

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский технический университет связи и информатики»

На правах рукописи

Варламов Олег Витальевич

**ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СЕТИ ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ
СТАНДАРТА DRM ДЛЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Официальные оппоненты:

Елисеев Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой радиосвязи, радиовещания и телевидения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»;

Ковалгин Юрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиосвязи и вещания федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»;

Рябова Наталья Владимировна, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой радиотехники и связи федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный технологический университет».

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт радио» (ФГУП НИИР), г. Москва.

Защита диссертации состоится «18» мая 2017 г. в 15:00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а, ауд. А- 448 (малый зал заседаний), тел. +7(495) 957-78-70.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики»: <http://srd-mtuci.ru/index.php/ru/council>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 219.001.04
кандидат технических наук, доцент

Терешонок Максим Валерьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Возникновение и бурное развитие в последнее десятилетие систем наземного цифрового радиовещания (ЦРВ) обусловлено технико-экономическими причинами. С одной стороны, современный уровень техники позволяет в недорогих малогабаритных приемных аппаратах проводить сложные вычислительные процедуры обработки и декодирования сигналов ЦРВ. С другой стороны, системы ЦРВ при мощностях передатчиков не выше, а в ряде случаев значительно ниже, чем в аналоговых системах, позволяют обеспечить более высокое качество передаваемого контента, и (или) экономию частотного ресурса.

Для различных диапазонов частот были разработаны, одобрены МСЭ и в некоторых странах уже внедрены различные системы ЦРВ. Так, в диапазоне ОВЧ в ряде стран Европы и в Австралии осуществляется регулярное вещание в стандарте DAB (DAB+), в Японии используется ISDB-T_{SB}, в КНР разработана система CDR (Convergent Digital Radio), а в США внедряется система HD Radio™ (IBOC), имеющая спецификацию и для диапазона СЧ. Для использования в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ международным консорциумом Digital Radio Mondiale (DRM, Всемирное цифровое радио), образованном в 1998 году, разработана система DRM, которая получила также и разновидность для диапазона ОВЧ (DRM+). Кроме собственно радиовещательных систем, для диапазона ОВЧ разработаны и варианты доставки пользователю мультимедийной информации, в том числе и отечественная система РАВИС. Все перечисленные разработки учитывают особенности распространения радиоволн в тех диапазонах частот, для которых они предназначены, и сложившиеся в них принципы частотно-территориального планирования.

Вопрос использования той или иной системы ЦРВ, в том числе и диапазонов радиочастот, каждое государство определяет для себя самостоятельно в зависимости от размера территории, плотности населения и его распределения по территории, сложившихся традиций в области радиовещания, социально-экономических и географических критериев.

Так, в относительно небольших по площади территории странах с высокой плотностью населения вполне оправдано использование систем цифрового наземного радиовещания в диапазоне ОВЧ. Использование одного передатчика для трансляции мультиплекса из нескольких программ обеспечивает экономические преимущества для вещателей, а возможность работы в одночастотной синхронной сети – экономию частотного ресурса. По этим причинам преимущественное распространение в странах Западной Европы получила система DAB (DAB+).

Разработанная для США, где в 1991 году насчитывалось 4987 коммерческих радиостанций в диапазоне СЧ, работающих в аналоговом режиме и 4442 радиостанции в диапазоне ОВЧ, система ЦРВ HD Radio™ (IBOC) позволяет сохранить гибкость в покрытии территорий с различной плотностью населения и сложившиеся традиции в сфере радиовещания. При этом все радиостанции задействованы в национальной системе оповещения о чрезвычайных ситуациях.

В Индии, где национальным радиовещательным оператором All India Radio (AIR) обслуживается в аналоговом режиме 92% территории и более 99% населения, сделан выбор в пользу стандарта DRM. К концу 2014 года планировалось завершение модернизации сети мощного радиовещания в диапазоне СЧ из 72 DRM передатчиков

мощностью от 20 кВт до 1000 кВт. В первое время они будут работать в совмещенном режиме (Simulcast), передавая одновременно аналоговую и цифровую версии программы, а также сигналы оповещения, а в 2017 году перейдут на двуязычное вещание в полностью цифровом режиме. По данным AIR на август 2016 года, 33 передатчика осуществляли регулярное вещание в режиме Simulcast в диапазоне СЧ, и еще два в цифровом режиме с одновременной передачей двух программ.

