic radiation through ice nanolayer samples has been measured. The selected optical range, the wavelength of the emitter is 0.52 μm. Ice has been obtained by deposition of water vapor on dielectric substrates when heated from temperatures below –140 °C. Attenuation of transmitted radiation with a minimum near –23 °C was detected. This effect is assumingly due to the formation of ferroelectric ice 0.

Keywords: ice 0, supercooled water, ferroelectricity, optical range.

В работе Бордонского и Орлова (Письма в ЖЭТФ, 2017, Т. 105, С. 483) экспериментально обнаружена новая кристаллическая модификация льда – лёд 0. Эта модификация была найдена и исследована при компьютерном моделировании в работе Russo (Nature materials, 2014, V. 13, P. 733). Этот лёд образуется из переохлаждённой воды при температурах ниже –23 °С и является сегнетоэлектриком. Экспериментально его обнаружили при замораживании воды, находящейся в порах силикатных сорбентов. Сегнетоэлектрики по данным Коробейникова (Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, V. 38, P. 915), контактируя с диэлектриками, образуют в области контакта тонкий нанометровый слой, с весьма высокой электропроводностью. Из-за большой удельной площади поверхности пор сорбента, порядка сотен квадратных метров на грамм сухого вещества, достигается заметное увеличение микроволнового фактора потерь среды.

Для изучения спектральных особенностей проявления льда 0 была поставлена задача, исследовать его в оптическом диапазоне. Плёнку льда 0 решили получать осаждением на прозрачный диэлектрик. Поскольку переохладить воду до температур ниже –50 °С, где достаточно эффективно может образовываться лёд 0 является весьма сложной задачей, то для получения тонкой плёнки толщиной порядка единиц нанометра использовали специальный приём конденсации водяного пара на холодную подложку из разнообразных диэлектриков: слюды и кварца.

На первом этапе эксперимента в камеру с температурой лабораторного помещения подавали с постоянной скоростью пары азота, которые заполняли объем камеры, охлаждали её элементы и подложку. Отработанные пары выходили из камеры, одновременно увлекая во внешнее пространство находящиеся в камере пары воды. При такой схеме охлаждения в камере отсутствовали водяные пары, и отсутствовала их конденсация на подложке во все время прокачки установки газообразным азотом.

После достижения подложкой требуемой температуры (ниже –150 °С) начинали процесс нагревания (отключая ток через испаритель). Нагревание подложки при этом происходило из-за притока теплоты через стенки камеры, которую выполнили из полиэтиленовой плёнки. Адсорбированные пары воды и мелкие кристаллики льда при повышении температуры, испаряясь на нагреваемых поверхностях, увеличивали абсолютную влажность на периферийных участках

установки. Диффундируя в центральную часть камеры, пары конденсировались на более холодных элементах в центре, в том числе на подложке. В результате удалось получить приток пара и его конденсацию при температурах, при которых может образовываться лёд 0 на исследуемой подложке. Одновременно с изменением температуры образца выполняли измерения проходящей мощности излучения с использованием фотодетектора и усилителя с синхронным детектором. Точность измерения температуры термопарой, прижимаемой к подложке, около 1 °C. Измерения выполнены с использованием маломощного полупроводникового лазера на длину волны 0,52 мкм.

В выполненных измерениях обнаружен характерный минимум прохождения излучения лазера после начала конденсации льда на подложке. Коэффициент пропускания в области температур –40…–23 °C понижался до значений от 0,1 до 0,5 для различных диэлектриков. Этот процесс наблюдался на ветви нагревания при прекращении притока и оттока газообразного азота, что создаёт вблизи исследуемого образца накопление и избыточное давление паров воды. Лёд 0 нестабилен и превращается в лед Ih или Ic выше температуры –23 °C. Поскольку проходящая мощность достаточно резко возрастает выше этой температуры для всех исследованных образцов, сделан вывод, что при конденсации образуется именно лёд 0.

Была выполнена грубая оценка толщины осаждённой плёнки льда 0 из наблюдавшегося отсутствия выраженных интерференционных изменений интенсивности прошедшего излучения, которая оказывается не более 10 нм. При измерении сквозной проводимости на расстоянии 1 см не было обнаружено её появление. Этот факт указывает на то, что осаждённые плёнки имели островковый характер на слюде и кварцевом стекле.

В случае островковых плёнок изменение проводимости может быть связано, как показано в работе Климова (Наноплазмоника, М.: Физматлит, 2009) с возникновением поверхностных плазмонов в трёхслойной среде с тонким металлическим слоем между двумя диэлектриками с шероховатыми поверхностями. Их возникновение приводит к поглощению и рассеянию падающих излучений даже от слоёв нанометровой толщины.

Обнаруженная особенность может проявиться в стратосферных и мезосферных облаках при резких понижениях температуры и осаждении паров воды в виде льда 0 на пылевых диэлектрических частицах, что приводит к их свечению из-за отражения излучения Солнца при его восходе или заходе. Предполагается выполнить аналогичные измерения в микроволновом диапазоне.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-05-00563).

Н. С. Пщелко
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (Санкт-Петербург)

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНОГО КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Аннотация. Рассматриваются вопросы, связанные с технической реализацией зондирования окружающей среды с помощью емкостных датчиков. Предлагается конструкция емкостного датчика планарного типа. Обсуждаются физические основы его работы и схемотехническая реализация. Анализируется работа датчика в двух основных режимах: 1) определение расстояния до объекта при известных электрофизических характеристиках объекта; 2) определение электрофизических характеристик объекта при известном расстоянии до него. Приведятся примеры результатов измерений.

Ключевые слова: емкостной датчик, электрическое поле, схемотехническая реализация, электрофизические характеристики.

N. S. Pshchelko
Military Telecommunications Academy named after the Soviet Union Marshal S. M. Budienny (Saint Petersburg)

MULTIFUNCTIONAL SENSOR BASED ON A PLANAR CAPACITOR FOR REMOTE SENSING

Abstract. The issues related to the technical implementation of environmental sensing using capacitive sensors are considered. The design of a capacitive sensor of the planar type is proposed. The physical foundations of its operation and circuit implementation are discussed. The operation of the sensor in two main modes is analyzed: 1) determination of the distance to the object with its known electrophysical characteristics; 2) determination of the electrophysical characteristics of an object at a known distance to the object. Examples of measurement results are given.

Keywords: capacitive sensor, electric field, circuit implementation, electrophysical characteristics.

Емкостные датчики нашли разнообразные применения. Первый тип емкостных датчиков – это датчики, основанные на принципе конденсатора с параллельными пластинами; измеряемый объект при этом действует как одна из параллельных пластин. Второй тип – это датчики, основанные на принципе краевой емкости. По ряду причин второй тип предпочтительней, поэтому именно этот тип датчика исследовался в настоящей работе.

В разработанном датчике используется зависимость емкости его чувствительного элемента от расстояния между «наблюдаемым» объектом и поверхностью чувствительного элемента датчика, а также от электрофизических характеристик объекта. В предлагаемой конструкции емкость измеряется между двумя пластинами-электродами, находящимися в одной плоскости.

В результате проведенных измерений было установлено, что зависимость емкости чувствительного элемента датчика от расстояния между «наблюдаемым» объектом и поверхностью чувствительного элемента носит сложный характер: при приближении объекта издалека (с расстояния более метра в исследованном образце) емкость уменьшается, а на малых расстояниях (порядка мм) начинает резко возрастать. Таким образом, имеются «дальнодействующий» и «короткодействующий» участки. Дано физическое объяснение этому факту. Также разработана и оптимизирована электрическая схема, позволяющая получать выходной сигнал в удобных величинах – в виде напряжения.

«Дальнодействующий» участок, очевидно, удобен для использования при работе в режиме датчика приближения, «короткодействующий» – ввиду его высокой чувствительности – для точного определения электрофизических характеристик (например, диэлектрической проницаемости). Приведены примеры использования работоспособного образца датчика (измерение толщин пленок, выявление различий между маслами разных сортов и др.).

Н. С. Пщелко
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (Санкт-Петербург)

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КЕРАМИКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ЕЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ И НА ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Аннотация. Рассматриваются результаты оценки механических прочностных характеристик керамических образцов неразрушающим способом на основе измерения их диэлектрической проницаемости. При этом измерения диэлектрической проницаемости производились как в СВЧ-диапазоне на 8-ми-миллиметровом интерферометре, так и в постоянном электрическом поле. Измерения в постоянном электрическом поле продемонстрировали наилучшую информативность и корреляцию с пределом прочности при изгибе исследованных образцов.
Ключевые слова: неразрушающий контроль, керамика, диэлектрическая проницаемость.

N. S. Pshchelko
Military Telecommunications Academy named after the Soviet Union Marshal S. M. Budienny (Saint Petersburg)

NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF CERAMICS BY THE RESULTS OF MEASURING ITS PERMITTIVITY IN THE MICROWAVE RANGE AND AT CONSTANT VOLTAGE

Abstract. The results of evaluating the mechanical strength characteristics of ceramic samples by a non-destructive method based on measuring their permittivity are considered. In this case, measurements of the permittivity were carried out both in the microwave range on an 8-mm interferometer and in a constant electric field. Measurements in a constant electric field demonstrated the best information content and correlation with the ultimate strength in bending of the studied samples.
Keywords: non-destructive testing, ceramics, permittivity.

Бериллиевая и алюмооксидная керамика, специальные стекла и др. широко используются в современных приборах электронной техники для жесткого и точного закрепления электродов, их изоляции, уменьшения потерь СВЧ энергии. Учитывая, что в процессе работы данные материалы нагреваются и испытывают термомеханические напряжения, неразрушающий контроль диэлектрических и механических параметров этих материалов представляет несомненный интерес.

Для испытания были взяты кристаллодержатели СВЧ приборов в форме дисков с размерами: высота 1,95 мм; диаметр 17,95 мм. Температура спекания керамики при этом изменялась в интервале от 1600 до 1950° С.

В разработанном для измерений высокочастотного значения диэлектрической проницаемости интерферометре при помещении исследуемого образца между согласующими рупорами происходит разбаланс фаз электромагнитной волны в плечах интерферометра, который устраняется с помощью градуированного фазовращателя. По его показаниям судят об измеряемом значении диэлектрической проницаемости.

Измерения низкочастотного значения диэлектрической проницаемости производились с помощью разработанного устройства на основе полевых транзисторов.

Измерения диэлектрической проницаемости в постоянном электрическом поле, т.е. на постоянном электрическом напряжении, оказались более информативными для контроля свойств материала. Это, вероятно, связано с возможностью фиксации медленно протекающих процессов (например, миграционной поляризации), закреплением зарядов на границах зерен и др. при использовании постоянного напряжения.

Выявленная в результате исследований корреляция между диэлектрической проницаемостью и пределом прочности при изгибе исследованных образцов, измеренном разрушающим способом, позволяет осуществлять их неразрушающий контроль.

А. В. Репин
Омский государственный педагогический университет (Омск)

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ГЛИНАХ, НАСЫЩЕННЫХ ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИЕЙ, В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ПРИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Аннотация. Приведены результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости глин, насыщенных водонефтяной эмульсией в различных соотношениях, в широком диапазоне частот. Измерения проводились при положительных и отрицательных температурах. Выявлено, что в спектрах наблюдаются несколько релаксационных процессов. Параметры процессов существенно зависят от температуры и соотношения воды и углеводорода в насыщающей смеси. Предложена модель, позволяющая провести учет релаксационных процессов и их зависимость от температуры.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, водонефтяная эмульсия, диэлектрическая релаксация, межповерхностная поляризация.

A. V. Repin
Omsk State Pedagogical University (Omsk)

DIELECTRIC RELAXATION IN CLAYS SATURATED WITH WATER-OIL EMULSION IN A WIDEBAND OF FREQUENCIES AT POSITIVE AND NEGATIVE TEMPERATURES

Abstract. The results of measuring the complex dielectric constant of clays saturated with an oil-water emulsion in various ratios in a wide frequency range are presented. The measurements were used out at positive and negative temperatures. It was revealed that several relaxation processes are observed in the spectra. The processes parameters significantly depend on the temperature and the ratio of water and hydrocarbon to the saturating mixture. A model is proposed that makes it possible to take into account relaxation processes and their dependence on temperature.

Keywords: complex dielectric permittivity, oil-water emulsion, dielectric relaxation, inter-surface polarization.

В наше время широкое распространение получают методы дистанционного зондирования земной поверхности, так как современные алгоритмы обработки спутниковых данных позволяют получать информацию необходимую в сельском хозяйстве, климатологии, экологии и т.д. Отсюда возникает необходимость регулярного мониторинга состояния почв и пород в самых разнообразных климатических условиях. Подобный контроль должен осуществляться как непосредственно на земной поверхности, так и дистанционным путем с космических аппаратов труднодоступных для человека областях Земли.

В последнее время исследованию комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$ сред в широком диапазоне частот посвящено много работ. Исследования показали, что спектры КДП в диапазоне частот от сотен герц до 10 ГГц имеют сложный вид, что связано с различным минеральным составом сред, а также с наличием поверхностей раздела между различными фазами. Показано, что в широком частотном диапазоне возникают релаксационные процессы, обусловленные поляризацией на межфазных границах сред. Также выяснено, что при добавлении нефтепродуктов спектры КДП становятся еще сложнее и зависят от температуры.

Целью нашего исследования было выяснение типов релаксационных процессов, возникающих в глинах при положительных и отрицательных температурах при фазовом превращении воды в твердую фазу и их влияние на КДП.

Нами было проведено исследование каолиновой и бентонитовой (Са-форма) глин, насыщенных эмульсией дизельное топливо – вода, в диапазоне температур от 25 до –15 ºС. Образцы насыщались эмульсией дизельное топливо – вода в пропорциях 100/0, 75/25, 50/50 и 25/75 по объему. Сухой образец глины, высушенный в печке, охлаждался в эксикаторе с водопоглощающим материалом, для предотвращения адсорбции воды из воздуха. Затем насыщался эмульсией

и заворачивался в пленку. Далее образец помещался в ячейку и выдерживался сутки для перераспределения жидкой фазы.

Измерения были проведены при температурах 25, 1, –5, –10, –15 ºС в климатической камере ТН-МЕ-25. Объемная доля жидкости определялась после высушивания образца термостатно – весовым методом, который является наиболее точным. Диэлектрические измерения проводились в одной ячейке с использованием векторного анализатора цепей ROHDE&SCHWARZ ZNB8 и измерителя импеданса KEYSIGHT TECHNOLOGIES E4990. Применение этих приборов позволяет получить спектры в диапазоне частот от 1 кГц до 8,5 ГГц. Из-за потерь электромагнитной энергии в изучаемых образцах погрешность измерения действительной части КДП ε' изменялась от 3 до 7% в исследуемом частотном диапазоне. Погрешность измерения мнимой части КДП ε" составляла не более 3%.

На частотных зависимостях действительной части и мнимой частей КДП хорошо видно несколько областей релаксаций: высокочастотная (гигагерцовая область частот), среднечастотная (мегагерцовая область частот) и низкочастотная (килогерцовая область частот). Также выявлено, параметры процессов зависят от температуры. Была разработана модель, позволяющая помимо релаксации свободной и связанной воды, учесть наличие релаксаций, которые обусловлены межслойной поляризацией на границах фаз. Наибольший интерес представляла релаксация в мегагерцовой области.

Выяснено, что в каолине «интенсивность» исследуемой релаксации уменьшается при уменьшении количества воды, как при положительных, так и при отрицательных температурах. Значения времен релаксации при положительных температурах очень сильно зависят от содержания воды в насыщающей эмульсии и имеют значения порядка десятков мкс, а при отрицательных температурах резко уменьшается (до десятых долей мкс) и практически не зависят от температуры и содержания воды в эмульсии. Такое изменение времени релаксации можно объяснить тем, что при положительных температурах релаксационный процесс определяет поляризация на границе дизельного топлива и воды, а при отрицательных на границе льда и дизельного топлива. А зависимость «интенсивности» релаксации можно объяснить увеличением площади межфазной границы и увеличением числа зарядов при увеличении количества воды в эмульсии.

В бентонитовых глинах «интенсивность» релаксации очень сложным образом зависит от содержания воды. При положительных температурах она уменьшается при уменьшении количества воды. В образце с малым содержанием воды, релаксационный процесс, который мы наблюдаем связан с поляризацией на границе вода–дизельное топливо. При отрицательных температурах превращения воды в лед не происходит, поэтому значении остаются практически постоянными. А в образцах с большим содержание воды релаксационный процесс, который мы наблюдаем связан с поляризацией на границе связанная вода–дизельное топливо и вода–дизельное топливо. При отрицательных температурах происходит замерзание свободной воды и изменение параметров связанной воды. В образце, насыщенном эмульсией соотношением дизельного топлива и воды 50/50 свободной воды очень мало, поэтому её превращение в лед немного изменяют «интенсивность» релаксации. Однако в образце, насыщенном эмульсией соотношением дизельного топлива и воды 25/75 свободной воды очень много, поэтому её превращение в лед существенно изменяют «интенсивность» релаксации.

Время релаксации при положительных температурах зависит от содержания воды в насыщающей эмульсии (десятки наносекунд), а при отрицательных температурах немного увеличивается и практически не зависит от температуры. Различие в численных значениях в образцах с малым и большим содержанием воды можно объяснить различием в поляризационных механизмах, обуславливающих релаксацию.

Результаты работы могут быть использованы при интерпретации данных георадаров и спутникового радиометрического зондирования почв, загрязненных нефтепродуктами.

А. В. Репин, О. В. Родионова
Омский государственный педагогический университет (Омск)

ВЛИЯНИЕ СОЛЕНОСТИ УВЛАЖНЯЮЩЕГО РАСТВОРА НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГЛИН В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 1 МГЦ ДО 8 ГГЦ

Аннотация. Приведены результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости глин, насыщенных раствором NaCl различной концентрации, в широком частотном диапазоне. Измерения проводились при положительных температурах. Выявлено, что в спектрах наблюдаются несколько релаксационных процессов. Предложена модель, позволяющая провести учет релаксационных процессов и их зависимость от концентрации солевого раствора. Концентрация раствора практически не оказывает влияния на параметры процессов в отличие от температуры.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, процессы диэлектрической релаксации, межповерхностная поляризация.

A. V. Repin, O. V. Rodionova
Omsk State Pedagogical University (Omsk)

THE INFLUENCE OF THE SALTITY OF THE MOISTURIZING SOLUTION ON THE DIELECTRIC PERMEABILITY OF CLAYS IN THE FREQUENCY RANGE FROM 1 MHZ TO 8 GHZ

Abstract. The results of measurements of the complex dielectric constant of clays saturated with NaCl, saturated, in a wide frequency range are presented. The measurements were carried out at positive temperatures. It was revealed that several relaxation processes are observed in the spectra. The concentration practically does not affect the parameters of the processes, the difference from the temperature. A model is proposed that makes it possible to take into account relaxation processes and their concentration on the concentration of a saline solution.

Keywords: complex dielectric permittivity, dielectric relaxation processes, inter-surface polarization.

Использование данных о комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) почв и горных пород в широком частотном диапазоне позволяют получать наиболее полную информацию в таких исследованиях, как диэлектрический каротаж, исследования с использованием TDR-датчиков, радиолокационное зондирование, изучение петрофизических характеристик почв. На спектры КДП сильное влияние оказывают петрофизические параметры почв, температура, содержание воды, а также минерализация насыщающего флюида.

Разработаны многочисленные модели, позволяющие рассчитывать диэлектрические характеристики почв и пород в узких высокочастотных или низкочастотных диапазонах. Частотный диапазон от 10 кГц до 100 МГц остается менее изученным. Так для расчета характеристик радиолиний на частотах УКВ, КВ и СВ диапазонов используется модель диэлектрической проницаемости, рекомендованная Международным союзом электросвязи, однако эта модель не позволяет получать достоверные результаты на частотах ниже 0,1–1 ГГц.

Целью исследования являлось изучение влияния концентрации насыщающего флюида на процессы диэлектрической релаксации, вызванных поляризацией межфазных границ связанная вода-воздух глинистых породах.

Для достижения цели исследования были проведены диэлектрические измерения каолиновой глины и бентонитовой глины. Образцы увлажнялись дистиллированной водой и солевыми растворами концентрацией 2, 4 или 17 г/л до значений меньших, чем максимальное количество связанной воды в исследуемых грунтах.

Подготовленный образец помещался в измерительную коаксиальную ячейку сечением 7/3 мм и длиной 5 см с отражающей диэлектрической шайбой из фторопласта длиною 0,4 см. Измерения проводились с использованием векторного анализатора цепей ROHDE&SCHWARZ ZNB8

и измерителя импедансов KEYSIGHT TECHNOLOGIES E4990. Применение такой методики позволяет получить спектры в диапазоне частот от 1 кГц до 8,5 ГГц, при этом погрешность измерения действительной части КДП составляет 3–6%, для мнимой части КДП не превышает 4%.

Результаты измерений показали, что для образцов каолиновой глины при почти одинаковых значениях плотности сухого сложения и объемной влажности, но при разной концентрации насыщающего раствора в высокочастотной части спектры значения действительной части КДП (ε') практически не различаются, поскольку эти значение определяются объемной долей воды в образце. В этом частотном диапазоне проявляется релаксация, вызванная ориентационной поляризацией молекул воды. В среднем диапазоне частот от 1 МГц до 1 ГГц значения ε' начинают слабо возрастать, что может быть интерпретировано, как проявление релаксационного процесса, обусловленного поляризацией на границе вода-воздух. На частотах ниже 1 МГц наблюдается дальнейший рост значение действительной части КДП, обусловленный низкочастотной релаксацией. Влияние проводимости насыщающего раствора на значения ε' начинает сказываться в диапазоне частот от 10 МГц до 10 кГц. Поведение тангенс угла диэлектрических потерь также обнаруживает зависимость от солености увлажняющего раствора. Так, при увеличении концентрации от 0 до 4 г/л максимум тангенса угла диэлектрических потерь сдвигается вверх по частоте и при этом его «амплитуда» становится ниже.

Сравнение частотных спектров действительной части КДП каолиновой и бентонитовой глины Са-формы, при почти одинаковой влажности, во всем частотном диапазоне позволило выявить что, при увеличении проводимости увлажняющего раствора значения ε' для образцов каолиновой глины лежат несколько выше. Помимо этого, в бентонитовой глине релаксационные процессы более выражены.

Экспериментальные результаты промоделированы с помощью комбинированной модели, позволяющей рассмотреть многорелаксационный процесс как сумму отдельных процессов. Так релаксационный процесс, наблюдаемый в высокочастотной область спектра, описывается моделью Дебая. В среднечастотном диапазоне спектра КДП наблюдаемые релаксационые процессы можно описать моделью Коула-Коула. Таким образом, появляется возможность установить вклад каждого механизма релаксации в спектре КДП.

Параметры модели определялись путем минимизации невязки между расчетными и экспериментальными данными в диапазоне частот от 1 МГц до 8,5 ГГц. Погрешность моделирования составила не более 5% по действительной части КДП и не более 7% по мнимой части КДП.

Моделирование показало, что в каолиновой и бентонитовой глинах «интенсивность» третьего релаксационного процесса, вызванного поляризацией на границе связанная вода-воздух в мегагерцовом диапазоне частот, не зависит от солености увлажняющего раствора. Увеличение концентрации раствора приводит к уменьшению значения времен релаксации этого процесса. Результаты работы могут быть использованы при интерпретации данных георадаров и спутникового радиометрического зондирования почв.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-05-00395.

К. Н. Суслов[1], О. В. Родионова[2], С. В. Кривальцевич[1]
[1] Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН (Омск)
[2] Омский государственный педагогический университет (Омск)

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ОБРАЗЦА ГРУНТА АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

Аннотация. На основе экспериментальных измерений образца арктического почвогрунта в широком частотном и температурном диапазонах были получены зависимости спектров комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) от температуры. При содержании в образце большого количества свободной воды, которая при понижении температуры ниже 0 ºС замерзает, значение КДП значительно снижается во всем частотном диапазоне.

Ключевые слова: мёрзлые грунты, радиофизические характеристики почвогрунтов, комплексная диэлектрическая проницаемость.

K. N. Suslov[1], O. V. Rodionova[2], S. V. Krivaltsevich[1]
[1] Institute of Radiophysics and physical electronics Omsk Scientific Center SB RAS (Omsk)
[2] Omsk State Pedagogical University (Omsk)

DIELECTRIC SPECTRA OF A SOIL SAMPLE IN THE ARCTIC REGION

Abstract. Based on experimental measurements of a sample of Arctic soil in a wide frequency and temperature range, the dependence of the complex permittivity (CDP) spectra on temperature was revealed. If the sample contains a large amount of free water, which freezes when the temperature drops below 0 ºC, the CDP value decreases significantly over the entire frequency range.

Keywords: complex dielectric permittivity, oil-water emulsion, dielectric relaxation, inter-surface polarization.

При проведении работ во многих областях фундаментальных и прикладных исследований возникает необходимость проводить измерения диэлектрических свойств материалов в широком частотном диапазоне. Для исследования физико-химических свойств материалов используют анализ диэлектрических спектров, основополагающей частью которых являются экспериментальные данные о комплексной диэлектрической проницаемости. В связи с этим целью данного исследования являлось измерение спектров КДП грунта Арктического региона в широком частотном и температурном диапазоне.

Объектом исследования являлся образец, представляющий собой поверхностный слой почвы толщиной 15–20 см, извлеченный на полуострове Таймыр (69,3; 87,3).

При анализе экспериментальных данных было выявлено, что при большом содержании влаги (коэффициент водонасыщенности близок к 1) действительная часть КДП резко снижается при пересечении температурой точки фазового перехода, при замерзании воды. Однако в практически сухом образце данного перехода не наблюдается. Это свидетельствует о том, что практически вся вода в образце находится в свободном состоянии. При анализе полученных зависимостей отмечается, что в диапазоне частот ниже 10 МГц значения действительной части КДП в области положительных температур возрастают. Это связано с тем, что на частотах ниже 100 МГц проявляется межповерхностная поляризация, а именно поляризация на границе вода – минерал. Однако при температуре минус 10 ºС во влажном образце скорость изменения действительной части значительно снижается, что свидетельствует о переходе воды из жидкого состояния в твердое, а следовательно, и смене релаксационных процессов, которые могут быть обусловлены поляризацией на границах связанная вода – лед либо лед – минерал. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что содержание большого количества влаги значительно влияет на радиофизические свойства грунтов.

При проведении данной работы были получены данные о радиофизических характеристиках почвогрунтов Арктического региона в лабораторных условиях. Полученные данные исследований диэлектрической проницаемости почвогрунта выявили ряд особенностей и показали необходимость в дальнейших экспериментальных исследованиях.

Р. Ф. Шакиров, А. Р. Насыбуллин
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ СВЧ СТРУКТУР

Аннотация. Рассмотрены методы определения комплексной диэлектрической проницаемости брэгговских СВЧ структур. Написан алгоритм определения диэлектрической проницаемости исследуемого вещества. Выяснено, что с помощью данного алгоритма можно определить вещество, которое мы исследовали с помощью датчика.

Ключевые слова: брэгговская СВЧ структура, датчики, методы определения комплексной диэлектрической проницаемости вещества.

R. F. Shakirov, A. R. Nasybullin
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

THE NEED FOR PRACTICAL APPLICATION OF SENSORS BASED ON BRAGG GRATINGS OF THE FIRST TRANSPARENCY WINDOW

Abstract. Methods for determining the complex permittivity of Bragg microwave structures are considered. It was determined that using this algorithm it is possible to determine the substance that we investigated using a sensor.

Keywords*:* Bragg microwave structure, sensors, methods for determining the complex permittivity of a substance.

Введение

Достижения в технологиях изготовления позволили реализовать многие сложные микроволновые схемы с использованием недорогих технологий печатных плат. Брэгговские структуры, метаматериалы и волноводы, интегрированные в подложку, являются примерами таких передовых структур.

Для многочисленных применений необходим неразрушающий контроль диэлектрических свойств материалов. С этой целью были разработаны методы линии электропередачи; в частности микрополосковые датчики, которые широко используются в некоторых областях, таких как микроэлектроника или для управления промышленными процессами (полимеризация/отверждение смолы, жидкие смеси, разрушение композитов, поглощение влаги и т. д.). В большинстве этих применений испытываемый материал (ИМ) подвергается определенному процессу, цель которого состоит в том, чтобы отслеживать физические или химические изменения ИМ, связывая их с изменениями его диэлектрических свойств. Однако при работе с образцами, диэлектрические свойства которых претерпевают небольшие изменения во время процесса (например, резиновые смеси при отверждении), такое небольшое изменение их диэлектрических свойств серьезно ограничивает возможности мониторинга. Таким образом, повышение чувствительности датчика становится ключевой проблемой.

Микрополосковые датчики позволяют контролировать свойства ИМ, размещая его над полосой и выполняя непрерывные измерения с фиксированной частотой характеристик передачи системы.

Интересующим параметром является фазовый сдвиг волны, распространяющейся вдоль датчика. Известно, что квази-ТЕМ поле в микрополосковом датчике распространяется как в области над полосой (занятой ИМ), так и в диэлектрической подложке. Следовательно, изменение диэлектрических свойств ИМ изменяет условия распространения, и ожидается изменение сдвига фазы. Исходя из этих соображений, лучшая конфигурация датчика – это та, которая обеспечивает отличное взаимодействие между волной и ИМ, поскольку это означает, что датчик будет более чувствителен к любому изменению свойств ИМ.

Если правильно ввести периодическую структуру, то новая брэгговская структура будет иметь полосовую диаграмму. Эта структура показывает такую частотную область, в которой распространение внутри структуры запрещено (запрещенная зона). На краю запрещенной зоны групповая скорость ν управляемой моды стремится к нулю. Для постоянной рабочей частоты достигается большое изменение групповой скорости по сравнению с микрополосковым датчиком. Большое уменьшение групповой скорости соответствует большому увеличению времени, необходимого для прохождения через датчик и, следовательно, через ИМ. Этот параметр очень полезен для характеристики и сравнения различных конфигураций датчиков. Здесь он определяется как отношение между изменением фазового сдвига, обеспечиваемым датчиком $\Delta\varphi$, и относительным изменением диэлектрических свойств ИМ $\Delta\varepsilon^*/\varepsilon_1^*$.

Если конфигурация датчика дает низкие изменения фазового сдвига сигнала ($\Delta\varphi \approx 0$), даже когда происходят большие изменения свойств ИМ (высокие $\Delta\varepsilon^*/\varepsilon_1^*$), то чувствительность приближается к 0, и конфигурация датчика будет считаться неподходящей для выполнения процесса мониторинга. Также и наоборот, датчики, представляющие явные изменения фазового сдвига (значения $\Delta\varphi$ около 180º) для небольших изменений диэлектрических свойств ИМ (небольшие значения $\Delta\varepsilon^*/\varepsilon_1^*$), обеспечат высокие значения чувствительности. Такие датчики являются желательными, поскольку высокие значения чувствительности приводят к легкому осуществлению функциональности управления.

Цель состоит в том, чтобы написать алгоритм нахождения комплексной диэлектрической проницаемости датчика с достаточной чувствительностью, чтобы иметь возможность отслеживать изменения в ИМ.

А. С. Ященко, С. В. Кривальцевич
Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН (Омск)

КАРТИРОВАНИЕ МЁРЗЛЫХ ПОЧВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ И РАДИОМЕТРОВ

Аннотация. Приведены результаты оценки возможности использования дистанционных радиолокационных и радиометрических данных для картирования мёрзлых почв. Показано, что данные спутниковых радиолокаторов малочувствительны к изменениям комплексной диэлектрической проницаемости при промерзании. Идентификация замёрзших участков поверхности по данным спутниковых радиометров возможна лишь при специфических условиях.
***Ключевые слова*:** дистанционное зондирование, радиолокация, микроволновая радиометрия.

A. S. Yashchenko, S. V. Krivatsevich
Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center SB RAS (Omsk)

THE FROZEN SOIL MAPPING WITH SATELLITE'S RADAR AND RADIOMETER DATA

Abstract. The results of assessing the possibility of using remote radar and radiometric data for frozen soils mapping are presented. It is shown that the satellite's radar data are insensitive to changes in the soil's complex dielectric constant during freezing process. The frozen areas may be identification by satellite's radiometers data is possible only under specific nature conditions.
Keywords: remote sensing, radar, microwave radiometry.

Известно, что фазовые переходы воды сопровождаются выделением или поглощением большого количества теплоты. Участки поверхности суши, для которых характерно длительное сезонное падение температуры поверхностного слоя почв ниже нуля, занимают огромные площади в арктической, субарктической и большей части умеренной климатических зон. В связи с этим сезонные процессы промерзания-оттаивания определяют более половины теплового баланса материковой части суши. Получить информацию о состоянии поверхности в пределах таких территорий можно с привлечением технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Технологией ДЗЗ, получающей информацию о состоянии удалённого объекта в процессе анализа характеристик его собственного радиотеплового излучения, является микроволновая радиометрия. Интенсивность собственного радиотеплового излучения в микроволновом диапазоне волн, количественно измеряемая в значениях радиояркостной температуры ($T_я$), является функцией многих переменных. Значения $T_я$ почв в основном зависят от величин комплексной диэлектрической проницаемости (КДП), степени неровности поверхности, термодинамической температуры и гранулометрического состава. Гранулометрический состав почв в пределах определённого территориально-природного комплекса является квазипостоянной величиной; механический состав может оставаться постоянным в течение десятков и сотен лет. Изменение геометрии поверхности почв наблюдается преимущественно в регионах с развитым растениеводством. Для таких участков поверхности Земли наблюдается скачкообразный рост стандартного отклонения высот неровностей в результате механической обработки почв. В дальнейшем происходит постепенное уменьшение шероховатости поверхности в результате разрушения почвенных агрегатов при выпадении осадков или в процессе дальнейшей обработки пахотных угодий. Значения КДП, так же как и $T_я$, являются функцией многих переменных, основными из которых выступают объёмное содержание влаги и термодинамическая температура. Поскольку КДП воды значительно отличается от КДП минерального скелета почвы и органической компоненты, то изменение влажности почвы сопровождается непропорциональным изменением КДП. Так, зависимость между КДП почвы в микроволновом диапазоне и её объёмной влажностью до значений, соответствующих максимальной полевой влагоёмкости, удовлетворительно аппроксимируется полиномом второй степени. При падении термодинамической температуры почвы ниже нуля её КДП резко уменьшается, что объясняется скачкообразным изменением КДП воды при переходе из

жидкого состояния в твёрдое. При падении КДП излучательная способность почвы увеличивается, что проявляется в росте $T_я$. Этот эффект позволяет идентифицировать замёрзшие участки поверхности в процессе анализа временного ряда данных $T_я$; по ряду причин для этих целей в большей степени подходят радиометрические данные, полученные в дециметровом диапазоне волн. На данный момент на орбите функционируют два космических аппарата с установленными на борту радиометрами L-диапазона (1,4 ГГц): SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) и SMAP (Soil Moisture Active and Passive).

Спутниковая радиолокация получает информацию об объекте мониторинга в результате анализа излучения, отраженного или рассеянного поверхностью этого объекта. Активные спутниковые радиосенсоры конструктивно относятся к радиолокаторам бокового обзора. Такие инструменты позволяют охватить в процессе съёмки существенно больший, по сравнению с зондированием в надир, участок поверхности Земли. В результате радиолокационной съёмки определяется удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) объекта. Значения УЭПР в большей степени определяется геометрией цели. Однако известен ряд работ, в которых данные радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) применялись для картирования мёрзлых почв. То есть, согласно описанным в этих работах результатам, значения УЭПР, полученные РСА, коррелируют со значениями КДП. В процессе выполнения работ использовались данные РСА установленного на борту Sentinel-1. Этот аппарат разработан ESA в рамках программы экологического мониторинга Copernicus. Данные Sentinel-1 отличаются высоким пространственным разрешением (до 5 метров) и находятся в открытом доступе.

В процессе оценки перспектив использования данных спутниковых радиометров и радиолокаторов для картирования мёрзлых почв в степной и лесостепной зонах мы исследовали участок поверхности, расположенный на юго-западе Омской области, в Москаленском районе, вблизи с. Гвоздёвка. Использовались данные SMOS, полученные за 2010–2019 гг., данные SMAP за 2015–2019 гг. и Sentinel-1 за 2018–2019 гг. Анализ временного ряда данных о УЭПР, полученных поздней осенью и зимой, показал, что они слабо изменяются при замерзании почв. Вариации УЭПР были сопоставимы с погрешностью измерений. Этот факт объясняется тем, что величина УЭПР в основном определяется геометрией поверхности объекта зондирования и в значительно меньшей степени его КДП. Можно предположить, что радиолокационные данные, полученные при зондировании в надир, будут в большей степени зависеть от диэлектрических характеристик исследуемого объекта. Идентифицировать момент начала промерзания с помощью временного ряда данных $T_я$ можно с большей точностью. Однако это удаётся сделать лишь в случае отсутствия снега на поверхности почв. Зачастую процесс замерзания почв протекает при выпадении осадков в виде мокрого снега. В этом случает радиотепловое излучение почвы поглощается снежным покровом. Кроме того, при низкой влажности почв падение термодинамической температуры не сопровождается ростом $T_я$. Это объясняется тем, что при низких влажностях вода, находящаяся в почве, находится в связанном состоянии. Свойства связанной воды, распределённой по поверхности минеральных частиц, отличается от свойств свободной. В частности, замерзание связанной воды происходит при температурах гораздо ниже нуля.

Таким образом, картирование мёрзлых почв в степной и лесостепной зонах возможно лишь с помощью данных микроволновых спутниковых радиометров при специфических условиях. Данные о УЭПР мало изменяются при замерзании почв. Идентификация начала промерзания по временному ряду $T_я$ возможна лишь при высоких влажностях почв перед промерзанием и отсутствии осадков в виде мокрого снега.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (номер госрегистрации проекта в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А19-119052890058-2).

А. С. Ященко[1], Ю. И. Ященко[2]
[1] Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН (Омск)
[2] Омский АНЦ, Омск

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ВЛАЖНОСТИ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗ СПУТНИКОВЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Аннотация. Приведены результаты сравнительного анализа данных о влажности, восстановленных из дистанционных измерений и измеренных контактными методами. Показано, что временной ход данных о влажности, восстановленных из дистанционных измерений, соответствует процессам, протекающим в поверхностном слое почв. Однако абсолютные значения влажности, измеренные с борта разных космических аппаратов и определённые контактными методами, могут заметно отличаться.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, микроволновая радиометрия, влажность почв.

A. S. Yashchenko[1], Y. I. Yashchenko[2]
[1] Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center SB RAS (Omsk)
[2] Omsk ASC (Omsk)

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF SOIL MOISTURE DATA RETRIEVED FROM SATELLITE'S RADIOMETER MEASUREMENTS

Abstract. The results of a comparative analysis of soil moisture retrieved from remote sensing data and measured by contact methods are presented. It is shown that the time dependence of the retrieval soil moisture data corresponds to the processes taking place in the soil toplayer. However, the absolute values of soil moisture data retrieved from data of different satellites and measured by contact methods may differ markedly.

Keywords: remote sensing, microwave radiometry, soil moisture.

Социально-экономическая деятельность, характерная для того или иного физико-географического региона, во многом определяется его климатическими особенностями. Изменение климата, обусловленное глобальным потеплением, приводит к росту числа природных катастроф. Так, за период 1980–2016 гг. наблюдается рост числа неблагоприятных явлений, связанных с изменением погодных условий; увеличивается число наводнений, ураганов, засух и т.д. Доклад страховщика крупных промышленных рисков AGSC утверждает, что выплаты по убыткам, связанным с экстремальными погодными условиями, вырос с 15 млрд долларов в 1980 гг. до 70 млрд в 2010 г. При этом для территории России потепление происходит интенсивнее, чем в среднем по Земному шару.

Влажность поверхности почвы является одной из климатических переменных, рекомендованной Всемирной метеорологической организацией для постоянного наблюдения. Ввиду этого факта достоверные и актуальные данные о характере и направлении потоков влаги являются одними из главных входных параметров климатических моделей. Решить эту задачу, основываясь исключительно на данных, полученных в результате наземных измерений (например, с помощью сети метеостанций), довольно проблематично. Как утверждают разработчики модели гидрологического цикла GLEAM, привлечение данных о влажности почв, восстановленных из спутниковых радиометрических измерений SMOS на длине волны 21 см, существенно увеличивает точность оценки количества испарившейся влаги. Кроме того, достоверная информация о влажности поверхностного слоя почв может быть полезна при планировании сельскохозяйственных работ, а также при прогнозировании распространения радиоволн.

Оперативное картирование влажности поверхностного слоя почв в глобальном масштабе с приемлемой точностью возможно лишь с помощью данных, предоставляемых спутниковыми микроволновыми радиометрами. В основе технологий дистанционного мониторинга влажности микроволновым методом лежит взаимосвязь между излучательными характеристиками почвы и её комплексной диэлектрической проницаемостью. Так, в простейшем приближении процесс дистанционного определения влажности сводится к определению следующих действий:

- измерить радиояркостную температуру ($T_я$), являющуюся количественной характеристикой интенсивности радиотеплового излучения;
- определить коэффициент отражения почв по известному значению термодинамической температуры;
- определить комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) почв из известного значения коэффициента отражения;
- определить влажность почвы по известным диэлько-влажностным зависимостям.

Между тем зависимость между $T_я$ и КДП носит сложный характер. Значения $T_я$ для неизотермического случая определяется видом профиля термодинамической температуры в поверхностном слое почв. Величина КДП зависит не только от влажности, но и от содержания в почве физического песка и глины, органической компоненты, солей и др. Для оценки указанных факторов и параметров привлекаются сторонние данные. Вид профиля температуры оценивается в процессе моделирования потоков тепла в поверхностном слое почвы с привлечением данных о температуре поверхности, измеренной спутниковыми инфракрасными сенсорами. Данные о гранулометрическом составе почв извлекаются из соответствующих глобальных тематических карт. Однако достоверность подобной информации зачастую сомнительна. Так, в процессе моделирования потоков тепла необходима информация о профиле КДП, а почвенные карты, в особенности для удалённых участков поверхности, получены на основании точечного отбора образцов. Указанные факты могут приводить к заметному отличию реальных данных о влажности от восстановленных из дистанционных измерений.

Мы проводили анализ данных о влажности почв, восстановленных из дистанционных радиометрических измерений и измеренных контактно. Дистанционные данные были получены космическими аппаратами SMOS и SMAP. Карты влажности, построенные на основании спутниковых радиометрических измерений, отличаются низким пространственным разрешением. Так, данные о влажности в файлах SMOS Level 2 приведены для координатной сетки с расстоянием между узлами в 11 км; в файлах SMAP Enhanced Level 3 и SMAP Level 3 (длина волны 21 см) – для сетки с расстоянием в 9 и 36 км соответственно. Контактный отбор проб влажности осуществлялся на юго-западе Омской области, в Москаленском районе, вблизи с. Гвоздёвка. Сравнительный анализ временных рядов данных о влажности показал их соответствие друг другу на качественном уровне. Так, при выпадении осадков значения влажности увеличивались, при длительном испарении без выпадения осадков – уменьшались. Однако в абсолютных единицах значения влажности заметно отличались. Это факт можно объяснить рядом причин: отсутствием достоверных данных о КДП почв и профиле температуры при обработке спутниковых радиометрических данных; точечным характером контактного отбора проб влажности, в то время как данные о влажности, восстановленные из дистанционных измерений, представляют собой величину, усреднённую в пределах пикселя радиометрического снимка.

Тем не менее временной ряд данных о влажности, восстановленных из дистанционных измерений, можно идентифицировать с процессами, протекающими в поверхностном слое почв. Данные о влажности с характерным пространственным разрешением в несколько десятков километров вполне пригодны для исследования глобальных климатических процессов. Однако их применение для оценки влажности в региональном и местном масштабе для тех или иных нужд возможно лишь со значительными ограничениями.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (номер госрегистрации проекта в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А19-119052890058-2).

А. Г. Козлов, Е. А. Фадина
Омский государственный технический университет (Омск)

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ С ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВЫМИ МИКРОЭЛЕКТРОДАМИ

Аннотация. Рассмотрены особенности исследования методом импеданса электрофизических свойств жидкостей в электрохимической ячейке с встречно-штыревыми микроэлектродами. Проведено моделирование распределения потенциала в системе встречно-штыревых микроэлектродов. Рассмотрена эквивалентная электрическая схема электрохимической ячейки с встречно-штыревыми микроэлектродами. Представлены данные о влиянии высоты электрохимической ячейки с встречно-штыревыми микроэлектродами на постоянную ячейки и ее импеданс.

Ключевые слова: электрохимическая ячейка, встречно-штыревые микроэлектроды, импеданс, постоянная ячейки, импедансная диаграмма.

A. G. Kozlov, E. A. Fadina
Omsk State Technical University (Omsk)

FEATURES OF INVESTIGATING THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF LIQUIDS IN AN ELECTROCHEMICAL CELL WITH INTERDIGITATED MICROELECTRODES

Abstract. The features of investigating the electrophysical properties of liquids in an electrochemical cell with interdigitated microelectrodes by the impedance method are considered. The modeling of the potential distribution in the system of interdigitated microelectrodes is carried out. An equivalent electrical circuit of an electrochemical cell with interdigitated microelectrodes is considered. Data on the effect of the height of an electrochemical cell with interdigitated microelectrodes on the cell constant and its impedance are presented.

Keywords: electrochemical cell, interdigitated microelectrodes, impedance, cell constant, impedance diagram.

Импедансные методы широко используются в химических, биологических и биохимических исследованиях для изучения жидких веществ. Данные методы позволяют определять характеристики жидких вещества при минимуме временных и материальных затрат. В последнее время среди импедансных методов интенсивно развиваются микросистемные методы, особенностью которых является использование микроэлектродов для измерения импеданса. Микросистемные методы измерения импеданса позволяют исследовать небольшие объемы жидкого вещества. Они применимы в технологии «лаборатория на кристалле» и в микроаналитической технике, и на их основе могут создаваться системы, распознающие единицы биологических клеток.

Среди микроэлектродов, используемых в микросистемах для исследования импеданса, особое место занимают встречно-штыревые микроэлектроды (ВШМЭ). Они позволяют измерять сопротивление в широком диапазоне значений, просты в конструктивном исполнении и процесс их изготовления полностью совместим с большинством процессов изготовления интегральных схем. Однако при интерпретации результатов измерений, полученных при их использовании, имеются трудности, которые вызваны неоднородностью электрического поля в системе ВШМЭ, размещенных на одной плоской поверхности. В связи с этим необходимо знать распределения потенциала и плотности тока в системе микроэлектродов, что позволяет более адекватно определять электрический импеданс в системе электрод-электролит-электрод. Существует ряд работ, в которых был представлен анализ системы ВШМЭ, однако до настоящего времени изучению

электрофизических процессов в системе ВШМЭ, применяемой на исследуемом объекте (например, в микроячейке или микроканале), уделялось мало внимания.

Целью данной работы является рассмотрение особенностей исследования методом импеданса электрофизических свойств жидкостей в электрохимической ячейке с ВШМЭ.

Электрохимическая ячейка (как стационарная, так и проточная) с системой двух встречно-штыревых микроэлектродов содержит диэлектрическую подложку, на которой данные электроды расположены. Каждый микроэлектрод представляет собой гребенку с рядом пленочных проводящих штырей, объединенных с одного конца одним общим пленочным электродом. На подложке каждый из двух электродов располагается так, чтобы его штыри находились в промежутке между штырями противоположного пленочного электрода. Электрическое поле в системе ВШМЭ, помещенной в раствор электролита, является неоднородным. Для его определения, учитывая трансляционную симметрию системы ВШМЭ и слабое влияние на распределение электрического поля между штырями общего объединяющего пленочного электрода, можно рассматривать лишь электрическое поле между двумя пленочными штырями.

Моделирование распределения потенциала в системе из двух пленочных штырей при постоянном напряжении на электродах проведено аналитическим методом. Из выражения для распределения потенциала в системе встречно-штыревых электродов получено выражения для плотности тока через пленочные штыри и определено значение сопротивления раствора электролита между ними с учетом геометрического фактора. Используя полученное значение сопротивления электрохимической ячейки с ВШМЭ и заданную проводимость раствора, определена постоянная электрохимической ячейки. Полученное значение постоянной ячейки позволяет определить емкость электрохимической ячейки при заданном значении относительной диэлектрической проницаемости раствора.

Следующим шагом в исследовании импедансным методом электрофизических свойств жидкостей при использовании электрохимической ячейки с ВШМЭ является выбор соответствующей эквивалентной электрической схемы ячейки. Используемая эквивалентная электрическая схема ячейки содержит две цепи, включенных параллельно. В одной цепи находится резистор, сопротивление которого равно сопротивлению ячейки на постоянном токе. Последовательно с резистором с каждой его стороны включены конденсаторы, емкость которых соответствуем емкости двойного электрического слоя на каждом гребенчатом электроде. Вторая параллельная цепь содержит конденсатор, емкость которого равна емкости электрохимической ячейки. Последовательно с контуром из двух параллельных цепей включены два резистора, которые характеризуют активные потери в электродах. Их сопротивление равно сопротивлению пленочных электродов.

Эквивалентная электрическая схема электрохимической ячейки используется для определения аналитическим методом импеданса ячейки. Полученные частотные зависимости характеристик импеданса электрохимической ячейки с ВШМЭ (реальная и мнимая части импеданса, модуль и аргумент импеданса) сравниваются с экспериментальными зависимостями. На основе полученных частотных зависимостей реальной и мнимой частей импеданса электрохимической ячейки формируется ее импедансная диаграмма. Из импедансной диаграммы определяется значение активного сопротивления электрохимической ячейки с раствором, а также, используя полученное аналитическим путем значение постоянной ячейки, значение проводимости исследуемого раствора.

Особое внимание уделяется исследованию влияния размеров электрохимической ячейки и прежде всего её высоты над областью расположения ВШМЭ на постоянную ячейки и её импеданс. Полученные результаты показывают, что при уменьшении высоты ячейки возрастает ее влияние на постоянную ячейки. Значение постоянной ячейки увеличивается и возрастает её чувствительность к изменению высоты электрохимической ячейки.

Представленный анализ позволяет учитывать особенности электрохимической ячейки с ВШМЭ при проведении с ее помощью импедансных исследований жидких веществ.

К. Л. Левин[1], Д. В. Рябоконь[1], С.Д. Ханин[1],
Е. А. Назарова[2], Р. В. Джеламо[3], В. А. Доронин[1]
[1] Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного (Санкт-Петербург)
[2] Научно-образовательный центр химического инжиниринга и биотехнологий Университета ИТМО (Санкт-Петербург)
[3] Федеральный университет региона Триангуло Минейро, Институт технологических и точных наук (Убераба, Бразилия)

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ГРАФЕНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА

Аннотация. Изучены многослойные графены (МСГ) в виде отдельно стоящих пленок, обработанных плазмой различного химического состава. Исследованы морфология, электрические свойства и структуры электронного соединения для оценки применимости МСГ в гибких устройствах хранения заряда. Продемонстрирована способность изменять электрические свойства поверхности, такие как работа выхода электронов, без достаточного изменения химических свойств поверхности, поэтому полученные образцы перспективны для различных практических применений, где химическая инертность сочетается с гибкостью и высокой электропроводностью.

Ключевые слова: многослойные графены, спектроскопия RAMAN, Мотт-Шоттки анализ, туннельный ток.

K. L. Levine[1], D. V. Ryabokon[1], D. E. Khanin[1],
E. A. Nazarova[2], R. V. Jelamo[3], V. A. Doronin[1]
[1] Military Telecommunications Academy named after the Soviet Union Marshal S. M. Budienny (Saint Petersburg)
[2] Research and Education Center for Chemical Engineering and Biotechnology, ITMO University (Saint Petersburg)
[3] Federal University of Triangulo Mineiro, Institute of Technological and Exact Sciences (Uberaba, MG, Brazil)

ELECTROPHYSICAL RESEARCH OF MULTILAYER GRAPHENE FOR APPLICATION IN CHARGE STORAGE DEVICES

Abstract. Multilayered graphenes (MLG) in the form of a free-standing films, treated with plasma of different chemical composition, were studied. Morphology, electrical properties, and electronic bonding structure were evaluated to assess MLG applicability in flexible charge storage devices. Ability to alter surface electrical properties, such as electron work function without sufficient changing of chemical properties of the surface was shown; therefore, obtained samples are promising for variety of practical applications, where chemical inertness is combined with flexibility and high electrical conductivity.

Keywords: multilayered graphenes, RAMAN spectroscopy, Mott-Schottky analyis, tunneling current.

Введение

Графены – это высокоупорядоченные плоскости, состоящие из атомов углерода в sp^2-гибридизации (гексагональная структура в плоскости), связанные друг с другом связями σ и π. Соседние плоскости связаны друг с другом силами Ван-дер-Ваальса, что делает возможным существование графеновых стеков. Структура графенов является причиной сильной анизотропии их электропроводности: низкое сопротивление в тангенциальном, высокое в нормальном направлении. Другим ограничением для практического использования являются плохие механические свойства графена: стопка очень тонкая, поэтому его нельзя использовать отдельно от подложки.

В данной работе использовали МСГ в виде пленки, существующей отдельно от подложки, и обладающей механическими характеристиками доставочными для ее дальнейших исследований. Образцы обрабатывали плазмой различного химического состава для управления их электрическими свойствами в нормальном направлении.

Результаты и обсуждение

Образцы многослойного графена (МСГ) были синтезированы термомеханическим способом и представляли собой диски диаметром 40 мм и толщиной 50–100 мкм.

На основании данных спектроскопии Рамана можно сделать ввод о том, что толщина графеновых пачек в образце не превышает пяти графеновых плоскостей.

Исследование морфологии с помощью СЭМ показало, что пленки МСГ состоят из фрагментов графена размером примерно 0,5…5 мкм, ориентированных тангенциально к поверхности пленки. Было замечено дробление некоторых участков поверхности, возможно, вызванное плазменной обработкой.

Электрические свойства

Плоские потенциалы из данных Мотт-Шоттки определяли по пересечению графика C^{-2}/U (обратный квадрат емкости/потенциал) с осью X.

Отметим, что обработка кислородной плазмой приводит к увеличению ПП (8,3 В), в то время как обработка азотной плазмой приводит к существенно уменьшенному ПП (2,1 В), обеспечивая хорошие электропроводящие свойства пленки МСГ в объеме и в контакте с электролитом, при ее применении в качестве токосъемника в электрохимических устройствах накопления и хранения электрического заряда. Такое изменение ПП, возможно, имеет место из-за искажения двумерной структуры вокруг примесных атомов, введенных плазменной обработкой, что приводит к появлению дополнительных каналов переноса заряда.

Поверхностная электропроводность, измеренная четырехзондовым методом, показывает высокие значения электропроводности, близкие по порядку для обработанных и необработанных пленок. Следовательно, плазменная обработка не снижает электропроводность поверхности при изменении объемных свойств.

Вольт-амперные зависимости (ВАХ) туннельного тока, полученные на АСМ в туннельном режиме, показали наличие неомической зависимости. Наибольшие токи проводимости наблюдались для образцов, обработанных аргоновой плазмой. Наименьшие токи – для необработанных образцов, что подтверждает формирование каналов электропроводности в направлении, нормальном к поверхности пленки при плазменной обработке.

Выводы

Исследованы электрофизические свойства многослойных графенов, модифицированных в плазме различного химического состава. Показано, что свойства поверхности существенно неомичны, что связано с особенностями электропроводности графенов в поперечном направлении. Гибкость и неплохие механические характеристики полученных пенок в сочетании с высокой электропроводностью делают данный тип материала перспективным в применении в качестве как катодных, так и анодных токосъемников в гибких устройствах накопления и хранения электроэнергии.

Н. И. Лысенко[1], В. Г. Половинкин[1, 2]
[1] Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск)
[2] Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск)

РЕАЛИЗАЦИЯ ДВУХЧАСТОТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОИЗВОДНОЙ ВОЛЬТ-ФАРАДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Аннотация. Приведён пример реализации двухчастотного метода измерения производной вольт-фарадной характеристики. Описаны схема измерительной системы и программный пакет для управления процессом измерения. Показаны и описаны результаты измерений вольт-фарадной характеристики и её производной кремниевой структуры метал-диэлектрик-полупроводник. Представлены обнаруженные качественные различия производных вольт-фарадной характеристики структуры метал – диэлектрик – полупроводник, полученных в результате численного дифференцирования и её прямого измерения двухчастотным методом. Предположена причина этого различия.

Ключевые слова: производная вольт-фарадной характеристики, вольт-фарадная характеристика, двухчастотный метод, метал – диэлектрик – полупроводник.

N. I. Lysenko[1], V. G. Polovinkin[1, 2]
[1] A. V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (Novosibirsk)
[2] Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk)

IMPLEMENTATION OF THE TWO-FREQUENCY METHOD FOR MEASURING THE DERIVATIVE OF CAPACITANCE-VOLTAGE CHARACTERISTICS

Abstract. An example of the implementation of the two-frequency method for measuring the capacitive derivative is given. The scheme of the measuring system and the software package for the measurement process control are described. The results of measurements of capacitive characteristics and their derivatives of the metal – insulator – semiconductor silicon structure are shown and described. Qualitative differences between the derivatives of the capacitive characteristics of the metal-insulator-semiconductor structure obtained as a result of numerical differentiation and its direct measurement by the two-frequency method are presented. The reason for this difference is suggested.

Keywords: capacitance derivative, capacitance-voltage characteristic, two-frequency method, metal – insulator – semiconductor.

Двухчастотный метод применяется при исследовании объектов с нелинейными характеристиками. Особенностями метода являются использование измерительного сигнала, который содержит две близкие частоты, и измерение характеристик исследуемого объекта на разностной частоте составляющих измерительного сигнала.

Обычно измерение производной вольт-фарадной характеристики (dC/dV) используется для определения таких характеристик полупроводниковых структур, как напряжение пробоя, спектр поверхностных состояний в полупроводнике, напряжение плоских зон, профиль легирования и т.д. Некоторые подобные параметры можно извлечь из dC/dV, полученной в результате численного дифференцирования измеренной вольт-фарадной характеристики (C-V). Для объектов без частотной дисперсии dC/dV, полученные в результате численного дифференцирования C-V и в результате прямого измерения не будут отличаться. Для объектов, обладающих частотной дисперсией, dC/dV, полученные разными способами, могут существенно различаться и нести различную информацию об объекте.

В настоящей работе представлен вариант реализации двухчастотного метода измерения dC/dV, который можно использовать для диагностики и исследования полупроводниковых структур.

При измерении dC/dV проявляются нелинейные эффекты, которые возникают под воздействием переменного сигнала. Если в качестве измерительного переменного сигнала использовать сигнал с малой амплитудой, содержащий две близкие частоты, то тогда величина dC/dV будет про-

порциональна величине амплитуды выходного сигнала на разностной частоте. Этот предположение доказывается разложением Тейлора функции дифференциальной ёмкости от напряжения.

Измерительная система состоит из программируемого устройства на платформе National Instruments single board rapid input output sb9637 (ПУ), исследуемой структуры (ИС), интегратора и двух селективных измерителей амплитуды сигналов (высокочастотный – ВЧ; низкочастотный – НЧ). Данная измерительная система позволяет одновременно измерять C-V и величину пропорциональную dC/dV. Далее в тексте она будет обозначена просто dC/dV.

Измерение C-V происходит на средней либо на одной из частот. Измерение dC/dV происходит на разностной частоте.

ПУ генерирует измерительный сигнал, а также производит сбор и отправку измеренных данных на ПК для их обработки и отображения результатов. Для управления генерируемым сигналом, обработки измеренных данных, их отображения и сохранения, а также для взаимодействия пользователя с ПУ был написан пакет программ в среде NI LabVIEW 2015. Обработка данных происходит методом усреднения установленного пользователем количества измерений АЦП. Такое усреднение позволяет снизить влияние шумов и паразитных наводок на отображаемые данные.

Селективными измерителями амплитуды ВЧ и НЧ измеряются величины, пропорциональные ёмкости и модулю первой производной ёмкости по напряжению, т.е. с помощью данной измерительной системы не получится определить знак производной, т.к. эти приборы нечувствительны к фазе сигнала.

В этой работе в качестве селективных измерителей амплитуды были селективные нановольтметры Unipan 237 с установленной селективностью 25 дБ/октава для высокочастотной составляющей и 40 дБ/октава для разностной частоты.

Для тестовых измерений использовалась кремниевая МДП-структура с толщиной окисла 94 нм на подложке с n типом проводимости и алюминиевыми контактами диаметром 320 мкм и толщиной 100 нм.

Представленные в работе результаты были получены при комнатных условиях, скорости развёртки напряжения равной 0,05 В/с и параметрах измерительного сигнала: амплитуды обеих составляющих – 20 мВ, частот – 4 и 4,093 кГц. Измерения C-V и dC/dV проводились соответственно на частотах 4 кГц и 93 Гц.

На высокочастотной C-V МДП-структуры в области формирования инверсного слоя обнаружен гистерезис, что говорит о наличии неравновесных процессов при измерении.

Получив результат прямого измерения dC/dV и сравнив его с результатом численного дифференцирования, были отмечены два качественных различия: ненулевое значение в области инверсии при прямом измерении, при численном дифференцировании dC/dV в этой области равно нулю, и различие в положениях пиков.

Ненулевое значение измеренной производной в области инверсии можно объяснить наличием высокочастотных составляющих при измерении на низкой разностной частоте. Такие условия подобны условиям измерения неравновесной высокочастотной C-V, когда происходит быстрая развёртка напряжения. При численном дифференцировании и прямом измерении двухчастотным методом есть существенное различие в частотах дифференцирования. В первом случае частота дифференцирования равна частоте развёртки напряжения, в во втором она равна частоте высокочастотного сигнала (несущей частоте).

Показано, что прямое измерение первой производной вольт-фарадной характеристики по напряжению позволяет регистрировать особенности, которые нельзя обнаружить в результате численного дифференцирования исходной характеристики.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что предложенная реализация двухчастотного метода позволяет одновременно измерять равновесные и неравновесные вольт-фарадной характеристики МДП структуры.

А. С. Спирюхин, И. И. Нуреев
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

КОМПАКТНЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНОК

Аннотация. Рассмотрены методы химического анализа, оптические методы, метод спектроскопии, мониторинг и зондирование полигармонического излучения.
Ключевые слова: химический анализатор, спектроскопия, оптические методы.

A. S. Spiryukhin, I. I. Nureev
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

COMPACT CHEMICAL ANALYZER BASED ON OPTICAL FREQUENCY COMBS

Abstract. Methods of chemical analysis, optical methods, spectroscopy, monitoring and probing of polyharmonic radiation were considered.
Keywords: chemical analyzer, spectroscopy, optical methods.

Предпосылки для создания химического анализатора заключается в том, что с его помощью можно проводить очень точные и быстрые спектроскопические измерения и, следовательно, быстро определять химический анализ веществ.

Химический анализ – это совокупность методов, с помощью которых определяют химический состав веществ. Химический анализ разделяют на качественный и количественный. Задача первого – обнаружение и идентификация компонентов исследуемого образца, второго – определение их концентраций или масс. Также существуют такие методы определения вещества, как химические методы анализа, физико-химические методы анализа, физические методы анализа, а также биологический метод анализа.

Из физико-химических методов анализа вещества можно выделить категорию методов, которая больше всего подходит к вопросу химических анализаторов – это оптические методы анализа, а именно методы спектроскопии. Оптические методы основаны на взаимодействии электромагнитного излучения с веществом. Сопровождается явлениями, из которых наиболее важны испускание, поглощение и рассеяние излучения. Частота сигнала, при таком взаимодействии, отражает специфические свойства вещества, его природу, а интенсивность сигнала связана с количеством анализируемого соединения. Методы спектроскопии позволяют получать детальную информацию о составе, строении и количественном содержании исследуемых веществ.

Спектроскопия – это наука о взаимодействии электромагнитного излучения с веществами. В процессе этого взаимодействия мы получаем информацию свете и о веществе. Самый простой случай – это то, что известно с давних пор, когда знаменитый химик Бунзен кинул обычную поваренную соль в пламя, в результате чего соль вспыхнула яркими звездочками. Если это свечение разложить на спектры с помощью какого-то прибора, например призмы или дифракционной решетки, то можно увидеть появившиеся линии. Эти линии получили название спектральных линий, изучая их, можно узнать, как устроено то вещество, над которым ведется наблюдение. Анализируя свечение вещества (газа, жидкости, твердого тела), можно узнать, как оно устроено, из каких атомов и молекул состоит, как эти атомы и молекулы взаимодействуют друг с другом. Выяснилось, что спектры различных веществ могут быть разными. Самый простой случай – это спектры атомов и ионов (например, атомарного водорода). В таких случаях регистрируются спектры, которые сравнительно просты для анализа и представляют собой набор узких спектральных линий. Благодаря такому спектральному анализу можно проанализировать, как устроен атом, какие в нем есть уровни энергии.

Каждому переходу отвечает спектральная линия (совокупность всех фотонов одной частоты). Не все переходы могут осуществляться. Часть их запрещена правилами отбора. Наиболее вероятны резонансные переходы, это переходы с первого возбуждённого уровня на основной и наоборот, т. е. $E1 \rightarrow E0$ и $E0 \rightarrow E1$.

Как правило, мониторинг осуществляется с помощью оптических анализаторов спектра или векторных анализаторов. В этом случае реализация мониторинга осуществляется с помощью наложения полигармонического зондирующего сигнала на спектр информационного сигнала. Алгоритмическая обработка ведется на частоте огибающей биений составляющих зондирующего сигнала. Недостатком такого мониторинга является невозможность перестройки длины волны несущей канала, которая используется и как центральная длина волны мониторинга, для настройки на центр полосы пропускания (центральную частоту). Из достоинств можно отметить, что для обработки требуется только один фотоприемник.

Исходя из результатов мониторинга и зондирования, можно сделать вывод, что частотные гребенки не только справляются с такими задачами, но и могут улучшить протоколы безопасности в телекоммуникационных сетях, в разработке лекарственных средств, а также помочь в создании нового поколения комплексных вычислений в медицине и много другом.

В. И. Струнин[1, 2], Г. Ж. Худайбергенов[1, 2]
[1] Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского (Омск)
[2] Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН (Омск)

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ-ТЕРМОСТАТОВ

Аннотация. Разработан измерительный стенд с предельным вакуумом $10^{-5}\div10^{-6}$ Pa для определения атмосферы герметичных микросхем. Получены масс-спектры атмосферы остаточных газов при разгерметизации кварцевых резонаторов-термостатов (КРТ) в корпусе DIL-14. Проведен качественный анализ состава газа при температурах 20÷160 °С. В результате проведенного анализа спектров установлено, что основными загрязняющими веществами являются азотсодержащие соединения и пары воды.

Ключевые слова: масс-спектрометрия, подкорпусное пространство микросхемы, кварцевый резонатор-термостат.

V. I. Strunin[1, 2], G. Zh. Khudaibergenov[1, 2]
[1] Dostoevsky Omsk State University (Omsk)
[2] Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center SB RAS (Omsk)

INVESTIGATION OF ATMOSPHERE OF RESIDUAL GASES OF QUARTZ RESONATORS OF THERMOSTATS

Abstract. A measuring bench with a maximum vacuum of $10^{-5}\div10^{-6}$ Pa has been developed to determine the atmosphere of sealed microcircuits. Mass spectra of atmosphere of residual gases are obtained during depressurization of quartz resonators-thermostats (QRT) in housing of DIL-14. Qualitative analysis of gas composition at temperatures of 20÷160 °C was carried out. As a result of the analysis of spectra, it was found that the main pollutants are nitrogen-containing compounds and water vapors.

Keywords: mass spectrometry, sub-body space of microcircuit, quartz resonator thermostat.

Высокая степень интеграции современных изделий пьезотехники предъявляет строгие требования к качеству поверхности кристаллов и внутренних поверхностей корпусов для ограничения негативных поверхностных процессов, приводящих к деградации электрических параметров, и коррозии металлических контактов и проводников. На работу микроэлектронных устройств негативно влияют адсорбаты, конденсат влаги, водород, кислород, углеводороды, аммиак, галогениды и другие летучие вещества. В работе представлен метод масс-спектрометрического анализа газов замкнутого объема КРТ, выделяемых материалами, используемыми при монтаже устройств. Метод позволит определить вещества с наибольшим газовыделением и по возможности исключить или, по крайней мере, минимизировать их присутствие. Проведен масс-спектрометрический анализ остаточной атмосферы подкорпусного пространства КРТ после прокола крышки микросхемы, измерены парциальные давления основных химических соединений в зависимости от температуры, которая изменялась от 20÷160 °С. В результате проведенных экспериментов, установлены основные химические соединения, которые, на наш взгляд, могут пагубно влиять на рабочие характеристики КРТ и даже выводить их из строя. Предложены меры по устранению данных соединений.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (номер госрегистрации проекта в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А19-119052890058-2).

А. Р. Шарафеев, А. Р. Насыбуллин
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

СВЧ ДАТЧИК НА ПОЛОСКОВЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУРАХ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ВЕЩЕСТВ

Аннотация. Рассчитаны и смоделированы параметры для оптимальной работы СВЧ датчиков на брэгговских структурах. Проведено измерение влажности фармацевтического порошка, который является микрокристаллической целлюлозой.
Ключевые слова*:* СВЧ датчик, брэгговские структуры, фармацевтический порошок.

A. R. Sharafeev, A. R. Nasybullin
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

MICROWAVE SENSOR ON STRIP BRAGG STRUCTURES FOR NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF MEDICINAL SUBSTANCES

Abstract. Parameters for optimal operation of microwave sensors on Bragg structures were calculated and modeled. The moisture content of pharmaceutical powder, which is microcrystalline cellulose, was measured.
Keywords: the microwave sensor, Bragg structures, pharmaceutical powder.

Микроволны охватывают диапазон частот от 300 МГц до 300 ГГц. Уникальные свойства и превосходство микроволн над обычными источниками энергии вызвали огромный интерес к их использованию для промышленной переработки. Микроволновая технология широко распространена в фармацевтической области для различных применений, таких как экстракция природных продуктов и фармацевтических активных веществ, органические синтезы химических соединений, сушка фармацевтических порошков и гранул, модификация материала, а также разработка дозированных форм.

Применение микроволновой технологии в фармацевтической обработке может быть в целом разделено на те, которые используют тепловые и нетепловые эффекты микроволн. Нетепловые эффекты используются для обработки материалов, которые не поддаются обычным методам обработки. В частности, микроволны предлагают путь для улучшения и модификации физико-химических свойств материалов посредством специфических материалов-микроволновых взаимодействий, которые не являются термическими по своей природе. Эти взаимодействия использовались главным образом для разработки лекарственных форм с контролируемым высвобождением.

Тепловые эффекты микроволн

В качестве альтернативного источника тепла микроволны были применены с замечательным успехом для сушки как фармацевтического сырья, так и продуктов. В многочисленных исследованиях сушка с помощью микроволнового излучения превзошла традиционные методы сушки с точки зрения эффективности процесса и поддержания качества ценных фармацевтических материалов и продуктов.

Микроволновая сушка

Когда вода подвергается воздействию микроволн, полярные молекулы испытывают интенсивные вращательные движения в попытке выровнять себя с изменяющимися полярностями поля. Накопление кинетической энергии и столкновения с соседними молекулами приводят к диэлектрическим потерям и образованию тепла при трении, которые способствуют испарению. Это основа микроволновой сушки.

По сути микроволновая сушка отличается от обычной сушки режимом генерации и передачи тепла. Обычные источники тепла вызывают преимущественно локализованный поверхностный нагрев и полагаются на медленный процесс теплопроводности от горячей поверхности материала к его внутренней части на основе установленных температурных градиентов. Это часто составляет стадию ограничения скорости в обычных процессах сушки. Микроволны, однако,

нагревают и сушат уникальным способом. Микроволновый нагрев происходит через прямые взаимодействия между волнами и молекулами материала мишени. Это обусловлено диэлектрической потерей материала, которая, как обсуждалось выше, зависит от его физико-химических свойств. Когда материалы обладают благоприятными диэлектрическими свойствами и имеют физические размеры, меньшие, чем длина волны микроволн (12,2 см), проникающая и объемная природа нагрева микроволн позволяет мгновенно и быстро генерировать внутреннее тепло. Следовательно, можно ожидать более быстрой и более эффективной скорости нагревания и сушки в условиях микроволнового излучения.

Для примера была собрана микрополосковая линия с параметрами подложки ε_2, $tg\delta 2$ и толщиной h, к которой со стороны полоскового проводника приложен без зазоров диэлектрик, толщиной d. После рассчетов и моделирования микрополосковой линии были найдены наилучшие параметры для оптимальной работы СВЧ датчика, а именно ширина полоска, диэлектрическая проницаемость слоя диэлектрика, а также толщина подложки микрополосковой линии.

В результате моделирования СВЧ датчика с расчитаными параметрами получили результаты измерения влажности (микрокристаллической целлюлозы) и коэффициенты отражения для каждого значения влажности.

А. С. Шашкина, С. Д. Ханин
Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного (Санкт-Петербург)

МЕТОДЫ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Рассмотрены предпосылки диагностики дефектов и неоднородностей полупроводниковых структур с помощью фрактального анализа особенностей осциллограмм микроплазменных импульсов тока при электрическом пробое. Показано, что такой анализ является более комплексной оценкой состояния структуры по сравнению с традиционными методами диагностирования по уровню шума.
Ключевые слова: фрактальный анализ, дефект структуры, микроплазма, шум.

A. S. Shashkina, S. D. Khanin
Military Telecommunications Academy named after the Soviet Union Marshal S. M. Budienny (Saint Petersburg)

METHODS FOR FRACTAL ANALYSIS OF INHOMOGENEES IN SEMICONDUCTOR MATERIALS

Abstract. Background diagnostic considered defects and inhomogeneities semiconductor structures using fractal analyzing waveforms microplasma current pulses under electrical breakdown. It is shown that such an analysis is a more comprehensive assessment of the state of the structure in comparison with traditional methods of diagnosing by the noise level.
Ключевые слова: fractal analysis, structural defect, microplasma, noise.

Диагностика неоднородностей и дефектов и прогнозирование надежности в полупроводниковых структурах остается актуальной задачей. Достаточно распространены методы диагностирования по уровню шума, однако для получения максимально возможной информации о потенциально опасных дефектах необходимо учитывать все виды шумов, наблюдаемые в конкретном образце. Таким образом, важна разработка простого в использовании и дешевого инструмента для комплексного анализа полупроводниковой структуры.

Электрический пробой полупроводниковых структур обычно локализован в местах дефектов и имеет микроплазменный характер, т.е. в случайные моменты времени происходит протекание импульсного тока через образец полупроводника.

Было обнаружено, что временное распределение микроплазменных импульсов тока, несмотря на свой случайный характер, обладает свойством самоподобия. Помимо этого, выявлена корреляция между наблюдаемыми временными распределениями в контексте фрактального подхода и структурными неоднородностями полупроводниковых материалов. Выраженные фрактальные свойства свидетельствуют о наличии большого количества дефектов. Поэтому для того, чтобы диагностировать дефекты и неоднородности структуры, необходимо выполнить следующее:

1. Получить прямую и обратную ветви вольтамперной характеристики (ВАХ) исследуемого образца полупроводника.

2. Для каждой точки ВАХ построить и проанализировать осциллограмму импульсного тока.

3. Проанализировать прямые ветви ВАХ: определить избыточные токи при смещениях менее 1 В, рассчитать коэффициент неидеальности.

4. В случае исследования светоизлучающих структур определить величину прямого тока, при котором появляется свечение. Данное значение зависит от степени дефектности структуры, поскольку именно дефекты способствуют образованию микроплазм при обратном смещенни.

5. Провести фрактальный анализ полученных осциллограмм, а именно: рассчитать фрактальную размерность последовательности импульсов по типу Хаусдорфа, по степени самоподобия классифицировать конкретный образец по фрактальным свойствам.

В случае реализации фрактального анализа, согласно п. 5, с применением разработанной классификации можно определить степень неоднородности структуры, минуя п. 2–4. Анализируемая временная последовательность импульсов содержит в себе флуктуации различных происхождений, которые имеют место в данном образце, поэтому фрактальная методика способствует комплексной диагностике.

Данный алгоритм методики фрактального анализа может быть использован в качестве основы неразрушающего метода контроля структурных неоднородностей при разработке и производстве полупроводниковых приборов.

К. А. Батенков
Академия федеральной службы охраны Российской Федерации (Орёл)

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ С ИМПУЛЬСНЫМИ ПОМЕХАМИ

Аннотация. Показано, что в случае измерения параметров канала связи наиболее важной статистической характеристикой является его импульсная характеристика. Представлено, что ее оценкой обычно принимают усредненное значение. Получено аналитическое описание оценки импульсной характеристики канала связи с импульсными шумами.

Ключевые слова: цифровая линия связи, импульсная характеристика, дисперсия оценки, импульсный шум.

K. A. Batenkov
The Academy of the Federal Guard Service of the Russian Federation (Oryol)

CHARACTERISTIC EVALUATION OF DIGITAL COMMUNICATION LINE WITH PULSE INTERFERENCE

Abstract. It is shown that in the case of measuring the parameters of a communication channel, the most important statistical characteristic is its pulse characteristic. It is shown that its value is usually taken as an average value. An analytical description of the estimation of the pulse characteristic of a communication channel with pulse noise is obtained.

Keywords: digital communication line, pulse characteristic, estimation variance, pulse noise.

В работе проведено моделирование цифровой линии связи, использующей в качестве среды передачи медножильный кабель связи, подверженный воздействию импульсных помех. При этом данные потребителей, представляющие собой поток бит, передаются на скремблер, затем преобразуются помехоустойчивым кодером, перемежителем и поступают в последовательно-параллельный преобразователь. Формирование вектора координат точек сигнальных созвездий производится кодером сигнальных конструкций из блока бит. В настоящее время наиболее часто используется квадратурно-амплитудная модуляция (QAM – quadrature amplitude modulation). В данном случае координаты разбиваются на группы, несущие двумерные точки сигнальных созвездий. Объем сигнальных созвездий может изменяться в довольно широких пределах: например, от 4 до 32 768. Общая суммарная размерность сигнальных созвездий должна быть степенью числа 2.

В дальнейшем вектор координат предварительно обрабатывается в соответствии с характеристикой канала связи (импульсной, частотной и т.п.). Для этого необходимо ее измерить, что оказывается весьма нетривиальной задачей.

При моделировании импульсного шума используют множество вариантов, каждый из которых описывается различными соотношениями между амплитудой, длительностями импульсов и межимпульсного интервала. Однако аналитический вид стохастических свойств импульсного шума, принимающих во внимание все факторы, оказывается чересчур громоздким, особенно когда источники помех являются вариативными и плохо прогнозируемыми. По данным причинам в литературе широко используется модель, в которой импульсный шум описывается на основе коротких и широкополосных импульсов. Наиболее часто используемой моделью подобного типа явлений выступает Бернулли-Гауссовский процесс, образующий амплитудно-модулированную последовательность строб. В результате шумовые отсчеты оказываются композицией стохастических величин Гаусса и Бернулли.

Хорошо известно, что для любой статистической характеристики существует множество оценок. В случае измерения параметров канала связи наиболее важной статистической характеристикой является его импульсная характеристика, а ее оценкой обычно принимают усредненной значение. Подобная оценка оказывается несмещенной и состоятельной, а ее качество характеризуется дисперсией, отыскать которую возможно на основе плотности результатов независимых опытов, представляющую собой произведение функций правдоподобия канала связи.

Ее аналитическое описание показывает, что качество определяется не только дисперсией гауссовского шума в канале связи, как в случае классического гауссовского канала связи, но и параметрами импульсного шума.

Ю. Р. Буткевич, В. В. Афанасьев
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

СЕЛЕКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДИСКРЕТНО-НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ ДУФФИНГА-ХОЛМСА С ДИНАМИЧЕСКИМ ХАОСОМ

Аннотация. Исследованы особенности избирательного подавления сигналов дискретно-нелинейной системы Дуффинга-Холмса с хаотической динамикой. Выполнено моделирование селективного подавления сигналов системы Дуффинга-Холмса в условиях действия низкочастотных и высокочастотных шумов в канале системы связи, использующей эффекты динамического хаоса.

Ключевые слова: динамический хаос, система Дуффинга-Холмса, селективное подавление, система связи.

Yu. R. Butkevich, V. V. Afanasyev
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

SELECTIVE SUPPRESSION OF CHAOTIC SIGNALS OF DISCRETE NON-LINEAR DUFFING-HOLMS SYSTEMS WITH DYNAMIC CHAOS

Abstract. The features of selective suppression of signals of a discrete-nonlinear Duffing-Holmes system with chaotic dynamics are investigated. Modeling of selective suppression of signals of the Duffing-Holmes system under the influence of low-frequency and high-frequency noise in the channel of a communication system using the effects of dynamic chaos is carried out.

Keywords: dynamic chaos, Duffing-Holmes system, selective suppression, communication system.

Главным преимуществом использования динамического хаоса в системах связи является возможность применения методов обработки на основе свойств, порождающих хаотическими системами и функциональных связях между формируемыми сигналами этих систем. Селективное подавление сигналов систем с динамическим хаосом открывает новые возможности при приеме и идентификации, а также обработке сигналов цифровых систем связи на основе динамического хаоса. В работе рассмотрено селективное подавление сигналов дискретно-нелинейных систем Дуффинга-Холмса с хаотической динамикой.

Цель работы – оценка эффективности селективного подавления сигналов дискретно-нелинейных систем Дуффинга-Холмса с динамическим хаосом при воздействии помех.

Для достижения поставленной цели произведено моделирование селективного подавления сигналов вариантов дискретно-нелинейной системы Дуффинга-Холмса в математической среде Machcad методом Эйлера с помощью задачи цикла решения. Параметры моделируемой системы, реализующие хаотическое поведение, выбраны: $b = 0,15$, $a = 0,15$, $w = 0,8$.

Селективное подавление сигналов систем Дуффинга-Холмса произведено по принципу двухканальности теории инвариантности и с применением метода интегрирования. Исследованы взаимосвязи обоих методов от шага временной дискретизации и получены оценки влияния помех при вариации отношения сигнал/шум и шага дискретизации. Проведен сравнительный анализ двух методов селективного подавления сигналов дискретно-нелинейных систем Дуффинга-Холмса с хаотической динамикой при воздействии шумов.

Установлено, что при увеличении шага интегрирования коэффициент подавления сигналов систем Дуффинга-Холмса снижается, то же наблюдается при снижении отношения сигнал/шум в канале связи. При моделировании отмечено, что метод интегрирования показал сравнительно более высокую степень селективного подавления сигналов систем Дуффинга-Холмса, и что воздействие высокочастотной составляющей шума оказывает большее влияние на коэффициент подавления, чем низкочастотная составляющая. Это указывает на необходимость применения при построении цифровых систем связи на основе дискретно-нелинейных систем Дуффинга-Холмса дополнительной предварительной фильтрации при селективном подавлении псевдослучайных сигналов системы, порождающей динамический хаос. Обоснованы рекомендации по выбору параметров предварительных сглаживающих фильтров.

А. Ю. Ветлужский
Институт физического материаловедения СО РАН (Улан-Удэ)

ЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Аннотация. Обсуждаются методы определения эффективной диэлектрической проницаемости металлических фотонных кристаллов, которые могут быть использованы как для теоретического анализа, так и для практического применения. Показывается, что металлические фотонные кристаллы проявляют свойства, во многом сходные со свойствами сплошных металлов. При этом в видимом диапазоне при определенных параметрах они обладают значительно меньшими тепловыми потерями и положительной меньше единицы эффективной диэлектрической проницаемостью, что делает их перспективными для создания различных устройств преобразования оптического излучения.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, эффективная диэлектрическая проницаемость, резонанс, дисперсия.

A. Yu. Vetluzhsky
Institute of Institute of Physical Materials Science SB RAS (Ulan-Ude)

EFFECTIVE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF 2D METAL PHOTONIC CRYSTALS IN THE OPTICAL RANGE

Abstract. Methods for determining the effective dielectric constant of metallic photonic crystals that can be used both for theoretical analysis and for practical applications are discussed. It is shown that metal photonic crystals exhibit properties largely similar to those of solid metals. At the same time in the visible range at certain parameters they have much lower thermal losses and positive (lower unit) effective permittivity. This makes metallic photonic crystals promising for the creation of various devices for conversion of optical radiation.

Keywords: photonic crystals, effective permittivity, resonance, dispersion.

Среди искусственных оптических материалов, которые активно изучаются в последние годы, особое место занимают металлические фотонные кристаллы (ФК) – двумерно-периодические решетки, образованные цилиндрическими элементами, имеющими высокую проводимость в радио- и инфракрасном диапазонах. Обладая всеми свойствами ФК, в частности, имея спектр пропускания в виде чередующихся запрещенных и разрешенных зон, такие структуры можно рассматривать и как своеобразные метаматериалы. А именно в разрешенных диапазонах частот, где длина волны излучения превышает период расположения элементов в ФК, последние проявляют плазмоподобные свойства, т.е. могут рассматриваться как сплошные среды, диэлектрическая проницаемость которых на частотах ниже пороговой отрицательна, а выше – имеет значение меньше единицы. В настоящем докладе рассматривается ряд оригинальных способов определения электрофизических параметров таких материалов, применимых в оптическом диапазоне, и демонстрируется их эффективность с использованием методов строгого численного моделирования.

В первую очередь это анализ собственных резонансных свойств металлических ФК. В диапазоне частот первой разрешенной зоны, где такие структуры можно рассматривать как однородные метаматериалы с показателем преломления меньше единицы, их спектр пропускания представляет собой последовательность пиков. Каждому из них соответствует локализация поля во внутренних областях ФК, возникающая, когда линейная протяженность структуры оказывается кратна половине длины волны в ФК, который выступает в данном случае в роли объемного резонатора. Сопоставление резонансной частоты возбуждения структуры с ее пространственной протяженностью позволяет корректно определить ее эффективную диэлектрическую проницаемость как теоретически, так и экспериментально.

Другим рассматриваемым в докладе способом является анализ процессов отражения и преломления волн на границах металлических ФК на частотах первой разрешенной зоны. Анализ интерференционных картин, получаемых при численном моделировании взаимодействия падающих под различными углами плоских волн с границами ФК, демонстрирует отсутствие локальных неоднородностей поля внутри ФК, связанных с рассеянием на отдельных элементах, подтверждая тем самым возможность описания свойств таких структур на частотах разрешенной зоны как однородного метадиэлектрика. Поскольку ФК в данном случае выступает в роли среды с малыми значениями диэлектрической проницаемости, при возбуждении его границы возможно выполнение условий полного внутреннего отражения, что также дает возможность однозначного определения искомых параметров.

Важно, что в диапазоне первой разрешенной зоны металлические ФК являются сильно диспергирующими средами, и данные способы позволяют установить законы дисперсии, характеризующие свойства таких метаматериалов во всем указанном диапазоне.

С ростом частоты увеличиваются потери в материале элементов ФК, поэтому в видимом диапазоне описанные способы определения эффективной диэлектрической проницаемости ФК становятся менее эффективными. В этом случае может быть использован подход, базирующийся на сопоставлении и минимизации расхождений результатов моделирования амплитудно-фазового распределения поля в ФК и однородном диэлектрике, характеризующемся комплексным показателем преломления.

Обладая сверхнизкими значениями эффективной диэлектрической проницаемости, металлические ФК могут выступать в качестве основы для создания устройств преобразования излучений оптического диапазона: различного рода линзовых систем, включая линзы Люнеберга; коллиматоров; волноведущих систем на основе линейных дефектов в структуре ФК, в которых локализация поля достигается за счет полного внутреннего отражения, и т.д.

Работа выполнена в рамках госбюджетного проекта «Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах» в ИФМ СО РАН.

В. Г. Давыдов, В. В. Афанасьев
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н.Туполева – КАИ (Казань)

ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ РЕЖЕКТИРОВАНИЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДМИТРИЕВА-КИСЛОВА

Аннотация. Выполнено моделирование избирательного режектирования сигналов дискретно-нелинейной системы Дмитриева-Кислова. Рассмотрены структурные схемы реализации режектирования формируемых сигналов. Проведено сравнение эффективности исследуемых методов селективного подавления сигналов при действии шумов.

Ключевые слова: хаотические сигналы, псевдослучайные сигналы, система Дмитриева-Кислова, избирательное режектирование.

V. G. Davydov, V. V. Afanasyev
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

SELECTIVE REJECTION OF PSEUDO-RANDOM SIGNALS OF THE DMITRIEV-KISLOV DYNAMIC SYSTEM

Abstract. The simulation of selective signal rejection of the discrete-nonlinear Dmitriev-Kislov system is performed. The structural schemes of realization of generated signals rejection are considered. A comparison of the effectiveness of the investigated methods of signals selective rejection under the action of noise is performed.

Keywords: chaotic signals, pseudo-random signals, Dmitriev-Kislov system, selective rejection.

Система Дмитриева-Кислова с хаотической динамикой может быть применена для формирования широкополосных сигналов. Широкополосные сигналы обеспечивают конфиденциальность передачи и более высокую её помехоустойчивость, что определяет актуальность их исследования.