Для Российской Федерации, как для страны с развитыми традициями государственного вещания, с огромной – и при этом малонаселенной в северных регионах территорией, где уже не принимаются сигналы от геостационарных спутников, распоряжением Правительства РФ от 28 марта 2010 г. № 445-р признано целесообразным внедрение системы цифрового радиовещания DRM, работающей в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ.

Следует отметить, что Россия, в отличие от США, Индии, КНР, и других стран с большой территорией, находится в 1-м регионе МСЭ, в котором разрешено использование для радиовещания диапазона НЧ. В этом диапазоне предоставляется уникальная возможность обеспечивать вещание с радиусом более 600 км от передатчика независимо от солнечной активности и времени суток, что особенно актуально для обслуживания малонаселенных и северных территорий.

Реализуемая в настоящее время ФГУП РТРС беспрецедентная по своим масштабам ФЦП «Развитие телерадиовещания в Российской Федерации на 2009 – 2015 годы» позволит впервые обеспечить население РФ возможностью приема многопрограммного цифрового телевизионного вещания (ЦТВ) «с охватом до 98,3% населения в местах постоянного проживания». Однако элементарный анализ покрытия цифровым телевизионным вещанием девяти крупнейших по площади регионов, занимающих 62,7% площади РФ, проведенный на основе опубликованных на сайте РТРС данных по количеству и мощности объектов ЦТВ, показывает, что более половины территории РФ не покрыты телевещанием. Обслуживание этих территорий, неохваченных ЦТВ (2,4 миллиона человек), и населения, находящегося вне мест постоянного проживания, а также части водителей из более 50 миллионов транспортных средств, зарегистрированных в РФ, в предыдущие годы осуществлялось средствами аналогового мощного радиовещания в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ. При этом покрытие всей территории РФ не обеспечивалось, качество сигнала в темное время суток было невысоким, а затраты на электроэнергию (в текущих ценах) приближались к 2 миллиардам рублей в год. Именно по причине огромных затрат на электроэнергию для мощных передатчиков аналоговое вещание в диапазонах частот ниже 30 МГц было практически полностью прекращено.

Цифровое радиовещание потенциально позволяет обеспечить более высокое качество доставляемого слушателю контента при мощностях передатчиков и эксплуатационных затратах не выше, а в ряде случаев значительно ниже, чем в аналоговых системах. Поэтому задача разработки технологии создания государственной сети ЦРВ, позволяющей осуществлять круглосуточное обслуживание всей территории РФ и прилегающих акваторий, в том числе с целью оповещения о чрезвычайных ситуациях, является актуальной и может рассматриваться как совокупность новых научно обоснованных технических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Система ЦРВ стандарта DRM разрабатывалась как совместимая с имеющимися частотными планами в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ. Однако применение технологии орто-

гонального частотного разделения каналов с мультиплексированием (OFDM) в корне отличается от используемой в диапазонах ниже 30 МГц системы радиовещания с амплитудной модуляцией по требованиям, предъявляемым к передающим и приемным устройствам, их антенным системам, а также к методам частотно-территориального планирования.

Первая версия стандарта цифрового радиовещания DRM была опубликована в сентябре 2001 года (ETSI ES 201 980). Начавшееся в 2002 году крупнейшими международными вещателями (BBC, DW, RFI, с 2003 года – Голос России) регулярное вещание в диапазонах СЧ и ВЧ позволило исследовательским подразделениям вещателей собрать большой объем статистических данных о параметрах системы, которые легли в основу ряда Рекомендаций и других документов МСЭ. Следует отметить, что международных вещателей в первую очередь интересовала возможность организации иновещания в диапазоне ВЧ, поэтому проблемы гарантированного покрытия территории, которые могут быть решены в диапазонах НЧ и СЧ, ими практически не исследовались. Также можно отметить работы П. Ангуейры, Д. Гуерры, А. Вааля, А. Мерфи, В. Фишера.

По тематике ЦРВ стандарта DRM в РФ известны теоретические работы А.Ю. Никитина и Р.М. Ставиской, посвященные исследованию возможности построения синхронных зон вещания в диапазоне ВЧ. Цикл статей, в том числе с русскоязычным изложением первой редакции стандарта, опубликован А.Н. Иванчиным и С.Г. Рихтером. Ряд работ, частично основанных на результатах зарубежных экспериментальных исследований, а частично на результатах собственных измерений в диапазонах СЧ и ВЧ, опубликован Ю.А. Черновым. Исследования расширения стандарта DRM в диапазоне ОВЧ (DRM+) начаты под руководством Ю.А. Ковалгина.