Для применения сигналов, формируемых системами с хаотической динамикой, необходимо определить эффективный способ их обработки. Цель работы заключается в исследовании методов избирательного режектирования сигналов дискретно-нелинейной системы Дмитриева-Кислова.

Математическое моделирование системы выполнено в среде Mathcad. Формирование сигналов дискретно-нелинейной системы произведено численным интегрированием исходной системы ОДУ. Для численного решения применён метод Эйлера как наименее требовательный к вычислительным ресурсам. Величина шага интегрирования системы выбрана из диапазона допустимых величин, при которой сохраняются требуемые статистические характеристики формируемых сигналов.

При исследовании было оценено влияние шума в канале связи на эффективность обработки сигналов. В качестве модели шума применён случайный процесс с равномерным распределением. Оценка эффективности избирательного режектирования производилась по отношению величин СКО в разных каналах после осуществления режектирования одного из сигналов дискретной системы Дмитриева-Кислова. При изменении уровня шума в каналах проводилась вариация отношения сигнал/шум.

Проведено сопоставление предлагаемых вариантов реализации селективного режектирования сигналов дискретной системы Дмитриева-Кислова. Получены сравнительные характеристики рассмотренных структурных схем, реализующих методы избирательного режектирования. Установлено, что применение избирательного режектирования может быть осуществлено в рассматриваемой дискретно-нелинейной системе Дмитриева-Кислова с динамическим хаосом в условиях аддитивных шумовых воздействий.

Е. В. Дереча, Д. Д. Привалов
Институт радиофизики и физической радиоэлектроники Омского научного центра СО РАН (Омск)

ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ НЕСУЩЕЙ НА ОШИБКУ ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ГММС-СИГНАЛА

Аннотация. В работе рассмотрен способ одновременной оценки тактового и частотного отклонения ГММС-сигнала, основанный на возведении в степень. Проведен анализ влияния нестабильности несущей на ошибку тактовой синхронизации ГММС-сигнала. Приведена численная зависимость дисперсии оценки тактовой частоты от отношения сигна – шум.
Ключевые слова: тактовая синхронизация, частотная синхронизация, ГММС модуляция.

E. V. Derecha, D. D. Privalov
Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center SB RAS (Omsk)

THE INFLUENCE OF THE INSTABILITY OF THE CARRIER FREQUENCY ON THE ERROR OF THE TIMING SYNCHRONIZATION OF THE GMSK SIGNAL

Abstract. The paper considers a method for simultaneous estimation of the timing and frequency deviation of a GMMS signal based on raising to a power. The analysis of the influence of carrier instability on the timing synchronization error of the GMMS signal is carried out. The numerical dependence of the variance of the timing frequency estimate on the signal-to-noise ratio is given.
Keywords: timing synchronization, frequency synchronization, the GMSK modulation.

К портативным устройствам радиосвязи предъявляются высокие требования в части уменьшения габаритных размеров и увеличения продолжительности работы от встроенных аккумуляторных батарей. В то же время, такие устройства должны осуществлять весь комплекс задач по обработке и формированию сигналов с помощью цифровых сигнальных процессоров, работающих на минимально возможной частоте и потребляющих тем самым незначительную энергию.

Одним из видов рассинхронизации в системах радиосвязи является расстройка частот опорных генераторов приемника и передатчика. Кроме того, неизбежно возникают искажения, требующие осуществления частотной и фазовой синхронизации. Это значительно усложняет решение задачи синхронизации в процессе обработки принимаемых сигналов при разработке радиостанций, обеспечивающих функционирование указанных систем.

Целью данной работы является исследование влияния нестабильности несущей, вызванной остаточной погрешностью в оценке частоты сигнала гауссовой частотной модуляции с минимальным сдвигом (ГММС), на ошибку тактовой синхронизации. Использование в работе ГММС-сигнала определяется его применением в таких системах радиосвязи, использующих малогабаритные портативные устройства, как GSM, DECT, спутниковые системы связи.

В известной литературе по синхронизации предлагается использовать принцип возведения сигнала в квадрат, как для восстановления фазы, так и тактовой частоты. В спектре сигнала, возведенного в квадрат, будут содержаться компоненты, содержащие величину расстройки опорных генераторов приемника и передатчика, а также величину фазового отклонения. Для выделения каждой из компонент обычно используются схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В качестве недостатка такого варианта построения схем синхронизации следует указать необходимость построения системы ФАПЧ с астатизмом более высокого порядка, чем в предлагаемой работе, для устранения влияния непрерывно изменяющегося частотного сдвига.

В данной работе рассмотрен вариант построения схемы, объединяющий фазовую и тактовую синхронизации, что обеспечивает уменьшение числа операций, производимых цифровым сигнальным процессором. При этом вводится петля обратной связи по фазе, которая обеспечивает одновременное функционирование обеих систем синхронизации. Проведено моделирование работы предлагаемой схемы с имитацией временной задержки путем введения частотной расстройки тактовых генераторов приемника и передатчика.

На основе проведенного анализа показана возможность одновременного осуществления тактовой и фазовой синхронизации. Преимуществом данной схемы является наличие петли обратной связи с астатизмом первого порядка, позволяющей исключить наличие постоянного фазового сдвига. С помощью математического моделирования определены граничные значения отклонения несущей, при которой еще обеспечивается выполнение тактовой синхронизации с удовлетворительной точностью.

Работа выполнена в рамках государственного задания Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (номер госрегистрации проекта в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А19-119052890058-2).

Л. Г. Кесель, К. О. Ведерникова
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОЙ ШИРИНЫ КОЛЬЦА ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Аннотация. Выполнена расчетная оценка конструктивных параметров коаксиального лазера для получения заданной ширины кольца выходного излучения.
Ключевые слова: резонатор, коаксиальный лазер, конструктивные параметры.

L. G. Kesel, K. O. Vedernikova
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

CALCULATED ESTIMATION OF CONSTRUCTION PARAMETERS OF A COAXIAL LASER FOR OBTAINING A PRESENT WIDTH OF THE RING OF THE OUTPUT RADIATION

Abstract. In this work, we calculated the design parameters of a coaxial laser to obtain a given width of the output radiation ring.
Keywords: resonator, coaxial laser, design parameters.

Экспериментальные исследования выходных характеристик коаксиальных лазеров показали, что в резонаторах данных лазеров существует наклонные типы колебаний. При этом излучение лазера фокусируется в кольцо, диаметр которого определяется углом наклона лучевых потоков к оси резонатора, а угол наклона в свою очередь зависит от согласования области, занимаемой лучевыми потоками оптического резонатора с апертурой разрядного промежутка коаксиальной камеры.

В данной работе рассмотрен резонатор коаксиального лазера, состоящий из плоского и асферического зеркал. Для анализа наклонных типов колебаний была разработана трехмерная модель данного резонатора.

Характеристиками излучения, используемыми для определения конструктивных параметров, являются: диаметр кольца выходного излучения, ширина кольца выходного излучения, диапазон углов наклона выходных лучевых потоков, необходимость селекции отдельных типов колебаний, геометрическая расходимость кольца выходного излучения.

Конструктивными параметрами резонатора, влияющими на вышеперечисленные характеристиками выходного излучения лазера, являются: длина резонатора, величина рабочего зазора разрядной камеры, деформация плоского зеркала, разъюстировки плоского и асферического зеркал, тепловая линза, точность изготовления асферического зеркала.

Минимальная ширина кольца выходного излучения равна диаметру основной моды (если лазер работает на одном типе колебаний). В остальных случаях при генерации нескольких типов колебаний ширина кольца будет больше.

Если не принять меры по селекции отдельных типов колебаний, то ширина кольца будет определяться зазором между стенками разрядной камеры.

Если выходное зеркало подвержено деформациям (температурным или под действием давления атмосферы), то необходимо провести расчет деформации и использовать полученные результаты для корректировки параметров асферического зеркала.

Представленная работа содержит результаты расчетной оценки конструктивных параметров коаксиального лазера для получения заданной ширины кольца выходного излучения.

С. В. Козлов, Ву Тхань Ха
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Белоруссия)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕГРАДАЦИИ ПРИЕМНЫХ КАНАЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ СО СКАНИРУЮЩЕЙ МНОГОКАНАНАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ

Аннотация. Показано сохранение работоспособности радиолокационного измерителя угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой при выходе из строя части приемных каналов. Определены требования к ошибкам калибровки приемных каналов по амплитуде и фазе при заданных максимальных ошибках оценивания угловых координат.
Ключевые слова: деградация приемных каналов, радиолокационный измеритель, угловые координаты, многоканальная антенная система, функция отношения правдоподобия.

S. V. Kozlov, Vu Thanh Ha
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
(Minsk, Belarus)

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF RECEIVING CHANNELS DEGRADATION ON THE EFFICIENCY OF A RADAR DETECTOR-METER OF ANGULAR COORDINATES WITH A SCANNING MULTI-CHANNEL ANTENNA SYSTEM

Abstract. It is shown that the radar angular coordinate meter with a scanning multi-channel antenna system remains operational when a part of the receiving channels fails. The requirements for errors in calibration of receiving channels in amplitude and phase at the specified maximum errors in the estimation of angular coordinates are determined.
Keywords: receiver degradation, radar meter, angular coordinates, multi-channel antenna system, likelihood ratio function.

В ряде работ были предложены одно- и двухэтапные квазиоптимальные алгоритмы обработки сигналов в радиолокационных измерителях угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой. Алгоритмы основаны на операциях пространственной компенсации помех в каждом периоде повторения, оценивании доплеровского сдвига частоты мешающих отражений, их когерентной компенсации, обеления результатов обработки во временной области, оценивании средней мощности и коэффициента междупериодной корреляции отраженного сигнала с последующим построением и максимизацией логарифма функции отношения правдоподобия (ФОП). При синтезе алгоритмов обработки диаграммы направленности (ДН) приемных каналов полагались известными, а комплексные коэффициенты усиления приемных трактов – идентичными. На практике ни первое, ни второе условие в полном объеме не выполняются: форма ДН антенн приемных каналов известна лишь приближенно, а приемные каналы подвержены деградации – выходу из строя отдельных приемных каналов или изменению модуля или фазы коэффициента передачи в сравнении с модельным значением. Для практического применения разработанных алгоритмов требуется оценка влияния деградации приемных каналов на точность определения угловых координат цели и определение требований к точности калибровки приемных каналов. Исследование указанных вопросов и составляло цель настоящей работы.

Для проведения исследований использовалась имитационная математическая модель многоканальной приемной системы при непосредственном воспроизведении алгоритмов оценивания угловых координат цели в условиях деградации приемных каналов. Рассматривался измеритель угловой координаты в составе обзорной импульсной РЛС с механическим вращением антенной системы. Моделируемая антенная система включала основную приемопередающую антенну прямоугольной формы размерами 15x2,5 длин волн и четыре компенсационные антенны размерами 1x2,5длин волн, попарно пристыкованных справа и слева к основной апертуре. Амплитудное распределение поля на апертурах принималось равномерным, число импульсов в

пачке около 100. Во всех случаях на РЛС по главному и боковым лепесткам ДН основного канала воздействовали внешние источники помех при отношении помеха/шум 30…40 дБ.

Рассматривались два варианта деградации: предельный случай выхода из строя отельных приемных трактов, когда их коэффициенты усиления по мощности изменялись на 10…20 дБ; наличию ошибок нормированных коэффициентов усиления приемных каналов по амплитуде в виде центрированной нормально распределенной случайной величины со среднеквадратическим отклонением до 0,3 и нормально распределенных фазовых ошибок со среднеквадратическим значением до 30°.

Для первого случая установлено, что при выходе из строя от одного до трех компенсационных каналов при достаточном отношении сигнал/шум максимум ФОП формируется в правильном направлении, то есть алгоритм сохраняет свою работоспособность даже при выходе из строя трех компенсационных каналов из четырех. При этом величина максимума ФОП снижается на 40, 65 и 80% при выходе из строя одного, двух и трех приемных каналов соответственно.

Установлена причина сохранения работоспособности алгоритма при столь существенной деградации приемных каналов. Показано, что при компенсации внешней помехи в условиях расхождения модельных и фактических значений параметров приемных каналов, но сохранении близкого к заданному коэффициента усиления хотя бы одного из них, в процессе отклонения нормали к антенной системе от направления на помеху реализуемая адаптированная ДН будет приближаться к модельной адаптированной ДН. Так как модельные значения ДН далее используются в алгоритме максимального правдоподобия при оценивании угловых координат, то на части интервала наблюдения отсчеты адаптированной и нормированной принимаемой реализации будут резко отличаться от ожидаемого сигнала, суммироваться с близким к нулю весом, и, следовательно, практически не будут участвовать в формировании значения ФОП. В то же время для отсчетов, когда модельная и реализуемая ДН близки, слагаемые ФОП будут суммироваться с ненулевым весом. Это приводит к наблюдаемому уменьшению максимумов ФОП, но сохранению работоспособности алгоритма оценивания угловых координат. Степень снижения максимума ФОП будет зависеть от разности угловых положений полезного сигнала и помехи и степени деградации приемных каналов. Для оценки влияния деградации приемных каналов на результаты обработки предложено использовать зависимость коэффициента различия формы реальной и модельной адаптированной ДН от углового положения антенной системы.

Для случая малых ошибок калибровки комплексных коэффициентов усиления приемных каналов для наиболее сложной ситуации наличия трех источников внешних помех установлено, что при средней квадратической ошибке приемных каналов по амплитуде в 30% от номинального значения и средней квадратической ошибке по фазе 30° дисперсия ошибки оценивания угловых координат цели увеличивается не более чем в 3 раза в сравнении со случаем идентичных приемных трактов. Ошибки измерения не превышают 10% от ширины главного лепестка ДН основного канала.

Таким образом, в измерителе угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой за счет использования алгоритма максимального правдоподобия происходит частичное устранение влияния деградации характеристик приемных каналов. Влияние имеющих место на практике ошибок калибровки на результат измерения угловых координат окажется относительно небольшим.

Работа выполнена в рамках плана научных исследований Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Д. А. Панков
Омский научно-исследовательский институт приборостроения (Омск)

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация. Рассмотрена проблема устойчивости к отказам и сбоям радиотехнических систем. Выделена проблема появления новых системных свойств (эмерджентность) радиотехнических систем, возникающая при их проектировании. Приведены способы исследования устойчивости в процессе разработки и тестирования системы. Произведена оценка методологии устойчивости согласно зарубежным и отечественным стандартам надежности для радиотехнических систем. Приведены способы борьбы с нежелательными свойствами системы на практике с помощью применения техники фаззинга и имитаторов неисправностей в процессе тестирования. Приведены полученные результаты.

Ключевые слова: робастность радиотехнических систем, надежность программно-аппаратных систем, техника фаззинга, системный анализ, тестирование систем.

D. A. Pankov
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)

SYSTEM ANALYSIS OF RADIO ENGINEERING SYSTEMS

Abstract. The problem failures resistance considered for radio engineering systems. The problem new system properties (emergence) highlighted for radio engineering systems. We give methods of stability research in the process of system development and testing. The stability methodology evaluated in accordance with foreign and domestic reliability standards for radio engineering systems. The methods of dealing with undesirable properties of the system in practice using fuzzing techniques and fault simulators in the testing process are given. The obtained results presented.

Keywords: robustness of radio engineering systems, reliability of software and hardware systems, fuzzing technique, system analysis, system testing.

Радиотехнические системы (системы связи) являются частью программно-аппаратных комплексов, интегрированных в глобальную информационную инфраструктуру. Для удовлетворения современных потребностей связи к радиотехническим системам предъявляются требования по качеству работы, обеспечение которых невозможно без устойчивости к отказам и сбоям, которое проявляется как время наработки системы на отказ.

При этом интеллектуализация систем связи и добавление функций систем связи предполагает увеличение объема программного обеспечения, выполняемого радиотехническими системами. В связи с этим решения, которые действовали для систем «один микроконтроллер – одна функция с заданный временем», часто не применимы. Стандарты и ГОСТ по надежности систем ориентированы на аппаратное обеспечение и не учитывают или недостаточно учитывают возможность ошибок в программах устройств и их последствия.

Проблема устойчивости к любым внешним воздействиям (проблема робастности) программно-аппаратных систем широко рассматривается ИПУ РАН (Институтом проблем управления) уже более 30 лет. До сих пор она теоретически не разрешима, но для различных классов систем разработаны алгоритмы и методы повышения устойчивости к отказам и сбоям за счет выделения областей устойчивости. В качестве передовых проектов ученых из ИПУ выделяются система устойчивого управления для токамака (термоядерный реактор ТД-15), система верификации программного обеспечения для АСУ АЭС «Куданкулам», отказоустойчивые управляющие системы для разгонных блоков и малых спутников широкого назначения в МОКБ «МАРС» и ФГУП ЦНИИмаш, анализ навигационно-пилотажного комплекса самолёта Ил-62м.

При проектировании радиотехнических систем используется ограниченное количество основных архитектур системных модулей – ARM, DSP, FPGA. Тем не менее при выборе и их сочетании в каждой работе по проектированию радиотехнической системы проявляется новые системные свойства (эмерджентность).

В теории систем эмерджентность – появление у системы свойств, не присущих её элементам в отдельности. Современный прикладной системный анализ предлагает подход, который состоит в сосредоточении внимания на двух факторах: недопустимости отдельного рассмотрения любой части, когда целью является улучшение всей системы в целом; вхождении системы как части в большие, объединяющие ее системы, и взаимосвязанность системы с другими системами в окружающей среде.

Проблема эмерджентости отсутствует во всех ГОСТ и стандартах по надежности программно-аппаратных систем: ГОСТ 27.310-95 «Анализ видов, последствий и критичности отказов», MIL-STD-1629 «Procedures for Performing a Failure Mode, Effects Criticality Analysis»; IEC 61508 «Функциональная безопасность электрических, электронных и программируемых электронных систем, связанных с безопасностью»; EN 50128 «Системы связи, сигнализации и обработки. Программное обеспечение для систем управления и защиты железных дорог»; ISO 26262 «Дорожный транспорт. Функциональная безопасность»; Р 51901.12-2007 «Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов».

Тем не менее именно её проявление способствует уменьшению устойчивости системы, т.е. уменьшению заявленного времени наработки на отказ. Согласно практическим исследованиям специалистов по надежности программно-аппаратных систем, экспериментальная оценка устойчивости систем точнее по сравнению с моделированием системной устойчивости на один-два порядка точнее для современных архитектур и предписывается к выполнению стандартами.

Экспериментальная оценка устойчивости к отказам и сбоям производится с помощью имитаторов неисправностей, поскольку протестировать все неисправности для устройства невозможно. Поэтому для радиотехнических систем необходим имитатор неисправностей, который позволит ее проверить с учетом специфики архитектуры системы. Способы тестирования системы предполагают: искажение входных данных, искажение выходных данных, искажение времени, искажение передаточной функции и целевой функции системы.

Также такой имитатор должен позволять выявить ошибки программ. Для выявления ошибок лучше всего подходит техника фаззинга. Фаззинг является самым оптимальным по временным показателям в использовании инструментом для тестирования устойчивости к отказам и сбоям системы (искажение входных данных). С помощью имитации отказов и сбоев программными методами он позволяет проявить ошибки программ и выявлять аппаратные неисправности, проявляющиеся как программные ошибки. Для диагностики обнаруженных отказов/сбоев и выделения причины их возникновения фаззинга недостаточно, поэтому используется системы математической статистики и машинного обучения, позволяющие предсказать отказы и сбои на основе формирования критериев поведения системы и составления анализа признаков наличия отказа или сбоя в системе.

Поскольку решения устойчивости к отказам и сбоям не существует, то спроектированный имитатор позволит в процессе тестирования установить среднее время наработки на отказ полученной системы и сравнить со временем наработки без применения данной технологии. На данный момент в результате исследований предложена архитектура имитатора для радиотехнических систем на базе JTAG-стандарта позволяет получить время наработки на отказ более чем на 30% большее, чем без его применения. Это проверено в процессе тестирования двух радиотехнических устройств для связных комплексов.

Для радиотехнической системы цикл разработки программного и аппаратного обеспечения с использованием тестирования на базе имитаторов неисправностей с поддержкой фаззинга процессорных модулей и их программ в процессе типичной эксплуатации представляется наиболее оптимальным решением задачи повышения устойчивости системы к отказам и сбоям, противостоящей эмерджентности при построении комплексной архитектуры связных комплексов.

Д. Ю. Патронов, Д. В. Крживокольский, Д. Д. Сергеев
Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (Орёл)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НА СОВМЕЩЕННЫХ УЗЛОВЫХ РАДИОЦЕНТРАХ СЕТИ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

Аннотация. В докладе рассмотрены особенности моделирования электромагнитной совместимости на совмещенных узловых стационарных радиоцентрах ведомственных сетей коротковолновой радиосвязи. Представлены результаты оценки ЭМС и предложения по ее обеспечению. Материалы подготовлены на основе математического моделирования с использованием результатов натурных испытаний.

Ключевые слова: КВ радиосвязь, электромагнитная совместимость, узловой стационарный радиоцентр.

D. Yu. Patronov, D. V. Krgivokolskiy, D. D. Sergeev
The Academy of the Federal Guard Service of the Russian Federation (Oryol)

THE MODELING OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ON COMBINED NODE STATIONARY RADIO CENTERS OF SHORT-WAVE RADIO COMMUNICATION NETWORKS

Abstract. The report examines the features of modeling electromagnetic compatibility at combined nodal stationary radio centers of departmental short-wave radio communication networks. The results of the EMC assessment and proposals for its provision are presented. The materials were prepared on the basis of mathematical modeling using the results of field tests.

Keywords: SW radio communication, electromagnetic compatibility, node stationary radio center.

На современном этапе развития ведомственных сетей коротковолновой (КВ) радиосвязи происходит их реорганизация из отдельных линий и сетей в единую автоматизированную адаптивную сеть с использованием методов динамического управления общим ресурсом. Основным принципом построения автоматизированной адаптивной сети КВ радиосвязи является сочетание прямых связей между пользователями сети и связей с применением ретрансляции сообщений. Основу сети составляют узловые стационарные радиоцентры (УзСРЦ), развернутые таким образом, чтобы каждый оконечный радиоцентр имел возможность соединяться с одним или двумя УзСРЦ односкачковыми радиолиниями с наилучшими условиями ионосферного распространения радиоволн протяженностью 1000–2500 км. С учетом разработанного варианта закрепления корреспондентов, распределенных по всей территории страны, возможно использование пяти УзСРЦ типовой структуры.

Для выполнения требований по пропускной способности с учетом временных параметров работы комплексов МКТС, являющихся основой сети, необходимо на типовом УзСРЦ иметь один комплекс радиосвязи мощностью 5 кВт (МКТС-5) и не меньше трех комплексов мощностью 1 кВт (МКТС-1). В дальнейшем, при полном переходе на зоновый принцип построения сети на УзСРЦ возможно потребуется развертывание до 8 комплексов.

Совместное размещение на радиоцентре нескольких радиостанций, имеющих передатчика большой и средней мощности, требует проведения анализа электромагнитной совместимости (ЭМС), обеспечивающего учет различных помеховых воздействий и особенностей организации связи в КВ диапазоне частот.

Моделирование при оценке ЭМС подразумевает проведение ряда общих этапов:

1. Частотный анализ. Проведение этого этапа оценки ЭМС предусматривает построение частотной матрицы анализируемых РЭС, в результате анализа которой осуществляется выявление потенциально несовместимых пар РЭС.

2. Энергетический анализ. При проведении этого этапа оценки ЭМС необходимо осуще-

ствить расчет допустимого уровня помехи на входе каждого РПрУ из состава исследуемой группировки, произвести расчет мощности помехи, воздействующей на конкретное РПрУ, приведенной к его входу и, сравнив полученные значения, сделать вывод о совместимости исследуемых РЭС.

Эксперименты, проведенные на УзСРЦ г. Екатеринбурга, показали, что мешающее воздействие одиночного передатчика на свой приемник не происходит, если разнос частот между ними составляет не менее 150–170 кГц при работе на разные типы антенн в различных участках КВ диапазона. При расчетах ширина спектра РПУ вместе с полосами расфильтровки ограничена 200 кГц.

Вероятность обеспечения электромагнитной совместимости на совмещенном УзСРЦ при произвольном назначении частот передатчикам и приемникам была определена с помощью имитационного моделирования методом Монте-Карло. Результаты моделирования показывают, что вероятность обеспечения ЭМС при произвольном назначении частот передачи и приема определяется величиной рабочего диапазона частот и защитным интервалом между частотами передачи и приема.

Произведен детальный анализ ЭМС УзСРЦ с целью выявления факторов, влияющих на обеспечение ЭМС. Для минимального разноса в 200 кГц между частотами передачи и приема проведены расчеты полос частот помех от РПУ для следующих видов помех: полосы частот основного и внеполосного излучения; полосы частот на субгармониках; полосы частот комбинационных составляющих; полосы частот интермодуляционных помех.

При моделировании ЭМС на совмещенном УзСРЦ сделаны следующие выводы:

1. Одновременное размещение на одном радиоцентре большого количества передатчиков и приемников приводит к существенному усложнению вопросов обеспечения ЭМС РЭС.

2. Вероятность обеспечения ЭМС на УзСРЦ при 8-ми РЭС и произвольным назначением частот передачи и приема в наиболее вероятных случаях составит не более 3–6%.

3. При совмещенном размещении передающих и приемных РЭС необходимо учитывать интермодуляционные помехи высокого порядка. Это приводит к тому, что практически весь частотный диапазон 1,5–30 МГц может быть загружен помехами от собственных передатчиков.

4. Для повышения эффективности использования радиочастотного спектра целесообразно выделить два поддиапазона частот (первый – частоты для всех передатчиков, второй – частоты для приемников.) или разбить весь диапазон рабочих частот на чередующиеся поддиапазоны передающих и приемных частот с разносом между поддиапазонами не менее 200 кГц.

5. Шаг назначения частот передатчиков желательно выбирать минимальным, при котором обеспечивается возможность совместной работы РПУ.

6. При совмещенном развертывании УзСРЦ возможна организация работы не более 5 РЭС (среди которых 1 передатчик большой мощности и не более 4 – средней).

7. При увеличении количества передающих РЭС до 6 и более проблема обеспечения ЭМС становится трудноразрешимой. В этом случае целесообразно произвести разнесение в пространстве передатчиков и приемников.

8. При оценке ЭМС на УзСРЦ необходимо учитывать не только воздействие внутриобъектовых помех от своих РЭС, но и внешние воздействия, в том числе атмосферные и электростатические помехи.

9. Точные расчеты можно провести только с учетом особенностей развертывания РЭС, включая размещение РЭС на территории УзСРЦ, типы и направления развертывания антенн, высокочастотное и низкочастотное заземления, экранирование цепей питания, информационных трактов, а также частотное планирование.

Р. Р. Раупов, В. В. Афанасьев
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ПСВЕДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОЛЕПЕСТКОВОЙ СИСТЕМЫ ПО СХЕМЕ JERK С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ

Аннотация. Разработана программа реализации многолепестковой дискретно-нелинейной динамической системы с динамическим хаосом по схеме Jerk в программной среде Mathcad. Проведено моделирование в программной среде Multisim схемной реализации многолепестковой системы с хаотической динамикой по схеме Jerk. Исследованы статистические характеристики псевдослучайных сигналов, формируемых многолепестковой системой, и даны рекомендации по выбору параметров базовой системы с динамическим хаосом по схеме Jerk.

Ключевые слова: динамический хаос, многолепестковая система, статистические характеристики, фазовый портрет.

R. R. Raupov, V. V. Afanasiev
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

SIMULATION OF PSEUDO-RANDOM SIGNAL GENERATORS BASED ON MULTI-SCROLL SYSTEM WITH CHAOTIC DYNAMICS USING THE JERK CIRCUIT

Abstract. A program for the implementation of multi-scroll discrete-nonlinear dynamic system with dynamic chaos using the Jerk circuit in the Mathcad software environment has been developed. Simulation in the Multisim software environment of the circuit of multi-scroll system with chaotic dynamics using Jerk circuit is carried out. The statistical characteristics of pseudo-random signals generated by a multi-lobe system are investigated, and the recommendations for choosing the parameters of the base system based on Jerk circuit with dynamic chaos are proposed.

Keywords: dynamic chaos, multi-scroll system, statistical characteristics, phase portrait.

Использование в системах передачи информации нелинейных динамических систем с динамическим хаосом позволяет обеспечить скрытность и маскировку передаваемой системой информации. В настоящее время известен ряд различных нелинейных динамических систем с хаотической динамикой, которые возможно использовать в качестве генератора хаоса. Ввиду возможности обеспечения высокой конфиденциальности и защищенности при передаче информации эффективно построение генераторов псевдослучайных сигналов на основе многолепестковых систем с хаотической динамикой по схеме Jerk.

Цель работы – создание средств моделирования многолепестковой системы по схеме Jerk в программных средствах Mathcad и Multisim и выработка инженерных рекомендаций по выбору параметров исследуемой системы.

Широко используемый вариант реализации схемы Jerk описывается системой из трех дифференциальных уравнений 1-го порядка, где зависимыми переменными являются перемещение x, скорость $\dot{x}$, ускорение $\ddot{x}$ $(\dot{y})$. С помощью функции $f(x)$ имеется возможность регулирования количества спиралей в фазовом пространстве многолепестковой системы. Кроме того, система содержит базовый параметр a, определяющий режим работы.

Численное решение в программной среде Mathcad нелинейной дифференциальной системы, описывающей динамику схемы Jerk, в работе проводилось методом Эйлера. Величина относительного шага временной дискретизации, нормированного к периоду квазирезонансных колебаний в моделируемой системе, выбиралась равной 0,09.

Программа реализации многолепестковой системы включает в себя задание управляющего параметра, относительного шага временной дискретизации, числа шагов, начальных условий. Для нахождения значений переменных нелинейной дифференциальной системы задаются непосредственно функции, определяющие производные этой системы, а также итерационные уравнения.

В работе исследованы статистические характеристики псевдослучайных сигналов, формируемых на основе многолепестковой системы с динамическим хаосом. В результате проведенного моделирования установлено, что для получения в системе хаотического режима рекомендуется выбирать значение базового параметра: $0{,}3 \leq a \leq 1{,}1$.

В программной среде Multisim разработана и исследована упрощенная схемная реализация многолепестковой системы с хаотической динамикой по схеме Jerk, выполненная на элементной базе ОУ. Схема многолепестковой дискретно-нелинейной динамической системы с динамическим хаосом состоит из трех блоков: блок интеграторов, буфер, генератор сигналов треугольной и пилообразной формы.

Блок интеграторов состоит из трех ОУ типа TL082CD, питаемые от источника напряжением ± 8 В, которые вырабатывают на выходе псевдослучайные сигналы на основе переменных многолепестковой системы $\ddot{x}\ (z)$, $-\dot{x}(-y)$ и x.

Генератор сигналов треугольной и пилообразной формы реализуется на компараторе с включенным резистором в цепь обратной связи ОУ. При замыкании управляющего ключа генератор формирует сигналы треугольной формы, при размыкании – пилообразной. Потенциометры служат для регулировки выходных напряжений операционных усилителей. В генераторе используются компараторы типа LP239D, которые питаются от источника напряжением ± 12 В. Путем замыкания и размыкания ключей на выходах компараторах обеспечивается требуемая возможность регулирования количества спиралей в фазовом пространстве модулируемой системы с динамическим хаосом.

Буфер, построенный на ОУ типа TL082CD, используется для согласования блока интеграторов и генератора сигналов треугольной и пилообразной формы.

Снятые с осциллографа фазовые портреты схемной реализации многолепестковой системы совпадали с фазовыми портретами, полученными при моделировании системы в программной среде Mathcad, что дополнительно подтверждает корректность проведенного моделирования.

Таким образом, на основе разработанных средств моделирования многолепестковой системы с хаотической динамикой по схеме Jerk в Mathcad и Multisim выработаны инженерные рекомендации по выбору параметров исследуемой системы с динамическим хаосом. Полученные в работе результаты моделирования возможно использовать при проектировании и оптимизации генераторов хаоса в прямохаотических системах цифровой передачи информации.

М. А. Семисошенко
Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого
(Санкт-Петербург)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛЬНОЙ И ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ В ИОНОСФЕРНЫХ РАДИОКАНАЛАХ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Аннотация. Приведены аналитические выражения, описывающие математические модели радиосигналов и радиопомех в ионосферном радиоканале декаметрового диапазона волн. Представлены статические и динамические характеристики огибающих радиосигналов и радиопомех, а также их уровней. Рассмотрены одномерные законы распределения стохастических характеристик радиосигналов и радиопомех, а также дифференциальные уравнения, описывающие динамику изменения характеристик радиосигналов и радиопомех во времени.

Ключевые слова: линия декаметровой радиосвязи, ионосферный радиоканал, математические модели радиосигналов, математические модели радиопомех.

M. A. Semisoshenko
Military Telecommunications Academy named after the Soviet Union Marshal S. M. Budienny
(Saint-Petersburg)

MODELING OF SIGNAL AND INTERFERENCE CONDITIONS IN DECAMETER IONOSPHERIC RADIO CHANNELS

Abstract. Analytical expressions describing mathematical models of radio signals and radio interference in the ionospheric radio channel of the decameter wave range are given. Static and dynamic characteristics of radio signal envelopes and radio interference, as well as their levels, are presented. One-dimensional laws of distribution of stochastic characteristics of radio signals and radio interference, as well as differential equations describing the dynamics of changes in the characteristics of radio signals and radio interference over time are considered.

Keyword: decameter radio communication line, ionospheric radio channel, mathematical models of radio signals, mathematical models of radio interference.

Широкое применение в декаметровом диапазоне волн частотно-адаптивных радиолиний, использующих при ведении радиосвязи группу частот, вызывает необходимость совершенствования алгоритмов анализа и выбора рабочих частот в процессе функционирования таких радиолиний. Построение алгоритмов анализа и выбора рабочих частот, а также оценка эффективности функционирования частотно-адаптивных радиолиний, использующих такие алгоритмы, предполагает, наряду с проведением трассовых испытаний и реализацией различных имитационных моделей ионосферных радиоканалов (например, модель Ватерсона и ее модификации), применение аналитического моделирования сигнальной и помеховой обстановки на основе аналитических моделей радиосигналов и радиопомех, адекватно описывающих реальные динамические процессы изменения характеристик радиосигналов и радиопомех.

Используемые математические модели, описывающие сигнальную и помеховую обстановку в ионосферных радиоканалах декаметрового диапазона, должны учитывать наличие в таких радиоканалах как быстрых интерференционных замираний огибающих радиосигналов и радиопомех, обусловленных явлением многолучевости электромагнитных волн в пункте приема, так и медленных флуктуирующих замираний эффективных значений напряжения (уровней) радиосигналов и радиопомех на входе радиоприемника, основной причиной которых являются процессы изменения электронной концентрации и высоты отражающих ионосферных слоев.

С учетом широкого проявления в ионосферных радиоканалах декаметрового диапазона явления многолучевости, в результате чего результирующий радиосигнал на входе радиоприемника является суммой отдельных колебаний с различными амплитудами и фазами, математическая модель принимаемого радиосигнала представлена в виде суммы K колебаний с различными случайными значениями коэффициента передачи радиосигнала и различными длительностями запаздывания принимаемых колебаний от каждого из интерферирующих лучей.

Одномерные плотности вероятности случайной величины коэффициента передачи ионосферного радиоканала декаметрового диапазона, характеризующие распределение огибающих радиосигналов и радиопомех, предложено моделировать законом распределения Накагами (*m*-распределение). При этом закон распределения Накагами огибающих радиосигналов и радиопомех в ионосферном декаметровом радиоканале является достаточно универсальным и вполне удовлетворительно описывает реальные процессы изменения огибающих радиосигналов и радиопомех, в том числе характеризующиеся законами распределения Релея, Райса (обобщенное релеевское распределение), односторонним нормальным распределением и другими законами, что подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями.

Динамические модели огибающих радиосигналов и радиопомех в ионосферном радиоканале декаметрового диапазона волн представлены нелинейными стохастическими дифференциальными уравнениями. При этом функция возмущения процесса изменения во времени огибающих радиосигналов и радиопомех описана белым гауссовским шумом с нулевым средним значением и автокорреляционной функцией, определяемой на основе обработки экспериментальных измерений.

Статистические характеристики параметров законов распределения огибающих радиосигналов и радиопомех (эффективные напряжения), которые отражают медленные замирания радиосигналов и радиопомех в ионосферном декаметровом радиоканале, представлены логарифмически нормальным законом распределения, а уровни радиосигналов и радиопомех – нормальным законом распределения с параметрами, определяемыми на основе обработки результатов измерений.

Моделирование динамики изменения во времени уровней радиосигналов и радиопомех осуществляется с помощью линейных стохастических дифференциальных уравнений с экспоненциальной автокорреляционной функцией.

Для моделирования динамики изменения уровней радиосигналов и радиопомех в дискретные моменты времени с заданным временным интервалом осуществлен переход от линейных стохастических дифференциальных уравнений к стохастическим конечно-разностным уравнениям.

Предлагаемые математические модели сигнальной и помеховой обстановки в ионосферных радиоканалах декаметрового диапазона целесообразно использовать при синтезе алгоритмов анализа и выбора оптимальных рабочих частот в частотно-адаптивных радиолиниях, а также при разработке методик оценки эффективности функционирования частотно-адаптивных радиолиний аналитическими методами.

Д. Д. Ситдиков, Д. А. Веденькин
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МУЛЬТИФОКУСИРОВКИ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ИЗЛУЧЕННОГО ПОЛЯ

Аннотация. Представлено исследование процесса пространственной мультифокусировки в зоне ближнего излученного поля. Разработана математическая модель для оценки основных свойств и особенностей электромагнитных полей в точках фокусировки в зависимости от их расположения.

Ключевые слова: фокусировка, антенны, ближняя зона излученного поля, антенная решётка.

D. D. Sitdikov, D. A. Vedenkin
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF SPATIAL MULTIFOCUS IN THE NEAR FIELD OF THE RADIATED FIELD

Abstract. This paper presents a study of the process of spatial multifocusing in the zone of the near radiated field. A mathematical model has been developed to evaluate the basic properties and characteristics of electromagnetic fields at the focus points, depending on their location.

Keywords: focusing, antennas, near zone of the radiated field, antenna array.

В век беспроводных технологий растёт тенденция в эксплуатации беспроводных устройств, использующих электромагнитные поля радиочастотного диапазона как основной ресурс при решении различного рода задач.

В данной работе было проведено исследование процесса двойной фокусировки в ближней зоне излучённого поля. Для этого была разработана математическая модель, в которой в качестве излучающих элементов были выбраны изотропные излучатели, расположенные на линейной апертуре. Амплитудное распределение вдоль всей апертуры было подобрано таким, чтобы в необходимых точках пространства получался максимум напряженности электрического поля за счёт сложения в фазе полей от всех источников излучения. Причём четная группа излучателей на апертуре фокусировалась в одну точку, а нечётная – в другую.

В результате исследования было определено, что при фокусировке в одну точку наблюдается один максимум напряжённости электрического поля и области с ненулевыми значениями боковых лепестков. При добавлении второй точки фокусировки, появляется второй максимум, а уровень первого и его боковых лепестков увеличивается, но чем дальше эти точки расположены друг от друга, тем меньше соответствующие уровни. Кроме этого, была исследована возможность фокусировки в две точки пространства, расположенных на расстояниях порядка километра.

Таким образом, учитывая возможность реализации такой мультифокусировки в ближней зоне излученного поля, можно найти ряд новых применений для решения задач в областях медицины, промышленности и телекоммуникациях, а также улучшить уже существующие варианты применения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части Государственного задания №8.6872.2017/БЧ.

Л. С. Терехов[1], А. А. Лаврухин[2]
[1] (Омск)
[2] Омский государственный университет путей сообщения (Омск)

О ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА СВЯЗИ

Аннотация. Указана одна из причин практической ограниченности модели пропускной способности (ПС) канала связи по К. Шеннону. Показаны её функциональная и структурная общность с моделью радиолокационного соотношения неопределённостей (РСН). На основе ранее полученного и широко апробированного обобщения РСН намечен путь к обобщению также и модели ПС канала связи К. Шеннона.
Ключевые слова: соотношение неопределённостей, материальная дисперсия, дуальность.

L. S. Terekhov[1], A. A. Lavrukhin[2]
[1] (Omsk)
[2] Omsk State Transport University (Omsk)

ABOUT THE BANDWIDTH OF THE COMMUICATION CHANNEL

Abstract. One of the reasons for the practical limitations of communication channel model according to K. Shannon is indicated. Its functional and structural similarity with the radar uncertainty relation (RUR) is shown. On the basis of previously obtained and widely tested generalization of the RUR, a way to generalize the K. Shannon communication channel model is outlined.
Keywords: uncertainty relation, material dispersion, duality.

Известны математическая модель пропускной способности (ПС) канала связи по К. Шеннону – с учётом шума, но без учёта дисперсии, а также модель ПС для сигнала в оптоволокне – с учётом частотной дисперсии, но без учёта шума. Настоящее сообщение посвящено обоснованию возможности создания обобщающей модели ПС, включающей учёт как шума, так и частотной дисперсии.

О моделях К. Шеннона и радиолокационного соотношения неопределённостей (РСН)

Модель радиолокационного соотношения неопределённостей **(**РСН) функционально и структурно близка модели пропускной способности канала связи по Шеннону. Обе включают отношения мощностей сигнала к шуму, ширину полосы частот, длительность импульса и обратную ей величину – битрейт, функционально равноценную пропускной способности. Обе модели имеют ограничения в том, что построены для фиксированных параметров без учёта, например, процесса материальной дисперсии, ведущей к постепенному замыванию интервала между импульсами по мере распространения сигнала по линии связи.

Обе модели с фиксированными параметрами – шенноновская и РСН – отвечают закону сохранения энергии, но при этом не представляют процессов перехода энергии из одних форм в другие, происходящих при поглощении, рассеянии и материальной дисперсии по мере распространения сигнала.

Обоснование к обобщению модели канала связи

Основой подхода к нахождению более приемлемой оценки ПС стал предложенный ранее постулат, условно названный динамическим соотношением неопределённостей (ДСН), имеющий в отличие от прототипа РСН два компонента. Постулат включает наряду со случайным шумовым также и регулярный компонент, построенный при зависимости одной из пары изменяющихся величин от другой. Указанная зависимость, в отличие от классического РСН, может быть практически любой – не только от времени, но и от частоты, координаты… Например, зависимость длительности задержки от частоты, определяющая расплывание импульса, обусловлена введением в ДСН частотной дисперсии. Алгоритм, соответствующий постулату и остающийся структурно неизменным при различном выборе переменных, был широко апробирован в печати, на конференциях, симпозиумах Reliable Computing (Акад. городок, Новосибирск), URSI (Киото

и Лилль) и подтверждён патентом России. Коренное преобразование классического РСН приводит к сумме двух компонентов – случайного и регулярного. Сумма обоих компонентов образует дуальную зависимость длительности импульса, проявляющуюся в том, что оба изменяются противоположно при изменении полосы частот, формирующей импульс. То есть, в отличие дуализма в религии, философии и даже физики, используемый постулат включает не только известную качественную противоположность двух естественных природных начал, но выявляет также их количественное отношение. Противоположное действие обоих компонентов, представленных количественно, позволяет минимизировать их сумму (в рассматриваемой задаче – длительность импульса) по их общему параметру (по полосе частот), получая методически и практически значимый и неожиданный результат – сумма обоих компонентов может быть меньше каждого из компонентов в отдельности. Найденное таким образом минимальное значение длительности импульса обеспечивает максимальное значение битрейта и соответствующую ПС.

Согласно постулату, полученный минимум искомой величины имеет более общий характер: получен минимум величины действия, что отвечает принципу физики – принципу наименьшего действия, сопровождающему всякий естественный процесс. Таким образом, намеченный путь решения оказывается природоподобным, что может указывать на его пригодность к решению заявленной задачи.

Л. Ю. Фадеева, Р. В. Ибрагимов
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ НЕОДНОРОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ

Аннотация. Разработаны способы моделирования фрактальных поверхностей с использованием ПО NI LABVIEW. Приведены модели фрактальных поверхностей для систем радиосвязи с различными фрактальными размерностями. Представлен сравнительный анализ и оценка результатов исследования.

Ключевые слова: фрактальная размерность; фрактальная поверхность; проектирование систем радиосвязи.

L. Yu. Fadeeva, R. V. Ibragimov
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

DIGITAL MODELS OF HETEROGENEOUS SURFACES FOR RADIO COMMUNICATION SYSTEMS

Abstract. Methods for modeling fractal surfaces using NI LABVIEW software have been developed. Models of fractal surfaces for radio communication systems with various fractal dimensions are presented. Comparative analysis and evaluation of research results are presented.

Keywords: fractal dimension; fractal surface; design of radio communication systems.