В целом, вопросы применения системы цифрового радиовещания стандарта DRM (относительно новой, и требующей для изучения своих характеристик значительных ресурсов – использования мощных радиовещательных передатчиков и крупногабаритных антенных систем) к настоящему времени исследованы недостаточно полно, особенно в диапазоне НЧ. Вопросы гарантированного покрытия значительных по площади территорий также не рассматривались.

Цели и задачи исследования.

Целью диссертации является разработка технологии создания сети наземного цифрового радиовещания стандарта DRM для Российской Федерации.

Для достижения цели в работе поставлены и решены все основные необходимые для разработки технологии создания сети государственного цифрового радиовещания **задачи:**

- проведен анализ качественных характеристик системы DRM, эффективности систем наземного вещания в различных диапазонах частот, разработана и проанализирована нормативно-правовая база ее применения;

- исследованы требования к характеристикам оборудования сети радиовещания и разработаны решения по использованию в цифровом режиме передающего и приемного оборудования, а также их антенных систем;

- исследованы радиочастотные защитные отношения и разработаны технические основы методики частотно-территориального планирования;

- определены параметры сети для переходного периода;

– на основании предложенного метода крупно-кластерных зон одночастотного синхронного вещания в диапазоне НЧ разработана топология сети государственного наземного цифрового радиовещания стандарта DRM для РФ.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Предложен метод частотно-территориального планирования с использованием крупно-кластерных зон одночастотного синхронного вещания в диапазоне НЧ для построения глобальных сетей цифрового радиовещания. Разработаны параметры кластера (максимальное расстояние между передатчиками, размер, режимы помехоустойчивости) и определены расстояния между зонами, на которых возможно повторное использование частот при круглосуточной работе.

2. Разработаны технические основы методики частотно-территориального планирования сетей цифрового радиовещания стандарта DRM диапазонов НЧ и СЧ, учитывающие, в том числе, распределение атмосферных шумов по поверхности Земли.

3. Определены значения максимальных ожидаемых напряженностей поля атмосферных шумов, превышаемых в течение 2% времени, для различных частот диапазонов НЧ и СЧ (в полосе частот 10 кГц) в северных, средних и тропических широтах (Тикси, Норильск, окрестности Москвы, Хошимин).

4. Определены отдельные величины защитных отношений для трех видов каналов распространения (однолучевого, двухлучевого и четырехлучевого) при действии одной помехи от станции с амплитудной модуляцией (с АЧХ по МСЭ и по ГОСТ-Р), а также от станции с цифровой модуляцией.

5. Разработана методика расчета защитных отношений для сигнала ЦРВ при одновременном воздействии произвольного количества мешающих сигналов.

6. Разработан комплекс требований к техническим характеристикам высокоэффективных передающих устройств, отличающийся учетом нелинейности АХ и ФАХ, относительной задержки составляющих и полосы пропускания тракта огибающей. Выполнение этих требований обеспечивает одновременно допустимую величину коэффициента ошибок модуляции (MER, Modulation Error Ratio) в выходном сигнале передатчика.

7. Предложен способ расширения полосы согласования передающих вещательных антенных систем диапазонов НЧ и СЧ на основе применения частотно-расширительных цепей с потерями и разработана методика расчетов частотно-расширительных цепей.

Практическая ценность диссертации состоит в следующем.

1. На основе предложенного метода частотно-территориального планирования с использованием крупно-кластерных зон одночастотного синхронного вещания разработана топология сети государственного наземного цифрового радиовещания стандарта DRM для РФ в диапазоне НЧ. Разработанная топология позволяет с меньшими затратами покрыть круглосуточным вещанием всю территорию РФ. При этом остаются свободные частоты для стран РСС и для большинства территориально крупных стран 1-го региона МСЭ.

2. Разработанные технические основы методики частотно-территориального планирования сетей цифрового радиовещания стандарта DRM диапазонов НЧ и СЧ подтверждены экспериментальными исследованиями и позволили определить параметры передающей сети наземного цифрового радиовещания стандарта DRM для РФ.

3. Показана возможность одновременной передачи цифрового и аналогового сигнала с соотношением мощностей около 10 дБ, что обеспечивает примерное равенство зон покрытия при работе в режиме Simulcast в переходный период. При этом ухудшение качества приёма аналогового сигнала будет незначительным для большинства имеющихся у населения АМ приемников.

4. На основании результатов проведенных исследований приняты три решения ГКРЧ о возможности использования диапазонов НЧ, СЧ и ВЧ для создания на территории РФ сетей цифрового звукового радиовещания стандарта DRM.

5. Результаты исследований, проведенных в диссертации, были использованы при подготовке двух вкладов администрации связи РФ в МСЭ, вошедших в Отчет МСЭ-Р BS.2384-0 «Implementation considerations for the introduction and transition to digital terrestrial sound and multimedia broadcasting» (07/2015), и при разработке «Правил применения оборудования систем радиовещания. Часть I. Правила применения эфирных цифровых радиовещательных передатчиков, работающих в диапазонах частот 0,1485 – 0,2835 МГц; 0,5265 – 1,6065 МГц; 3,95 – 26,10 МГц».

6. Разработанные требования на параметры приемного оборудования сетей ЦРВ стандарта DRM, включающие в себя требования к основным функциональным и радиочастотным параметрам, а также методы измерений радиочастотных параметров этого оборудования, вошли в системный проект «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации».

7. Предложенный способ расширения полосы согласования передающих вещательных антенных систем диапазонов НЧ и СЧ на основе применения частотно-расширительных цепей с потерями и разработанные методика расчетов и средства инженерного проектирования частотно-расширительных цепей позволяют использовать для ЦРВ в диапазоне НЧ существующие антенны высотой 257 метров, в том числе в режиме Simulcast с двойной полосой частот в верхней половине диапазона НЧ.

Методы исследования. При проведении исследований в диссертационной работе использовались методы статистического анализа случайных процессов, теории оптимизации, статистического моделирования, системного и схемотехнического компьютерного моделирования, эфирных экспериментов и трассовых испытаний. Исследования проводились с использованием программного обеспечения и лабораторных установок, разработанных автором.

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты исследований, проведенных в диссертации, были использованы при подготовке двух вкладов администрации связи РФ в МСЭ, трех решений ГКРЧ, при разработке «Правил применения оборудования систем радиовещания. Часть I. Правила применения эфирных цифровых радиовещательных передатчиков, работающих в диапазонах частот 0,1485 – 0,2835 МГц; 0,5265 – 1,6065 МГц; 3,95 – 26,10 МГц», при выполнении системного проекта «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации» (заказчик ФГУП «РТРС», головной исполнитель ОАО «РИМР»), при разработке проекта топологии сети цифрового радиовещания Республики Казахстан, что подтверждается соответствующими актами. Результаты исследований, проведенных в диссертации, используются в учебном процессе МТУСИ в трех разработанных программно-аппаратных лабораторных работах, а также при выполнении магистрантами МТУСИ выпускных квалификационных работ, что подтверждается соответствующим актом.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Межрегиональной научно-технической конференции «Элементы и узлы современной приемной и усилительной техники» (Ужгород, 1991); 6-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиоприем и обработка сигналов» (Нижний Новгород, 1993); 15-й Межрегиональной научно-технической конференции «Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения» (Нижний Новгород, 2007); 1-й и 2-й Московских отраслевых научно-технических конференциях «Технологии информационного общества» (Москва, 2007, 2008); семинаре ITU-D «Transition from analogue to digital broadcasting» (Москва, 2008); Всероссийской конференции с международным участием «Применение космических технологий для развития арктических регионов» (Архангельск, 2013); Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (69 Научная сессия РНТО РЭиС имени А.С. Попова, Москва, 2014); 8-й Международной научно-методической конференции образовательных организаций, реализующих направление подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (Ярославль, 2014); Международных научно-технических конференциях «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «Синхроинфо – 2014» (Воронеж, 2014) и «Синхроинфо – 2016» (Самара, 2016); 5-й, 7...10-х Международных отраслевых научно-технических конференциях «Технологии информационного общества» (Москва, 2011, 2013...2016).

Личный вклад. Все основные результаты, составляющие содержание диссертации, получены соискателем самостоятельно. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включена только та их часть, которая получена лично соискателем.