Проектирование систем радиосвязи является достаточно сложной задачей, поскольку должно учитываться большое число факторов, обеспечивающих эффективность построения сети. Оптимальность определения мест установки базовых станций для обеспечения связью заданной территории с требуемым качеством является одной из приоритетных, поскольку параметры и архитектура сети связи непосредственно зависят от характеристик местности. Таким образом, построение топографической карты местности, максимально приближенной к реальности, является актуальной задачей.

Между источником радиосигнала и приемником часто возникают различные преграды. При этом энергия сигнала распределяется между копиями сигнала неравномерно, что в конечном счете может привести к замирании сигнала. Следствием этого является увеличение числа ошибок и общему ухудшению качества канала связи. Крупномасштабные замирания отражают среднее ослабление мощности сигнала или потери в тракте, при передаче на большие расстояния. На него влияют рельефные наземные объекты.

С топологических позиций, коммуникационные системы и сети можно рассматривать как совокупность большого числа распределенных точек (коммуникационных узлов), взаимодействующих между собой через каналы связи. При этом топологии больших коммуникационных систем и сетей представляют собой случайный фрактал, поскольку ее малая часть подобна целой. Следовательно, узлы коммуникационных систем и сетей можно рассматривать как множество точек, вложенных в пространство. Размерность этой совокупности точек имеет дробную размерность, или фрактальную размерность.

Многие сложные природные структуры могут быть описаны в рамках понятия фрактальной размерности D. Фрактальная поверхность – поверхность, сгенерированная с использованием определенного алгоритма, который имитирует внешний вид природной местности. Фрактальную поверхность можно получить путем сложения простейших фрактальных поверхностей, которые, в свою очередь, строятся на основе однозначных фрактальных кривых путем операций трансляции, масштабирования и поворота. Параметр D, характеризующий фрактальную поверхность, дает исчерпывающую информацию о поверхности, в частности о ее «изрезанности».

В данной работе для определения фрактальной размерности D исследуемой поверхности

использован метод Расса. Определение фрактальной размерности D даёт возможность рассчитать площадь данной поверхности. Определенному значению площади S, соответствует значение коэффициента измерительного масштаба d, удовлетворяющий условию $d < 1$. Понятно, что чем меньше d, тем более точным будет измерение площади поверхности. В работе использованное значение $d = 1/256$, характеризующее размер накладываемой сетки, практически соответствует наименьшему значению, которое может быть использовано для программной обработки изображений.

В работе была смоделирована фрактальная поверхность с использованием графической среды NI LabVIEW. В качестве фрактальной кривой для построения фрактальной поверхности была использована функция Вейерштрасса. Первичный «элемент поверхности» создан с помощью инструмента «3D Graph Surface». В работе представлена простейшая фрактальная поверхность получаемая из функции Вейерштрасса путем трансляции ее значений вдоль направления Y. Элемент «Случайная поверхность», в основе которой лежит «элемент поверхности», построена в результате перемножения значений координат по оси Z каждой точки поверхности со случайным масштабным коэффициентом h, имеющим равномерное распределение на отрезке [0,1] и транслируемой в результате поворота в плоскости XY на угол равный $\pi/2$. Фрактальная «Результирующая поверхность» получена путем сложения «элемента поверхности» и «Случайной поверхности», нормированной по значениям Z координат каждой ее точки. На следующем этапе создан 3D объект на основе полученной «Результирующей поверхности». С его помощью более подробно изучена поверхность, а так же это дает возможность экспортировать объект в другие форматы, например для дальнейшей печати его на 3D принтере. При моделировании были использованы инструменты: «3D Picture», благодаря которому изменялся цвет объекта, режим отображения и поворота объекта вдоль произвольной оси в пространстве, «Flat Sequence Structure», позволяющего настраивать отдаленность камеры от объекта и угол её наклона.

Была рассчитана фрактальная размерность D фрактальной «Результирующей поверхности», а также её площадь S, произведено исследование этих параметров в зависимости от разных значений параметров функции Вейерштрасса. Получено, что с увеличением фрактальной размерности, увеличивается площадь смоделированной фрактальной поверхности, что соответствует реальности.

Более «изрезанная» поверхность потребует большего числа базовых станций. Однако, это не всегда приводит к улучшению параметров сети. Для оптимального охвата территории сложной телекоммуникационной сетью, топология этой сети должна быть скоординирована с топологией поверхности, когда на некотором шаге покрытия фрактальная размерность поверхности достигает максимального значения, которое превышает общую размерность топологии коммуникационных узлов.

Таким образом, получая цифровые модели неоднородных поверхностей, можно достичь оптимизации при построении сетей радиосвязи.

Л. Ю. Фадеева, Н. В. Абдулкина
Казанский национальный исследовательский технический университет КНИТУ – КАИ
(Казань)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ, ВОЗБУЖДАЕМОГО ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ, В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Аннотация. В работе проведено моделирование полей, возбуждаемых электромагнитной волной в плоско-слоистых структурах, и исследование его характеристик.
Ключевые слова: электромагнитное поле, коэффициент отражения, проектирование антенн.

L. Yu. Fadeeva, N. V. Abdulkina
Kazan National Research Technical University KNITU – KAI
(Kazan)

SIMULATION OF THE FIELD EXCITED BY A PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE IN AN INHOMOGENEOUS MEDIUM

Abstract. In this work, the simulation of fields excited by an electromagnetic wave in plane-layered structures and a study of its characteristics
Keywords: electromagnetic field, reflection coefficient, antenna design.

При проектировании антенн величина коэффициента отражения оказывает существенное влияние на правильную оценку их радиотехнических характеристик. Различие величины коэффициента отражения материалов, используемых в антенной технике, оказывает существенное влияние на выбор конструкции антенны и ее параметров. Поэтому моделирование процессов возбуждения полей различной природы, их распространения в различных средах и материалах является актуальной задачей.

Фактором, характеризующим коэффициент отражения электромагнитных волн в средах, используемых в авиаконструкциях, в том числе углеродного волокна и сетеполотна, используемого в производстве антенн, является электрический ток, возбуждаемый электрическим полем падающей волны. Углеродное волокно в электродинамическом плане представляет собой несовершенный диэлектрик с плоско-слоистой структурой с достаточно высокой проводимостью и относительной диэлектрической проницаемостью ε.

Геометрии плоско-слоистой структуры соответствуют поля в виде плоских волн, распространение которых через структуру может быть описано аналитически. Электромагнитное поле монохроматической плоской волны с линейной поляризацией в однородной среде является простейшим решением уравнений Максвелла и характеризуется комплексными векторами напряженностей электрического и магнитного полей, которые являются функциями вектора r_0. Зависимость от времени векторов поля характеризуется множителем $\exp(i\omega t)$, где ω – круговая частота поля. Векторы поля перпендикулярны направлению распространения r_0 и друг другу. Вектор напряженности магнитного поля однозначно определен через вектор напряженности электрического поля. Комплексные амплитуды полей $E(r)$ и $H(r)$ связаны через волновое сопротивление среды w, куда входят μ, ε – электромагнитные постоянные, которые могут быть вообще говоря, комплексными.

Если имеются два произвольных вектора r_1 и r_2 к точкам наблюдения, тогда векторы поля плоской волны в этих точках связаны через волновое число среды, являющееся комплексной величиной, мнимая часть которого характеризует затухание волны в среде. Комплексная амплитуда вектора напряженности магнитного поля сдвинута по фазе относительно вектора напряженности электрического поля из-за комплексного характера волнового сопротивления.

Рассмотрим плоско-слоистую структуру, на которую наклонно падает плоская линейно-поляризованная волна из полупространства с параметрами ε_0, μ_0, с направлением распространения r_{1t}. Плоскость, перпендикулярную границам структуры и в которой лежит вектор r_{1t}, совместим с координатной плоскостью падения XOZ декартовой системы координат.

После окончания переходных процессов в плоско-слоистой структуре устанавливается

стационарное состояние, характеризующееся тем, что в каждом i-м слое ($i = 0, N$) имеются две плоские волны – падающая и отраженная с направлениями распространения r_{it} и r_{is}. Наличие симметрии относительно XOZ дает основание предполагать, что единичный вектор направления отраженной волны r_{is} остается в плоскости падения.

Падающая волна может быть поляризована произвольно относительно плоскости падения. Ее удобно представить как суперпозицию двух волн, одна из которых поляризована в плоскости падения, а другая, соответственно, перпендикулярна этой плоскости. Такое же представление имеет и отраженное поле.

Поскольку в каждой из волн сохраняется перпендикулярность направлению распространения, можно записать значения комплексных амплитуд соответствующих полей. В полупространстве позади плоско-слоистой структуры отраженное поле, очевидно, отсутствует. В данном случае комплексные амплитуды полей от координаты Y не зависят.

Легко показать, что для обеих поляризаций значения комплексных амплитуд вблизи левой и правой границ каждого слоя связаны соотношениями. При переходе через границу раздела соседних слоев касательные составляющие полных полей должны быть непрерывны. Поле каждой поляризации определяется независимо.

Соотношения, определяющие комплексные амплитуды, зависят только от координаты x, и они могут быть выражены через значения в любой фиксированной точке (например, $x = 0$). Системы уравнений можно разрешить относительно комплексных амплитуд падающей и отраженной волн i-го слоя. Аналогично для составляющих поля, поляризованных перпендикулярно плоскости падения.

Отношение комплексных амплитуд E_{isr}/E_{itr} называют коэффициентом отражения поля в i-м слое и обозначают R_{ir}. Как и сами комплексные амплитуды, оно является функцией Z. Значения R_i вблизи левой и правой границы слоя обозначают соответственно через R_{il} и R_{ir}.

Получена формула для коэффициента отражения в i-м слое через коэффициент отражения в следующем по порядку (i+1)-м слое. Заметим, что в (N+1)-м слое, т.е. в полупространстве за плоско-слоистой структурой, отраженной волны не существует. Поэтому коэффициент отражения в этом слое оказывается известным. Полагая в $i = N$, находят коэффициент отражения R_{Nr}. Далее вычисляют значение коэффициента отражения вблизи левой границы слоя. По найденному значению вычисляют $R_{N-1,r}$ и так далее до $i = 0$, тем самым получают R_{or} – коэффициент отражения всей многослойной структуры. Также получены формулы для расчета частичных коэффициентов прохождения.

В работе было выполнено моделирование полей в среде Mathcad и NI LabVIEW для поля в одномерно неоднородной изотропной среде, индуцируемого плоской монохроматической электромагнитной волной, а также представлено графическое представление электромагнитной волны, проходящей через слоистую структуру. Также было проведено исследование плоско-слоистых структур для различных параметров электромагнитного поля.

К. В. Хацевский[1], А. А. Сидоренко[2], В. Е. Беляков[2],
Е. М. Стельмахович[3], В. В. Крюков[3]
[1] Омский государственный технический университет (Омск)
[2] Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации (Омск)
[3] ООО «Голд Энричмент Текнолоджи» (Москва)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФИЛЬТРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация. Рассматривается совершенствование П-образных фильтров, установленных в военной технике. Конденсаторы, входящие в состав современных фильтров питания, с течением времени теряют свои характеристики, изменяется их электрическая ёмкость, снижается эффективность работы фильтра. Кроме того, фильтр на конденсаторе с индуктивностью является колебательным контуром с фиксированной резонансной частотой, которая ограничивает верхний предел частот поглощаемых возмущений. Для современной бронетехники этот предел ограничен 10 кГц. Предлагается и исследуется возможность замены в П-образных фильтрах конденсатора варикапом.
Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электромагнитная помеха, фильтр, амплитудно-частотная характеристика.

K. V. Hatsevskiy[1], A. A. Sidorenko[2], V. E. Belyakov[2],
E. M. Stelmakhovich[3], V. V. Kryukov[3]

[1] Omsk State Technical University (Omsk)
[2] Military Academy of logistics named after General of the army A. V. Khrulev of the Ministry of defense of the Russian Federation (Omsk)
[3] Gold Engineering Technologies LLC (Moscow)

IMPROVING THE FILTER OF ELECTROMAGNETIC DISTURBANCES IN ELECTRICAL CIRCUITS OF MILITARY EQUIPMENT

Abstract. The article discusses the improvement of U-shaped filters installed in military equipment. Capacitors that are part of modern power filters lose their characteristics over time, their electrical capacity changes and the efficiency of the filter decreases. In addition, the filter on a capacitor with inductance is an oscillatory circuit with a fixed resonant frequency, which limits the upper limit of the frequency of absorbed perturbations. For modern armored vehicles, this limit is limited to 10 kHz. The possibility of replacing the capacitor in U-shaped filters with a varicap is proposed and investigated.
Keywords: electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, filter, amplitude-frequency response.

Развитие микроэлектроники и микромеханики, мультипроцессорных и информационных технологий, методов искусственного интеллекта является основой создания высокотехнологического оружия нового поколения. Широкое внедрение высокотехнологичных электронных изделий, предназначенных для работы на военных машинах устанавливает необходимость строго выполнения требований к их электромагнитной совместимости по кондуктивным помехам в бортовых сетях с номинальным напряжением 24 В.

Проверка соответствия изделия, требованиям стандартов по электромагнитной совместимости, выполняется при постановке изделий на производство, а также при изменении конструкции изделий или технологии изготовления, если эти изменения могут оказать влияние на их работоспособность.

В период эксплуатации возможны изменения параметров изделия, поэтому рекомендуется обеспечить электромагнитную совместимость по уровню кондуктивных помех по цепям питания военной технике. Методики и регламент выполнения таких проверок на сегодняшний день не существуют. В процессе эксплуатации в электроэнергетической системе электрооборудование

частично теряет свои изначальные характеристики и параметры, которые не классифицируются как неисправность и не могут быть определены при выполнении ТО-1. Также стоит отметить, что любой фильтр имеет свои частотные характеристики и эффективен в определенном частотном диапазоне.

Таким образом, в процессе эксплуатации может нарушаться электромагнитная совместимость бортовой сети в военной технике, а также могут возникать кондуктивные электромагнитные помехи. Требования стандартом по электромагнитной совместимости при этом выполняться не будут, а электрооборудование будет работать в режимах, которые не заложены проектировщиком. Известно, что наиболее чувствительными к действию к электромагнитным помехам являются именно высокотехнологичные электронные изделия. При возникновении их корректная работа не может быть гарантирована. Также могут возникнуть режимы, когда эти устройства могут выйти из строя.

Военная техника при современных боевых действиях часто работает в условиях активного противодействия противника, в сложной радиочастотной обстановке, при наличии помех систем радиоэлектронной борьбы (РЭБ), а также в условиях прямого воздействия радиочастотным электромагнитным оружием (ЭМО). В этой ситуации на высокотехнологичные электронные изделия, как наиболее уязвимые со стороны ЭМО, оказывается кратковременное, но очень мощное электромагнитное воздействие в широком спектре частот (от килогерц до сотен гигагерц). Такое воздействие способно полностью или временно вывести из строя важнейшие системы современных боевых машин.

В военной технике устанавливаются П-образные низкочастотные фильтры, которые состоят из конденсаторов и индуктивности. Экспериментальные исследования, проводимые на нескольких моделях военной техники, показали низкую эффективность их по электромагнитной совместимости. В силу того, что такой фильтр представляет собой обычный заземлённый по однопроводной схеме колебательный контур с довольно низкой (до 10 кГц) резонансной частотой, он способен на сглаживание довольно длительных импульсных помех, возникающих в цепи генератора и питающей сети. И их верхний частотный предел возможностей ограничен резонансной частотой колебательного контура фильтра. Возмущения высокой частоты (короткий импульс) и, тем более, широкополосного спектра (ШПС) такие фильтры поглотить не в состоянии.

Моделирование существующих фильтров проводились в программном продукте MULTISIM. Результаты моделирования показали максимальное относительное отклонение результатов теоретических и экспериментальных исследований составляет не более 4,4%. Причины расхождения результатов могут быть объяснены принимаемыми в моделях допущениями, приближенными значениями некоторых параметров, участвующих в расчетах, а также погрешностями проводимых измерений.

Установка варикапа в существующие фильтры повысила эффективность как на участке низких частот помех, в зоне действия существующих емкостных фильтров, так и в области высоких частот, не достижимой для них.

С. А. Ходенков, Н. А. Шепета, К. Э. Гаипов, Г. Г. Назаров
Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева (Красноярск)

ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ СВЧ ФИЛЬТР НА МНОГОМОДОВОМ РЕЗОНАТОРЕ

Аннотация. Приведены результаты теоретических исследований микрополоскового полосно-пропускающего фильтра на многомодовом резонаторе со свернутым полосковым проводником, отрезки которого заземлены на основание конструкции. Амплитудно-частотные характеристики шестимодового резонатора и фильтра на его основе были получены при помощи численного электродинамического анализа их 3D моделей. Предложенная конструкция СВЧ фильтра может быть использована в узлах радиоаппаратуры тропосферной и космической связи.

Ключевые слова: многомодовый резонатор, микрополосковый фильтр, численный электродинамический анализ, амплитудно-частотная характеристика.

S. A. Khodenkov, N. A. Shepeta, K. E. Gaipov, G. G. Nazarov
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Krasnoyarsk)

MICROWAVE BANDPASS FILTER BASED ON MULTIMODE RESONATOR

Abstract. The results of theoretical investigations of microstrip bandpass filter based on multimode resonator with a rolled strip conductor are shown. Conductor segments are grounded to the base of the structure. Amplitude-frequency characteristics of six-mode resonator and filter based on it were obtained by means of numerical electrodynamic analysis of their 3D models. Proposed construction of the microwave filter can be used in unit of tropospheric and space communication radio equipment.

Keywords: multimode resonator, microstrip filter, numerical electrodynamic analysis, amplitude-frequency characteristic.

Как известно, частотно-селективные устройства СВЧ диапазона традиционно используются в узлах современных радиотехнических систем. Среди этих устройств полосно-пропускающие фильтры являются наиболее востребованными. В настоящее время повышенное внимание разработчики СВЧ техники уделяют также и сверхширокополосным фильтрам, в том числе на основе микрополосковых многомодовых резонаторов. Благодаря использованию в конструкциях таких резонаторов, можно не только дополнительно уменьшить их габариты, но существенно расширить полосу пропускания фильтров, конструируемых на их основе. Кроме того, микрополосковые устройства обладают низкой себестоимостью при массовом изготовлении и технологичностью производства.

В работе приведены результаты моделирования микрополоскового многомодового резонатора с полосковым проводником, свернутым в форме меандра и конструкции сверхширокополосного фильтра на его основе. Рассмотренные СВЧ устройства синтезированы при помощи численного электродинамического анализа их 3D моделей параметрическим синтезом. В расчетах использовалась подложка с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 9{,}8$, толщиной $h = 1$ мм (СВЧ материал – поликор).

Полосковый проводник предложенного микрополоскового резонатора образован семью состыкованными друг с другом отрезками и имеет форму нерегулярного меандра, причем оба его свободных конца заземлены на основание с одного края. Шесть нижайших мод колебаний такого резонатора формируют его широкую полосу пропускания с граничными частотами $f_l = 2{,}0$ ГГц и $f_h = 10{,}7$ ГГц, измеренными по уровню – 3 дБ от уровня минимальных потерь мощности $L_{\min} = 0{,}18$ дБ на ее частотах. Таким образом, относительная ширина полосы пропускания – $\Delta f/f_0 = 137\%$.

Перспективность предложенного резонатора обусловлена возможностью проектирования на его основе микрополосковых фильтров с высокими частотно-селективными свойствами. Так, используя в конструкции прямоугольный полосковый отрезок-перемычку, соединяющий полосковые проводники двух таких резонаторов, расположенных на подложке сонаправлено, можно

реализовать полосно-пропускающий фильтр уже двенадцатого порядка. Соответственно, его полосковый проводник будет образован пятнадцатью отрезками, четыре из которых заземлены на основание конструкции.

Граничные частоты полосы пропускания настроенного фильтра сопоставимы с аналогичными частотами шестимодового резонатора, а вносимые в его полосу пропускания потери мощности не превышают 0,35 дБ.

Предложенная новая конструкция СВЧ фильтра может быть использована в узлах радиоаппаратуры тропосферной и космической связи с расширенными каналами передачи данных. Важно отметить, что теоретические результаты, полученные при помощи численного электродинамического анализа 3D моделей микрополосковых фильтров, хорошо согласуются с результатами экспериментальных измерений, что позволяет ограничиться в исследованиях данной конструкции сверхширокополосного фильтра только численными экспериментами.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FEFE-2020-0013.

Д. Н. Шлома, Ю. А. Степанов
Омский научно-исследовательский институт приборостроения (Омск)

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ СБОРА МЕТЕОДАННЫХ

Аннотация. Показаны результаты анализа существующих систем сбора и обработки метеоданных. Определены основные этапы разработки аналогичной системы и ее модулей. Определены основные требования к разрабатываемой системе, перечень модулей, их назначение и порядок работы. Описана методика тестирования некоторых модулей.

Ключевые слова: система сбора данных, модуль, микроконтроллер, опытный образец, метеоданные, тестирование.

D. N. Shloma, Yu. A. Stepanov
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)

MANUFACTURING A FUNCTIONAL PROTOTYPE METEODATA COLLECTION SYSTEMS

Abstract. The results of the analysis of existing systems for collecting and processing meteorological data are shown. The main stages of development of a similar system and its modules are determined. The main requirements for the system being developed, the list of modules, their purpose and operating procedure have been determined. The method of testing some modules is described.

Keywords: data collection system, module, microcontroller, prototype, meteorological data, testing.

В основу действующего прототипа системы сбора метеоданных положена отладочная плата. В различных источниках имеется достаточное количество информации о различных реализациях отладочных плат: промышленных и любительских решений. Выполнив анализ каждого найденного устройства, принято решение выделить из их конструкции минимальный набор тех составляющих, которые позволят изготовить действующий прототип системы сбора и обработки метеоданных.

В первую очередь определено основание для отладочной платы – его использование позволит избежать излишнего переплетения проводов во время тестирования и отладки разработанных модулей. Если закрепить на общем основании хотя бы часть плат, то это поможет исключить возможные замыкания в результате случайного касания плат друг об друга. После некоторых практических экспериментов был определен стандарт на размеры плат и с учетом этого в основании просверлены серии отверстий, что позволит с помощью винтов и стоек с резьбой надежно крепить несколько плат.

Следующий шаг в разработке системы сбора метеоданных стал разработка модуля платы питания. Исходя из предположения, что источники напряжения питания системы сбора метеоданных могут быть различными – была реализована плата, задача которой получать на вход либо постоянное, либо переменное напряжение то 7 до 18 вольт, а на выходе выдавать стабилизированные 5 вольт. Клемники и разъемы были использованы для различных способов подключения к плате. Схема платы проста и основана на стабилизаторе 7805. На случай легких перегревов стабилизатора предусмотрен небольшой радиатор.

Следующий этап подготовки к испытаниям разработанных модулей системы сбора метеоданных предполагал разработку платы контроллера. В основу платы положен микроконтроллер. Для унификации распиновка разъемов портов, аналогична той, что используется в большинстве используемых платах в настоящее время. Эти разъемы имеют 10 выводов (8 линий порта, питание, земля). Разъем подключения для SPI-программатора имеет стандартную распиновку. На плате присутствует выключатель и индикатор питания.

Для некоторых задач использование встроенного кварцевого 8 МГц резонатора в микроконтроллер не достаточно, поэтому был изготовлен набор плат с кварцевыми резонаторами. Для этого выбраны самые типовые частоты и для каждой из них изготовлена подобная плата. Для

соблюдения помехозащищенности платка двухсторонняя. Верхний слой соединен с землей и работает как экран. Корпуса кварцев припаяны к этому слою и тоже работают как экран. Разводка учитывает только одно правило – максимум земли.

В испытании использовались следующие модули: сигнальный модуль индикации, текстовый модуль, графический, звуковой и речевой модуль. Перечисленные модули были соединены между собой в сеть по топологии «звезда».

Звуковой индикатор генерирует серию звуков определённой частоты и продолжительности, а речевой оповещает проигрыванием заранее сгенерированных голосовых заготовок с произношением цифр и иных фраз, после чего алгоритм в нужном порядке запускал эти файлы, исходя из полученной информации.

На системе сбора метеоданных находятся переключатели, которые позволяют подавать информацию на определенный модуль. Например, при возникновении аварийной ситуации в системе, сигнал подается на сигнальный модуль индикации, который оповещает пользователя о проблеме, а также на текстовый индикатор, который выводит код полученной ошибки.

Каждый модуль являл собой аппаратную реализацию микропроцессорной архитектуры. Это значит, что каждый модуль работал в режиме ожидания сигнала от системы. Как только система посылает сообщение конкретному модулю индикации, оно обрабатывается микроконтроллером модуля и ставится очередь на выполнение. Если очереди нет, то модуль индикации приступает к работе с этим сигналом сразу. Размеры очереди ограничены и, если очередь уже переполнена, полученное значение отбрасывается и микроконтроллером модуля индикации генерируется сообщение об ошибке переполнения и отправляет его обратно на систему сбора и обработки метеоданных.

Первым тестом системы была проверка на реакцию модулей индикации в случае возникновения какой-либо аварии. Основной частью этого сообщения является третий блок, в котором указывается следующее поведение светодиодов:

- первый светодиод мигает каждые 500 миллисекунд;
- второй светодиод выключен;
- третий светодиод включен без мигания.

Такому режиму сигнального модуля индикации соответствует значение ошибки №143, которая говорит в данный момент в целом о том, что система неисправна. На текстовый модуль индикации было отправлено сообщение схожего вида, в третьем блоке которого выводилось сообщение «Ошибка №143». На графический модуль индикации отправлялось такое же сообщение, как и на текстовый модуль, но из-за большего размера дисплея к сообщению было добавлено изображение знака ошибки. Звуковому индикатору в сообщении передается длительность и тональность звука, который он должен проиграть, тем самым обозначая возникновение ошибки в системе.

Речевой индикатор имеет банк заранее записанных звуковых файлов, которые производятся в нужном для ситуации порядке при получении цифр – названий этих записанных файлов, которые он берет в сообщении от системы сбора и обработки метеоданных. Этот модуль является примером высокого уровня абстракции встроенного ПО, которое было написано для модулей индикации.

Общий вид системы в сборе является действующим прототипом, который пригоден для демонстрации основных возможностей системы сбора метеоданных, но даже для проведения простого натурного эксперимента, является недостаточным. Относительно открытая конструкция, не предотвращает свободный доступ к элементам системы, что может привести к ее повреждению и последующему выходу из работоспособного состояния.

Проведенные натурные эксперименты на объектах различного уровня сложности в части измерения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха, позволили авторам апробировать на практике разработанный действующий прототип системы сбора метеоданных. Результаты расхождения показаний с поверенными метеорологическими приборами составили не более 3%.

А. А. Альмеев, И. И. Нуреев
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ЛАЗЕР В СИСТЕМАХ DWDM

Аннотация. Рассмотрены принципы работы систем DWDM, перестраиваемый лазер с модулированной решеткой Y-ветви (MG-Y).
Ключевые слова: блок управления, перестраиваемый лазер, DWDM.

A. A. Almeev, I. I. Nureev
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (Kazan)

TUNABLE LASER IN DWDM SYSTEMS

Abstract. The principles of operation of DWDM systems, a tunable laser with a modulated grating of the Y-branch (MG-Y) were considered.
Keywords: control block, tunable laser, DWDM.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) сегодня являются одним из самых перспективных направлений развития связи. Важными преимуществами ВОЛС являются такие факторы, как малое затухание сигналов, позволяющее, при использовании современных технологий, строить участки оптических систем в сто и более километров без ретрансляции, высокая помехозащищенность, связанная с малой восприимчивостью оптического волокна к электромагнитным помехам, и многие другие.

Технология передачи DWDM создает базис для организации гибких высокоскоростных интеллектуальных сетей, обеспечивая прозрачную передачу постоянно растущего трафика, в том числе чувствительного к задержкам. Технология поддерживает скорости от 150 Мбит/с до 400 Гбит/с на одну длину волны.

Основным принципом работы DWDM систем является уплотнение каналов по рабочим длинам волн, с шагом ~ 0,4 нм. Перестраиваемые передатчики облегчают работу групп технического обслуживания и плановых отделов на производстве, которым приходится сталкиваться с передатчиками, имеющими около 80 разновидностей. Для построения системы передачи DWDM вполне достаточно иметь один передатчик, программируемый в момент установки на нужную длину волны. Кроме того, позже его можно перепрограммировать, а это первый шаг на пути создания перестраиваемых мультиплексоров ввода-вывода. Массовая потребность в измерительных перестраиваемых источниках лазерного излучения возникла с началом широкого распространения систем передачи DWDM. Таким образом, к передающей части подобных систем выдвигаются жесткие требования по погрешности подстройки длины волны, дрейфу длины волны из-за различных причин, частоте перестройки длины волны и динамическому диапазону усиления оптического сигнала.

В этой работе мы исследуем лазер DBR и перестраиваемый лазер с модулированной решеткой Y-ветви (MG-Y). Перестраиваемый лазер с модулированной решеткой Y-ветви основан на обычном лазере с отраженным брэгговским отражателем (DBR). Диапазон настройки лазера DBR, тем не менее, ограничен ~ 1 ТГц (~ 8 нм), что означает, что один лазер DBR не может охватить весь C- или L-диапазон. Чтобы расширить диапазон настройки, отражатель с одной решеткой лазера DBR заменяется комбинацией двух отражателей с модулированной решеткой (MG). Работа лазера MG-Y основана на эффекте Вернье. Два модулированных решетчатых отражателя имеют гребнеобразный спектр отражения. Расчески имеют слегка различающиеся пиковые расстояния, так что в любой момент времени перекрывается только одна пара пиков. Оба

отражения объединяются с использованием многорежимного интерференционного (MMI) ответвителя. Большое отражение возникает только на частоте, где пик отражательной способности от левого отражателя совмещен с пиком отражательной способности от правого отражателя. Таким образом, лазер будет излучать свет с частотой моды продольного резонатора, которая ближе всего к пику совокупного отражения. Настраивая один из отражателей на величину, равную разности в разделении пиков, можно выровнять смежную пару пиков, что позволяет расширить диапазон настройки длин волн. То есть большая настройка частоты излучения (длины волны) получается для сравнительно небольшой настройки одного отражателя.

Н. И. Гарипов
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ВОСХОДЯЩИХ ПОТОКОВ В СЕТЯХ WDM-PON ТРАНСПОРТНЫХ ДОМЕНОВ МОБИЛЬНЫХ 5G СИСТЕМ

Аннотация. Проведен обзор возможных одночастотных методов инициализации центральной длины волны восходящих потоков в системах WDM-PON.
Ключевые слова: WDM-PON, AMCC, контроль длины волны.

N. I. Garipov
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

METHODS OF CONTROL OF THE CENTRAL LENGTH OF THE UPSTREAM FLOWS IN WDM-PON NETWORKS OF TRANSPORT DOMAINS OF MOBILE 5G SYSTEMS

Abstract. A review is made of possible single-frequency methods for initializing the central wavelength of upstream flows in WDM-PON systems.
Keywords: WDM-PON, AMCC, central wavelength control.

Введение

Важным процессом при настройке и эксплуатации систем WDM-PON (от англ. wavelength division multiplexing passive optical network) является контроль центральной длины волны восходящих потоков. Данные характеристики могут быть получены с помощью одночастотных методов инициализации центральной длины волны.

Основная часть

В данной работе мы проводим анализ одночастотных методов инициализации центральной длины волны в системах WDM-PON и рассказываем об их принципах реализации.

Системы пассивной оптической сети с мультиплексированием с разделением по длине волны WDM-PON являются привлекательным кандидатом для подключения микроячеек 5G в мобильной транспортной сети MFH (от англ. mobile fronthaul). Чтобы подключить их к сети WDM-PON, необходимо решить вопрос управления центральной длиной волны в модуле оптической сети ONU (от англ. optical network unit). Однако метод реализации замкнутого контура управления длиной волны между ONU и OLT не был предложен.

В работе предлагается метод реализации замкнутого контура управления длиной волны между ONU и OLT для достижения и поддержания оптимальной точки настройки изменения длины волны ONU.

Заключение

Таким образом, были рассмотрены одночастотные методы инициализации центральной длины волны восходящих потоков в системе WDM-PON.

В. А. Ефимов, Р. В. Фархутдинов
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

КОАКСИАЛЬНАЯ БРЭГГОВСКАЯ СВЧ СТРУКТУРА С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАПОЛНЕНИЯ

Аннотация. Рассмотрены разновидности брэгговских СВЧ структур и их особенности построения на основе коаксиальных волноводов. Одно из применений брэгговских структур – коаксиальные кабели с неоднородностями диэлектрического заполнения.
Ключевые слова: коаксиальная брэгговская СВЧ структура, СВЧ диапазон.

V. A. Efimov, R. V. Farkhutdinov
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

COAXIAL BRAGG MICROWAVE STRUCTURE WITH DIELECTRIC INHOMOGENEITIES

Abstract. Varieties of Bragg microwave structures and their design features based on coaxial waveguides were considered. One application of Bragg structures is coaxial cables with dielectric inhomogeneities.
Keywords: coaxial Bragg microwave structure, microwave range.

Цилиндрические направляемые структуры, такие как коаксиальные линии или круглые волноводы, широко применяются в микроволновой инженерии, при исследовании электромагнитной запрещенной зоны брэгговской СВЧ структуры. Исследования проводятся через электромагнитные запрещенные зоны и реализованы на цилиндрических направляющих конструкциях с использованием тела вращения методом конечных разностей во временной области (BOR-FDTD). Это двумерный (2D) алгоритм, применимый для анализа цилиндрических конструкций благодаря их осесимметричным свойствам. Периодическая серия диэлектрических слоев размещена продольно вдоль направляющих структур для формирования электромагнитной запрещенной зоны. Чистая запрещенная зона определяется по спектрам рассеяния параметры. BOR-FDTD предлагает альтернативное решение для таких структур, чем полный анализ 3D-FDTD, как прежний подход обеспечивает более эффективную экономию с точки зрения вычислительного времени и распределения памяти.

Электромагнитные брэгговские структуры привлекают значительное внимание в микроволновой области. Они выступают в качестве устройства полосовой остановки для подавления нежелательных сигналов в диапазоне частот. Как правило, они моделируют каскадные распределенные элементы для формирования периодической цепочки вдоль направления распространения.

Цилиндрические направляемые структуры, такие как коаксиальные кабели, круглые волноводы, рупорные антенны и т. д., хорошо применяются в микроволновой технике. Все они обладают общим свойством – они осесимметричны, что приводит к равномерному распределению поля по азимуту (φ).

Для того, чтобы эффективно анализировать такие коаксиальные симметричные структуры, используется эффективный и экономящий память алгоритм FDTD, который называется метод BOR-FDTD. Это цилиндрическая система, которая расширяет i-зависимость полей с использованием рядов Фурье. В результате, трехмерная (3D) решетка Yee в (p, φ, z) проецируется на двумерную (2D) плоскость p-z, сопровождаемая модой число m установлено в ряду Фурье. В конце концов, это поле приводит к значительной экономии с точки зрения вычислительной памяти и времени.

Некоторые исследования проводятся через электромагнитные запрещенные структуры, реализуясь на цилиндрических направляющих конструкциях с использованием метода BOR-FDTD. Серия диэлектрических слоев размещена вдоль направления распространения таких структур, чтобы сформировать Шаблон запрещенной зоны и неразделенный идеально согласо-

ванный слой (U-PML) используется для моделирования открытых торцевых стенок как согласованная нагрузка. Параметры частотных спектров рассеяния извлекаются. Свойства запрещенной зоны наблюдаются во всех случаях.

Техника U-PML предполагает наличие искусственной среды, расположенной за пределами вычисленного объема FDTD. Производные BOR-FDTD алгоритма, в сочетании с техникой U-PML, начинаются с нестационарных уравнений скручивания Максвелла.

Два типа цилиндрических направляющих структур, коаксиальный кабель и цилиндрический волновод, используются для исследований брэгговских структур. Возбуждения выполняются во временной области FDTD обновления на обозначенных полевых компонентах. Коаксиальный кабель поддерживает TEM (поперечный электромагнитный) режим, возбуждение может быть легко смоделировано с использованием гауссовского импульса, где в пределах интервалов времени $t_{min} \leq t_n \leq t_{max}$.

Поскольку цилиндрические направляемые структуры p-зависимы от оси вращения, возбуждение должно быть хорошо пространственно модулировано, если оно имеет место в любом поперечном сечении, чтобы отражать правильный способ распространения. Для коаксиального кабеля, для того чтобы обеспечить распространение моды TEM в направлении z, это реализуется с помощью возбуждающего компонента E_ρ или H_φ с нормализованным $1/p$-фактором.

Б. М. Кац[1], В. П. Мещанов[1], К. А. Саяпин[1, 2]
[1] Научно-производственное предприятие «НИКА-СВЧ» (Саратов)
[2] Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского (Саратов)

КОМПАКТНЫЙ ДВУХДИАПАЗОННЫЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР

Аннотация. Решены в приближении Т-волн задачи структурного и параметрического синтеза малогабаритного двухдиапазонного полосно-пропускающего фильтра на основе плавно-неоднородных линий передачи со шлейфами. На основе полученных решений построены и численно исследованы микрополосковые схемотехническая и электродинамическая модели фильтра. Благодаря использованию плавно-неоднородных линий передачи и шлейфов в структуре фильтра, удалось увеличить ширину полосы заграждения и уменьшить уровень вносимых потерь в полосах пропускания.
Ключевые слова: полосно-пропускающий фильтр, СВЧ-диапазон, устройства фильтрации радиосигналов, микрополосковая линия передачи.

B. M. Katz[1], V. P. Meshchanov[1], K. A. Sayapin[1, 2]
[1] NIKA-Microwave, Ltd (Saratov)
[2] Saratov National Research State University named after N. G. Chernyshevsky (Saratov)

COMPACT DUAL-BAND BANDPASS FILTERS

Abstract. The problems of structural and parametric synthesis of a small-size dual-band bandpass filter based on smoothly inhomogeneous transmission lines with stubs are solved in the T-wave approximation. On the basis of the solutions obtained, microstrip circuitry and electrodynamic filter models are constructed and numerically investigated. Thanks to the use of smoothly non-uniform transmission lines and stubs in the filter structure, it was possible to increase the stop band and reduce the level of losses in the transmission bands.
Keywords: bandpass filter, microwave range, radio signal filtering devices, microstrip transmission lines.

Полосно-пропускающие фильтры (ППФ) предназначены для частотной селекции радиосигналов и являются важными функциональными устройствами приемопередающей аппаратуры систем связи и навигации, радиолокационного оборудования, контрольно-измерительной техники и радиоэлектронной техники специального назначения. В последнее время в связи с бурным развитием систем беспроводной связи актуальной задачей стало создание многодиапазонных ППФ. Данная работа посвящена разработке ППФ с двумя полосами пропускания с центральными частотами 2,4 ГГц и 5,2 ГГц.

Предлагаемая структура фильтра образована каскадным соединением одиночных плавно-неоднородных линий передачи, волновое сопротивление которых изменяется по экспоненциальному закону вдоль пространственной координаты, совпадающей с продольной осью фильтра. Полученная структура нагружена плавно-неоднородными разомкнутыми и короткозамкнутыми шлейфами. Параметрическая оптимизация фильтра в приближении Т-волн осуществлялась с помощью метода Нелдера-Мида. На основе полученных решений построены микрополосковые схемотехническая и электродинамическая модели ППФ. Благодаря использованию плавно-неоднородных линий передачи в конструкции фильтра удалось обеспечить более широкую полосу заграждения в верхней части диапазона (до 10 ГГц) с большим уровнем затухания, чем у аналогичных известных структур, отличающихся использованием только отрезков однородных ЛП.

Проведенные исследования показали перспективность использования плавно-неоднородных линий передачи в структуре фильтров СВЧ на линиях передачи с Т- и квази-Т-волнами.

Б. М. Кац[1], В. П. Мещанов[1], К. А. Саяпин[1, 2]
[1] Научно-производственное предприятие «НИКА-СВЧ» (Саратов)
[2] Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского (Саратов)

УГОЛКОВЫЕ КОАКСИАЛЬНО-ВОЛНОВОДНЫЕ ПЕРЕХОДЫ ИНДУКТИВНОГО ТИПА

Аннотация. Разработаны уголковые коаксиально-волноводные переходы индуктивного типа для волноводов прямоугольного сечения. Изготовлены опытные образцы переходов с волноводов сечением 35х15 мм, 19х9,5 мм, 7,2х3,4 мм, 6,2х3,1 мм на коаксиальную линию 2,92/1,27 мм. Экспериментальное исследование образцов показало приемлемый уровень согласования всех переходов с коэффициентом стоячей волны по напряжению не более 1,23 и значением прямых потерь не более 0,3 дБ.
Ключевые слова: коаксиально-волноводный переход, СВЧ-диапазон, устройства согласования линий передачи.

B. M. Katz[1], V. P. Meshchanov[1], K. A. Sayapin[1, 2]
[1] NIKA-Microwave, Ltd (Saratov)
[2] Saratov National Research State University named after N. G. Chernyshevsky (Saratov)

CORNER COAXIAL-WAVEGUIDE TRANSITIONS OF INDUCTIVE TYPE

Abstract. Corner coaxial-waveguide transitions of inductive type for rectangular waveguides have been developed. Prototypes of transitions from waveguides with a cross section of 35x15 mm, 19x9,5 mm, 7,2x3,4 mm, 6,2x3,1 mm to a coaxial line 2,92/1,27 mm have been made. An experimental study of the samples showed an acceptable level of matching of all transitions with a voltage standing wave ratio of no more than 1,23 and a insertion loss value of no more than 0,3 dB.
Keywords: coaxial-waveguide junction, microwave range, transmission line matching devices.

Разработка устройств согласования коаксиальных и волноводных линий передачи – коаксиально-волноводных переходов (КВП) – остаётся одной из наиболее актуальных задач техники СВЧ. Несмотря на значительное число научных работ, посвящённых данной тематике, нерешённым остаётся ряд проблем, связанных с конструкцией КВП, предназначенных для эксплуатации в условиях пониженного давления и при высоких уровнях входной мощности. В частности, использование КВП с ёмкостным типом связи чревато в таких случаях увеличением вероятности возникновения электрических пробоев (коронного или мультипакторного), приводящих к нарушению функционирования устройства и выходу его из строя. Кроме этого, возникает проблема эффективного теплоотвода от элемента связи, тепловой поток от которого протекает через диэлектрическое заполнение коаксиальной линии, чаще всего обладающее низким коэффициентом теплопроводности, а также через сопрягаемые поверхности подключаемого коаксиального соединителя, что снижает его ресурс.

Переходы индуктивного типа более устойчивы к возникновению электрических пробоев, а наличие гальванического контакта между проводниками обеспечивает достаточную теплоотдачу, что уменьшает вероятность перегрева устройства. Наибольшее распространение получили КВП индуктивного типа с соосным расположением коаксиальной и волноводной линий передачи, позволяющие обеспечить приемлемое согласование во всем рабочем диапазоне волновода. Однако они сложны в изготовлении, что делает их более дорогими, чем КВП с ёмкостной связью. Более простыми с технологической точки зрения являются уголковые переходы, в которых коаксиальная и волноводная линии передачи расположены под прямым углом. Целью данной работы является разработка, теоретическое и экспериментальное исследование уголковых КВП с индуктивным типом электромагнитной связи.

Разработанные переходы выполнены в виде короткозамкнутого отрезка волновода с трехступенчатым трансформатором сопротивлений на основе П-волновода. Ребро П-волновода находится в гальваническом контакте со стенкой короткого замыкания. Ширина ребер П-волновода

имеет фиксированное значение, оптимальное с технологической точки зрения, а также удовлетворяющее требованиям к уровню согласования КВП (ширина ребра должна быть одного порядка с диаметром центрального проводника коаксиальной линии). Коаксиальный соединитель перехода имеет сечение 2,92/1,27 мм и выполнен без использования твердых диэлектриков, что упрощает его конструкцию и снижает уровень вносимых потерь. Ввод центрального проводника коаксиального соединителя, гальванически связанного с выступом первого (сопрягаемого с плоскостью короткого замыкания) ребра, осуществляется через широкую стенку волновода. Механическая прочность такой конструкции обеспечивается паяным соединением центрального проводника и ребра П-волновода, а центровка проводника осуществляется при помощи технологической оснастки оригинальной конструкции. Геометрические размеры ребер П-волновода (их длина и высота) и расстояние от точки присоединения центрального проводника к ребру волновода до короткозамыкающей стенки получены в результате параметрической оптимизации, целью которой являлась минимизация уровня обратных потерь КВП в рабочем диапазоне прямоугольного волновода соответствующего сечения (согласно ОСТ 4.206.000 ред. 1-77). Оптимизация осуществлялась с помощью симплекс-метода.