Все экспериментальные результаты получены в результате научно-исследовательских работ, которые проводились под руководством и при непосредственном участии автора на протяжении 2001 – 2013 годов в научно-исследовательской лаборатории связных транзисторных радиопередатчиков Московского технического университета связи и информатики. Заказчиками НИР в разные годы выступали ОАО «ЦКБ Связь», ОАО «Телеком», ОАО «НТЦ-РС», ФГУП «МГРС», Федеральное агентство по печати и массовым коммуникациям, ФГУП «Главный радиочастотный центр», а также ФГУП «РТРС», по заказу и с использованием объектов которого было проведено большинство эфирных исследований и измерений.

Публикации. Основные материалы по теме диссертации были опубликованы в 50 печатных работах, в том числе в 37 публикациях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России, из них 18 патентов на изобретения и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, содержащего 172 наименования и четырех приложений. Основной текст диссертации изложен на 256 страницах и содержит 101 рисунок и 37 таблиц. Приложения содержат 51 страницу.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новый метод частотно-территориального планирования с использованием крупно-кластерных зон одночастотного синхронного вещания в диапазоне НЧ для построения глобальных сетей цифрового радиовещания, позволил разработать топологию сети государственного наземного цифрового радиовещания стандарта DRM, обеспечивающую покрытие круглосуточным вещанием всей территории РФ с меньшими затра-

тами. При этом остаются свободные частоты для стран РСС и для большинства территориально крупных стран 1-го региона МСЭ.

2. Новые технические основы методики частотно-территориального планирования сетей цифрового радиовещания стандарта DRM диапазонов НЧ и СЧ, учитывающие в том числе распределение атмосферных шумов по поверхности Земли, позволили определить параметры передающей сети наземного цифрового радиовещания стандарта DRM для РФ.

3. Новая методика расчета защитных отношений для сигнала ЦРВ позволяет рассчитывать требуемую напряженность поля полезного сигнала при одновременном воздействии произвольного количества мешающих сигналов, шумов, искажений передатчика и фазовых шумов приемника.

4. Новое соотношение мощностей между цифровой и аналоговой компонентами сигнала при работе в режиме одновременной передачи (Simulcast) обеспечивает примерное равенство зон покрытия в переходный период. Ухудшение качества приёма аналогового сигнала незначительно для большинства имеющихся у населения АМ приемников.

5. Разработанный комплекс требований к техническим характеристикам высокоэффективных передающих устройств учитывает нелинейности АХ и ФАХ, относительную задержку составляющих и полосу пропускания тракта огибающей. Требования на нелинейность передатчика, обусловленные допустимым уровнем внеполосных излучений, являются наиболее жесткими и должны использоваться в качестве критерия при проведении настройки передатчиков ЦРВ. Выполнение этих требований обеспечивает одновременно допустимую величину коэффициента ошибок модуляции (MER, Modulation Error Ratio) в выходном сигнале передатчика.

6. Новый способ расширения полосы согласования передающих вещательных антенных систем диапазонов НЧ и СЧ, отличающийся применением частотно-расширительных цепей с потерями, и разработанная методика расчетов частотно-расширительных цепей позволяют использовать для ЦРВ в диапазоне НЧ существующие стандартные антенны высотой 257 метров, в том числе в режиме Simulcast с двойной полосой частот в верхней половине диапазона НЧ.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и научные задачи диссертационной работы, указаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены сведения о структуре работы и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится анализ общих характеристик сетей радиовещания. Рассмотрены качественные характеристики звукового тракта в системе DRM при различных доступных скоростях передачи и используемых аудиокодеров.

Проанализированы выполненные формальные инструментальные измерения параметров радиовещательного тракта передатчика в режиме DRM в 23-х различных режимах помехоустойчивости со скоростями передачи от 10,5 кбит/с до 34,7 кбит/с. Показано, что система DRM имеет меньшие уровни шума, коэффициент гармоник и интермодуляционные искажения, чем предусмотрено нормами на характеристики радиовещательных передатчиков с АМ и ЧМ. Диапазон модулирующих частот в семи режимах помехоустойчивости не уже, чем для передатчиков с ЧМ. Еще в 10-ти режи-

мах помехоустойчивости диапазон модулирующих частот уже, чем для передатчиков с ЧМ, но шире, чем для передатчиков с АМ. Обоснован вывод о том, что качество работы аудиокодеров с потерями целесообразно определять по результатам прослушивания, а результаты инструментальных измерений можно использовать лишь для предварительного выбора режимов помехоустойчивости.