Используя конструкцию и методику проектирования, описанные выше, были разработаны КВП для прямоугольных волноводов следующих сечений: 35х15 мм, 19х9,5 мм, 7,2х3,4 мм, 6,2х3,1 мм. Результаты электромагнитного моделирования, полученные в одном из доступных программных пакетов проектирования СВЧ-устройств, показали, что КВП для всех перечисленных сечений волноводов обеспечивают уровень согласования с коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН) не превышающим 1,04. С целью экспериментального исследования были изготовлены опытные образцы переходов. Измеренные с помощью векторного анализатора цепей значения КСВН составили не более 1,15 в случае КВП для каналов 35х15 мм, 19х9,5 мм и 1,23 для переходов на каналы сечением 7,2х3,4 мм и 6,2х3,1 мм. Прямые потери КВП для каналов 35х15, 19х9,5 мм не превышают 0,2 дБ, а для каналов 7,2х3,4 мм и 6,2х3,1 мм – не более 0,35 дБ. Отличие экспериментальных характеристик от расчетных можно объяснить влиянием технологических допусков на размеры.

Таким образом, проведенные исследования показали, что коаксиально-волноводные переходы индуктивного типа со взаимно перпендикулярным расположением коаксиальной и волноводной линий передачи обеспечивают приемлемый уровень согласования (КСВН менее 1,23) и малый уровень потерь (менее 0,3 дБ) и при этом обладают достаточной простой конструкцией. Полученные результаты позволяют заключить, что переходы уголкового типа описанной конструкции способны составить конкуренцию более распространенным в настоящее время переходам соосного типа, обладая при этом технологическими преимуществами и низкой ценой. Следует также учесть особенности компоновки радиоэлектронной аппаратуры, в ряде случаев которая допускает использование только переходов с перпендикулярным расположением сочленяемых линий передачи.

Б. И. Кидяров
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск)

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ПОЛЯРНЫХ ОКСИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Аннотация. Систематизирована эмпирическая взаимосвязь пироэлектрических и пьезоэлектрических свойств оксидных кристаллов, используемых в функциональной электронике. Установлена резко экстремальная зависимость между верхней огибающей линией нечеткого множества этих свойств, до сих пор не рассматриваемая в физике твердого тела. Дано также сравнение аналогичных взаимосвязей с нелинейно-оптическими и электрооптическими свойствами кристаллов.

Ключевые слова: оксидные кристаллы, свойства, пьезоэлектрические, пироэлектрические, эмпирические данные, взаимосвязь.

B. I. Kidyarov
Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (Novosiborsk)

PROPERTIES SYSTEMATIZATION FOR POLAR OXIDE CRYSTALS

Abstract. The systematization of the pyro-, and piezo-properties interrelationship has been carried out for the polar oxide crystals, used in functional electronics. The sharp extremal dependence has been found for the upper envelope of this fuzzy point set “pyroelectricity- piezoelectricity”. The comparison has been presented for other property interrelationships: «nonlinear optical susceptibility- piezo-electricity», “electro-optical and piezoelectric coefficients”.

Keywords: oxide crystal, property, piezoelectric, pyroelectric, empirical data, interrelationship.

В современных устройствах функциональной электроники и оптоэлектроники широко используются композитные материалы, образуемые из пленок металлов, диэлектрических оксидов, и полупроводников, имеющих аморфную, кристаллическую центросимметричную (ЦС) или нецентросимметричную (НЦС, ацентричную) структуру. Характеристики устройств предопределяются совокупнывми свойствами всех его компонентов, зависящими также от их размерного фактора. Учет взаимосвязи этих свойств является составной частью систематизации и классификации материалов, составления списков «состав – структура – свойство», позволяющих целенаправленно подбирать подходящие компоненты. Знание комплекса свойств кристаллов крайне необходимо, и полезно в дальнейшем поиске новых материалов, а также в оценке их практической применимости

В данной работе проведено сравненние эмпирических данных по свойствам ацентричных оксидных кристаллов, прежде всего ацентричных пироэлектрических (ПИЕ) и пьезоэлектрических (ПЭ) свойств, имея в виду широкое использование этих кристаллов в создании различных устройств ацентрияной диэлектронки, и лазерной физики. Поскольку расширенный банк эмпирических данных всегда образует нечеткие множества, такие обобщения стало возможным проводить только за последние десятилетия, когда число изученных свойств НЦС кристаллов простых и сложных оксидов охватило основную часть таблицы химических элементов Д. И. Менделеева.

Совокупность: ПЭ, электрооптических (ЭО), и нелинейно-щптических (НЛО) свойстсв относится к 20 структурам точечной симметрии, в то время как для ПИЭ свойств - только к 10 структурам полярной точечной симметрии. Кроме того матричное предсталение зависимости ацентричных свойств от направления среза кристалла идентично для НЛО, ПЕ и ЭО свойств, а для ПИЕ свойств эта матрица другая. Отметим, что сравнение всех ацентричных свойств между собой осуществляется по максимальному значению этого свойства в одном из срезов кристалла для большой серии уже изученных материалов с разными составами и структурой. Ранее нами была обнаружена линейно возрастающая взаимосвязь ЭО (r_{ij}) и ПЭ (d_{ij}) свойств, однако выявлена экстремальная взаимосвязь НЛО ($\chi^{(2)}$) и ПЭ, НЛО и ЭО свойств для большой серии уже изученных НЦС бинарных и тройных оксидных материалов с разным составом и структурой. Это обусловлено наличием наибольшего числа данных по НЛО свойствам, так как оценка этих данные

легко получается сравнением генерации второй гармоники иилучения от CO_2-лазера на мелкокристаллических порошках оксидов. Для изучения других ацентричных свойств необходимио обязательно выращивать качественные кристаллы достаточных размеров. При этом непрерывная публикация новых данных позволяет постоянно уточнять эти взаимосвязи.

В итоге взаимосвязь «состав – свойство» установлена для более 1000 НЦС кристаллов бинарных оксидов, а также 1700 НЦС-боратов, совокупности более 300 НЦС кристаллов фосфатов, более 100 кристаллов силикатов, селенатов, теллуритов, молибдатов, вольфраматов, титанатов, ниобатов, танталатов, алюминатов, галлатов, цинкатов. Показано, что уточненная экстремальная взаимосвязь «$\chi^{(2)}$–d» с максимумом НЛО свойств ~70 пм/В) наблюдается при величине пьезокоэффициента (d_{33}~400 пКл/Н), Аналогичный максимум НЛО воспримчивости для взаимосвязи «$\chi^{(2)}$–r» соответсвует величине ЭО коэфыфициента r ~ 20 пм/В.

В данной работе впервые обнваружена резко экстремальная взаимосвязь ПИЕ коэффициента (p_t ~34300 мкКл/m^2K), и ПЭ свойств лля верхней огибающей нечеткого множества оксидных кристаллов при величине пьезокоэффициента d_{33}~1240 пКл/Н. При этом наблюдается значительное превышение величины p_t на огибающей линии над основным массивом данных в интервале d_{33} ~ 250 – 1500 пКл/Н. Наивысшими значениями указанных свойств обладают, прежде всего, кристаллы релаксоров тригональной и тетрагональной сингонии, имеющие сложный состав тройных и четверных оксидов ниобатов-титанатов свинца-магния (кристаллы (1-x)$PbMg(NbO_3)_2$\-x$PbTiO_3$, PMN-PT; $Pb(In_{1/2}Nb_{1/2})O_3$-$Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$; PIN-PMN-PT; $Pb(Sc_{1/2}Nb_{1/2})O_3$-$Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$; PSN-PMN-PT и другие). Резкая зависимость величины свойств этих кристаллов от температуры, электрического поля, числа циклов испытаний (сегнетоэлектрическая память) наличие фазовых превращений кристаллов ограничивают пока их применение в создании многих оптоэлектронных устройств. Для повышения стабильности свойств кристаллов уже предложено легироваить их диоксидом олова. Тем не менее недавно изученные сложные оксиды на основе тригональных кристаллов мультиферроиков $FeAlO_3$ и другие также имеют высокие ПИЕ свойства ~ 1000–2000 пКл/Н, которые существенно превышают величину p_t ранее используемых ПИЕ кристаллов типа триглицин сульфата, танталата лития и других.

Фундаментальная причина наличия экстремума обсуждаемых свойств обусловлена тем, что величина ПЭ и ЭО свойств кристаллов преимущественно предопределяется параметрами, и характеристиками кристаллической решетки, в то время как величина НЛО и ПИЕ свойств определяется в значительной мере характеристиками «электронной подсистемы» кристаллов. Однако необходимый теоретический анализ взаимосвязи величин d, p_t, и $\chi^{(2)}$ со всем комплексом электрофизических свойств, составом и внутренней структурой кристаллов до сих пор не проведен.

Таким образом, физика пьезоэлектрических, сегнетоэлектрических и пироэлектрических кристаллов находится в интенсивном развитии. Дальнейшее открытие и изучение новых оксидных кристаллов открывает путь к созданию новых устройств для прикладной физики, включая сенсоры и высокотемпературные датчики давления.

В. С. Ковивчак[1, 2]
[1] Омский научный центр СО РАН (Омск)
[2] Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского (Омск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЛОЕВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА НА ПОЛИМЕРНОЙ ПОДЛОЖКЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГИБКИХ МИКРОСУПЕРКОНДЕНСТОРОВ

Аннотация. Рассмотрены возможности использования слоев наноструктурированного углерода, сформированного на различных полимерных подложках для создания гибких микросуперконденсторов. Оценены перспективы использования для этих целей слоев наноструктурированного углерода, созданных на недорогом промышленном хлорированном поливинилхлориде при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности.

Ключевые слова: гибкие микросуперконденсаторы, хлорированный поливинилхлорид, мощный ионный пучок, наноструктурированный углерод.

V. S. Kovivchak[1, 2]
[1] Omsk Scientific Center SB RAS (Omsk)
[2] Dostoevsky Omsk State University (Omsk)

THE USE OF NANOSTRUCTURED CARBON LAYERS ON A POLYMER SUBSTRATE TO CREATE FLEXIBLE MICROSUPERCAPACITORS

Abstract. The possibilities of using layers of nanostructured carbon formed on various polymer substrates to create flexible microsupercapacitors are considered. The prospects of using nanostructured carbon layers created on low-cost commercial chlorinated polyvinyl chloride under the action of a high-power ion beam of nanosecond duration for these purposes are evaluated.

Keywords: flexible microsupercapacitors, chlorinated polyvinyl chloride, high-power ion beam, nanostructured carbon.

Быстрое развитие различных микроэлектронных носимых устройств поставило задачу создания микросуперконденсаторов с высокой плотностью мощности и длительным жизненным циклом. Наиболее перспективным материалом для электродов таких микросуперконденсаторов является наноструктурированный углерод (углеродные нанотрубки и нановолокна, графен и т.д.), сформированный на полимерной подложке. На настоящий момент основная масса исследований по этой тематике посвящена изучению формирования слоев пористого графена на поверхности высокотемпературного полимера – полиимида, под действием импульсного лазерного излучения инфракрасного диапазона различной длительности. Получены данные по емкости двойного электрического слоя для электродов из пористого графена, в том числе с добавками наночастиц оксидов металлов. Планарные микросуперконденсаторы, созданные на основе таких электродных материалов показывают удельную емкость до 20 мФ/см^2. Однако малый диаметр лазерного луча приводит к неоднородности формируемого слоя пористого графена (и, соответственно, его электрофизических параметров), что ограничивает области применения таких микросуперконденсаторов.

Для формирования однородных углеродных слоев на поверхности недорогого промышленного полимера (хлорированный поливинилхлорид) было использовано воздействие на полимер мощного ионного пучка наносекундной длительности. В зависимости от режимов облучения и природы каталитической добавки были исследованы углеродные нановолокна и ячеистый углерод на поверхности хлорполимера.

Работа выполнена в рамках государственного задания Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (№ госрегистрации АААА-А17-117041210227-8).

И. А. Корж
Омский научно-исследовательский институт приборостроения (Омск)

МИКРОИНИЦИАТОР, РЕАЛИЗОВАННЫЙ НА ОСНОВЕ НАНОПЛЕНОК С ЭФФЕКТОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Аннотация. Представлен обзор работ, посвященных исследованиям и разработкам микроинициаторов на основе нанопленок с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Приведены предварительные результаты разработки микроинициатора на основе нанопленок Al/Ni.

Ключевые слова: микроинициатор, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, нанопленки Al/Ni.

I. A. Korzh
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)

MICROINITIATOR IMPLEMENTED ON THE BASIS OF NANOFILMS WITH THE EFFECT OF SELF-PROPANDING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

Abstract. A review of the works devoted to the research and development of microinitiators based on nanofilms with the effect of self-propagating high-temperature synthesis is presented. Preliminary results of the development of a microinitiator based on Al/Ni nanofilms are presented.

Keywords: microinitiator, self-propagating high-temperature synthesis, Al/Ni nanofilm.

В настоящее время для приведения в действие различных пиротехнических зарядов (например, в подушках безопасности автомобилей, при проведении горных работ по добыче различных минералов и т.п.) используются электровоспламенители. Широкое применение нашли электропиротехнические микроинициаторы, выполненные по микроэлектронной технологии. Нами ранее разработан один из таких микроинициаторов (пиротехнический резистор), выполненный на основе тонких резистивных пленок титана. Микроинициатор имеет незначительные габариты 1,2 х 1,2 х 0,5 мм, и для приведение его в действие достаточно приложить напряжение 15 В от заряженного конденсатора емкостью 3,3 мкФ. При этом происходит вспышка резистивной пленки с выделением определенного количества энергии, достаточной для воспламенения, контактирующего с поверхностью резистивной пленки, пиротехнического материала, который воспламеняет основной пиротехнический заряд.

Главный недостаток – низкая энергетика из-за маленьких габаритов резистивного моста (типичные размеры 100 х 50 мкм). При использовании таких резистивных микроинициаторов необходимо обеспечивать тщательное контактирование с поверхностью пленки промежуточного пиротехнического материала.

В последние годы интенсивно развивается направление изготовления микроинициаторов с увеличенной активной нагреваемой площадью микроинициатора (в десятки и сотни раз), контактирующей с пиротехническим материалом, за счет использования в качестве взрывателя нанофольги с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Если к краю СВС фольги приложить некоторую энергию (искра от источника питания, пятно лазерного луча и просто локальный тепловой импульс от резистивного нагревателя или открытого пламени), то фольга вспыхивает и по длине полоски фольги распространяется так называемый фронт безгазового горения со скоростью до нескольких метров в секунду с температурой до 1400^{o}C и выше. Это явление и было использовано для создания новых эффективных микроинициаторов с увеличенной активной нагреваемой площадью. Наиболее подробно описаны два способа инициирования СВС реакции в микроинициаторах. Первый способ заключается в нагреве СВС пленки до критической температуры (более 300 ^{o}C), при которой начинается СВС реакция, при помощи пленочного нагревателя, располагаемого под СВС пленкой. Второй способ заключается в пропускании тока через саму СВС пленку и ее локальный нагрев до температуры начала

СВС реакции. При подаче напряжения на резистивный мост происходит его разогрев с последующим микровзрывом (по аналогии с плавким предохранителем), в результате чего в месте контакта СВС пленки с поверхностью резистивной пленки начинается реакция СВС, которая распространяется по всей площади СВС пленки. Инициирование СВС реакции производится при помощи разряда конденсатора (типичные значения 47 мкФ, 100 В).

Другая конструкция микроинициатора, где ток проходит по узкой полоске СВС пленки, которая соединяется с большой площадью СВС пленки при этом происходит ее разогрев и СВС реакция, которая распространяется на значительно большую площадь СВС пленки. Для зажигания требуется напряжение источника 1,5 В, при этом потребляемая мощность не превышает 3 мВт. Температура на поверхности СВС пленки на расстоянии от ее поверхности 100 мкм достигает 790 К. Эта температура достаточно высокая, чтобы зажечь большинство распространенных пиротехнических материалов, которые не требуется тщательно притирать к поверхности микроинициатора.

Результаты проведенных нами экспериментов показали, что при подаче напряжения на резистивный мостик происходил его взрыв и СВС реакция в месте взрыва лишь на поверхности резистивного мостика. Эта СВС реакция не распространялась на всю поверхность СВС пленки. Был сделан вывод, что сравнительно высокая теплопроводность подложки (1,4 Вт/м·К) не дает распространяться фронту горения реакции СВС по всей площади СВС пленки. Для проверки этого предположения СВС пленка в виде фольги прижималась к поверхности резистивного мостика деревянной палочкой (при этом резко уменьшался отвод тепла в подложку) и при подаче на микроинициатор напряжения 25 В от конденсатора 47 мкФ полоска фольги Al/Ni ярко вспыхивала (температура свыше 1500 ^{o}C).

Была также опробована конструкция микроинициатора с прохождением тока через СВС пленку Al/Ni. Размеры ситалловой подложки составляли 1,2 х 1,2 мм. Ширина активной дорожки СВС пленки составляла 100 мкм при толщине многослойной энергетической пленки Al/Ni (8–10) мкм. СВС реакция происходила (с последующим перегоранием) в различных местах по длине активной перемычки и не распространялась на всю площадь СВС пленки, т.е. тепло в месте начала СВС реакции уходило в подложку и СВС реакция затухала.

Результаты проведенных экспериментов показали, что необходимы подложки с низким коэффициентом теплопроводности. Возможные варианты – фторопласт (коэффициент теплопроводности 0,25 Вт/м·К), полиимид ПМ-1 (0,14–0,20 Вт/м·К), стеклотекстолит FR-4 (0,2 Вт/м·К). Наиболее подходящими материалами из вышеприведенных – стеклотекстолит и фторопласт с толщиной 0,5 мм. Стеклотекстолит к тому же обладает достаточной прочностью при толщине 0,5 мм. Для проверки правильности предложенных решений нами на подложки из фторопласта напылялись пленки Al/Ni длиной (5–11) мм, шириной (2–5) мм и толщиной около 40 мкм. При напряжении 9 В от конденсатора емкостью 10000 мкФ происходила яркая вспышка СВС полоски с температурой свыше 1400 ^{o}C.

Анализ возможных вариантов построения микроинициаторов с характеристиками, удовлетворяющими предъявляемым требованиям по габаритам (не более 2 х 2 мм), напряжению инициирования (25 В от конденсатора 47 мкФ) показал:

– возможны два варианта построения микроинициатора: первый вариант – интеграция резистивного мостика с СВС пленкой типа Al/CuO, Al/NiO, Al/MoO_3; второй – использование СВС пленок Al/Ni, технология осаждения которых хорошо отработана, с толщиной от 15 мкм и выше. Хотя энергетика пленок Al/Ni ниже, чем энергетика пленок типа Al/CuO, этот недостаток легко компенсируется увеличением толщины пленок Al/Ni;

– для снижения тепловых потерь необходимо использовать подложки с минимальной теплопроводностью не более 0,25 Вт/м·К: фторопласт ФАФ-4Д (Т = 250 ^{o}C) и стеклотекстолит FR-4 хорошо обрабатываются, имеют гладкую поверхность и низкую теплопроводность 0,2 Вт/м·К. Типичная рабочая температура равна 130 ^{o}C, температура стеклования 170–180 ^{o}C, поэтому в процессе нанесения СВС пленки температура не должна превышать 100–120 ^{o}C.

И. А. Корж[1], В. С. Ковивчак[2, 3]
[1] Омский научно-исследовательский институт приборостроения (Омск)
[2] Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского (Омск)
[3] Омский научный центр СО РАН (Омск)

СОСТАВ НАНОПЛЕНОК NI/AL, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Методом рентгеновского микроанализа исследован элементный состав многослойных нанопленок Ni/Al, полученных последовательным магнетронным распыления Ni и Al мишеней. Проанализирована однородность состава поверхности пленки и наличие в пленке примесных элементов.

Ключевые слова: многослойные нанопленки Ni/Al, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, элементный состав.

I. A. Korzh[1], V. S. Kovivchak[2, 3]
[1] Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)
[2] Dostoevsky Omsk State University (Omsk)
[3] Omsk Scientific Center SB RAS (Omsk)

COMPOSITION OF NI/AL NANOFILMS OBTAINED BY THE METHOD MAGNETRON SPUTTERING OF MATERIALS

Abstract. The elemental composition of multilayer Ni/Al nanofilms obtained by successive magnetron sputtering of Ni and Al targets has been studied by X-ray microanalysis. The uniformity of the composition over the film surface and the presence of impurity elements in the film were analyzed.

***Keywords*:** multilayer Ni/Al nanofilms, self-propagating high-temperature synthesis, elemental composition.

Наноразмерные многослойные реакционные пленки обращают на себя особое внимание из-за выделения большого количества локализованного тепла в течение короткого интервала времени через реакцию самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Благодаря этому СВС нанопленки имеют большие перспективы для применения в качестве внешнего источника тепла для широких областей применения, включая соединение материалов (сварка, пайка), миниатюрных воспламенителей.

В настоящее время в промышленности наиболее часто применяется нанофольга на основе чередующихся нанопленок никель – алюминий, обладающая эффектом самораспротраняющегося высокотемпературного синтеза. Чтобы инициировать в такой фольге СВС, достаточно приложить к ней напряжение в несколько вольт. В этом случае локальный нагрев вызывает СВС-реакцию и по фольге распространяется так называемый фронт безгазового горения, скорость которого достигает нескольких метров в секунду, а температура до ~ 1400 ^{o}C. Это явление используется для соединения радиоэлектронных компонентов, не допускающих их объемного нагрева в процессе соединения (пайки), а также для воспламенения пиротехнических материалов с помощью микроинициаторов (резистивных воспламенителей). Состав многослойных нанопленок Ni/Al (прежде всего соотношение Ni и Al) определяет термические параметры получаемой на их основе фольги. Это температура горения, скорость распространения фронта горения и удельная выделяемая энергия (количество выделяемой энергии на единицу массы фольги).

Нами выполнены исследования по получению фольги многослойных нанопленок Ni/Al методом магнетронного распыления мишеней из никеля и алюминия на вращающуюся металлическую подложку. Скорость осаждения отдельных компонентов нанопленки и скорость вращения подложкодержателя определяют толщину отдельных слоев никеля и алюминия и общую толщину бислоя Ni/Al, а также влияют на концентрацию примесных компонент (прежде всего кислорода) в пленке.

В системе Ni/Al имеется несколько модификаций с различным соотношением (по атомному весу) никеля и алюминия (Ni:Al), обеспечивающих протекание СВС:

Ni:Al – 1:1 (по толщине 2:3),
Ni:Al – 1:2 (по толщине 1:3),
Ni:Al – 1:3 (по толщине 0.7:3),
Ni:Al – 3:2 (по толщине 1:1),
Ni:Al – 3:1 (по толщине 2:1).

Наиболее высокие тепловые параметры имеет нанофольга с отношением Ni к Al по атомному весу 1:1 (по толщине 2:3), а также нанофольга с отношение Ni к Al по атомному весу 3:2 (по толщине 1:1). При этом оптимальными значениями толщины бислоя являются толщины в пределах 40–100 нм. Многослойные нанопленки Ni/Al наносились на модернизированной магнетронной установке УРМ3.279.011. Одновременно в едином вакуумном цикле производилось распыление алюминия из двух мишеней и никеля из двух мишеней, а также титана из одной мишени на вращающийся водоохлаждаемый подложкодержатель. Охлаждение подложки, на которую наносится многослойная пленка Ni/Al, необходимо для предотвращения инициирования СВС во время осаждения пленки. Скорость вращения подложкодержателя можно было изменять от 0,1 до 2 об/мин, что позволяло изменять толщину бислоя Ni/Al. Осаждение слоев проводилось в следующей последовательности: 1-я мишень – алюминий, 2-я мишень – никель, 3-я мишень – алюминий, 4-а мишень – никель, 5-я мишень – титан. Скорость распыления отдельных материалов подбиралась таким образом, чтобы обеспечить заданную толщину отдельных слоев в бислое Ni/Al. Как правило, осаждение слоев начинали с алюминия (без включения других мишеней), чтобы обеспечить необходимую адгезию многослойной нанопленки к подложке. Заканчивали изготовление нанофольги осаждением пленки никеля (без включения других мишеней). Никель препятствует окислению готовой нанофольги. Получаемая фольга является очень хрупкой, и для повышения её эластичности тонкие слои титана включали в фольгу из нанопленок Ni/Al.

Исследование морфологии поверхности фольги и ее состава проводили на сканирующем электронном микроскопе JSM-6610LV JEOL (с энергодисперсионным анализатором Inca-350). В случае многослойных пленок рентгеновский микроанализ дает значение элементов, усредненное по толщине пробега электронов зондирующего пучка. В составе нанофольги обнаружены следующие элементы: углерод (C): 8,97–16,13 ат. % (соответственно минимальное и максимальное значение), кислород (O): (3,80–5,87 ат. %), алюминий (Al): (21,48–35,87 ат. %), ванадий (V): 4,24–5,17 ат. %, никель (Ni): 45,18–59,66 ат. %. Ванадий введен в состав никелевой мишени (7% по весу), чтобы сделать ее немагнитной, тем самым материал мишени не закорачивает магнитное поле магнетрона, что повышает скорость распыления никеля. Присутствие углерода обусловлено масляными средствами откачки вакуумной камеры установки в процессе изготовления фольги. Для его уменьшения необходимо использовать безмасляные средства откачки. Кислород, по-видимому, присутствует в нанофольге из-за недостаточного высокого вакуума (в нашем случае камера откачивалась до давления $5{,}10^{-3}$ Па) либо из-за недостаточно высокой чистоты аргона, используемого для распыления. Кислород ухудшает термические параметры фольги (скорость распространения фронта горения и выделяемую энергию в процессе реакции СВС). Для полученных пленок отношение Ni:Al составило: минимальное значение 1,8:1, максимальное значение 2,3:1. Эти отношения находятся между стандартными отношениями Ni:Al от 1,5:1 до 3:1. Для получения высококачественных фольг с соотношением Ni:Al по атомному весу 1:1 (по толщине 2:3) необходимо либо уменьшить скорость осаждения никеля, либо увеличить скорость осаждения алюминия. Последнее проще реализовать, поскольку алюминий менее дефицитный материал, чем никель, и скорость распыления алюминия на 12% выше скорости распыления никеля.

И. А. Корж, Б. А. Косарев
Омский научно-исследовательский институт приборостроения (Омск)

ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ НАНОПЛЕНОК Ni/Al

Аннотация. Приведены результаты экспериментов по отработке технологии гальванического осаждения оловосодержащих сплавов на поверхность реакционной фольги. Показано, что на поверхности фольги с гальваническим подслоем никеля можно формировать покрытие олово – висмут значительной толщины (до 30 мкм). Если требуется толщина покрытия не более 6 мкм, то целесообразнее использовать реакционную фольгу с увеличенной толщиной крайних слоев никеля.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, слоистая структура Al/Ni, гальваническое осаждение металлов.

I. A. Korzh, B. A. Kosarev
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)

GALVANIC METALLIZATION OF Ni/Al NANOFILMS

Abstract. The results of experiments on the development of the technology of galvanic deposition of tin-containing alloys on the surface of the reaction foil are presented. It is shown that a tin-bismuth coating of considerable thickness (up to 30 μm) can be formed on the surface of a foil with a galvanic nickel sublayer. If a coating thickness of no more than 6 microns is required, then it is more expedient to use a reaction foil with an increased thickness of the outermost nickel layers.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, layered Al/Ni structure, galvanic deposition of metals.

Введение

На основе чередующихся слоев из нанопленок Ni/Al изготавливается реакционная фольга с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), которая является наиболее изученной СВС фольгой, обеспечивающей высокую температуру реакции (1500–1600 °С). СВС процесс используются при сварке материалов, ограниченных по температуре допустимого нагрева.

Технология сварки различных материалов при помощи СВС фольги заключается в следующем. Между свариваемыми деталями располагается СВС фольга, покрытая припоем. Детали сдавливаются с усилием 0,1–50 МПа. СВС процесс инициируется путем теплового, оптического или электрического воздействия, при этом локальное выделение тепла является достаточным для расплавления припоя и соединения деталей. Разогревается только поверхностный слой в зоне сварки, а сам свариваемый материал не разогревается. При этом физические свойства материала не изменяются.

Условием соединения деталей при помощи СВС фольги является предварительное покрытие ее поверхности припоем. Существует проблема покрытия поверхности СВС фольги припоем, связанная с наличием в составе фольги тончайших слоев никеля 20–100 нм, на которые и должен осаждаться слой припоя, а также наличием тончайших пленок алюминия 20–100 нм, на которые припой не осаждается. Кроме того, материалы этих слоев могут перемешиваться в процессе изготовления фольги. Одним из решений этих проблем является применение в технологическом процессе изготовления СВС фольги гальванического осаждения оловосодержащих сплавов.

Цель настоящего исследования – разработка и апробирование технологии гальванического осаждения оловосодержащих сплавов на поверхность СВС фольги.

СВС фольга формируется магнетронным напылением многослойной структуры Ni/Al на подложку, после чего фольга отделяется от подложки. Оказалось, что при гальваническом осаждении оловосодержащих сплавов на СВС фольгу происходит вспучивание ее поверхности со стороны подложки. Предполагается, что нанометровая толщина слоев алюминия и никеля в процессе напыления вызывает интенсивную диффузию в переходном слое подложка – СВС фольга. Образующиеся окислы алюминия, никеля и многокомпонентные соединения могут являться

причиной локальных протравов с образованием полостей в слоистой структуре фольги со стороны основания при гальваническом осаждении оловосодержащих сплавов.

Для устранения вспучивания поверхности СВС фольги было предложено два пути решения: гальваническое осаждение подслоя никеля перед операцией нанесения оловосодержащего сплава и увеличение толщины первого и последнего слоев никеля при напылении СВС структуры.

При гальваническом осаждении подслоя никеля предполагаемая толщина выбиралась в пределах 0,1–2 мкм. Перед осаждением никеля необходимо обезжирить СВС фольгу и активировать поверхность в 50%-ом водном растворе ортофосфорной кислоты в течение 10–30 с. при комнатной температуре. Никель должен равномерно покрыть поверхность СВС фольги.

Для осаждения никеля на СВС фольгу применялся сульфатный электролит с катодной плотностью тока 0,6–1 А/дм^2 при температуре 40–50 ^{o}С следующего состава: сульфат никеля 180–230 г/л, сульфат натрия 40–60 г/л, кислота борная 23–28 г/л, фторид натрия 1,5–2,5 г/л, персульфат калия 1–3 г/л.

В качестве оловосодержащего сплава выбрано покрытие Sn-Bi, которое осаждалось на никелированную поверхность СВС фольги из сернокислого электролита при комнатной температуре и катодной плотности тока 0,7 А/дм^2. Состав электролита следующий: олово сернокислое 40–60 г/л, серная кислота 95–140 г/л, висмут сернокислый 0,8–1,5 г/л, натрий хлористый 0,3–0,8 г/л, препарат ОС-2 3–5 г/л, клей мездровый 0,5–0,8 г/л.

При увеличении толщины первого и последнего слоев никеля для устранения вспучивания поверхности выбрана следующая структура СВС фольги (от подложки): Al/0,15 мкм Ni/бислой Ni-Al = 40:60 нм (около 500 слоев) / 0,15 мкм Ni. Первый слой Al используется как адгезионный при напылении СВС структуры на подложку. Перед осаждением покрытия олово-висмут первый слой алюминия удаляется селективно по отношению к никелю в 50%-ом растворе ортофосфорной кислоты при комнатной температуре в течение не менее 180 с.

При осаждении Sn-Bi из сульфатного электролита на СВС фольгу с гальванически нанесенным подслоем никеля получены следующие результаты при температуре 45–50 °С и катодной плотности тока 0,9 А/дм^2: при значительной толщине подслоя никеля (более 0,4 мкм) поверхность СВС фольги со стороны основания при осаждении сплава Sn-Bi не вспучивается, а при гальваническом осаждении покрытия Sn-Bi на подслой никеля толщиной 0,1–0,4 мкм наблюдается вспучивание поверхности СВС фольги со стороны подложки, при предварительном травлении поверхности СВС фольги в 50%-ом водном растворе ортофосфорной кислоты в течение менее 10 секунд при последующем никелировании наблюдаются непокрытые участки.

Получены хорошие результаты по осаждению покрытия олово – висмут толщиной 20–30 мкм без вспучивания на поверхность СВС фольги с увеличенной толщиной крайних слоев никеля (более 0,4 мкм) при предварительном травлении в 50%-ом водном растворе ортофосфорной кислоты в течение 10–30 с. при комнатной температуре.

Таким образом, для устранения вспучивания поверхности фольги при гальванических процессах предложены два варианта: формирование подслоя никеля электрохимическим способом и увеличение толщины крайних слоев никеля в процессе формирования фольги магнетронным распылением. Обнаружено, что на вспучивание поверхности СВС фольги влияют два фактора: предварительная подготовка поверхности фольги (активация поверхности) и толщина покрытия олово-висмут. Активация поверхности СВС фольги должна выполняться в водном растворе ортофосфорной кислоты при комнатной температуре в течение не менее 180 с. На поверхности СВС фольги с гальваническим подслоем никеля можно формировать покрытие олово-висмут значительной толщины (до 30 мкм). Если требуется толщина покрытия олово-висмут не более 6 мкм, то целесообразней использовать СВС фольгу с увеличенной толщиной крайних слоев никеля.

И. А. Корж, А. Н. Кузнецов, Ю. С. Зонова
Омский научно-исследовательский институт приборостроения (Омск)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИОННЫХ НАНОПЛЕНОК Ni/Al С ЭФФЕКТОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА С ПРОСЛОЙКАМИ ИЗ НАНОПЛЕНОК Ti

Аннотация. Приведены результаты исследований реакционных нанопленок Ni/Al с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с прослойками из нанопленок Ti. Показано, что введение прослоек Ti через каждые 4–5 мкм нанофольги Ni/Al позволяет получать нанофольгу с более плоской поверхностью и с большей гибкостью, чем фольга Ni/Al без прослойки из титана. Приведены результаты относительных измерений показателей хрупкости фольги.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, нанопленки Ni/Al, прослойки из титана.

I. A. Korzh, A. N. Kuznetsov, Yu. S. Zonova
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)

STUDY OF Ni/Al REACTIVE NANOFILMS WITH THE EFFECT OF SELF-PROPANDING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS WITH INTERLAYERS FROM TI NANOFILMS

Abstract. The results of studies of reaction Ni/Al nanofilms with the effect of self-propagating high-temperature synthesis with interlayers of Ti nanofilms are presented. It is shown that the introduction of Ti interlayers every 4–5 μm of a Ni/Al nanofilm makes it possible to obtain a nanofilm with a flatter surface and greater flexibility than a Ni/Al foil without a titanium interlayer. Results of relative measurements of foil fragility indicators are presented.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, Ni/Al nanofilms, titanium interlayer.

Реакционные нанопленки Ni/Al в настоящее время наиболее исследованы, на их основе выпускается нанофольга с толщиной от 40 мкм и выше. Нанофольга состоит из тысяч чередующихся слоев никеля и алюминия. Типичная толщина слоев Ni и Al составляет от 10 до 100 нм. Сочетание двух слоев образует бислой Ni/Al, толщина которого также варьируется в пределах 20–100 нм. Наибольшее применение в настоящее время нашла нанофольга Ni/Al с молекулярным отношением Ni:Al=1:1. При подаче на край полоски фольги энергии в виде искры от источника напряжения, открытого пламени и другого полоска вспыхивает, температура повышается до 1400 ^{o}C и выше и по длине полоски распространяется так называемый фронт безгазового горения со скоростью до нескольких метров в секунду. Горение фольги может происходить в любых средах, в том числе в вакууме и в воде.

Одной из главных технологических операций является удаление фольги с подложки. Основным параметром при этом является хрупкость получаемой фольги и ее плоскостность. Зачастую при снятии фольги с подложки происходит ее скручивание, что определяется механическими напряжениями, возникающими в системе пленка Al- пленка Ni- подложка. В основном это термические напряжения, возникающие из-за разности коэффициентов линейного термического расширения материалов и температуры подложки в процессе осаждения нанослоев.

Цель работы-разработка технологии получения нанофольги Ni/Al с минимальными термическими напряжениями с минимальной хрупкостью и хорошей плоскостностью.

Из литературных источников известно, что расслоение и хрупкость нанофольги Ni/Al, а также ее неплоскостность можно уменьшить, если между слоями никеля и алюминия вставлять слои из титана. Если слои Ti наносятся недостаточно часто, расслоение может происходить с большой вероятностью по всей пленке. Это можно увидеть в пленке Ni/Al толщиной 21 мкм со слоями Ti, вставленными каждые 7 мкм, по сравнению с пленкой Ni/Al толщиной 20 мкм со слоями Ti, вставленной каждые 5 мкм. Несмотря на то что расслаивание не является катастрофическим, оно демонстрирует тонкие эффекты использования дополнительных слоев Ti в качестве способа уменьшения внутренних плоских напряжений в СВС фольге Ni/Al.

Нами были изготовлены образцы нанофольги Ni/Al, толщиной 40–60 мкм с прослойками из титана. Осаждение пленок производили на модернизированной под магнетронное распыление установке УРМ3.279.011. Одновременно в одном вакуумном цикле производилось напыление никеля и алюминия из 4 мишеней. Периодически через каждые 4–5 мкм напыленной нанофольги магнетроны никеля и алюминия отключались и производилось напыление прослойки из титана толщиной 15 нм, после чего производилось дальнейшее напыление слоев никеля и алюминия. И так до достижения толщины нанофольги 40–60 мкм. Использовались подложки из бериллиевой бронзы марки БрБ2, после напыления пленок нанофольга отделялась от подложки. Оценивались следующие параметры готовой нанофольги: плоскостность на размере 100 х 200 мм по величине загиба краев фольги; зажигание фольги от источника напряжения (по величине напряжения инициирования СВС реакции); хрупкость фольги по разработанной нами отдельной методике.

Вырезались полоски нанофольги Ni/Al с прослойками из Ti и без прослоек из Ti. Полоски укладывались на специальные упоры и к середине полоски толщиной **d** и шириной **b** прикладывалось усилие **P.** Фиксировалось значение усилия **P** и прогиб нанофольги **u** при котором происходил разлом (трескание) полоски. Полученное значение хрупкости определяли, как $\mathbf{A = Pu/bd}$. Здесь **A –** работа, затраченная на разрушение нанофольги, отнесенная к площади ее сечения. Чем большее значение **A**, тем фольга является менее хрупкой. Полученные данные сравнивали для фольги с титаном и для фольги без титана. Общее впечатление – фольга с прослойками из титана была более эластичной, и при больших значениях изгиба происходило ее разрушение. Затраченная работа до разрушения фольги составляла примерно 550 Дж/м^2 для фольги без титана и 1200–1400 Дж/м^2 для фольги с титаном. Нанофольга с прослойками титана менее хрупкая, чем без прослоек из титана.

Анализ фольги по критерию плоскостности показал, что могут быть получены плоские образцы как с прослойками титана, так и без прослоек титана. При этом большое количество плоских образцов нанофольги получается при включении в ее состав через каждые 5 мкм прослоек из титана. Тем не менее часть образцов имели загибы по короткой стороне (размер образцов 100 х 200 мм). В структуре фольги (Ni/Al-------Ni/Al------Ni/Al) без Ti высокая плоскостность наблюдалась у 50–60% образцов при толщине в 50 мкм. В структуре фольги (Ni/Al---Ti----Ni/Al----Ti) с Ti толщиной 15 нм, вставленным в фольгу через каждые 5 мкм, высокая плоскостность была выше и наблюдалась у 62–70% образцов при толщине 38–50 мкм. По-видимому, одним из определяющих факторов, влияющих на плоскостность получаемой нанофольги, является температура подложки в процессе напыления пленок, которая зависит от качества прижатия подложки к поверхности водоохлаждаемого подложкодержателя. Там, где прижим был ослабленным, и наблюдались загибы фольги.

Кроме того, оценивалась величина напряжения подаваемого на край фольги для инициирования СВС процесса. Различий не найдено, фольга вспыхивала при приложении напряжения на ее край от 2 В. Визуально яркость вспышки также была одинаковой.

Обнаружено, что на получение плоских образцов нанофольги в большей степени влияет охлаждение подложки в процессе нанесения пленок, которое зависит от качества прижатия подложки к водоохлаждаемому подложкодержателю. Так как применяемые подложки имеют толщину 0,1 мм, они достаточно гибкие, и возникают проблемы по ее плотному прижатию к поверхности подложкодержателя. Нужны специальные конструкции подложкодержателя (например, с выпуклой поверхностью), позволяющие улучшить отвод тепла в процессе напыления пленок.

Н. С. Коровин
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

АЛГОРИТМЫ АППРОКСИМАЦИИ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ СПЕКТРОВ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК

Аннотация. Обсуждаются методы математической обработки ВБР, основным параметром которых является центральная длина волны.
Ключевые слова: центральная длина волны, полином Ньютона, Гауссово распределение, центр масс.

N. S. Korovin
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

ALGORITHMS OF APPROXIMATION OF SYMMETRIC AND UNSYMMETRICAL SPECTRA OF BRAGG SOLUTIONS

Abstract. The paper discusses methods of mathematical processing of VBR, the main parameter of which is the central wavelength.
Keywords: center wavelength, Newton polynomial, Gaussian distribution, center of mass.

Введение

При использовании волоконных Брэгговских решёток (ВБР) в датчиках, основным информационным параметром является центральная длина волны ВБР. Для повышения точности приборов, используемых для опроса датчиков, применяются различные методы математической обработки, а именно аппроксимация (Гауссова распределение и полином Ньютона) и метод механической аналогии (Центр масс).

Основная часть

1) Пик ВБР хорошо аппроксимируется профилем Гауссова распределения. Аппроксимация положения пика центральной длины волны профилем Гаусса обладает достаточной точностью для исследования методом. К недостатку этого метода можно отнести слабую точность, если кривая имеет два сравнимых друг с другом максимальных значения.

2) Известно, что любая кривая, заданная дискретным образом, может быть аппроксимирована полиномом Ньютона степени n, если число точек дискретизации составляет $n + 1$. Точность определения положения максимума по методу Ньютона значительно выше, чем метод определения центральной волны по трем точкам, описанный в предыдущем параграфе, поскольку в определении максимума принимают участие большее количество характеристических данных.

3) Центром масс механической системы называется такая геометрическая точка C, концентрируя в которой (мысленно) массу M всей механической системы, получим, что ее статический момент массы равен статическому моменту массы всей механической системы,

Заключение

В ходе исследований будут рассмотрены все методы применительно к симметричным и несимметричным спектрам ВБР, выданы рекомендации по использованию методов для различных видов спектра ВБР.

А. Н. Кузнецов, С. А. Доберштейн, И. В. Веремеев
Омский научно-исследовательский институт приборостроения (Омск)

ЧАСТОТНАЯ ПОДСТРОЙКА STW-РЕЗОНАТОРОВ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ ДО 1 ГГЦ

Аннотация. В работе представлены данные по частотной подстройке методом плазмохимического травления одновходовых STW-резонаторов на диапазон частот 500–1000 МГц. Приведены основные параметры резонаторов после частотной подстройки: точность установки центральной частоты $<\pm 100 \cdot 10^{-6}$, добротность 8600–9500, элементы эквивалентной схемы, необходимые для практического использования STW-резонаторов.

Ключевые слова: поверхностные поперечные волны, резонатор, добротность, частотная подстройка, вносимые потери.

A. N. Kuznetsov, S. A. Doberstein, I. V. Veremeev
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)

FREQUENCY TRIMMING OF THE STW-RESONATORS WITH WORKING FREQUENCY UP TO 1 GHZ

Abstract. This paper presents the data for frequency trimming of the single port STW-resonators in a frequency range of 500–1000 MHz by plasma chemical etching method. The main parameters of resonators after frequency trimming are given: frequency tolerance $<\pm 100 \cdot 10^{-6}$, quality factor of 8600–9500, equivalent elements needed for use of the STW-resonators.

Keywords: surface transverse waves, resonators, quality factor, frequency trimming, in-sertion losses.

Для элементов частотной стабилизации в малошумящих генераторах успешно используются резонаторы на поверхностных поперечных волнах (Surface Transverse Waves – STW) с высокой добротностью в диапазоне частот 500–2000 МГц. Поскольку STW-резонаторы являются узкополосными устройствами на кварце, их центральная частота f_0 очень сильно зависит от технологии изготовления: толщины металлической пленки и коэффициента металлизации электродов в топологии. Современное технологическое оборудование позволяет с высокой точностью поддерживать указанные выше параметры топологии и массово изготавливать STW-резонаторы с точностью установки центральной частоты $\pm 150 \cdot 10^{-6}$ в диапазоне частот 500–1000 МГц. Однако в специальных применениях STW-резонаторов требуется установка f_0 от $\pm 50 \cdot 10^{-6}$ до $\pm 100 \cdot 10^{-6}$. Для этого используются различные методы подстройки f_0: напыление диэлектрической пленки на поверхность пьезоматериала, химическое травление металлической пленки и плазмохимическое травление (ПХТ) поверхности пьезоматериала. В гигагерцовом диапазоне среди этих методов наиболее эффективно ПХТ. Этот метод позволяет с высокой точностью контролировать процесс травления пьезоматериала, а значит и подстройку частоты STW-устройств без ухудшения параметров.

В работе представлены данные по частотной подстройке методом ПХТ одновходовых STW-резонаторов на диапазон частот 500–1000 МГц. Приведены основные параметры резонаторов после частотной подстройки: точность установки центральной частоты, добротность, элементы эквивалентной схемы, необходимые для практического использования STW-резонаторов.

Суть метода заключается в следующем: STW-устройство изготавливается на частоту, которая выше заданной на относительный частотный сдвиг $\Delta f/f_0 \leq 0{,}001$, а затем методом ПХТ подстраивается вниз до требуемого значения. В этом процессе за счет плазменного травления формируются очень тонкие канавки в пьезоматериале – кварце между металлическими электродами топологии, а сами электроды остаются неизменными. Известно, что скорость акустической волны (в данном случае STW) уменьшается под канавками, в результате чего центральная частота STW-устройства уменьшается без деградации основных электрических параметров. Теоретически относительный частотный сдвиг $\Delta f/f_0$ STW-устройства на кварце линейно зависит от глубины канавок h_g. Последнее очень точно контролируется в процессе ПХТ. Проведенные

оценки показывают, что точность выполнения глубины канавок около 1 нм приводит к подстройке частоты STW-устройств с точностью около 10^{-4} в гигагерцовом диапазоне.

В качестве примера приведем данные по подстройке STW-резонаторов на $f_0 = 766$ МГц. Резонаторы изготавливаются групповым методом на пьезоподложках из кварца среза YX/36°+90° размерами 20 х 25 х 0,5 мм. На зондовой станции измеряется амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) S_{21} по последовательной схеме в тракте $R_0 = 50$ Ом. Тщательно измеряется частота минимума вносимых потерь (ВП), которая близка к максимуму активной части проводимости STW-резонатора. Активная и реактивная части проводимости Y STW-резонатора вычисляются по формуле $Y = S_{21}/(2R_0(1–S_{21}))$ и отображаются соответствующими графиками на анализаторе цепей. По измеренной карте АЧХ модулей STW-резонаторов выбираются модули с минимальными ВП (максимальным значением G_{max}) на $f_1 = f_0+\Delta f$, где $\Delta f = 1–2$ МГц. Пластина кварца разрезается на модули, которые монтируются на эпоксидный клей К-400 в SMD корпуса 5 х 5 х 1,8 мм.

Образцы STW-резонаторов помещаются в камеру-реактор установки ПХТ на рабочий столик-электрод, где формируются канавки в кварце с высокой точностью. В камере-реакторе установки создаётся емкостный разряд. Камера вакуумируется, а затем подается рабочая смесь газов: кислород и фреон-14 (CF_4). В газовом разряде образуются атомы фтора вследствие диссоциации молекулы CF4 под действием электронного удара. Добавка некоторого количества кислорода (≤21%) увеличивает концентрацию атомов фтора, что способствует повышению скорости ПХТ. Образующиеся ионы фтора вступают в реакцию с кварцем, образуя летучее соединение SiF_4. Образующиеся летучие соединения CO, CO_2, COF_2 и SiF_4 удаляются из камеры-реактора средствами вакуумной откачки. При этом структура электродов алюминиевой пленки в топологии STW-резонатора остается неизменной. Образцы STW-резонаторов в SMD-корпусах измеряются в специальном приспособлении на анализаторе цепей, фиксируются активная и реактивная части проводимости, определяется частота f_0 максимума активной части проводимости. Установка обеспечивает подстройку частоты со скоростью 4–8 кГц/с вблизи частоты 500 МГц, 20–25 кГц/с на частоте 766 МГц, 35–50 кГц/с в диапазоне частоты 1000 МГц, что согласуется с данными по частотной подстройке STW-резонаторов в диапазоне частот до 2 ГГц.

В работе показаны частотные характеристики активной и реактивной частей проводимости STW-резонатора на $f_0 = 766$ МГц в процессе подстройки. Приведены графики частотных характеристик резонатора в исходном состоянии: $f_0 = 768{,}15$ МГц и после подстройки на 2,10 МГц. Как видно из графиков, после плазменного травления значение активной части проводимости резонатора увеличивается на 44%, одновременно увеличивается и добротность резонатора Q на 22%, достигая величины $Q = 9000$. Это объясняется тем, что при плазмохимическом травлении происходит очистка поверхности кварца от органических загрязнений и улучшается отражательная способность отражательных решеток за счет увеличения отражения STW от прямоугольных канавок. Серьезные деградации частотных характеристик STW-резонаторов наблюдаются при больших подстройках. В диапазоне частот 500–1000 МГц уменьшение Q и уровня G STW-резонаторов происходили при подстройке свыше 4 МГц.

Образцы резонаторов перед герметизацией отжигались в течение нескольких часов в вакуумной камере, а затем герметизировались в нейтральной азотной среде. Элементы эквивалентной схемы: динамическая индуктивность, динамическая емкость, статическая емкость и динамическое сопротивление рассчитывались по измеренным характеристикам STW-резонаторов по известным формулам для одновходовых STW-резонаторов. Эти параметры используются для моделирования и разработки малошумящих генераторов.

Рассмотренный метод подстройки дает возможность очень точно подстраивать центральную частоту STW-резонаторов в диапазоне $\Delta f/f_0 = 10^{-3}$ без ухудшения электрических характеристик. Метод подстройки частоты продемонстрирован на примере одновходовых STW-резонаторов на диапазон частот 500–1000 МГц, обеспечивающих добротность 8600–9500, точность установки центральной частоты $<\pm 100\cdot 10^{-6}$.

Представленный метод подстройки STW-резонаторов позволяет создавать высокодобротные и высокоточные элементы частотной стабилизации для малошумящих генераторов для различной телекоммуникационной аппаратуры в широком частотном диапазоне.

Д. А. Курносов
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

ОПТИЧЕСКИЙ ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗАТОР НА ОСНОВЕ ДВУХПОЛОСНОЙ МОДУЛЯЦИИ С ПОДАВЛЕННОЙ НЕСУЩЕЙ И ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКИ С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ

Аннотация. Исследован подход к реализации оптического векторного анализатора на основе двухполосной модуляции с подавленной несущей, а также его преимущества.
Ключевые слова: АЧХ, ФЧХ, анализатор, модуляция.

D. A. Kurnosov
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

OPTICAL VECTOR ANALYZER BASED ON SUPPRESSED-SHIFTED DOUBLE-SIDEBAND MODULATION AND FIBER BRAGGING LATTICE WITH PHASE SHIFT

Abstract. The approach to the implementation of an optical vector analyzer based on two-band modulation with suppressed carrier, as well as its advantages, is investigated.
Keywords: frequency amplitude characteristic, frequency phase characteristic, analyzer, modulation.

Введение

Важным процессом при изготовлении, настройке и эксплуатации систем оптических элементов является измерение амплитудно- и фазо-частотных характеристик. Данные характеристики могут быть получены с помощью оптического векторного анализатора (ОВА) с широкой полосой пропускания (десятки гигагерц) и высоким разрешением (единицы килогенрц).

Основная часть

В процессе развития данной области были созданы ОВА на основе методов фазового сдвига и интерферометрии, а также ОВА на основе оптической однополосной модуляции (ООМ). Недостатками данных методов являются, в первом случае, низкое разрешение измерений (сотни МГц), а во втором случае: ограниченный частотный диапазон измерений и ошибки измерений, вызванные биениями боковых полос высших порядков. Поиск решений перечисленных проблем привёл к созданию ОВА на основе оптической двухполосной модуляции (ОДМ) с подавленной несущей. Недостаток первого метода – необходимость проведения в два раза большего числа измерений и сложные процедуры математической обработки данных. Этих недостатков лишены ОВА на основе ОДМ с подавленной несущей.

Заключение

Сравнительный анализ описанных выше ОВА на основе ООМ и метода на основе ОДМ с ПН позволяет заключить, что последний метод выгодно отличается от остальных простотой реализации, экономичностью, производительностью, не уступающей существующим аналогам.

Л. В. Лихачев, Р. В. Фархутдинов
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

КОАКСИАЛЬНАЯ БРЭГГОВСКАЯ СВЧ СТРУКТУРА С ВНЕШНИМ ПРОВОДНИКОМ В ВИДЕ СТЕРЖНЕЙ

Аннотация. Рассмотрен вариант коаксиальной СВЧ брэгговской структуры, отличающейся видом внешнего проводника, который составлен из ряда проводящих стержней. Такая структура может быть применена в качестве сенсора для измерения комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей.

Ключевые слова: коаксиальная брэгговская СВЧ структура, СВЧ диапазон, коаксиальный волновод.

L. V. Likhachev, R. V. Farkhutdinov
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

COAXIAL BRAGG MICROWAVE STRUCTURE WITH AN EXTERNAL CONDUCTOR IN THE FORM OF RODS

Abstract. A variant of a coaxial microwave Bragg structure is considered, which differs in the form of the external conductor, which is composed of a number of conductive rods. Such a structure can be used as a sensor for measuring the complex permittivity of liquids.

Keywords: coaxial Bragg microwave structure, microwave range, coaxial waveguide.

Брэгговские структуры находят широкое применение в различных физических системах, но наибольшее распространение они получили в оптике. В последнее время достижения в области оптических технологий побудило многих исследователей перенять идеи, касающиеся оптических брэгговских структур, и перенести их в диапазоны более длинных электромагнитных волн. Так появились сверхвысокочастотные (СВЧ) брэгговские структуры или электромагнитные структуры с запрещенной зоной (electromagnetic bandgap structures). В микроволновом диапазоне брэгговские структуры начали применяться в качестве фильтров, элементов антенн, устройств для обеспечения электромагнитной совместимости, отражателей, резонаторов и преобразовательных элементов измерительных устройств.

Особое значение брэгговские СВЧ-структуры получили для измерения электрофизических параметров материалов и веществ. Большое разнообразие физических реализаций брэгговских элементов в СВЧ диапазоне способствовало появлению решений для исследования различных видов материалов и состояний вещества. Для определения диэлектрической проницаемости жидких сред наиболее предпочтительными оказались брэгговские структуры на коаксиальном волноводе в силу высокой чувствительности и помехозащищенности.

Разработка преобразовательных элементов на основе коаксиальных брэгговских СВЧ-структур связана с определенными сложностями, возникающими по причине необходимости создания таких конструкций электродинамических элементов, которые должны одновременно удовлетворять ряду требований, иногда даже носящих противоречивый характер. Например, для обеспечения беспрепятственного проникновения исследуемой жидкости в измерительное пространство датчика необходимы отверстия во внешнем проводнике коаксиального волновода, наличие которых негативно сказывается на электромагнитных характеристиках СВЧ-структуры. Поэтому создание и исследование новых конфигураций коаксиальных структур, позволяющих на их основе получить датчики с улучшенными метрологическими характеристиками, является важной научно-технической задачей.

Коаксиальный волновод является электромагнитной направляющей системой с плоской волной в качестве фундаментальной моды, что роднит его с другими линиями передачи, такими как двухпроводная линия, плоскопараллельный волновод, симметричная полосковая линия и другими. Если заменить внешний проводник коаксиального волновода на систему проводников, например, цилиндрических стержней, то волновод сохранит свойство распространения плоской

электромагнитной волны. Если количество стержней достаточно велико, то характер электромагнитного поля мало отличается от поля в коаксиальном волноводе со сплошным внешним проводником. На основе такого волновода можно создавать брэгговские структуры, которые могут обеспечить беспрепятственное проникновение жидкостей во внутреннее пространство волновода без значительного искажения электромагнитных характеристик структуры.

Для создания брэгговских СВЧ структур на основе коаксиальных линий с внешним проводником в виде ряда стержней решена задача определения значения волнового сопротивления таких линий, зависящего в общем случае от всех геометрических и электрических параметров линии. Предложен вариант решения задачи расчета волнового сопротивления коаксиальной линии с внешним проводником в виде ряда стержней. Он основан на численном методе интегральных уравнений для статического электромагнитного поля. Анализ влияния таких параметров линии как количество стержней, радиус стержня, расстояние от центра до края стержня и радиуса центрального проводника, позволил высказать предположение о форме функциональной зависимости волнового сопротивления от названных параметров. Также проводилось сравнение результатов одноволнового и полноволнового моделирования коаксиальных брэгговских структур с внешним проводником в виде ряда стержней. Рассмотрены два варианта брэгговских структур: с неоднородностями диэлектрика и с одновременными неоднородностями диэлектрика и нерегулярностями центрального проводника. Показано, что для первого варианта структуры сходство результатов двух расчетов больше, чем для второго.

В. П. Мещанов[1], К. А. Саяпин[1, 2], Д. Н. Шерстюков[3]
[1] Научно-производственное предприятие «НИКА-СВЧ» (Саратов)
[2] Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского (Саратов)
[3] 637 ВП МО РФ (Саратов)

НОВЫЕ СТРУКТУРЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ НА БАЗЕ ОДИНОЧНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Аннотация. В работе исследованы новые структуры электрических цепей фазосдвигающего канала дифференциальных фазовращателей СВЧ, реализованные на основе одиночных линий передачи со шлейфами. Поучены решения задачи синтеза дифференциальных фазовращателей в приближении Т-волн. На основе полученных решений разработаны и исследованы микрополосковые схемотехнические и электродинамические модели фазовращателей. Показаны преимущества исследованных структур по сравнению с известными ранее.
Ключевые слова: дифференциальный фазовращатель, СВЧ-диапазон, устройства фазового смещения радиосигналов, микрополосковая линия передачи.

V. P. Meshchanov[1], K. A. Sayapin[1, 2], D. N. Sherstyukov[3]
[1] NIKA-Microwave, Ltd (Saratov)
[2] Saratov National Research State University named after N. G. Chernyshevsky (Saratov)
[3] 637 Military acceptance of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Saratov)

NEW STRUCTURES OF DIFFERENTIAL PHASE SHIFTERS BASED ON SINGLE TRANSMISSION LINES

Abstract. The paper investigates new structures of electric circuits of the phase-shifting channel of differential microwave phase shifters, implemented on the basis of single transmission lines with stubs. Solutions to the problem of synthesis of differential phase shifters in the TEM-wave approximation have been learned. On the basis of the solutions obtained, microstrip circuitry and electrodynamic models of phase shifters have been developed and investigated. The advantages of the investigated structures in comparison with those known earlier are shown.
Keywords: differential phase shifter, microwave range, devices for phase shifting of radio signals, microstrip transmission lines.

Дифференциальные фазовращатели (ДФ) являются одними из наиболее важных функциональных устройств микроволновой техники. Они состоят из фазосдвигающего канала (ФК) и опорного канала (ОК). В подавляющем большинстве известных структур ФК выполняется на основе либо связанных, либо одиночных линий передачи (ЛП), а ОК – на основе отрезка одиночной однородной ЛП. ФК на основе одиночных ЛП имеют простую конструкцию, благодаря чему больше всего подходят для серийного производства. Данная работа посвящена разработке дифференциальных фазовращателей с ФК на основе одиночных ЛП со шлейфами различного типа.

Минимизация габаритных размеров ДФ и улучшение их частотных характеристик возможны за счёт использования ступенчато- и плавно-неоднородных короткозамкнутых шлейфов. Так, ДФ с ФК в виде трехступенчатой ЛП, нагруженной трехступенчатым шлейфом, рассчитанный на октавный диапазон частот с номинальным значением фазового сдвига равным 45°, позволяет добиться уровня согласования ФК с коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН) не более 1,06 и отклонением фазочастотной характеристики от номинала не более чем 0,5°. При этом габаритные размеры ДФ уменьшены не менее чем в 1,5 раза по сравнению со структурой класса I. Теоретическое и экспериментальное исследование микрополосковой реализации описанного ДФ для диапазона частот 2…4 ГГц показало удовлетворительное совпадение расчетных и измеренных частотных характеристик: экспериментальное значение КСВН составило не более 1,11, а отклонение ФЧХ от номинала – не более 0,6°. Расхождение теоретических и экспериментальных характеристик объясняется погрешностью изготовления опытных образцов ДФ.

Другой перспективной разновидностью ФК на основе одиночных ЛП является симметричная ступенчатая структура, нагруженная шлейфом в виде каскадного соединения одиночной однородной ЛП и радиального шлейфа. Благодаря низкому входному сопротивлению радиального шлейфа удается добиться значения номинального фазового сдвига больше 90°, в то время как получение аналогичных значений для структур с короткозамкнутыми шлейфами сопряжено с низкими значениями волнового сопротивления шлейфа, что приводит к его значительным габаритам.

Отдельного внимания заслуживают многоэлементные структуры ФК, представляющие собой каскадное соединение описанных выше структур. Использование таких ФК позволяет расширить рабочий диапазон ДФ по сравнению с одноэлементными структурами, улучшить согласование и уменьшить отклонение ФЧХ от заданного номинального значения. Однако стоит отметить, что в этом случае габаритные размеры ДФ значительно увеличиваются.

Таким образом, использование в ДФ структур ФК на основе одиночных неоднородных линий передачи со шлейфами различной топологии позволяет добиться широкополосных частотных характеристик (диапазон частот не менее октавы) с приемлемыми значениями уровня согласования и отклонения ФЧХ от заданного номинала (КСВН не более 1,06, отклонение ФЧХ от номинала 0,6° в случае номинального фазового сдвига равного 45°).

В. Е. Михальцов[1], З. В. Семенова[1], Е. А. Степанова[2]
[1] Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (Омск)
[2] Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН (Омск)

ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ УЛУЧШЕНИЯ ДИАРИЗАЦИИ КЛАССОВ В СИСТЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ГОЛОСОВЫХ ПОДДЕЛОК

Аннотация. Выполнены экспериментальные исследования по улучшению распознавания голосовых синтезированных данных целевого диктора путем модификации обучающего набора данных, предназначенного для фоновой модели классификатора архитектуры GMM-UBG. Исследования показали, что добавление синтезированных данных в обучающий набор не ведет к увеличению качественных показателей. Предложены дальнейшие возможные методы улучшения диаризации классов модели.

Ключевые слова: дикторская модель, фоновая модель, голосовая подделка, диаризация, искусственная нейронная сеть, GMM, GAN.

V. E. Mikhaltsov[1], Z. V. Semenova[1], E. A. Stepanova[2]
[1] Siberian State Automobile and Highway University (Omsk)
[2] Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center SB RAS (Omsk)

CHECKING THE HYPOTHESIS FOR IMPROVING CLASS DIARIZATION IN THE VOICE FAKE DETECTION SYSTEM

Abstract. Experimental research has been carried out to improve the recognition of the target speaker's synthesized voice data by modifying a training dataset designed for the background model of the GMM-UBG architecture classifier. Experience has shown that adding synthesized data to the training set does not lead to an increase in quality indicators. Further possible methods for improving the diarization of the model classes have also been proposed.

Keywords: speaker's model, background model, voice fake, diarization, neural network, GMM, GAN.

В связи с высокими темпами развития технологий глубокого обучения в последние годы особенно остро стоит проблема аутентичности голосовых и видеоданных, распространяемых в сети Интернет, в СМИ, используемых в цифровой криминалистике и т.д. Современная публикационная активность в данной области показывает, что большой интерес для исследователей представляют системы определения высококачественных подделок аудиоданных (deepfake) созданных с помощью различных разновидностей генеративно-состязательных нейросетей (GAN).

Постановка задачи: провести экспериментальные исследования в соответствии с одной из гипотез инженеров высшего учебного заведения Цуриха Kei Ishikawa, Jingqiu Ding, Xiaoran Chen, в рамках которой высказано предположение о том, что, если добавить синтезированные данные в обучающий набор фоновой модели, тогда вероятность обнаружения поддельных данных целевого диктора станет выше 50%. Исследователи применяли фоновую модель, обученную только естественным голосам. Таким образом, для проверки гипотезы необходимо подготовить фоновую модель содержащую смесь естественных и синтезированных голосов, чтобы дать возможность нейронной сети научиться захватывать признаки синтезированного голоса. Целью проведения экспериментов является обучение фоновой модели на модифицированном наборе данных, и проверка ее способности обнаруживать атаки подмены голоса в соответствии с выдвинутой гипотезой.

Выявить различия между голосами можно следующим образом:

1) проанализировать признаки синтезированных голосов и проверить способность модели выявлять различия звучания естественного голоса от синтезированного;

2) проанализировать признаки голосов, приближенных к целевому и проверить способность модели различать практически одинаковые голоса.

В настоящем исследовании представлен анализ серии экспериментов, позволяющий проверить способность модели выявлять различия звучания естественного голоса и синтезированного. В данном модуле рассматриваются два возможных сценария, при котором существуют:

– disjoint дикторская модель, которая знает некоторые признаки из множества A;

– shared дикторская модель, которая обладает расширенными знаниями disjoint-модели путём дополнительного анализа признаков голоса A, которым обучался преобразователь.

Для проверки гипотезы автора необходимо подготовить наборы для обучения новых фоновых моделей и убедиться в способности модели захватывать признаки синтезатора в звучании голоса. Для этого обучающие наборы были составлены с различным соотношением естественных и синтезированных голосов: 2000:0 (GMM-UBG); 1750:250 (GMM-UBG 250); 1500:500 (GMM-UBG 500); 1250:750 (GMM-UBG 750); 1000:1000 (GMM-UBG 1000). Голоса сгенерированы различными алгоритмами и взяты из открытого набора, предоставленного организаторами ASV Spoof 2020. Для обучения фоновых моделей с разным соотношением потребовалось 24 часа.

Важной особенностью проведения серии экспериментов являлось то, что для работы с частной GMM-UBG моделью, согласно технологическим требованиям, следует использовать голоса, принадлежащие одному половому признаку. Несоблюдение данного условия ведёт к искажению результатов, поэтому для экспериментов был выбран мужской синтезированный голос.

Для анализа поведения классификатора при различных пороговых значениях чаще всего используют графики рабочей характеристики (ROC-curve, Receiver Operating Characteristics curve), которая показывает точные результаты для сбалансированных данных и кривую чувствительную к соотношению классов (PR-curve, Precision-recall-curve) для несбалансированных. Для анализа в качестве средств оценки классификаторов GMM-UBG было решено применять сравнительные показатели: PR-кривой; ROC-кривой; расчёты площади под кривой ROC и PR, показывающие количественные оценки качества моделей.

Для того, чтобы правильно понять полученные оценки необходимо интерпретировать прогнозируемую логарифмическую вероятность в бинарный вид. Анализируя полученные данные можно увидеть, что происходит улучшение качества распознавания естественного голоса. При этом точность верификации составляет 99%. Однако, в ситуации с синтезированными голосами, модели по-прежнему не различают их. При этом уверенность в истинности синтетического голоса стала даже несколько превалировать по отношению к естественному звучанию.

Полученные нами данные площадей под кривыми ROC и PR для disjoint и shared моделей позволили выполнить сравнительный анализ. Анализ показал, что изменение пропорции обучающего набора фоновой модели в сторону синтезированных образцов не ведёт к увеличению точности прогнозов. Оценки, полученные disjoint моделями, показывают сохранение ситуации случайной классификации.

Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что гипотеза о том, что, если добавить сгенерированные поддельные данные в обучающий набор фоновой модели, тогда вероятность обнаружения поддельных данных целевого диктора станет выше 50%, не подтвердилась.

Возможным решением может являться попытка заменить устаревший MFCC метод для извлечения признаков из голоса на другой более современный. Стоит попробовать пойти путём анализа поддельных голосов, имеющих исключительное сходство с целевым диктором, добавив в фоновую модель подделки этого целевого диктора, сгенерированных различными алгоритмами. Также стоит исследовать возможность работы дискриминатора модели CycleGAN для помощи в выявлении признаков, через использование полученных ею знаний о целевом дикторе. Для повышения качества распознавания, можно добавить модуль учета психофизиологических особенностей говорящего.

А. Р. Насыбуллин, Т. О. Вазиев
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

РЕЗОНАНС ФАНО В ДИАПАЗОНЕ СВЧ, РЕАЛИЗОВАННЫЙ В ПЛАНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУРАХ

Аннотация. Рассматриваются свойства микрополосковой СВЧ структуры кольцевой конфигурации, которая построена по аналогии с волоконно-оптическим прототипом. Предложенная структура воплощает принцип образования резонанса Фано в СВЧ диапазоне. Подобный тип резонанса характеризуется асимметрией формы и обладает более узким резонансом по сравнению с классическими гауссовской и лоренцовской формами.

Ключевые слова: брэгговское отражение, резонанс Фано, кольцевая микрополосковая структура.

A. R. Nasybullin, T. O. Vaziev
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

FANO RESONANCE IN THE MICROWAVE RANGE, IMPLEMENTED I N PLANAR ELECTROMAGNETIC STRUCTURES

Abstract. The report discusses the properties of a microstrip microwave structure of an annular configuration, which is similar to a fiber-optic prototype. The proposed structure embodies the principle of Fano resonance formation in the microwave range. This type of resonance is characterized by an asymmetry of the shape and has a narrower resonance in comparison with the classical Gaussian and Lorentzian shapes.

Keywords: Bragg reflection, Fano resonance, microstrip ring structure.

В оптическом диапазоне проводились исследования по получению высокодобротной резонансной характеристики с применением кольцевого резонатора и волоконно-оптической решетки Брэгга (ВРБ) с фазовым π-сдвигом. Кольцевой ВРБ резонатор с фазовым π-сдвигом связан с двумя отрезками оптического волокна с помощью двух волоконных ответвителей. Резонатор физически состоит из одной брэгговской решетки замкнутой саму на себя через дополнительный виток оптического волокна, который вводит фазовую задержку для каждой встречной волны, генерируемой внутри кольцевой структуры Получаемая высокодобротная резонансная характеристика получила название резонанс Фано, который в свою очередь можно рассматривать как интерференцию двух волн с резонансами различной природы: кольцевой резонанс и резонанс в ВРБ с фазовым сдвигом. Необходимым условием возникновением резонанса Фано является сдвиг между резонансами на 180 градусов, что в данном случае реализуется фазовым сдвигом в ВРБ.

Микрополосковая брэгговская структура обладает аналогичными свойствами как оптическая ВБР, с этой целью проведена попытка реализовать аналогичную схему в СВЧ диапазоне. Использовался микрополосковый кольцевой резонатор на несимметричной полосковой линии, рассчитанный на частоту 1 ГГц. Резонатор с помощью электромагнитной связи был соединен с двумя подводящими микрополосковыми линиями. Далее в кольцевую линию были введены неоднородности в виде расширения ширины полоскового проводника.

Введя в брэгговскую структуру фазовый сдвиг можно наблюдать возникновение ассиметричного резонанса Фано в центре полосы заграждения брэгговской структуры. Полученный низкий уровень резонанса Фано и небольшая добротность объясняется малыми значениями направленности ответвителей на связанных микрополосковых линиях по сравнению с оптическими каплерами.

Т. Н. Торгаш[1, 2], А. Г. Козлов[1, 2]
[1] Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН (Омск)
[2] Омский научно-исследовательский институт приборостроения (Омск)

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ОАВ-РЕЗОНАТОРА НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА ОТ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СЛОЕВ БРЭГГОВСКОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Аннотация. Рассмотрены ОАВ-резонаторы с брэгговским отражателем на основе пьезоэлектрических пленок из оксида цинка. Исследовано состояние поверхности пленок молибдена и алюминия, используемых в брэгговском отражателе. Оценено влияние состояния поверхности этих слоев на проводимость и добротность ОАВ-резонаторов. Изготовлены СВЧ резонаторы с брэгговским отражателем, работающие на частоте 2,93 ГГц с добротностью 300...350 единиц.
Ключевые слова: СВЧ резонатор, брэгговский отражатель, шероховатость поверхности, тонкая пленка, добротность.

T. N. Torgash[1, 2], A. G. Kozlov[1, 2]
[1] Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center SB RAS (Omsk)
[2] Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)

DEPENDENCE OF THE BAW-RESONATOR CHARACTERISTICS BASED ON ZINC OXIDE ON THE STATE OF SURFACE OF THE BRAGG REFLECTOR LAYERS

Abstract. The bulk acoustic wave resonator based on zinc oxide with the acoustic Bragg reflector is considered. The surface roughness of the thin-film layers of molybdenum and aluminum for Bragg reflector are investigated. The influence of the surface roughness of these layers on the admittance and the quality factor of the BAW resonator are presented. Microwave resonators with the Bragg reflector operating at frequencies of 2.93 GHz a quality factor of 300…350 units are manufactured.
Keywords: microwave resonator, Bragg reflector, surface roughness, thin film, quality factor.

Тонкопленочные резонаторы на объемных акустических волнах (ОАВ) играют важную роль в беспроводных системах связи. Они позволяют реализовать частотно-избирательные устройства с рабочими частотами от 2 до 20 ГГц. Ключевым элементом СВЧ резонаторов на ОАВ является тонкопленочный электроакустический преобразователь со структурой металл-пьезоэлектрик-металл (МПМ). Размещение структуры МПМ непосредственно на подложке отрицательно влияет на электрические характеристики резонатора. Для устранения влияния подложки в конструкции ОАВ-резонатора используют тонкопленочный брэгговский акустический отражатель. Конструктивно брэгговский отражатель представляет многослойную структуру с чередующимися четвертьволновыми низкоимпедансными и высокоимпедансными слоями. Чем больше разница в значениях акустического импеданса, тем меньшее число слоев требуется для эффективной работы брэгговского отражателя.

В данной работе рассматривается брэгговский отражатель на основе пяти пар слоев пленок молибдена и алюминия. Такую структуру отражателя получают термическим напылением пленок в вакууме. Отметим, что с увеличением толщины структуры при ее напылении происходит увеличение шероховатости поверхности пленок. Большая шероховатость поверхности пленок приводит к рассеиванию ОАВ и нарушению нормальной работы брэгговского отражателя. Таким образом, получение пленочных слоев для брэгговского отражателя с минимальной шероховатостью их поверхности является актуальной проблемой в технологии изготовления тонкопленочных СВЧ резонаторов.

Целью работы является исследование влияния шероховатости поверхности пленочных слоев на характеристики ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем.

В работе рассматривается ОАВ-резонатор с брэгговским отражателем на основе пленок молибдена и алюминия с пьезоэлектрической пленкой из оксида цинка и с алюминиевыми элек-

тродами. Пленки молибдена и алюминия были получены магнетронным напылением на постоянном токе. Поверхность пленок Mo и Al исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Solver Pro. Шероховатость поверхности оценивали по величине среднеквадратичного отклонения высоты неровностей поверхности пленки (S_q), определяемой программным обеспечением АСМ. Исследованы закономерности изменения шероховатости поверхности пленок молибдена и алюминия от технологических параметров магнетронного напыления: давления аргона в вакуумной камере (P_{Ar}), температуры подложки при напылении (T_s) и удельной электрической мощности на мишени (W_0). Определены режимы, при которых S_q пленок молибдена не превышала 2 нм для толщин пленок 0,2…0,7 мкм (P_{Ar} = 0,25…0,28 Па, T_s = 430…480 K, W_0 = 8…10 Вт/см^2).

Пленки алюминия имели более развитую поверхность (S_q = 40…50 нм). Пленки с такой шероховатой поверхностью не позволяют брэгговскому отражателю работать эффективно. Для уменьшения шероховатости пленок был разработан новый метод напыления. Среднеквадратичное отклонение шероховатости поверхности полученных пленок алюминия с толщиной 0,45 мкм составило 4 нм.

На основе проведенных экспериментов были изготовлены опытные образцы резонаторов с брэгговским отражателем. Структуру резонаторов формировали на подложках из ситалла СТ-50 (S_q = 1 нм). Для исследования влияния шероховатости поверхности пленок Al на электрические характеристики ОАВ-резонатора были изготовлены резонаторы со значением S_q = 40 нм и S_q = 3,5 нм для пленок алюминия. У пленок молибдена в обоих случаях S_q равнялась 1,2 нм, а для пьезоэлектрической пленки из оксида цинка S_q составила 4 нм.

Суммарная шероховатость поверхности резонатора определялась по среднеквадратичному отклонению высоты неровностей поверхности всей структуры и составила S_q = 40 нм и S_q = 15 нм на основе пленок алюминия с S_q = 40 нм и S_q = 3,5 нм, соответственно. Электрические характеристики полученных образцов резонаторов исследовали с помощью векторного анализатора цепей E5071C фирмы Agilent Technology и измерительных зондов G-S-G. Максимальная величина активной проводимости резонатора с S_q = 40 нм была на частоте 2,74 ГГц и составляла 12,5 мСм. Добротность резонаторов составила 50…100 единиц. Частотная зависимость для коэффициента отражения (S_{11}) показала, что брэгговский отражатель работает неэффективно. Для резонатора с S_q = 15 нм максимальная величина активной проводимости составила 25,5 мСм на частоте 2,93 ГГц. Измеренная добротность была в пределах 300…350 единиц. Частотная зависимость коэффициента отражения составила -7,9 дБ на резонансной частоте, что указывает на эффективную работу брэгговского отражателя.

В работе рассмотрены тонкопленочные ОАВ-резонаторы с брэгговским отражателем на основе пьезоэлектрической пленки из оксида цинка. Экспериментально получены пленки молибдена и алюминия. Определены режимы магнетронного напыления, при которых полученные пленки молибдена и алюминия имеют минимальную шероховатость поверхности. Для пленок молибдена минимальное значение среднеквадратичного отклонения высоты неровностей поверхности пленок составило 1,2 нм, а для пленок алюминия – 3,5 нм.

Исследовано влияние состояния поверхности пленок на электрические характеристики ОАВ-резонатора. Показано, что увеличение шероховатости поверхности пленок отрицательно влияет на добротность резонаторов. Изготовлены ОАВ-резонаторы с брэгговским отражателем на основе пяти пар слоев молибдена и алюминия со значением S_q = 15 нм, работающие на частоте 2.9…3 ГГц с добротностью 300…350 единиц.

Таким образом, для получения высокодобротных ОАВ-резонаторов необходима технология напыления тонкопленочных слоев с минимальной шероховатостью поверхности пленок для каждого слоя, входящего в состав резонатора.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (номер госрегистрации проекта в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А19-119052890058-2).

А. И. Тюменцев, Т. С. Тимошенко, И. В. Забегайло
Омский научно-исследовательский институт приборостроения (Омск)

МИНИАТЮРНЫЙ ТРИПЛЕКСЕР ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ СВЯЗИ

Аннотация. Представлена разработка миниатюрного триплексера, выполненного в LTCC. Предложенная конструкция состоит из трех полосовых фильтров, выполненных на основе емкостно-нагруженных объемных резонаторов с добротностью Q не менее 150–170. Расчетные параметры модели показывают малые вносимые потери в каждой полосе пропускания (менее 3 дБ), высокие уровни изоляции между выходными портами триплексера (более 50 дБ). Габаритные размеры разработанного триплексера 12 х 14,5 х 1,4 мм.

Ключевые слова: фильтр, LTCC, емкостно-нагруженный объемный резонатор, триплексер.

A. I. Tyumentsev, T. S. Timoshenko, I. V. Zabegailo
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)

SMALL-SIZE TRIPLEXER FOR PORTABLE COMMUNICATION FACILITIES

Abstract. The paper presents the development of a small-sized triplexer fabricated on low temperature cofired ciramics (LTCC). The proposed design consists of three bandpass filters based on capacitively loaded cavities with a Q factor of at least 150–170. The calculated parameters of the model show low insertion loss in each passband (less than 3 dB), high isolation levels between the output ports of the triplexer (more than 50 dB). Overall dimensions of designed triplexer are 12 x 14,5 x 1,4 mm.

Keywords: filter, LTCC, capacitively loaded cavity resonator, triplexer.

Современные тенденции в области систем беспроводной связи диктуют все более жесткие требования к оборудованию базовых станций, обеспечивающих их работу. Оборудование, предназначенное для работы в стандарте 5G, поддерживает мультиканальность, что, в свою очередь, ведет к необходимости использования многополосных фильтров (мультиплексеров), которые сильно влияют на качество принимаемого сигнала. Мультиплексеры применяются для разделения нескольких сигналов на разных частотах на каналы.

В этой работе авторы покажут этапы разработки триплексера с низким уровнем вносимых потерь (не более 1,5 дБ), состоящего из трех ППФ на объемных резонаторах, выполненных в LTCC, для работы в 5G band 3, band 7, band 78 с низкой стоимостью изготовления. Также будут показаны расчетные параметры триплексера на основе ППФ на резонаторах такого типа.

Триплексер состоит из трех каналов, каждый из которых выполнен в виде узкополосного полосно-пропускающего фильтра с малыми потерями и корректирующей цепочкой на входе, для обеспечения параллельной работы фильтров. Каждый ППФ состоит из соединенных емкостной связью двух емкостно-нагруженных объемных резонаторов.

Для синтеза схемы ППФ на основе емкостно-нагруженного объемного резонатора, представляющего собой параллельный контур, был применен метод перехода от фильтра-прототипа НЧ с использованием инверторов сопротивлений.

Чтобы обеспечить вносимые потери ППФ не более 1,5 дБ, собственная добротность объемного резонатора должна быть не менее 150–170. Такие высокие значения добротности резонатора квадратного сечения могут быть получены при отношении $\frac{a}{\lambda_g} \approx 0{,}12$, тогда для ППФ с центральной частотой f_0 = 3600 МГц, сторона резонатора a = 3,6 мм. Высота резонатора должна быть такой, чтобы с одной стороны обеспечивать необходимую индуктивность, а с другой – обеспечивать затухание в дальней зоне, которое напрямую зависит от высоты резонатора. Также общая высота резонатора ограничена количеством и толщиной слоев LTCC, а максимальная нагрузочная емкость зависит от минимально возможной толщины слоя.

Емкость выполнена в виде зазора между пластиной на конце резонансного штыря и металлизированной крышкой резонатора, тогда сторона пластины квадратного конденсатора, выполненного в структуре LTCC DuPont Green Tape TM 951 (ε_r = 7,8, tgδ = 0,0015) с толщиной слоя

между обкладками конденсатора 0,043 мм, будет равна a = 2,05 мм.

Так как высота штыря ограничена общей высотой резонатора и толщиной нагрузочного конденсатора, то зная индуктивность металлического стержня резонатора можно оценить его остальные геометрические размеры. Учитывая, что высота стержня h = 1,31, мм диаметр круглого штыря d = 2,5 мм. Сторону квадратного штыря можно найти, принимая d за диаметр описанной окружности. Тогда сторона квадратного штыря a = 1,77 мм. Емкостная связь между резонаторами выполнена в виде окна в ряде металлических штырей, являющихся эквивалентом цельной металлической стенки. Расчет емкости связи производился по формуле, как торцевая емкость, учитывая, что толщина металлизации 0,011 мм, а расстояние между обкладками конденсаторов 0,6 мм. Тогда размер диафрагмы равен 2,29 мм. Корректирующий контур выполнен в виде интегрального конденсатора емкостью C = 0,15 пФ и сосредоточенной индуктивности.

Разработанный триплексер имеет вносимые потери $IL_{21} = 0,9$ дБ; $IL_{31} = 0,85$ дБ; $IL_{41} = 1,18$ дБ в первом, втором и третьем каналах соответственно, возвратные потери были получены не хуже 15 дБ во всех каналах. Также в расчетных параметрах изоляция между выходными портами триплексера на центральных частотах не хуже 50 дБ для всех каналов, а в силу своих конструктивных особенностей такие фильтры не имеют паразитных резонансов на 2-й и 3-й гармониках, то в полосе задерживания триплексер имеет затухание более 60 дБ.

В работе представлен триплексер на три диапазона частот для работы в 5G. Разработанный триплексер обладает малыми вносимыми потерями в каждой полосе пропускания (менее 3 дБ), малыми габаритными размерами (12 х 14,5 х 1,4 мм), высокими уровнями изоляции между выходными портами триплексера (более 50 дБ) и проходной мощностью 5 Вт. Технология LTCC позволяет сократить стоимость и повысить технологичность производства триплексера, а также избежать сложной настройки каждого фильтра.

С. Г. Алюшина[1], В. О. Анучин[2], И. У. Курбиев[3], И. А. Макаров[2], Р. Ш. Мисбахов[2, 4], Л. М. Сарварова[2], А. А. Тяжелова[2]
[1] Московский технический университет связи и информатики (Москва)
[2] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)
[3] НПК «Сенсорика» (Сколково)
[4] Казанский государственный энергетический университет (Казань)

ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ВОСХОДЯЩЕГО ПОТОКА ТРАНСПОРТНОГО WDM-PON ДОМЕНА РАДИОСЕТЕЙ ДОСТУПА МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G

Аннотация. Для обеспечения плотного и эффективного развертывания микроячеек удаленных радиостанций RRH сетей доступа мобильной радиосвязи 5G и простой инициализации центральных длин волн, связанных с ними оптических узлов ONU волоконно-оптического пассивного транспортного домена с волновым мультиплексированием WDM-PON, используются настраиваемые бесцветные лазерные передатчики, что упрощает настройку и управление длиной волны излучения с помощью различных способов. В ONU управление длиной волны в восходящем направлении WDM-PON канала необходимо из-за возможных ошибок в настройке центральной длины волны при первоначальном соединении с оптическим линейным терминалом OLT, связанным с базовой станцией BBU сети доступа 5G, а также из-за дрейфа длины волны вследствие старения лазерного передатчика. В докладе представлен новый двухчастотный метод инициализации длины волны в одном из каналов мультиплексора WDM-PON, построенного на упорядоченной волновой решетке AWG, с использованием процесса определения максимального коэффициента амплитудной модуляции биений огибающей компонентов двухчастотного излучения в качестве параметра, указывающего на расстройку длины волны ONU от центральной длины волны AWG.

Ключевые слова: микроволновая фотоника, сеть радиодоступа, волоконно-оптический пассивный транспортный домен с волновым мультиплексированием, упорядоченная волновая решетка, восходящий канал, инициализация центральной длины волны.

S. G. Alyushina[1], V. O. Anuchin[2], I. U. Kurbiev[3], I. A. Makarov[2], R. Sh. Miesbakhov[2, 4], L. M. Sarvarova[2], A. A. Tyazhelova[2]
[1] Moscow Technical University of Communications and Informatics (Moscow)
[2] Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)
[3] NPK “Sensorika” (Skolkovo)
[4] Kazan State Power Engineering University (Kazan)

INITIALIZATION OF THE UPSTREAM CHANNEL CENTRAL WAVE LENGTH FOR WDM-PON FRONT HAUL OF MOBILE 5G RADIO ACCESS NETWORKS

Abstract. Tunable colorless laser transmitters are used to ensure dense and efficient deployment of 5G mobile radio access networks RRH remote radio microcells and easy initialization of the central wavelengths of the associated optical nodes of the ONUs of the WDM-PON front haul. Various methods are used for monitoring of the radiation wavelength. In the ONU, the upstream WDM-PON channel wavelength control is necessary due to possible errors in the center wavelength setting during the initial connection to the OLT connected to the BBU of the 5G access network, as well as wavelength drift due to aging laser transmitter. The article presents a new two-frequency method for initializing the wavelength in one of the channels of the WDM-PON multiplexer, built on an ordered AWG grating, using the process of determining the maximum amplitude modulation factor of the beats of the envelope of

two-frequency radiation components as a parameter indicating the detuning of the ONU wavelength from the central one.

Keywords: microwave photonics; radio access network; fiber-optic front haul; arreyd wave grating; upstream channel; center wavelength initialization.

Для достижения плотного и эффективного развертывания микросот RRH и простой инициализации их центральных длин волн в состав ONU включаются перестраиваемые бесцветные лазерные передатчики, позволяющие легко контролировать длину волны излучения и управлять ей с использованием различных механизмов. К ним относятся лазерные диоды Фабри-Перо FP-LD, лазеры VSCEL, DBR и др. В последнее время в связи с развитием технологий интегральной микроволновой фотоники получили распространение лазерные передатчики EML с внешним модуляционным управлением на подложках фосфита индия.

Классические методы управления длиной волны решают обе проблемы: инициализации и поддержания, но требуют при этом наличия прецизионных внешних фильтров, например, эталонов Фабри-Перо, и множества фотодетекторов для контроля оптической мощности каждой длины волны восходящего потока. Следовательно, с практической точки зрения настоятельно рекомендуется найти способ инициализации длины волны, который сводит вмешательство оператора и сервисных сигналов в процесс передачи информации к минимуму.