Проведено сравнение радиусов зон покрытия одного и того же передатчика в режимах АМ и DRM. На основе зависимостей показателей разборчивости русской речи от ОСШ по НЧ для различных категорий понятности передачи определены требуемые минимальные значения ОСШ по ВЧ в режиме АМ. Показано, что при использовании одного и того же передатчика там, где перестает декодироваться сигнал DRM в его самом помехоустойчивом режиме, понятность передачи в режиме АМ также перестает быть удовлетворительной. Зоны обслуживания в этих режимах всегда будут равными при мощности передатчика в режиме DRM в 2,6 раза меньше и лучшем качестве аудио.

Проведенные примеры расчетов радиусов зон покрытия для диапазонов НЧ и СЧ показывают что, при корректном учете напряженности поля атмосферных шумов и вариаций напряженности поля, требуемая минимальная напряженность поля в режиме DRM на 9...19 дБ меньше, чем в режиме АМ с нормативным качеством. При использовании одного и того же передатчика площадь зоны обслуживания в режиме DRM в 2–3 раза больше (на частотах ниже 1 МГц), чем в режиме АМ.

Проведен сравнительный анализ эффективности аналогового и цифрового вещания в различных диапазонах частот. На основании тарифов Федеральной службы по тарифам на услуги общедоступной электросвязи для целей эфирной аналоговой наземной трансляции, оказываемых ФГУП «РТРС», и рассчитанных радиусов зон обслуживания для передатчиков различных диапазонов частот и мощностей определена стоимость обслуживания одного квадратного километра территории в год. Показано, что минимальная стоимость гарантированного обслуживания территории достигается в режиме DRM в диапазоне НЧ. Стоимость покрытия территории в диапазоне НЧ более, чем на порядок ниже, чем в диапазонах СЧ и ОВЧ. Предпочтительными для использования являются мощности передатчиков 50...100 кВт.

Рассмотрена планировавшаяся ранее топология сети цифрового радиовещания стандарта DRM для РФ, разработанная в Системном проекте «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации», выполненном в 2011 году по заказу ФГУП «РТРС» в рамках ФЦП «Развитие телерадиовещания в Российской Федерации на 2009 – 2015 годы». Определены ее недостатки, заключающиеся в использовании диапазона ВЧ (с нестабильным распространением радиоволн в северных широтах) для обслуживания большей части территории РФ (удаленные и малонаселенные территории), а также в не решенных вопросах взаимных помех от передатчиков диапазона НЧ в темное время суток. Данные недостатки устраняются на основании проведенных в настоящей работе исследований в разрабатываемой в главе 7 топологии сети цифрового радиовещания РФ, основанной на применении крупно-кластерных зон с одночастотным синхронным вещанием диапазона НЧ.

Проведена разработка фрагментов отечественной нормативной базы цифрового радиовещания стандарта DRM: маски на внеполосные излучения и ОСШ в выходном сигнале передатчика в целом и его возбуждителя, а также ряда решений ГКРЧ.

Во второй главе проводится анализ передающих устройств стандарта DRM. Сформулированы требования к передающим устройствам, использованные при разра-

ботке «Правил применения оборудования систем радиовещания. Часть I. Правила применения эфирных цифровых радиовещательных передатчиков, работающих в диапазонах частот 0,1485 – 0,2835 МГц; 0,5265 – 1,6065 МГц; 3,95 – 26,10 МГц». Рассмотрены способы построения мощных радиовещательных передатчиков с высоким КПД диапазонов НЧ, СЧ и ВЧ и их основных энергоемких узлов: радиочастотного и модуляционного трактов. Для передатчиков с раздельным усилением составляющих, использующих ШИМ в модуляционном тракте, разработана расширенная методика учета потерь в оконечном каскаде модулятора. Данная методика позволяет более корректно проводить анализ энергетической эффективности ШИМ модулятора в широком диапазоне выходных напряжений, что особенно актуально при усилении сигналов с большим пик-фактором.

Разработаны требования к характеристикам линейных передатчиков, передатчиков с раздельным усилением и с цифровым преобразованием огибающей. Для этого:

- проведено обоснование применения метода анализа, основанного на компьютерной имитации нелинейности передающего устройства в реальном времени с использованием тестового передатчика и измерительного приемника, для измерения величины MER в выходном сигнале ЦРВ;

- разработана и создана лабораторная измерительная установка, позволившая провести анализ влияния нелинейности АХ и ФАХ передатчика, относительной задержки составляющих и полосы пропускания тракта огибающей на величину MER и выходной спектр сигнала ЦРВ.