В частности, в одной из работ представлен многошаговый алгоритм настройки одного канала, который занимает по времени около 5 минут и состоит как минимум из 4 шагов для мультиплексора на упорядоченной волноводной решетке (AWG) с полосой пропускания 100 ГГц. Каждый шаг занимает около 1 минуты и определяется временем тепловой перестройки длины волны лазера. При этом используется метод определения максимального сигнала, прошедшего через AWG, в OLT с обратной связью на ONU. В другой работе представлено решение, в котором излучается зондирующий сигнал на двух разных частотах, генерируемых поочередно в разное время. При этом используется алгоритм сравнения мощностей сигналов на указанных частотах. В данной работе нами предложена процедура предварительной настройки длины волны лазера ONU, проводимая в начале процесса его инициирования, перед передачей управления AMCC. Настройка осуществляется на основе двухчастотного зондирования фильтра AWG с помощью двухчастотного излучения, предварительно сформированного по методу Ильина-Морозова и разнесенного на ширину полосы пропускания одного канала на полувысоте. Для построения такого канала используется лазер типа EML.

Предлагаемая система инициализации длины волны восходящего потока в структуре транспортного WDM-PON домена радиосетей доступа мобильной связи 5G основана на теории и технологии двухчастотных микроволновых фотонных измерений, что позволяет оценивать параметры настройки длины волны ONU на центральную длину волны AWG OLT в режиме реального времени, а также прогнозировать основные параметры его статики и динамики изменений. Эта система свободна от недостатков, вызванных использованием в аналогичных системах одночастотных методов настройки, использующих прямое детектирование одночастотного излучения или двух одночастотных излучений разделенных во времени, и связанных с наличием различных шумов и искажений низкочастотной природы в области детектирования. Представлена структурная схема системы и ее измерительная характеристика, синтезированная в процессе численных экспериментальных исследований. Преимуществом этой системы является возможность измерять разность длины волны ONU и центральной длины волны AWG OLT, оценки которой получают путем непосредственного преобразования изменения величины коэффициента модуляции огибающей биений двухчастотного излучения в микроволновом диапазоне. Эта система может использоваться как для процесса инициализации при включении ONU, так и для коррекции настройки во время его суточной эксплуатации, а также перестройки после продолжительного использования лазера (более 1000 часов). Дополнительным ее преимуществом является возможность измерения температурных уходов центральной длины волны OLT AWG, которая имеет такую же природу при обработке информации.

Работа выполнена в рамках государственного задания КНИТУ-КАИ в соответствии с Соглашением № 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020).

Т. К. Болецкая, Е. В. Киселева
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского (Омск)

РАСЧЕТ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ СВЕТОВЫХ ВОЛН В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

Аннотация. Характеристики реальных оптических волноводов невозможно вычислить аналитически. Нужно использовать приближенные методы расчета, один из которых метод конечных разностей. В работе этим методом рассчитаны распределения электрического и магнитного полей в полосковых диэлектрических волноводах с утопленной, погруженной и возвышенной полосками.

Ключевые слова: метод конечных разностей, оптические волноводы, распределения электрического и магнитного полей.

T. K. Boletskaya, E. V. Kiseleva
Dostoevsky Omsk State University (Omsk)

CALCULATION BY FINITE DIFFERENCE METHOD ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD DISTRIBUTIONS LIGHT WAVES IN DIELECTRIC WAVEGUIDES

Abstract. The characteristics of real optical waveguides cannot be calculated analytically. You need to use approximate calculation methods, one of which is the finite difference method. This method is used to calculate the distribution of electric and magnetic fields in strip dielectric waveguides with recessed, submerged, and elevated strips.

***Keywords*:** finite difference method, optical waveguides, distribution of electric and magnetic fields.

В качестве устройств, соединяющих элементы оптических цепей, используются полосковые волноводы. Их характеристики невозможно вычислить аналитически. Нужно использовать приближенные методы расчета, один из которых метод конечных разностей.

Метод конечных разностей заключается в следующем: пространство и время дискретизируются; в уравнениях Максвелла все производные заменяются конечными разностями. Из полученных разностных уравнений находятся неизвестные будущие поля через известные прошлые поля.

Расчеты выполнялись для трех типов полосковых волноводов: с утопленной, погруженной и возвышенной полосками. Предполагалось, что поле в волноводе возбуждается волной, падающей на торец волноводной полоски. Для того чтобы ввести падающую волну в область, в которой выполняются вычисления, использовался TFSF метод (метод полного поля (TF) – рассеянного поля (SF)). Предполагалось, что границы области, в которой проводятся вычисления, поглощающие.

Из полученных результатов следует, что волновод с утопленной полоской лучше ограничивает поле: волна в этом волноводе распространяется в области, имеющие меньшие поперечные размеры, чем в волноводах с возвышенной и погруженной полосками.

Показано, что чем меньше разность показателей преломления волноводной полоски и подложки, тем лучше волновод ограничивает поле.

Финансирование работы выполнялось из централизованных средств ОмГУ им. Ф. М. Достоевского.

Д. Н. Бухаров, А. О. Кучерик, С. М. Аракелян
Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых (Владимир)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОСТРОВКОВЫХ НАНОПЛЕНОК

Аннотация. Предложена модель описания оптических свойств островковых нанопленок с учетом их структурных особенностей: оцениваются интенсивность рассеяния и коэффициент пропускания. Структура пленки моделируется в рамках фрактального подхода, в частности, рассматривается DLA фрактал. Для оценки интенсивности рассеяния используется фрактальная размерность, для оценки коэффициента пропускания – толщина смоделированной структуры.

Ключевые слова: DLA фрактал, рассеяние на кластере, коэффициент пропускания пленки, закон Бугера – Ламберта.

D. N. Bukharov, A. O. Kucherik, S. M. Arakelian
A. G., N. G. Stoletov Vladimir State University (Vladimir)

MODELING OF THE OPTICAL PROPERTIES OF ISLAND NANOFILMS

Abstract. A model is proposed for describing the optical properties of island nanofilms taking into account their structural features: the scattering intensity and transmission coefficient are estimated. The structure of the film is modeled within the framework of the fractal approach, in particular, the DLA fractal is considered. To estimate the scattering intensity, the fractal dimension is used, to estimate the transmittance - the thickness of the modeled structure.

Keywords: DLA fractal, scattering by a cluster, film transmittance, Bouguer – Lambert law.

Сегодня островковые нанопленки находят широкое применения в различных областях науки и техники благодаря своим уникальным свойствам и характеристикам. Особенно актуально исследование их управляемых оптических свойств, обусловленных структурными особенностями. Изучались полупроводниковые островковые нанопленки теллурида свинца (PbTe), полученные под действием непрерывного лазерного излучения YAG:Nd3+ – лазера с длиной волны 1,06 мкм, с мощностью 5–10 Вт, при движении лазерного пучка диаметром 30 мкм со скоростью 80 мкм/с. Полученные наноструктуры были исследованы с использованием РЭМ Quanta 200 3D и зондовой нанолаборатории Интегра-Аура, а также с помощью инструментов среды MATLAB и продемонстрировали свою фрактальную природу.

Для описания полученных результатов и калибровки условий эксперимента было проведено моделирование оптических свойств полученных нанопленок с учетом их структурных особенностей. В связи фрактальным характером рассматриваемых структур и рассчитанной методом box-counting фрактальной размерностью в качестве модели структуры был выбран фрактал диффузно-ограниченной агрегации (DLA) на плоскости при варьировании вероятности слипания частиц в агрегате. Такой подход позволил смоделировать рельеф наноструктуры. Для оценки интенсивности рассеяния S использовалось случайное распределение начальных центров агрегации, от которых происходил рост островков. Для смоделированных кластерных пленок была рассчитана фрактальная размерность D при варьировании вероятности слипания на [0.01; 1], значения которой лежали на [1.07; 2.02] и имели обратно пропорциональный вероятности слипания характер. Интенсивность рассеяния излучения на фрактальном кластере оценивалась как обратно пропорциональная фурье-компоненте от плотности материала в нем в степени фрактальной размерности. Таким образом, при увеличении фрактальной размерности пленки интенсивность рассеяния уменьшалась. Так, для длины волны 1,06 мкм и $D_1 = 1,07$, $D_2 = 1,8$, $D_3 = 2,06$, значения интенсивности рассеяния составили величины $S_1 = 0\ 43$, $S_2 = 0\ 2$, $S_3 = 0,16$ соответственно. Для оценки коэффициента пропускания, в зависимости от толщины пленки применялся закон Бугера – Ламберта для излучения 1,06 мкм, для случая сильного поглощения при отсутствии многократных внутренних отражений, когда рассматривалась хорошо сформированная островковая структура, а в случае разреженной – также учитывалось влияние подложки из стекла. Для оценки толщины нанопленки (d) применялась модель DLA в случае агрегации от нижней границы расчетной области, что позволило смоделировать боковое сечение и профиль

структуры для случая $d \leq 20$ нм. Проведенные расчеты показали, что зависимость величины коэффициента пропускания от толщины T(d) носит обратно экспоненциальный характер, таким образом, что для случая хорошо сформированной пленки он выше, чем для разреженной, что объяснимо влиянием отражений и рассеяний на границе пленки и подложки. Так, для хорошо сформированной пленки T(d) не превосходит 0,5, для разреженной – 0,3.

Предложенная модель позволит в первом приближении оценить оптические свойства, а так же условия получения и структурные особенности формируемых островковых нанопленок, когда необходимо реализовать заданные характеристики оптического рассеяния и пропускания.

Работа выполнена при поддержке при поддержке государственного задания ВлГУ в сфере научной деятельности в рамках проекта № 0635-2020-0013.

А. В. Зверев, Д. Е. Ипатов
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск)

ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ВИДЕОСИГНАЛА СЕНСОРА ИК ДИАПАЗОНА В ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ

Аннотация. Представлена разработка модели фотоприемного устройства с дифференцированием падающего излучения в пространстве и времени для решения задач систем машинного зрения на основе применения импульсных нейронных сетей. Приведён сравнительный анализ современных способов обработки видеосигнала. Предложена архитектура программного инструментария и подход для его реализации.

Ключевые слова: фотоприемное устройство, временное дифференцирование, пространственное дифференцирование, модель, DVS, инфракрасный, ИК, машинное зрение.

A. V. Zverev, D. E. Ipatov
Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (Novosibirsk)

TEMPORAL AND SPATIAL DIFFERENTIATION OF INFRARED SENSOR SIGNAL

Abstract. This work presents the development of a photodetector model with spatial and temporal differentiation of incident radiation in order to solve machine vision problems by the means of spiking neural networks. A comparative analysis of modern signal processing techniques was made. Software tools architecture and implementation are proposed.

Keywords: photodetector, temporal differentiation, spatial differentiation, model, dynamic vision sensor, infrared, machine vision.

Одним из наиболее значимых применений роботизированных систем является наземный и воздушный беспилотный транспорт, активно применяемый в гражданской и военной отраслях. Такие системы осуществляют принятие решений на основе интеллектуального анализе окружения.

В качестве наиболее мощных источников информации об окружающем мире предлагается использовать лидары или фотоприемные устройства (ФПУ), а также применять их совместно. Несмотря на высокое качество получаемой карты местности, для задач машинного зрения лидары обладают рядом недостатков, среди которых можно выделить следующие: низкая частота считывания кадров в секунду; наличие активной подсветки, что накладывает сильные ограничения на применение в экстремальных условиях при поглощении лазерного излучения (высокая влажность, туман, дождь, снег, другой лидар и т.д.); малое расстояние определения цели – наиболее продвинутые системы достигают порядка 150–200 метров.

Поэтому для задач робототехники именно ФПУ обладают самой высокой информационной ёмкостью по сравнению с другими приёмами. Одними из существенных недостатков традиционных ФПУ являются высокая латентность по выводу сигнала изображения и недостаточная ширина входного динамического диапазона. Преодолеть данные ограничения предполагается с помощью подхода временного дифференцирования падающего сигнала (DVS). Поскольку ФПУ видимого диапазона накладывают свои ограничения на применимость конечного продукта в тяжелых условиях (недостаточная освещенность, туман, дым и т.д.), то переход к средне- и длинноволновому ИК диапазону позволит преодолеть указанные недостатки. При этом фотонные приемники представляют больший интерес благодаря высокому быстродействию по сравнению с болометрическими.

Дальнейшее улучшение характеристик ФПУ заключается в применении метода пространственного дифференцирования видеосигнала непосредственно на сенсоре изображения. Данный подход заключается в том, что с каждого пикселя ФПУ считывается разностная составляющая сигнала относительно соседних пикселей. В результате величина считываемого с сенсора сигнала, имеет динамический диапазон много меньше динамического диапазона падающего излучения на отдельно взятый пиксель. Основой для данного подхода является тот факт, что в реальном изображении интенсивности излучения, падающего на соседние пиксели, различаются слабо.

Полученные потоки событий преодоления пороговых интенсивностей наиболее эффективно можно обрабатывать с помощью свёрточных нейронных сетей в задачах анализа окружения, отслеживания и распознавания объектов.

Модель ФПУ с применением пространственной и временной дискретизации, а также трехмерная ИК сцена разрабатываются в виде пакета программ с использованием SystemC и методики TLM 1.0. В качестве основы для высокопроизводительных вычислений при моделировании и проецировании трёхмерной сцены на фокальную плоскость моделируемого ФПУ используются ресурсы графических ускорителей с применением API Vulkan.

Главной особенностью разрабатываемой модели является возможность интерактивного создания трехмерных сцен с объектами различных фигур, форм, спектров энергетической светимости и коэффициентами серости. Для разработки конкретных прикладных решений наиболее интересными являются диапазоны длин волн 3–5 и 8–13 мкм, что соответствует средневолновому и длинноволновому ИК диапазону и окнам атмосферной прозрачности. Однако существует интерес и к другим диапазонам длин волн, поэтому в данную симуляционную модель будет заложена возможность осуществления рендеринга сцен для широкого диапазон длин волн.

Каждый трехмерный объект на сцене представляет собой модель черного тела с известными формой, коэффициентом серости, теплоёмкостью и положением в трехмерном пространстве. В соответствии с формулами Планка мы можем получить спектральную энергетическую светимость для каждой точки трёхмерного тела с заданным профилем коэффициента поглощения в заданном диапазоне длин волн. С учетом влияния воздействия атмосферы, оптической системы и положения модели ФПУ в пространстве относительно наблюдаемых объектов мы можем определить количество падающих фотонов на элемент сенсора.

Последующая обработка падающего излучения состоит из двух этапов. Первый представляет собой дифференцирование сигнала в пространстве. На одной из предлагаемых моделей результирующий сигнал на элементе сенсора, формируемый в результате поглощения падающего света, равен разнице вкладов поглощенного света на данном элементе и определённой части вкладов поглощенного света на соседних элементах. Таким образом каждый момент времени элемент сенсора хранит относительную информацию о величине падающего излучения, что позволяет значительно увеличить ширину входного динамического диапазона.

Во втором этапе обработки производится временное дифференцирование сигнала на элементе сенсора. Если по истечению некоторого заданного промежутка времени, независимого для каждого элемента сенсора, не происходит преодоления пороговой величины испускания спайка как в сторону положительного преодоления порога, так и в сторону отрицательного, то элемент сенсора не выдает никаких сигналов на выходную линию. Если же происходит преодоление пороговой величины, то в сторону дальнейшего обработчика отправляется импульс соответствующего знака (положительный или отрицательный).

Таким образом, формируется двумерная картинка импульсов, получаемых с независимых друг от друга элементов сенсора ИК изображения. Дальнейшую обработку импульсов предполагается осуществлять на импульсных нейронных сетях, аппаратно моделируемых на базе нейроморфного процессора «Алтай», что позволит достичь высочайшей эффективности в решении задач машинного зрения в компактных автономных устройствах.

Л. Г. Кесель, А. С. Смирнова
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАТОРА КОАКСИАЛЬНОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОГО ДИАМЕТРА КОЛЬЦА ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Аннотация. Определены конструктивные параметры резонатора коаксиального лазера и допустимые пределы их отклонений для получения заданного диаметра кольца выходного излучения.
Ключевые слова: резонатор, коаксиальный лазер, конструктивные параметры.

L. G. Kesel, A. S. Smirnova
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

DETERMINATION OF CONSTRUCTION PARAMETERS OF A COAXIAL LASER RESONATOR FOR OBTAINING A PRESENT RING DIAMETER OF OUTPUT RADIATION

Abstract. The design parameters of the resonator of a coaxial laser and the permissible limits of their deviations for obtaining a given diameter of the output radiation ring are determined.
Keywords: resonator, coaxial laser, design parameters.

Для практического применения необходимы достаточно компактные, но в то же время сравнительно мощные лазеры на CO_2. Значительные преимущества в этом отношении обеспечивают коаксиальные лазеры, использование которых позволяет создавать лидарные системы с большой дальностью, технологические и медицинские установки.

Типами колебаний коаксиальных лазеров являются многоходовые (многопучковые) типы (М-моды), обеспечивающие многолучевой выход.

Одним из основных элементов лазера данного типа является электроразрядная камера, которая состоит из двух секций наружного холодильника, внутри которого расположен один внутренний холодильник. Величина зазора между стенками разрядной камеры меняется путем установки центральных холодильников различного диаметра. На торцах камеры установлены зеркала оптического резонатора.

Одним из вариантов конструкций резонаторов, имеющих кольцевое сечение поля, является резонатор, состоящий из плоского и асферического зеркал.

Конструктивными параметрами резонатора, влияющими на характеристики выходного излучения лазера, являются: длина резонатора, величина рабочего зазора разрядной камеры, деформация плоского зеркала, разъюстировки плоского и асферического зеркал, тепловая линза, которая создается активной средой, точность изготовления асферического зеркала.

Важной характеристикой излучения, которая используется для определения конструктивных параметров резонатора, является диаметр кольца выходного излучения. Диаметр кольца выходного излучения определяется величиной зазора разрядной камеры, величиной угла при вершине конуса асферического зеркала, конусностью плоского зеркала, диапазоном углов наклона выходных лучевых потоков.

Для анализа асферического резонатора была разработана трехмерная модель, позволяющая определять зоны существования многоходовых мод и основные конструктивные параметры резонаторов для данных мод. На базе трехмерной модели была разработана инженерная методика расчета резонаторов коаксиальных лазеров, позволяющая определять конструктивные параметры и допустимые пределы их отклонений для получения заданного диаметра кольца выходного излучения.

Л. Г. Кесель, А. Р. Сулейманов
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЪЮСТИРОВОК ЗЕРКАЛ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛУЧЕВЫХ ПОТОКОВ В КОАКСИАЛЬНОМ ЛАЗЕРЕ

Аннотация. Выполнена оценка влияния разъюстировок зеркал на пространственные характеристики лучевых потоков в коаксиальном резонаторе. Получены зависимости положения эффективной самовоспроизводящейся оптической оси от величины перекосов и смещений зеркал для зон устойчивости резонатора.
Ключевые слова: резонатор, зеркала, лазер, разъюстировки.

L. G. Kesel, A. R. Suleymanov
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF MIRROR RECONSTRUCTIONS ON THE SPATIAL CHARACTERISTICS OF RADIATION FLOWS IN A COAXIAL LASER

Abstract. The effect of mirror misalignments on the spatial characteristics of beam fluxes in a axial resonator is estimated. The dependences of the position of the effective self-reproducing optical axis on the distortions and displacements of the mirrors for the stability zones of the resonator are obtained.
Keywords: resonator, mirrors, laser, misalignment.

При практическом применении многоэлементных резонаторов существенное влияние на характеристики выходного излучения лазера оказывает пространственное взаимное расположение и различного рода разъюстировки зеркал. В настоящей работе представлены результаты исследования лазеров коаксиальной конструкции с резонатором типа плоское зеркало – асферическое зеркало. Для указанного резонатора выполнена оценка влияния разъюстировок зеркал на пространственные характеристики лучевых потоков.

Для анализа юстировочных характеристик исследуемого резонатора использовались расширенные матрицы 3 х 3, соответствующие каждому оптическому элементу, где третий столбец матрицы описывает поправку, вызванную отклонениями от идеального положения зеркал резонатора. Получены зависимости положения эффективной самовоспроизводящийся оптической оси от величины перекосов и смещений зеркал для различных радиусов кривизны образующей асферического зеркала, соответствующих зонам устойчивости резонатора. Определено положение каустик на асферическом зеркале и на оси резонатора в зонах устойчивости.

Положение новой эффективной самовоспроизводящейся оптической оси в зависимости от перекосов и смещения зеркал определено в трёх сечениях резонатора (на плоском зеркале, на асферическом зеркале и оси резонатора). Показаны слабая чувствительность резонатора к разъюстировкам и возможность создания лазера без юстировочных приспособлений.

М. Э. Копонен
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ВЫХОДОМ

Аннотация. Приведена краткая справка принципа работы оптических измерителей высокого напряжения. Предложен вариант исполнения измерителя высокого напряжения с волоконно-оптическим выходом.
Ключевые слова: измеритель напряжения, эффект Поккельса.

M. E. Koponen
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

DEVELOPMENT OF THE HIGH VOLTAGE MEASURER WITH FIBER OPTICAL OUTPUT

Abstract. The report provides a brief reference to principle of work of high voltage optical meters. Also we have offered the high voltage meter with fiber optic output.
Keywords: voltage measurer, Pockels effect.

Введение

Под оптическими методами измерения напряжения подразумевается использование волоконно-оптических датчиков напряжения. Такие датчики в своей основе используют эффект Поккельса.

Эффект Поккельса – это явление возникновения двойного лучепреломления в оптических средах при наложении электрического поля, при этом поле может быть как постоянным, так и переменным.

На данный момент датчики, основанные на эффекте Поккельса, пользуются неослабевающим интересом, в связи с множеством преимуществ, которые они могут предоставить. Перечислим эти преимущества: широкий динамический диапазон измерений; высокая линейность; широкий частотный диапазон; отсутствие влияния нагрузки вторичных цепей и потерь в них; высокая устойчивость информационных каналов к внешним электромагнитным помехам; меньшие массогабаритные показатели; удаленность от блока электроники на большие расстояния.

Основная часть

В данной работе будет рассмотрено техническое решение, совмещающее традиционный высоковольтный делитель напряжения и устройство, преобразующее информационный низковольтный сигнал в изменение параметров оптического сигнала (модуляцию), тем самым обеспечивая гальваническую развязку высоковольтного блока и систем телемеханики.

Принцип работы устройства заключается в следующем: измеряемое напряжение с действующем значением не более 10кВ подается на делитель напряжения. Пониженное в 1000 раз напряжение подается на оптический аттенюатор. Параллельно с этим, на аттенюатор подается оптическое излучение с лазера. Пониженное по амплитуде оптическое излучение попадает на фотоприемник, а потом на вычитающее устройство с двумя входами. Второй вход предназначен для опорного канала, который является поделенным пополам оптическим излучением с того же лазера. В устройстве вычитания вычитаются опорный и измерительный сигналы. По этой разнице можно сделать вывод о измеряемом напряжении, подаваемом на вход измерителя.

Заключение

В данной работе был представлен вариант измерителя высокого напряжения с волоконно-оптическим выходом.

С. А. Кузнецов[1, 2], П. А. Лазорский[1], А. В. Гельфанд[2],
В. Н. Федоринин[2], Н. А. Николаев[1, 3]
[1] Новосибирский государственный университет, АТИЦ ФФ (Новосибирск)
[2] Филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «КТИПМ» (Новосибирск)
[3] Институт автоматики и электрометрии СО РАН (Новосибирск)

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТГЦ-ФОТОНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

Аннотация. Представлен обзор экспериментальных результатов по разработке элементов микроструктурной оптики и устройств на основе метаповерхностей, предназначенных для эффективного управления характеристиками пучков электромагнитного излучения в области частот от сотни ГГц до нескольких ТГц. Рассмотрены примеры квазиоптических частотных фильтров, преобразователей фазы и поляризации, плоских фокусаторов, ультратонких поглотителей излучения и спектрально-селективных тепловых детекторов на их основе, сенсоров тонкопленочных аналитов. Обсуждаются вопросы электродинамической оптимизации, технологии изготовления, спектральной характеризации и практического применения разработанных устройств.
Ключевые слова: метаповерхности, частотно-избирательные поверхности, квазиоптические элементы, терагерцовое излучение.

S. A. Kuznetsov [1, 2], P. A. Lazorskiy[1], A. V. Gelfand[2],
V. N. Fedorinin[2], N. A. Nikolaev[1, 3]
[1] Novosibirsk State University, Physics Department, ATIC (Novosibirsk)
[2] Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk Branch “TDIAM” (Novosibirsk)
[3] Institute of Automation and Electrometry SB RAS (Novosibirsk)

FUNCTIONAL OPTICAL ELEMENTS OF THZ-PHOTONICS BASED ON METASURFACES

Abstract. The review of experimental results on the development of microstructured optical elements and devices using metasurfaces intended for effective manipulation of radiation beams in the range from hundred GHz to several THz is presented. Practical solutions for quasi-optical frequency filters, phase and polarization transformers, planar focusing devices, ultra-thin radiation absorbers & spectrally-selective metasurface-based thermal detectors, and sensors of thin-film analytes are considered. The issues of electromagnetic optimization, technological fabrication, and spectral characterization of the developed devices alongside with their practical applications are discussed.
Keywords: metasurfaces, frequency selective surfaces, quasi-optical components, terahertz radiation.

В последнее десятилетие происходит активное освоение терагерцового диапазона частот электромагнитного спектра (0,1–10 ТГц), стимулированное развитием эффективных методов генерации и детектирования терагерцового излучения. Данная спектральная область, простирающаяся от коротковолновой части миллиметрового диапазона до дальнего ИК (λ = 0,03–3 мм), представляет большой практический интерес ввиду ряда уникальных свойств. К ним относятся отсутствие ионизирующего эффекта, сравнительно высокая проникающая способность во многие оптически непрозрачные материалы, высокая чувствительность к металлическим и водным средам, возможность достижения мм/субмм пространственного разрешения при визуализации скрытых объектов, наличие вращательных переходов в молекулах ряда важных органических веществ, высокая информационная ёмкость при передаче данных. Указанные свойства делают перспективным ТГц волны для систем безопасности, неразрушающего контроля и диагностики материалов, биомедицинских технологий, новых поколений систем связи (6G, 7G), и др.

Освоение ТГц области частот делает актуальными задачи разработки и изготовления эффективных оптических элементов для управления характеристиками пучков ТГц-излучения. С инструментальной точки зрения данный спектральный диапазон удобно позиционирован между примыкающими к нему СВЧ и ИК областями, поскольку позволяет сочетать в ТГц аппаратуре

инструментальные решения как оптической, так и микроволновой техники. Примером таких решений служат тонкие планарные метало-диэлектрические структуры субволновой топологии, известные в микроволновой литературе как «частотно-избирательные поверхности», а в физике метаматериалов как «метаповерхности»» (МП). МП являются, как правило, резонансными электродинамическими структурами, которые эксплуатируются в режиме, когда их характерные резонансные частоты лежат значительно ниже точки возбуждения высших дифракционных гармоник, что отличает такие структуры от дифракционных решеток. Последнее достигается малостью периода расположения элементарных ячеек МП в ее латеральной плоскости в сравнении с рабочей длиной волны. Существенно, что амплитудные, фазовые и поляризационные характеристики МП в заданной полосе частот определяются дизайном ее элементарных ячеек, соответствующий выбор которого обеспечивает требуемые функциональные свойства МП-устройств. Последние выгодно сочетают малость толщины/веса и высокую эффективность, которая зачастую не может быть достигнута в рамках решений классической оптики. При этом в ТГц-диапазоне характерный размер элементов топологического рисунка МП в большинстве случаев составляет от нескольких единиц до сотен мкм, что позволяет применять для его производства сравнительно недорогие и хорошо отработанные литографические технологии.

В настоящем докладе представлен обзор экспериментальных результатов по разработке оптических элементов и устройств на основе метаповерхностей традиционных и новых конфигураций, которые предназначены как для автономного применения, так и для интеграции с различными метрологическими системами, работающими в области частот от сотни ГГц до нескольких ТГц. Составляя неотъемлемую часть российской элементной базы радиофотоники, разработанные элементы в ряде случаев опережают по функциональным характеристикам отечественные и зарубежные аналоги. Обсуждаются вопросы электродинамического моделирования МП-структур с применением пакетов ANSYS и CST, технологического производства посредством фото- и ренгенолитографии, спектральной характеризации образцов техникам ЛОВ, Фурье и широкополосной импульсной спектроскопии (TDS). Рассмотрены конкретные инструментальные решения и примеры практического использования следующих типов терагерцовых МП-устройств и систем на их основе:

1) частотные фильтры различных видов: band-pass, low-pass, high-pass; дихроичные мультиплексоры пучков излучения; спектрорадиометрические системы на базе полосовых фильтров;

2) поляризаторы; преобразователи фазы и поляризации; эллипсометр;

3) плоские фокусирующие элементы, включая голографические структуры;

4) ультратонкие резонансные поглотители и тепловые детекторы на их основе, включая многоканальные пироэлектрические линейки для спектральных и поляризационных измерений с пространственным разрешением;

5) сенсоры тонкопленочных аналитов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (гранты FSUS-2020-0029 и 075-15-2020-797) с использованием парка оборудования Центров коллективного пользования «ВТАН» НГУ и «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

Е. В. Куликов, А. Ж. Сахабутдинов, И. И. Нуреев,
Л. М. Сарварова, А. А. Тяжелова
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНОК ИЗНОСА СТВОЛА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЯ ЕГО ДЕФОРМАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДРЕСНЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК

Аннотация. Представлена многосенсорная система на основе адресных волоконных брэгговских решеток (АВБР) для обеспечения мониторинга живучести ствола в реальном времени. Существует четыре вида систем для мониторинга указанного типа на основе измерения: скорости снаряда на выходе ствола, температуры, размеров и деформации наружной поверхности ствола. При этом последняя из них, реализованная на тензометрических беспроводных датчиках, считается наиболее информативной. Предложена многосенсорная система мониторинга живучести ствола, в которой используются датчики на основе АВБР в качестве чувствительных к деформации элементов и измерительная система, состоящая из волоконно-оптических и электрооптических компонентов для преобразования сигналов, создаваемых датчиками, в пригодные для последующей обработки сигналы радиодиапазона. Использование такой радиофотонной системы позволяет снять ограничения, присущие беспроводным системам мониторинга, которые отличаются низкой электромагнитной совместимостью.

Ключевые слова: живучесть ствола, кольцевая деформация ствола, многосенсорная система мониторинга, адресная волоконная брэгговская решетка, радиофотоника.

E. V. Kulikov, A. Zh. Sakhabutdinov, I. I. Nureev,
L. M. Sarvarova, A. A. Tyazhelova
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

A SYSTEM FOR ESTIMATING THE WEAR OF A BARREL ON THE DATA OF ITS DEFORMATIONS MEASURING USING ADDRESSABLE FIBER BRAGG GRATINGS

Abstract. A multisensor system based on addressable fiber Bragg gratings (AFBG) is presented to provide monitoring of barrel survivability in real time. There are four types of monitoring systems of this type based on measurements: the velocity of the projectile at the exit of the barrel, temperature, dimensions and deformation of the outer surface of the barrel. At the same time, the last of them, implemented on strain-gauge wireless sensors, is considered the most informative. This article proposes a multi-sensor system for monitoring barrel survivability, which uses sensors based on AFBG as strain-sensitive elements and a measuring system consisting of fiber-optic and electro-optical components for converting signals generated by sensors into radio-frequency signals suitable for subsequent processing. The use of such microwave photonic system allows removing the limitations inherent in wireless monitoring system, which are characterized by low electromagnetic compatibility.

Keywords: barrel survivability; barrel annular deformation, multi-sensor monitoring system; addressable fiber Bragg grating; microwave photonics.

При стрельбе из орудия ствол подвергается износу (истиранию и эрозии) и появлению усталостных изменений, что в конечном итоге приводит к невозможности обеспечения орудием прицельной стрельбы или к внезапному его отказу. Несмотря на то что был достигнут большой прогресс в области продления срока службы и повышения усталостной прочности ствола орудия, орудийный ствол необходимо снимать с эксплуатации, когда производительность орудия не соответствует требуемой точности стрельбы. Поэтому очень важной нерешенной проблемой является то, как точно определить оставшийся срок полезного использования или живучесть орудийного ствола.

Сенсорная часть систем на основе оптического волокна, как правило, компактна, механически прочна, невосприимчива к электромагнитным помехам, взрывобезопасна, для нее просто

обеспечиваются работоспособность в широком температурном диапазоне и возможность надежного крепления, практически, к любым поверхностям или встраивания внутрь контролируемого материала, Дополнительным преимуществом предложенной системы является применение АВБР, которые позволяют избежать ограничений на применение в волоконно-оптических системах сложных и дорогих, вибро-неустойчивых интеррогаторов, обеспечивая обработку информационных сигналов деформаций в радиодиапазоне.

Мониторинг состояния орудийного ствола включает в себя идентификацию эксплуатационных нагрузок, повреждений (износ и усталость), увеличение повреждений и будущие характеристики ствола по мере накопления повреждений. Основные технические области мониторинга состояния ствола включают в себя измерения, моделирование, анализ данных и прогнозирование.

Общая процедура контроля ствола состоит из следующих этапов:

– измерение деформации на стволе под эксплуатационной нагрузкой в начале срока службы (когда выполнен первый выстрел);

– измерение деформации при одинаковых условиях нагрузки в соответствии с графиком (программой проверок);

– нормализация деформации до величины нагрузки, применяемой во время первой оценки;

– сравнение измеренных деформаций, определение износа или выделение экстремальных значений вне тренда (идентификация повреждения).

Требования к проектированию системы включали: максимальную скорость снаряда 1400 м/с; дискретность измерения скорости менее 0,1% от максимальной скорости снаряда (1,4 м/с); устойчивость к ударным, температурным и вибрационным нагрузкам.

В дополнение к этим требованиям ожидаемые уровни деформаций и интенсивность деформаций, создаваемые во время реальной стрельбы, важны для проектирования волоконно-оптической системы. Исходя из результатов реальных огневых испытаний, максимальные уровни деформаций в предполагаемых местах расположения датчиков для некоторых орудий оцениваются в диапазоне 600–1000 με и скорости деформации до 500 με/μс.

Следовательно, требование по разрешающей способности измерения деформации для системы с тем, чтобы соответствовать 0,1% дискретности измерения скорости, как указано выше, было установлено равным 1 με.

В процессе проектирования были оценены несколько системных конфигураций для достижения приемлемой конструкции, которая должна крепиться к стволу. Оптимально конструкция состоит из нескольких АВБР отражательного типа, ВБР режекторного фильтра с наклонной характеристикой, узкополосного лазерного источника, обеспечивающего диапазон засветки АВБР и фильтра, соответствующий изменению температуры от –100 до +400 °С, разветвителя и фотодетектора. Конструкция может быть выполнена и на волноводных решетках, и в интегральном исполнении.

Преимущества такой конструкции – отсутствие необходимости использования спектрального интеррогатора, который не приспособлен к работе в полевых условиях и пороговых устройств регистрации видеоимпульсов, требующей широкополосной обработки видеосигналов в радиодиапазоне.

ВБР режекторного фильтра и ширина полосы излучения лазерного диода с учетом диапазона возможных уходов температуры и импульса волны давления должны составлять 4–6 нм. Скорость изменения деформации будет отслеживаться методом контроля коэффициента модуляции огибающей биений на разностной частоте каждой АВБР. При этом изменение в 0,5 нм/μс не оказывает влияния на разностную частоту, которая постоянна, а следовательно, не требует широкополосного приемника постоянного тока.

Работа выполнена в рамках государственного задания КНИТУ-КАИ в соответствии с Соглашением № 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020).

И. У. Курбиев[1], О. Г. Морозов[2], А. Ж. Сахабутдинов[2]
[1] НПК «Сенсорика» (Сколково)
[2] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

АДРЕСНЫЕ ЛИНЕЙНО-ЧИРПИРОВАННЫЕ ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ КАК БАЗОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ МНОГОСЕНСОРНЫХ РАДИОФОТОННЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Представлен новый вариант решения проблемы использования волоконных брэгговских структур с перекрывающимися спектрами как датчиков радиофотонных адресных систем. Данное решение относится к концепции адресных волоконных брэгговских структур, развиваемой КНИТУ-КАИ и его коммерческими партнерами. На сегодняшний день разработана теория двух- и трехкомпонентных адресных волоконных брэгговских структур. В работе предложено формирование новых адресных линейно-чирпированных волоконных брэгговских решеток, в структуру которых вносится множество фазовых π-сдвигов, формирующих «измерительную линейку» (гребенку) по длине решетки.

Ключевые слова: микроволновая фотоника, радиофотонные многосенсорные сети, двух- и трехкомпонентные адресные волоконные брэгговские структуры, адресные линейно-чирпированные волоконные брэгговские решетки, принципы измерительного преобразования.

I. U. Kurbiev[1], O. G. Morozov[2], A. Zh. Sakhabutdinov[2]
[1] SPK "Sensorica" (Skolkovo)
[2] Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

ADDRESSABLE LINEAR-CHIRPED FIBER BRAGG GRATINGS AS A BASIC ELEMENT OF MULTI-SENSOR MICROWAVE PHOTONIC SYSTEMS

Abstract. A new solution to the problem of using fiber Bragg structures with overlapping spectra as sensors of microwave photonic address systems is presented. This solution refers to the concept of addressed fiber Bragg structures developed by KNRTU-KAI and its commercial partners. To date, the theory of two- and three-component addressable fiber Bragg structures has been developed. The paper proposes the formation of new addressable linear-chirped fiber Bragg gratings, into the structure of which a set of phase π-shifts are introduced, forming a "measuring ruler" (comb) along the length of the grating.

Keywords: microwave photonics; microwave photonic multi-sensor networks; two- and three-component addressable fiber Bragg structures; addressable linear-chirped fiber Bragg gratings; measuring conversion principles.

Общей проблемой опроса массива волоконных брэгговских решеток (ВБР) в сенсорных системах является сложность и дороговизна используемых приборов, обусловленная применяемыми технологиями опроса и мультиплексирования датчиков. Волновое, временное, частотное, поляризационное и пространственное мультиплексирование требует применения таких сложных устройств, как оптические анализаторы спектра, спектрометры с перестраиваемыми интерферометрами Фабри-Перо с дифракционными решетками, излучение которых принимается и анализируется на ПЗС-матрицах и т. д. Сложность применяемых технологий мультиплексирования и опроса объясняется и еще одним важным фактором – опрашиваемые датчики не являются адресными, поэтому любое перекрытие спектров ВБР приводит к существенным ошибкам измерений.

Параллельно с развитием технологий мультиплексирования и методов радиофотонного опроса развивались и методы создания спектрально-кодированных ВБР, информация о спектральной форме которых позволяет обеспечить разделение откликов от ВБР-датчиков, работающих в одном и том же частотном диапазоне. Спектрально кодированные датчики основаны на технологии кодового мультиплексирования, опрос которых производится в режиме реального

времени с помощью определения функции автокорреляции между отраженным от датчика спектром и его кодовой сигнатурой. В ряде работ продемонстрировано обнаружение и отслеживание датчиков для эффективного измерения температуры и деформации даже в условиях перекрытия спектров датчиков при использовании кодов Слепяна на основе ортогональных дискретных протяженных сфероидальных последовательностей.

Более простое решение найдено в использовании адресных волоконных брэгговских структур (АВБС), таких квазипериодических структур в оптическом волокне, которые при направлении на них широкополосного лазерного излучения с равномерной амплитудно-частотной характеристикой формируют в оптическом диапазоне двухчастотный сигнал, разность между частотами которого много меньше несущих оптических частот и находится в радиочастотной области спектра. Разностная частота между двумя частотными составляющими называется адресной частотой. Такая частота инвариантна к воздействию внешних физических полей и не меняется при смещении центральной частоты АВБС.

Закономерным является переход от АВБС к многоадресной структуре, в спектральном отклике которой сформированы три (и более) оптических частотных компоненты, перекрестные биения которых на фотоприемнике формируют сложный, комбинированный адрес такой брэгговской структуры, состоящий из трех (и более) адресных частот. Такая их комбинация позволяет не только расширить адресную емкость измерительной системы, но и повысить точность определения центральной частоты отдельной многоадресной брэгговской структуры. Таким примером являются трехкомпнентные АВБС, аналогичные двухкомпонентным, описанным выше. В последнем случае одной структуре соответствует два или три адреса.

Важным отличием линейно-чирпированной (ЛЧ) ВБР от одномерной ВБР является то, что ее общий спектр зависит не только от деформации или температуры, воздействующей на всю длину решетки, но скорее от температуры/деформации, воздействующей на каждую отдельную секцию решетки. Другими словами, ЛЧВБР может измерять не только значение физической величины, но и определять в какой именно точке выполнено измерение. Используя этот подход можно измерять, например, температуру горячих участков или деформацию на локальных участках. В то время как типичная однородная ВБР составляет в длину до 5 мм, а минимальное расстояние между чувствительными элементами обычно ограничено 10 мм, типичная длина ЛЧВБР составляет 15–50 мм, и потенциально может иметь пространственное разрешение в пределах одного миллиметра. С другой стороны, ЛЧВБР может быть описан как квази-распределенный датчик: подобно однородной ВБР, у неё есть активная длина чувствительного элемента, который измеряет параметры деформации или температуры, и определяет профиль (график во времени) температуры и деформации. Датчики ЛЧВБР могут использовать ту же систему опроса, что и однородные ВБР, однако, требуя для этого применения сложного и громоздкого интерферометра.

Для устранения этого недостатка в структуру ЛЧВБР может быть внесено множество фазовых π-сдвигов. Минимальное волновое расстояние между двумя окнами прозрачности должно быть не менее 0,06 нм. В конкретном случае минимальное физическое расстояние между положениями двух фазовых сдвигов составляет 5–6 мм. Для получения большего разделение длин волн, например, 0,2 нм, фазовый сдвиг должен быть выполнен на расстоянии в 15 мм. На ЛЧВБР длиной 50 мм может быть выполнено 2–8 фазовых сдвигов, определяющих эквидистантные или неэквидистантные адресные свойства каждой решетки.

Частота биений окон прозрачности нескольких решеток, соответствующая сдвигу брэгговской длины волны каждой из них, будет определяться как разностная частота между положениями их окон прозрачности и окон прозрачности опорной решетки с максимальным числом фазовых сдвигов с учетом собственной адресной структуры. Решетки, кроме этого, должны иметь разный коэффициент отражения, поскольку система опроса датчиков использует широкополосный источник, ширина которого определяется диапазоном измерений.

Работа выполнена в рамках государственного задания КНИТУ-КАИ в соответствии с Соглашением № 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020).

И. Р. Муратшин, А. А. Кузнецов
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

НЕОБХОДИМОСТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ПЕРВОГО ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ

Аннотация. Рассмотрены особенности практического применения датчиков на основе брэгговских решеток первого окна прозрачности. Освещены эксперименты, позволяющие рассмотреть данный теоретический метод в реализации. Проведен анализ по выходным данным эксперимента. Выяснено, что данный метод практически не уступает аналогичным на основной длине волны телекоммуникационных волокон.

Ключевые слова: брэгговская решетка, одномодовое оптическое волокно, оптический анализатор спектра.

I. R. Muratshin, A. A. Kuznetsov
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

THE NEED FOR PRACTICAL APPLICATION OF SENSORS BASED ON BRAGG GRATINGS OF THE FIRST TRANSPARENCY WINDOW

Abstract. The features of practical application of sensors based on Bragg gratings of the first transparency window are considered. Experiments were conducted that allow us to consider this theoretical method in implementation. The analysis was performed based on the experimental output data. It was found that this method is almost as good as similar ones on the main wavelength of telecommunications fibers.

Keywords: Bragg grating, single-mode optical fiber, optical spectrum analyzer.

В связи с требованием высокой скорости и большой пропускной способности системы передачи, одномодовое оптическое волокно привлекло большой интерес, поскольку оно обеспечивает пространственное измерение для мультиплексирования сигнала с целью реализации системы мультиплексирования с разделением мод. Между тем, одномодовые оптические волокна также широко изучались и исследовались в качестве ключевого элемента в волоконно-оптическом датчике, поскольку одномодовое оптическое волокно может поддерживать только ограниченные режимы, чтобы обеспечить различные оптические пути для формирования волоконного интерферометра. С другой стороны, когда волоконные брэгговские решетки вписаны в одномодовое оптическое волокно, несколько пиков в спектре отражения возникают не только между одними и теми же поперечными модами, но и между соседними модами. Это свойство существенно отличается от волоконно брэгговских решеток, вписанных в малодомодовые оптические волокна, где пик в спектре отражения приходится на резонансную длину волны основной моды. Благодаря такому преимуществу волоконных брэгговских решеток, вписанных в одномодовые оптические волокна, они были использованы во многих приложениях, таких как волоконные лазеры и волоконные датчики.

Волоконные брэгговские решетки в последние годы становятся все более и более привлекательными, поскольку они малы, экономичны, просты в изготовлении и нечувствительны к электромагнитным помехам. Основной принцип измерения ВБР заключается в измерении отраженного спектра и отслеживании положения пика ВБР, предполагая линейную зависимость между измеренным положением пика и реальной физической величиной, такой как деформация или температура. Наиболее распространенные и коммерчески доступные ВБР работают в диапазоне длин волн 1550 нм, главным образом из-за наличия недорогого телекоммуникационного оборудования на этой длине волны. Однако это требует использования дорогих детекторов InGaAs длиной 1550 нм для опроса датчиков. Использование света на длине волны 850 нм в схемах опроса позволяет устанавливать более дешевые кремниевые детекторы и, следовательно, может значительно снизить цену детектора в интеррогаторах. Кроме того, можно получить больше пикселей в

диодной матрице, что означает лучшую выборку и увеличение разрешения посадки и/или большую ширину полосы измерения. К сожалению, одномодовые волокна на 850 нм не столь дешевые и доступные, как стандартные телекоммуникационные волокна на 1550 нм.

С учетом этих фактов было бы привлекательным переключаться на длину волны датчика 850 нм, в то же время иметь возможность использовать волокна длиной 1550 нм. Дополнительным преимуществом может стать возможность использования сети распределения волокон длиной 1550 нм в нескольких уже установленных системах датчиков ВБР. По сути, идея заключается в использовании недорогих ВБР-сенсорных систем, основанных на одномодовых волокнах.

В этой статье мы исследуем производительность недорогих волоконно брэгговских сенсорных систем на длине волны 850 нм, вписанных в стандартное одномодовое оптическое волокно 1550 нм. Это волокно модулируется в маломодовом режиме при 850 нм, что приводит к появлению нескольких мод в спектр отражения ВБР и ухудшение стабильности основного пика ВБР. Мы делаем подробное сравнение с системами ВБР на основе 850 нм в одномодовом волокне на длине волны 850 нм. С помощью экспериментов по измерению спектра мы сравниваем насколько различаются реальные значения от одномодового волокна на длине волны 1550 нм и света на этой же длине волны. Данная теория уже не нова и использовалась.

В докладе представлены результаты анализа, связанных с подробным сравнением с системами ВБР на основе 850 нм в одномодовом волокне на длине волны 850 нм. Для сглаживания лишних мод, возникающих в оптическом волокне мы будем использовать модовый фильтр.

Из данных приведённых в докладе экспериментов можно сделать следующие выводы.

Эксперимент при измерении спектра в полуметрах от анализатора спектра показал, что, даже несмотря на то что при большом числе витков у нас длина волны стабильна, форма искажается сильно, если мы в дальнейшем будем это аппроксимировать, то будут дополнительные погрешности. Поэтому для стабилизации спектральных характеристик модовый фильтр необходимо располагать в непосредственной близости к спектрометру, что показывает нам третий эксперимент.

Минимальное количество витков модового фильтра в случае непосредственной близости к спектрометру должно составлять 40, погрешность в 10 пм в нашем случае – это методическая погрешность при нашем эксперименте.

При намотке на оправку 50 витков для модового фильтра в случае непосредственной близости к спектрометру было установлено, что сдвига длины волны уже не происходит вообще. Без намотки на оправку сдвиг длины волны очень большой и составляет более 100 пм.

С. А. Останин[1, 2], М. Д. Жумадилов[1]
[1] Алтайский геофизический завод (Барнаул)
[2] Алтайский государственный университет (Барнаул)

РАДИОФОТОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПОРНЫХ СИГНАЛОВ ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Аннотация. Описаны назначение и состав радиофотонных компонентов волоконно-оптической системы распределения опорных сигналов дециметрового диапазона длин волн. Изложен принцип действия компонентов волоконно-оптической системы распределения опорных сигналов. Доказана возможность создания радиофотонных компонентов с улучшенными техническими характеристиками по сравнению с ближайшими зарубежными функциональными аналогами.
Ключевые слова: радиофотоника, радиолокация, опорные ВЧ сигналы.

S. A. Ostanin[1, 2], M. D. Zhumadilov[1]
[1] LLC Altai Geophysical Plant (Barnaul)
[2] Altai State University (Barnaul)

RF PHOTONICS COMPONENTS OF THE FIBER OPTICAL SYSTEM OF THE DISTRIBUTION OF REFERENCE UHF SIGNALS

Abstract. The purpose and composition of the radio-photon components of the fiber-optic distribution system of reference signals of the decimeter wavelength range are described. The principle of the components of the fiber-optic distribution system of reference signals is described. The possibility of creating radio-photon components with improved technical characteristics in comparison with the closest foreign functional analogues has been proved.
Keywords: RF Photonics, radar, RF reference signals.

Компоненты волоконно-оптической системы распределения опорных сигналов дециметрового диапазона длин волн предназначены для высокостабильной синхронизации работы составных частей радиотехнической системы, удаленных друг от друга на расстояние нескольких десятков метров.

Техническое решение задачи заключается в том, что используемые с этой целью радиочастотный сигнал опорной частоты преобразуется в оптический сигнал с длиной волны 1550 нм и модуляцией интенсивности оптического сигнала с частотой в ДМВ диапазоне. Далее, оптическое излучение передается по оптическим волокнам на расстояние нескольких десятков метров. В конце оптической лини сигналы преобразуются в радиочастотный сигнал опорной частоты и радиочастотный контрольный сигнал для управления составной частью радиотехнической системы. Высокая стабильность синхронизации работы всех составных частей обусловлена частотной независимостью потерь оптического сигнала в оптоволокне, нечувствительностью оптоволокна к электромагнитным помехам и наводкам, лучшими температурными и вибрационными характеристиками оптоволокна по сравнению с коаксиальным высокочастотным кабелем.

Для преобразования радиочастотного сигнала в оптический используется оптическое передающее устройство (ОПУ) имеющее оптический разветвитель от 1 к 4. ОПУ преобразует один радиочастотный сигнал в четыре оптических. Для преобразования оптического сигнала в радиочастотный используется фотоприёмное устройство (ФПУ).

Для передачи информации о параметрах четырех радиочастотных сигналов одно ОПУ соединяется с четырьмя ФПУ одномодовыми оптическими волокнами.

Оптическое передающее устройство (ОПУ) представляет собой последовательно соединенные ответвитель радиочастотного сигнала (часть мощности радиосигнала используется для контроля его уровня), модулятор интенсивности оптического излучения, передающий оптоэлектронный модуль с лазерным диодом, оптический изолятор, оптический разветвитель с одним входом и четырьмя выходами.

Преобразование электрического радиочастотного сигнала в оптический, модулированный

по интенсивности, происходит следующим образом. Радиочастотный сигнал поступает по радиочастотному коаксильному кабелю на вход ОПУ через розетку, расположенную на передней панели ОПУ. Далее, сигнал поступает на вход ответвителя радиочастотного сигнала (выполнен на резистивном делителе напряжения). Меньшая часть сигнала поступает на вход устройства контроля мощности радиосигнала «Контроль РЧ». В случае падения мощности сигнала на входе «РЧ» ниже 50% от номинальной устройство контроля мощности радиосигнала формирует сигнал «Авария РЧ» на открытом коллекторе транзистора. Индикация наличия сигнала «Авария РЧ» осуществляется светодиодом, установленным на передней панели ОПУ.

Основная часть радиочастотного сигнала поступает на модулятор тока и далее, на передающий оптоэлектронный модуль в котором функцию преобразователя радиочастотного сигнала в оптический выполняет лазерный диод лазерного диодного модуля LDI-DFB 1550-20/50-H-2-SM1-FA-CW (согласован с одномодовым волокном). Длина волны оптического излучения лазерного диода составляет 1550±3 нм, оптическая мощность в непрерывном режиме до 20 мВт. Постоянный уровень оптической мощности лазерного диода обеспечивает драйвер iC-WKM питающий его током, величина которого зависит от интенсивности излучения. Интенсивность излучения контролируется фотодиодом, встроенным в лазерный диодный модуль. С помощью инжектора питания электрический ток радиочастотного сигнала складывается с током инжекции лазерного диода, что вызывает амплитудную модуляцию интенсивности когерентного оптического излучения. Это позволяет использовать оптическую несущую частоту и оптоволокно для передачи информации о фазе и амплитуде радиосигнала. Для уменьшения влияния излучения отраженного от оптических элементов ОПУ на интенсивность излучения лазерного диода, оптический выход лазерного диодного модуля последовательно соединен с оптическим изолятором.

С выхода оптического изолятора оптический сигнал поступает на вход оптического разветвителя с одним входом и четырьмя выходами. Функция разветвителя состоит в пространственном разделении одного канала распространения оптического излучения на четыре с помощью оптических волокон. Интенсивность излучения, в каждом из четырех каналов, составляет около 25% от интенсивности на входе оптического пассивного разветвителя. Каждый из четырех выходов оптического разветвителя соединен с оптическим коннектором типа SC/APC. Для вывода четырех оптических сигналов из ОПУ коннекторы соединены с четырьмя адаптерами типа SC/APC-SC/APC расположенными передней панели ОПУ.

Фотоприёмное устройства (ФПУ) представляет собой последовательно соединенные приемный оптический модуль, усилитель радиочастоты и радиочастотный ответвитель для контроля уровня радиосигнала. Преобразование оптического сигнала, модулированного по интенсивности, в радиочастотный, модулированный по амплитуде, происходит следующим образом. Основная часть оптического сигнала поступает на приемный оптический модуль, в котором функцию преобразователя оптического сигнала в электрический радиочастотный выполняет фотодиодный модуль PDI-40-4G-K-R50-B-7-SM1-FA. Фотодиодный модуль согласован с одномодовым оптоволокном и содержит PIN фотодиод чувствительный к оптическому излучению в диапазоне длин волн от 850 до 1700 нм. Максимальная частота модуляции фототока 4 ГГц, максимально допустимая оптическая мощность 10 мВт. Приемный оптический модуль содержит на своем выходе схему согласования импеданса фотодиодного модуля с импедансом усилителя (30 дБ) радиочастотного сигнала. Оригинальная схема аналоговой автоматической компенсации температурного сдвига фазы оптического сигнала позволила улучшить фазовую стабильность передатчика в сравнении с зарубежным функциональным аналогом компании EMCORE, США.

О. А. Степущенко, О. Г. Морозов, Г. А. Морозов,
Е. В. Муравьева, Л. М. Сарварова, А. А. Тяжелова
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

ПРОТОТИП БИОСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ LAB-ON-CHIP НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНО-ЧИРПИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С МНОЖЕСТВОМ ФАЗОВЫХ π-СДВИГОВ

Аннотация. Предложена структура волоконно-оптического биосенсора рефрактометрического типа с радиофотонной обработкой информации о показателе преломления среды, окружающей датчик. Датчик выполнен на линейно-чирпированной волоконной брэгговской решетки и содержит в своей структуре два разнесенных по длине волокна фазовых π-сдвига: один – фиксированный по своей величине, второй – изменяющий свои параметры, на участке волокна с вытравленной оболочкой. При контакте измеряемой среды с участком волокна, содержащим второй фазовый сдвиг, происходит изменение его величины и частотного положения, зависящих от показателя преломления. Показана возможность детектировании изменений коэффициента преломления с разрешающей способностью $1{,}5\times10^{-6}$ RIU для множества π-сдвигов с формированием прототипа системы LAB-ON-CHIP.

Ключевые слова: линейно-чирпированная волоконная брэгговская решетка, биосенсор, показатель преломления, фазовый сдвиг, система опроса множества датчиков на одной решетке.

O. A. Stepushchenko, O. G. Morozov, G. A. Morozov,
E. V. Murav'eva, L. M. Sarvarova, A. A. Tyazhelova
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

BIOSENSOR LAB-ON-CHIP PROTOTYPE BASED ON LINEAR CHIRPED FIBER BRAGG GRATINGS WITH FEW PHASE π-SHIFTS

Abstract. The structure of a fiber-optic biosensor of refractometric type with microwave photonic processing of information about the refractive index of the medium surrounding the sensor is proposed. The sensor is made on a linearly chirped fiber Bragg grating and contains in its structure two phase π-shifts spaced along the length: one fixed in magnitude, the second, changing its parameters, in the section of the fiber with an etched cladding. When the measured medium is exposed to the fiber section containing the second phase shift, its magnitude and frequency position change, depending on the refractive index. The possibility of detecting changes in the refractive index with a resolution of $1{,}5\times10^{-6}$ RIU for a variety of phase shifts with the formation of a prototype of the LAB-ON-CHIP system is shown.

Keywords: linearly chirped fiber Bragg grating, biosensor, refractive index, phase shift, a system for interrogating multiple sensors on one grating.

Волоконно-оптические биосенсоры рефрактометрического типа (ОБРТ) на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) стремительно развиваются последнее десятилетие, находя широкое применение как для контроля сверхмалых концентраций различных веществ в растворах, так и для анализа гибридизации ДНК. Опираясь на опыт наших исследований и исследований других авторов можно сделать вывод, что достижение высоких характеристик ОБРТ с одной стороны, с другой стороны сопровождается необходимостью применения сложных и дорогих систем интеррогации датчиков, а также учета конструктивных недостатков ВРБ, связанных с малостью зоны измерения и необходимостью травления волокна для контакта с исследуемым веществом. В последнее время активно исследуется разновидность ВБР – линейно-чирпированные ВБР (ЛЧВБР), которые характеризуются неоднородной модуляцией показателя преломления сердцевины волокна по линейному закону и возможностью дифференциального анализа по длине решетки.

Задачей данной работы является разработка радиофотонного биосенсора на основе линейно-чирпированной волоконной брэгговской решетки с двумя фазовыми π-сдвигами.

Мы изготовили ЛЧВБР с двумя фазовыми сдвигами, используя стандартную технику фазовой маски. Причем решетка записывалась с помощью различных однородных масок и представляла собой набор из нескольких последовательных решеток. Запись проводилась 50 мВт аргоновым лазером с удвоенной частотой 244 нм, сфокусированным через цилиндрическую линзу. Одномодовое волокно, легированное Ge, было погружено в водородный объем на десять дней. Волокно с фазовым сдвигом в области «длинных» волн было протравлено в ортофосфоной кислоте. Частотное расстояние между фазовыми сдвигами составило 10,15 ГГц. Полоса пропускания окон прозрачности составила около 100 МГц.

Для ОБРТ в зоне травления (переменного фазового сдвига) наиболее существенной является зависимость сдвига его центральной длины волны от изменения коэффициента преломления окружающей среды. Другой изменяемой величиной является величина фазового сдвига в зоне травления, которая также зависит от изменения коэффициента преломления окружающей среды.

Следует заметить, что данные изменения не оказывают никакого влияния на составляющую, образованную первым окном прозрачности. Поэтому такой датчик может быть комплексированным: по первому окну прозрачности может измеряться температура, по второму – температура и показатель преломления окружающей среды.

В отличие от известных методов интеррогации волоконно-оптических датчиков, в данной работе было предложено измерять коэффициент амплитудной модуляции огибающей частоты биений в радиодиапазоне между частотными составляющими, определяющих окна прозрачности ЛЧВБР. Поскольку одна составляющая имеет постоянные значения, а вторая модулирована и по амплитуде, и по фазе, данная задача не является тривиальной.

Подобная обработка оптической информации в радиодиапазоне позволяет достичь высокой точности и разрешающей способности измерений. Проведенные оценки показали возможность детектировании изменений коэффициента преломления с разрешающей способностью до $1{,}5\times10^{-6}$ RIU.

Для рефрактометрического контроля множества веществ или одного вещества с различными концентрациями в ЛЧВБР можно сделать несколько фазовых сдвигов. Чтобы избежать перекрытий, было определено, что разделение длин волн между двумя окнами прозрачности должно быть не менее 0,06 нм. В конкретном случае минимальное расстояние между положениями двух фазовых сдвигов составляет 5–6 мм. Для получения большего разделение длин волн, например 0,2 нм, фазовый сдвиг должен быть выполнен на расстоянии в 15 мм от положения постоянного фазового сдвига. При этом снятие оболочки в указанных местах затруднительно с помощью травления волокна. Оптимально использовать в этом случае мощный CO_2 лазер.

Измерение для каждой зоны чувствительности будет проводится на адресных частотиах, которым они соответствуют. Для 0,06 нм это частота составит 7,2 ГГц, для 0,2 нм – 24 ГГц, для 0,13 нм – 15,6 ГГц. При длине решетки в 25 мм можно получить еще два окна прозрачности, которые попадут в полосу пропускания фотоприемника, используемого в стандартных телекоммуникационных сетях 40G.

Учитывая изложенные данные можно сделать вывод о высокой перспективности применения данного биосенсора при контроля качества воды и других жидких продуктов и создания на их основе прототипа системы LAB-ON-CHIP.

Работа выполнена в рамках государственного задания КНИТУ-КАИ в соответствии с Соглашением № 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020).

А. Я. Суранов
Алтайский государственный университет (Барнаул)

СИСТЕМА ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ С ИК-ПОДСВЕТКОЙ И АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА ЗРАЧКА ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА

Аннотация. Предложены система регистрации изображения глаза и алгоритм измерения диаметра зрачка при просмотре тестовых изображений. Система обеспечивает ИК-подсветку глаза и ввод в компьютер его изображений синхронно с последовательностью тестовых изображений. Используется ИК-чувствительная видеокамера с входным цветным фильтром, обрезающим видимое излучение. Для измерения диаметра зрачка предложен двухэтапный алгоритм, использующий бинаризацию изображения глаза по гистограмме яркостей и полиномиальную аппроксимацию количества «тёмных» элементов по двум координатам. Погрешность измерения диаметра зрачка не превышала 1%.

Ключевые слова: ИК-подсветка, видеокамера, обрезающий фильтр, гистограмма яркостей, порог бинаризации, полиномиальная аппроксимация, локальная область.

A. Ya. Suranov
Altai State University (Barnaul)

REGISTRATION SYSTEM AND ALGORITHM FOR MEASURING PUPILLARY REACTIONS

Abstract. A system for recording the image of the eye and an algorithm for measuring pupil size when viewing test images are proposed. The registration system provides infrared illumination of the eye and input into the computer of its images in synchronization with the sequence of test images. Registration of eye images is carried out using an IR-sensitive video camera equipped with a color filter that cuts visible radiation. An IR-sensitive video camera with an input color filter that cuts off visible radiation is used. To measure the diameter of the pupil, a two-stage algorithm is proposed that uses binarization of the eye image using the brightness histogram and a polynomial approximation of the number of «dark» elements in two coordinates. The error in measuring the pupil diameter did not exceed 1%.

Keywords: IR illumination, television camera, cut-off filter, luminance histogram, binarization threshold, polynomial approximation, local region.

Измерение зрачковых реакций человека на различные воздействия относится к области пупиллометрии и является важным инструментом диагностики его функционального и психологического состояния. При этом наиболее часто применяются и наиболее полно проработаны методы и средства оценки зрачковой реакции на световые стимулы в виде импульсов излучения. Для решения данной задачи применяются, как правило, портативные автоматизированные пупиллометры.

Однако в последние годы возрос интерес к использованию пупиллометрических методов для определения психоэмоциональной реакции человека на зрительно воспринимаемые изображения или видеозаписи, которые воспроизводятся в привычных для него условиях. Такие условия предполагают наличие естественных или искусственных источников света, создающих необходимую фоновую освещённость на рабочем месте. Однако при этом возникает ряд проблем, одна из которых связана с отражением источников излучения, окружающих предметов и стимулирующего изображения в зрачке человека. Помимо этого, при регистрации изображения глаза стандартными цветными видеокамерами изображение зрачка может иметь низкий контраст на фоне тёмной радужной оболочки.

Общепризнанным решением последней проблемы является использование источников ИК-подсветки и телевизионных камер, чувствительных в ИК области. Однако в этом случае изображение источников ИК-подсветки при фронтальном освещении также может попадать в область зрачка и вызывать трудности при его выделении и измерении диаметра.

В литературе предложен ряд алгоритмов выделения зрачка на изображении глаза и измерения его диаметра. Однако следует отметить, что в ряде данных работ указанная задача является

лишь частью актуальной в настоящее время задачи управления взглядом (eye tracking), в которой основным является определение направления взгляда. Это накладывает определённый отпечаток на полноту и эффективность решения задачи измерения диаметра зрачка. В другой части работ измерение диаметра зрачка также является составляющей другой, не менее актуальной задачи идентификации человека по радужной оболочке глаза (РОГ). Всё это приводит к тому, что предлагаемые алгоритмы, в частности использование конъюнктивного вращения изображения, построения набора лучей, преобразования Хафа и определение порога бинаризации методом перебора не являются оптимальными по быстродействию и точности. Указанные недостатки делают актуальной разработку алгоритмов обработки изображений глаз размером не менее 1 мегапикселя, обеспечивающих выполнение в реальном времени (с частотой не менее 15–30 кадров/с) с приемлемой точностью. При этом целесообразно обеспечить максимально возможное устранение оптических помех и контрастирование изображения зрачка на фоне РОГ.

Целью данной работы является разработка системы регистрации и алгоритма измерения зрачковых реакций на тестовые изображения, воспроизводимые на экране компьютера в лабораторных условиях.

В данной работе для решения перечисленных проблем предлагается, во-первых, разместить точечные источники ИК-подсветки (светодиоды) с обеих сторон глаза на боковых вертикальных направляющих оправы от очков. При этом угол падения излучения должен превышать 45° с тем, чтобы отражённые изображения источников находились за пределами зрачка. Во-вторых, предлагается перед объективом видеокамеры, в качестве которой использовалась цветная камера ASI120MC-S со снятым ИК-фильтром, установить фильтр, обрезающий видимое излучение. В качестве такого обрезающего фильтра использовался фильтр ПС-13, который имеет коэффициент пропускания ниже 50% в полосе от 400 до 870 нм. В результате использования указанных решений гистограмма яркостей изображения глаза имеет отчётливый пик в области низких значений, соответствующих зрачку.

Такая форма гистограммы позволяет бинаризовать изображение с целью упрощения алгоритмов его последующей обработки, установив порог бинаризации между верхней границей первого пика и нижней границей последующего пика. Для выделения из исходного изображения глаза локальной области зрачка использовалось построение гистограмм количества «тёмных» пикселей бинаризованного изображения по строкам и столбцами и их последующая полиномиальная аппроксимация. Такая аппроксимация позволяет найти граничные точки локальной области изображения зрачка по двум координатам с помощью корней соответствующих квадратных уравнений.

Ограничение области изображения зрачка позволяет повторно построить гистограммы яркостей, уточнить величину порога и рассчитать уточнённое бинаризованное изображение зрачка. Повторное построение гистограмм «тёмных» пикселей по строкам и столбцам позволяет определить размеры зрачка в пикселях простым нахождением границ по заданному порогу, например, по уровню 0,1 от максимального значения. При использовании описанного алгоритма погрешность измерения диаметра зрачка не превышала 1%.

Данный алгоритм был реализован в среде LabVIEW. При использовании ПК с оперативной памятью 16 ГБ время выполнения не превышало 60 мс. Время выполнения также можно уменьшить за счёт прореживания пикселей при расчёте гистограммы изображения глаза, однако значимый эффект (15%) получается только при прореживании в два раза, поскольку при дальнейшем прореживании получаемое снижение становится незначительным на фоне суммарной длительности других операций.

Также можно получить выигрыш в быстродействии, если границы локальной области зрачка, найденные в одном кадре изображения, использовать в качестве исходных границ в следующем кадре, поскольку при частоте кадров 15–30 Гц межкадровое смещение зрачка будет невелико.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-47-860018 р_а.

С. Д. Ханин[1], А. И. Ванин[2], Ю. А. Кумзеров[2, 3],
В. Г. Соловьев[1, 2], А. В. Цветков[2], М. В. Яников[2]
[1] Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного (Санкт-Петербург)
[2] Псковский государственный университет (Псков)
[3] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург)

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВ

Аннотация. Исследовано распространение электромагнитных волн в новых металлодиэлектрических системах на основе опалов. Обнаружено аномальное пропускание и поглощение света гибридными плазмонно-фотонными слоистыми гетероструктурами, связанное с возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся вдоль границ раздела «металл − диэлектрик». Положение максимумов в спектрах отражения нанокомпозитов, полученных путем заполнения опаловой матрицы металлом методом электротермодиффузии, объяснено брэгговской дифракцией, а асимметричная форма спектральных кривых – резонансом Фано.
Ключевые слова: фотонные кристаллы, опалы, поверхностные плазмон-поляритоны, металлодиэлектрические системы, резонанс Фано.

S. D. Khanin[1], A. I. Vanin[2], Yu. A. Kumzerov[2, 3],
V. G. Solovyev[1, 2], A. V. Cvetkov[2], M. V. Yanikov[2]
[1] Military Telecommunications Academy named after the Soviet Union Marshal S. M. Budienny (Saint-Petersburg)
[2] Pskov State University (Pskov)
[3] Ioffe Physico-Technical Institute RAS (Saint-Petersburg)

PECULIAR PROPERTIES OF ELECTROMAGNETIC RADIATION PROPAGATION IN PHOTONIC CRYSTALLINE METAL-DIELECTRIC SYSTEMS BASED ON OPALS

Abstract. The propagation of electromagnetic waves in novel metal-dielectric systems based on opals is studied. An anomalous transmission and absorption of light by hybrid plasmon-photonic layered heterostructures, which is associated with excitation of surface plasmon-polaritons, propagating along “metal–dielectric” interfaces, was revealed. The position of maxima in the reflection spectra of nanocomposites, obtained by filling the opal matrix with metal by the electrothermodiffusion method, is explained by the Bragg diffraction, and an asymmetric form of the spectral curves is attributed to the Fano resonance.
Keywords: photonic crystals, opals, surface plasmon-polaritonnnsss, metal-dielectric systems, Fano resonance.

В качестве перспективных оптических материалов, используемых для решения одной из важнейших задач фотоники, связанной с разработкой и созданием устройств, позволяющих управлять потоками электромагнитного (ЭМ) излучения подобно тому, как в электронике происходит управление движением электронов, многие исследователи рассматривают фотонные кристаллы (ФК). ФК обладают пространственной периодичностью показателя преломления (ПП), которая приводит к возникновению запрещённых энергетических состояний для света с длиной волны, сопоставимой с периодом структуры, – фотонных запрещённых зон (ФЗЗ). В роли трёхмерных ФК могут выступать синтетические опалы, состоящие из одинаковых субмикронных сфер (глобул).

В настоящей работе с целью расширения функциональных возможностей фотонно-кристаллического образца по управлению потоками ЭМ излучения изучены два типа металлодиэлектрических систем на основе опалов. В первом случае использовались широко применяемые в современной фотонике плазмонно-фотонные гетерокристаллы (ПФГК), состоящие из различных комбинаций слоёв коллоидных ФК в контакте с тонкопленочными плазмонными кристал-

лами. В таких системах происходит перенос энергии вдоль границы «металл – диэлектрик» поверхностными плазмон-поляритонами (ППП), что представляет интерес в плане управления потоками ЭМ излучения. Для практической реализации подобных эффектов необходимо обеспечить соответствие морфологии связного металлического покрытия особенностям поверхности исходного ФК. Во втором случае модификация фотонно-энергетической структуры (ФЭС) образца осуществлялась вследствие изменения функции распределения ПП, а также путём гибридизации собственных фотонных мод опала с волнами рассеяния на дефектах кристалла или возбуждёнными в наночастицах металлического наполнителя плазмонными резонансами.

В докладе представлены результаты исследования распространения ЭМ волн в двух типах новых фотонно-кристаллических металлодиэлектрических структур на основе опалов:

1) в слоистых металлодиэлектрических структурах, полученных последовательным напылением металлических и диэлектрических пленок на монослой (*ML*) опаловых глобул;

2) в нанокомпозитах *Me* / опал на основе «массивных» опаловых матриц, в которые металл (*Me = Ag, Sn*) вводился методом электротермодиффузии.

Пленки металла (серебра) и диэлектрика (оксида кремния) наносились магнетронным распылением на установке ATC ORION SERIES SPUTTERING SYSTEM на монослой опаловых глобул из полиметилметакрилата (ПММА), выращенный на стеклянной подложке. Нанокомпозиты *Me* / опал получены введением металла с катода в опаловую матрицу методом электротермодиффузии при напряженности электрического поля $E = 1{,}70 – 3{,}75$ кВ/см и температурах $T = 500 – 800$ К (в зависимости от температуры плавления металла).

Для исследования структуры рассматриваемых металлодиэлектрических систем использовалась сканирующая электронная микроскопия (СЭМ ZEISS FIB-SEM GEMINI и VEGA // LMU Tescan). Оптические свойства полученных ФК изучались методом брэгговской спектроскопии с угловым разрешением на экспериментальных установках, созданных на базе спектрометров Ocean Optics QE65000 и USB650 Red Tide.

Наиболее интересные особенности распространения ЭМ излучения в слоистых плазмонно-фотонных гетероструктурах наблюдались при последовательном соединении с системой *Ag / ML / Ag* оптического резонатора *Ag / оксид кремния / Ag*. В оптических спектрах таких ПФГК наряду с аномальным пропусканием света (extraordinary transmission – EOT) обнаружено также его интенсивное аномальное поглощение (extraordinary absorption – EOA) в области максимального пропускания резонатора, что связано с возбуждением ППП различных типов на границах раздела «профилированный слой металла – монослой опаловых глобул».

Форма спектров отражения нанокомпозитов *Ag / опал,* полученных методом электротермодиффузии, как показал эксперимент, существенно зависит от условий введения серебра в опаловую матрицу. При сравнительно небольшой напряженности электрического поля плотность тока, протекающего через образец с прижимными серебряными электродами, почти не меняла своего значения на протяжении всего времени опыта. В этом случае в спектрах брэгговского отражения нанокомпозита *Ag / опал* наряду с полосой исходной опаловой матрицы возникала более слабая длинноволновая полоса, связанная с появлением наночастиц серебра на поверхности (или внутри – в полостях второго порядка) опаловых глобул. При увеличении напряженности электрического поля плотность тока при тех же температурах возрастала в процессе электролиза в 500 раз. При этих условиях в образце, как показывают СЭМ - изображения, образуются дендриты, рассеяние света на которых приводит к наблюдаемой асимметрии полос в спектрах отражения нанокомпозита *Ag / опал*, что характерно для резонанса Фано. Аналогичные (хотя и менее ярко выраженные) эффекты наблюдались и в нанокомпозитах *Sn / опал*, полученных введением олова в опаловую матрицу.

Результаты исследования могут представлять интерес для разработчиков при создании оптических систем фотоники и наноплазмоники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Германской службы академических обменов (DAAD) и РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90003. Авторы признательны С. Г. Романову, М. И. Самойловичу, У. Пешелю и Д. Плоссу за предоставление образцов для исследования, полезные обсуждения и помощь в проведении экспериментов.

В. А. Швец[1, 2], Д. В. Марин[1], М. В. Якушев[1], С. В. Рыхлицкий[1]
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск)
Новосибирский государственный университет (Новосибирск)

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ КАДМИЙ-РТУТЬ-ТЕЛЛУРА И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ IN SITU КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА ПЛЁНОК

Аннотация. Рассмотрены проблемы применения спектральной эллипсометрии для технологического in situ контроля процесса выращивания слоёв твёрдого раствора кадмий-ртуть-теллур. Представлены экспериментальные исследования спектров оптических постоянных материала в зависимости от состава и температуры, на основании которых получена параметрическая формула спектров оптических постоянных. Обсуждаются вопросы эллипсометрического контроля состава и температуры в процессе роста слоёв.

Ключевые слова: эллипсометрия, оптические постоянные, МЛЭ КРТ, технологический контроль.

V.A. Shvets[1, 2], D. V. Marin[1], M. V. Yakushev[1], S. V. Rykhlitskii[1]
Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (Novosibirsk)
Novosibirsk State University (Novosibirsk)

ELLIPSOMETRIC STUDY OF OPTICAL CONSTANTS SPECTRA OF MERCURY CADMIUM TELLURIDE AND DEVELOPMENT OF METHODS FOR MONITOTING OF EPITAXIAL GROWTH PROCESSES

Abstract. The problems of using spectroscopic ellipsometry for technological in situ control of the process of growing of a cadmium-mercury-telluride solid solution layers are considered. Experimental studies of the optical constants spectra of a material depending on the composition and temperature are presented. The parametric form of the spectra of the optical constants is obtained on the basis of these data. Ellipsometric control of the composition and temperature during layer growth is discussed.

Keywords: ellipsometry, optical constants, MCT MBE, technological control.

Метод эллипсометрии успешно применяется для разработки технологии выращивания эпитаксиальных слоёв твёрдого раствора кадмий ртуть теллур (КРТ) и технологического in situ контроля процессов роста. Использование лазерного эллипсометра, установленного на камере роста, позволяет в реальном времени контролировать такие параметры, как скорость роста, морфологию поверхности растущих слоёв, состав соединения, температуру. Наиболее критическими из перечисленных параметров являются состав x (молярная доля CdTe в твёрдом растворе), определяющий фотоэлектрические свойства материала, и температура роста. Рост слоёв КРТ высокого структурного совершенства происходит в узком температурном интервале, поэтому желаемая точность измерения температуры составляет несколько градусов.

Оценки и эксперимент показывают, что метод лазерной эллипсометрии не может обеспечить для реального технологического процесса одновременное определение состава и температуры с требуемой точностью. Для решения проблемы необходимо разрабатывать методики, опирающиеся на спектральные эллипсометрические измерения. В основе таких методик лежит зависимость спектров оптических постоянных КРТ $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ от состава и температуры. Поэтому в качестве первого шага необходимо провести детальные эллипсометрические исследования материала КРТ и изучить зависимость спектров оптических постоянных от состава и температуры. Сложность задачи заключается в том, что такие исследования должны быть проведены в условиях, близких к эпитаксиальному росту КРТ при соответствующих значениях температуры (вблизи 190°C).

Для решения поставленной задачи был разработан и интегрирован в технологическую установку эллипсометр, функционирующий на основе статической схемы измерений и адаптированный

к геометрии вакуумной камеры. Спектральный диапазон прибора составил 400–1000 нм, что перекрывает область критических точек E_1 и $E_1+\Delta_1$ для КРТ состава x = 0,2–0,4. Время измерения полного спектра составляет 36 с. Воспроизводимость эллипсометрических измерений не хуже 0,01° для Ψ и 0,05° для Δ.

Измерения спектров эллипсометрических параметров проводили в процессе выращивания однородных по толщине слоёв КРТ на установке «Обь-М», а также в процессе пассивного остывания свежевыращенных плёнок при парциальном давлении паров ртути, соответствующем условию роста. Состав исследуемых образцов находился в диапазоне 0,16–0,4, наиболее востребованном для устройств оптоэлектроники. Дополнительно к этому проводились также ex situ температурные измерения тех же образцов на эллипсометре с аналогичными характеристиками.

Оптические постоянные рассчитывались из эллипсометрических измерений по модели полубесконечной среды. Проведённые исследования показали, что спектр диэлектрической функции КРТ $\varepsilon(\lambda) = (n-ik)^2$ имеет характерные особенности вблизи критических точек: максимумы для $\varepsilon_2(\lambda)$ и максимумы производных для $\varepsilon_1(\lambda)$. В области критических точек наблюдаются наиболее сильные изменения в спектрах. Положения критических точек по шкале длин волн зависят от состава и температуры T. Для узкого диапазона изменений x и T эти зависимости можно считать линейными. Для критической точки E_1 найдены следующие коэффициент пропорциональности этих зависимостей: $k_x = 2,3$ нм при изменении состава на $\delta x = 0,01$, а k_T изменяется в диапазоне от 0,093 нм/°C для x = 0,327 до 0,136 нм/°C для x = 0,16. Экспериментальная точности определения положения максимума 0.5 нм, поэтому данная методика может обеспечить точность измерения состава $\delta x \sim 0,005$ и точность измерения температуры $\delta T \sim 5$°C. В этих оценках предполагается определение одного параметра при неизменном втором. В реальном же процессе роста оба параметра изменяются независимым образом. Задача заключается в том, чтобы выделить вклад каждого. Учёт положения второй критической точки $E_1+\Delta_1$ не решает проблемы из-за её более слабой чувствительности и корреляции результатов измерений с положением E_1.

Независимое измерение состава и температуры можно реализовать только путём проведения анализа всего спектрального диапазона. Для решения этой задачи была разработана параметрическая модель оптических постоянных КРТ, описывающая их зависимость от состава и температуры. На первом шаге были представлены в аналитическом виде спектральные зависимости $n(\lambda,x)$ и $k(\lambda,x)$ для температуры роста. Эти зависимости базируются на массиве данных, полученном в результате измерений на 64 эталонных образцах разного состава. Затем были измерены спектральные зависимости коэффициентов температурной чувствительности оптических постоянных (температурные производные). Эти коэффициенты с хорошей точностью удалось аппроксимировать моделью осцилляторов Лорнца, что позволило представить температурную добавку для n и k в аналитическом виде, используя 39 экспериментально найденных параметров. В результате были получены аналитические выражения для задания спектров $n(\lambda,x,T)$ и $k(\lambda,x,T)$ в виде, удобном для моделирования эллипсометрического эксперимента и решения поисковых задач.

Численное моделирование, выполненное на основе полученных формул, показывает, что одновременное определение состава и температуры КРТ является хорошо обусловленной вычислительной задачей. Физическая причина обусловленности объясняется тем, что разные участки спектра имеют разнонаправленную чувствительность к составу и температуре, что позволяет определять оба эти параметра.

Р. А. Эшпай, О. А. Степущенко, О. Г. Морозов,
Л. М. Сарварова, А. А. Тяжелова
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ (Казань)

РАДИОФОТОННАЯ СИСТЕМА СБОРА ИНФОРМАЦИИ О ПОЛОЖЕНИИ ПАЦИЕНТА В ИНВАЛИДНОЙ КОЛЯСКЕ

Аннотация. В основе сенсорной части системы сбора информации, предназначенной для предотвращения пролежней у неподвижных пациентов, находящихся в инвалидной коляске, впервые используются датчики давления на основе адресных линейно-чирпированных волоконных брэгговских решеток с двумя фазовыми π-сдвигами. Применение таких систем позволит решить проблемы адресности получаемой информации от конкретных датчиков коляски.

Ключевые слова: линейно-чирпированная волоконная брэгговская решетка, фазовый сдвиг, адресность, пролежни, инвалидная коляска, датчик давления, компенсация температуры, система опроса датчиков.

R. A. Eshpai, O. A. Stepushchenko, O. G. Morozov,
L. M. Sarvarova, A. A. Tyazhelova
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (Kazan)

MICROWAVE PHOTONICS INFORMATION SYSTEM FOR THE PATIENT POSITION ASSESMENT IN A WHEELCHAIR

Abstract. For the first time, pressure sensors based on addressable linear-chirped fiber Bragg gratings with two phase π-shifts are used at the heart of the sensory part of the information system designed to prevent pressure ulcers in immobile patients in a wheelchair. The use of such systems will solve the problem of addressing the information received from specific wheelchair sensors.

Keywords: linear-chirped fiber Bragg grating, phase shift, addressing, ulcers, wheelchair, pressure sensor; temperature compensation, sensor interrogation system.

Пролежни являются серьезной проблемой для людей с травмами спинного мозга (ТСМ). Статистика показывает, что более 50% людей с ТСМ страдают от пролежней в период их жизни. Снизить стоимость лечения и улучшить качество жизни людей с ТСМ, можно с помощью профилактических и мониторинговых мероприятий.

Для создания мониторинговых систем используются различные технологии, при этом практически все они высокозатратны: видеоаналитика, массив датчиков от 128 до 2056 для контроля рельефа давления и т.д. К этому же классу систем относятся и волоконно-оптические системы на волоконных брэгговских решетках, стоимость системы интеррогации которых достигает десятков тысяч долларов. Более дешевые интеррогаторы не обладают требуемым разрешением для проведения профилирования.

Предложенные недавно системы на двух линейно-чирпированных волоконных брэгговских решетках (ЛЧВБР) без и с одним фазовым сдвигом позволяют частично решить указанные проблемы. Однако, в их арсенале отсутствует аппарат обеспечения адресности измерений. Даже для шести датчиков, установленных в зонах лопаток, седалища, пяток с обеих сторон тела, требуется применение 12, а то и большего количества датчиков, соединенных отдельными волокнами снижения.

В данной статье будут использованы принципы построения и работы адресных волоконных брэгговских решеток (АВБР), разрабатываемые в КНИТУ-КАИ. Ключевым свойством АВБР является возможность переноса информации о воздействии на датчик, формируемой в оптическом диапазоне, в радиочастотный микроволновый диапазон. Обработка информации в микроволновом диапазоне существенно выигрывает по точности и разрешающей способности у оптического. Кроме того, создание радиофотонного интеррогатора позволит снизить стоимость системы.

Для реализации в датчиках давления радиофотонных адресных принципов при записи адресных ЛЧВБР (а-ЛЧВБР) необходимо предусмотреть запись двух фазовых сдвигов с разностной

частотой между ними, лежащей в микроволновом диапазоне. Величина этой разностной частоты может отличаться от датчика к датчику или внутри одного датчика, формируя при обработке адресные свойства принимаемой информации. При приложении к а-ЛЧВБР внешних физических полей величина адресной частоты не меняется.

Определим диапазон изменения центральной длины волны оптоволоконного датчика в 2 нм (диапазон хождения по температуре), получим, что требуемая разрешающая способность определения центральной длины волны составит 0,3–1,5 пм или 37,5–187,5 МГц для определения центральной частоты, что является вполне достижимой величиной для радиофотонных методов измерений с а-ЛЧВБР.

Лазерный источник направляет широкополосное лазерное излучение, которое проходя через опорную а-ЛЧВБР1 (коэффициент отражения 20%), формирует двухчастотное излучение эквивалентное частотному диапазону смещения центральных частот, входящих в измерительную систему а-ЛЧВБР2 датчиков (формируются маркеры границы хождения датчиков по температуре). Излучение ЛИ (80%) прошедшее а-ЛЧВБР1 делится делителем СД на три оптических канала, в каждом из которых располагаются по два а-ЛЧВБР2 датчика (Д1.х, Д2.х и Д3.х). В каждом оптическом канале лазерное излучение, проходит через два а-ЛЧВБР2 датчика и проходит через фильтр с наклонной АЧХ, который асимметрично меняет амплитуды частотных компонент, формирующих адресные частоты, после чего принимается на фотоприемнике. Учитывая наклон характеристики фильтра на выходе фотоприемника можно однозначно определить положение а-ЛЧВБР1 и каждой а-ЛЧВБР2 по коэффициенту модуляции огибающей биений между адресными компонентами соответствующего датчика. Адрес датчика определяется уникальной для него частотой биений, равной адресной.

Электрический сигнал с каждого фотоприемника независимо оцифровывается на многоканальном АЦП (МАЦП) и поступает в блок обработки, где осуществляется фильтрация сигналов в каждом канале на адресных частотах всех а-ЛЧВБР. После фильтрации сигнала на адресных частотах в режиме реального времени производится определение центральных частот а-ЛЧВБР датчиков согласно методике измерительного преобразования и вычисление показаний давления с выводом данных на монитор исследователя.

Центральные и адресные частоты а-ЛЧВБР датчиков в каждом оптическом канале подбираются таким образом, чтобы, во-первых, исключить совпадение адресных частот, во-вторых, исключить пересечение спектров а-ЛЧВБР так, чтобы их можно было включать последовательно вдоль одного участка волокна и одновременно избежать возникновение после фотоприемника частот, совпадающих с адресными. Заметим, что в качестве наклонного фильтра, входящего в измерительную систему, может быть использованы специальным образом структурированные волоконные брэгговские решетки. Кроме того, установленный термостат позволит стабилизировать а-ЛЧВБР1 по температуре и сделать ее опорной для всей системы с реализацией функции компенсации датчиков давления.

В работе представлены результаты проектирования адресной системы сбора информации, предназначенной для предотвращения пролежней у пациента, находящихся в инвалидной коляске. В основе сенсорной части системы впервые используются датчики давления на основе а-ЛЧВБР. Применение таких решеток и разработанных радиофотонных методов их опроса позволило как обеспечить адресный опрос каждого датчика в зонах лопаток, седалища и пяток пациента, так и существенно снизить стоимость интеррогатора, при переходе на радиофотонные методы обработки. Кроме этого, использование простейшей системы приема и обработки информации позволяет крепить ее непосредственно на коляске и обеспечить термостатирование а-ЛЧВБР1. Достигнутая разрешающая способность измерения давления на один порядок превышает величины для π-ЛЧВБР.

Работа выполнена в рамках государственного задания КНИТУ-КАИ в соответствии с Соглашением № 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020).