Типичные виды нелинейностей АХ и ФАХ передатчиков различного построения и различных диапазонов частот приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Типичные виды нелинейностей АХ и ФАХ передатчиков

Нелинейность АХ	Неравномерность ФАХ:
$y(x) = \begin{cases} x \cdot (1+a) - a, & \text{при } x > a/(1+a) \\ 0, & \text{при } x \leq a/(1+a) \end{cases};$	$y(x) = ax^2;$
$y(x) = ax^2 + x;$	$y(x) = ax^3;$
$y(x) = ax^3 + x;$	$y(x) = a(1-x)^2;$
$y(x) = ax^3 + bx^2 + x, \text{ при } a < 0, b > 0;$	$y(x) = a(1-x)^3;$
$y(x) = ax^3 + bx^2 + x, \text{ при } a > 0, b < 0$	$y(x) = ax^2 + bx^3;$
	$y(x) = a(1-x)^2 + b(1-x)^3$

Проведенный анализ влияния неидеальности параметров узлов передатчиков на величину MER и выходной спектр сигнала ЦРВ (Рисунок 1) показал, что:

- требования на допустимую нелинейность передатчика, обусловленные допустимым уровнем внеполосных излучений, являются наиболее жесткими и должны использоваться в качестве критерия при проведении настройки передатчиков, используемых для работы с сигналами ЦРВ. Выполнение этих требований обеспечивает одновременно соответствие требованиям на величину MER в выходном сигнале передатчика;

- сигнал ЦРВ, в отличие от двухтонового сигнала, более чувствителен к неидеальностям амплитудных характеристик в области малых амплитуд входного сигнала. Поэтому требования к линейности амплитудной характеристики в верхней ее части оказываются существенно менее жесткими (допустимое «амплитудное ограничение

сверху» составляет 20%), чем требования к линейности амплитудной характеристики в нижней ее части (допустимая «амплитудная отсечка» или «ступенька снизу» составляет 1%);

- для «гладких» нелинейностей допустимое относительное отклонение АХ от идеальной составляет от $\pm 7\%$ до $\pm 15\%$;

- предельно допустимая неравномерность ФАХ для большинства возможных случаев составляет 0,1 радиан (5,7 градуса). В тоже время, если максимальная неравномерность ФАХ наблюдается в области малых амплитуд входного сигнала ($0 < U_{ВХ} < 0,3 U_{ВХ \text{ МАКС}}$), то требование ужесточается до 0,05 радиан. И, наоборот, если максимальная неравномерность ФАХ наблюдается в области больших амплитуд входного сигнала ($0,5 U_{ВХ \text{ МАКС}} < U_{ВХ} < U_{ВХ \text{ МАКС}}$), то требование смягчается до 0,2 радиан;

- искажения выходного сигнала передатчика в большей степени определяются абсолютной величиной неравномерности $\Delta\varphi$ фазоамплитудной характеристики и мало зависят от характера зависимости фазового сдвига от амплитуды входного сигнала;

- при совместном влиянии нелинейности АХ и неравномерности ФАХ в общем случае продукты нелинейных искажений, обусловленные каждой причиной в отдельности, складываются по мощности. Поэтому при наличии нескольких одновременно действующих факторов (на одну область спектра выходного сигнала) соответствующие требования к допустимой нелинейности ужесточаются;

- допустимая нормированная задержка между составляющими сигнала ($\Theta = \tau/T$) не должна превышать 1%. В частности, для сигнала DRM с необходимой шириной полосы частот 10 кГц допустимая задержка составляет не более 1 мкс;

- минимально достаточная для выполнения требований ЭМС относительная полоса пропускания фильтра модулятора должна составлять не менее трех с половиной полос передаваемого сигнала;

- результаты проведенного анализа подтверждают основные требования к DRM передатчикам, сформулированные DRM консорциумом, и дополняют их в части требований к допустимым неидеальностям АХ и ФАХ.

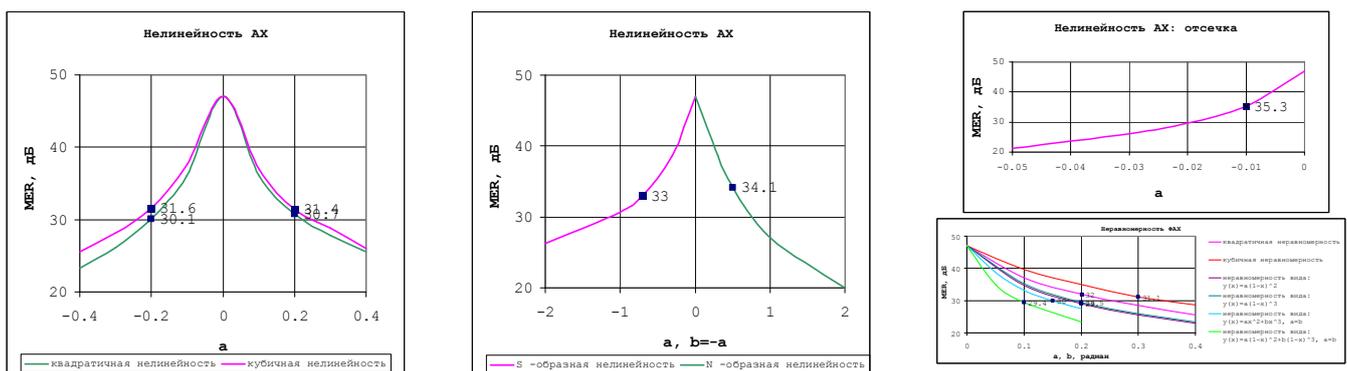


Рисунок 1 – Результаты анализа влияния нелинейностей АХ и ФАХ передатчика на величину MER в его выходном сигнале. Предельные значения параметров для соответствия спектра выходного сигнала маске на допустимые внеполосные излучения показаны синими точками

Для определения требований к передатчикам, построенным по методу дефазирования (РПДФ), разработана математическая модель РПДФ в виде его статических амплитудной (АХ) и фазоамплитудной (ФАХ) характеристик. Эти характеристики можно

получить при исследовании сигнала на выходе РПДФ с учетом амплитудной и фазовой асимметрии канальных сигналов.

Идеальные канальные сигналы описываются выражениями:

$$S_1(t) = U \cdot \cos(\omega t + \arccos(U_{\text{вх}}) + \theta),$$

$$S_2(t) = U \cdot \cos(\omega t - \arccos(U_{\text{вх}}) + \theta),$$

где: $U_{\text{вх}} \in [0,1]$ – нормированная амплитуда исходного сигнала (модулирующее напряжение); U – амплитуда канальных сигналов.

Введем в выражения для канальных сигналов амплитудную и фазовую асимметрию:

$$S_1(t) = U_1 \cdot \cos(\omega t + \arccos(U_{\text{вх}}) + \theta_1),$$

$$S_2(t) = U_2 \cdot \cos(\omega t - \arccos(U_{\text{вх}}) + \theta_2),$$

где: $U_1 \neq U_2$ – амплитуды канальных сигналов, $\theta_1 \neq \theta_2$ – фазы канальных сигналов.

После перевода в показательную форму выражение для сигнала на выходе РПДФ, являющегося суммой канальных сигналов, будет иметь вид:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = U_1 \cdot e^{j(\arccos(U_{\text{вх}}) + \theta_1)} + U_2 \cdot e^{j(-\arccos(U_{\text{вх}}) + \theta_2)}.$$

Введем определения коэффициента фазовой асимметрии: $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ – как разность фазовых набегов канальных сигналов, и коэффициента амплитудной асимметрии $\xi = \frac{U_2 - U_1}{U_1}$. После преобразований и принятия равным 1 сомножителя, характеризующего постоянный фазовый сдвиг выходного сигнала, который не вызывает искажений, выражение для выходного сигнала примет вид:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = U_1 \cdot \left\{ \xi \cdot e^{-j \left[\arccos(U_{\text{вх}}) + \frac{\Delta\theta}{2} \right]} + 2 \cdot \cos \left[\arccos(U_{\text{вх}}) + \frac{\Delta\theta}{2} \right] \right\}.$$

Далее можно определить мгновенные амплитуду и фазу выходного сигнала, предварительно представив его в алгебраической форме. Мгновенные амплитуда и фаза будут являться, соответственно, амплитудной характеристикой (АХ) и фазо-амплитудной характеристикой (ФАХ) РПДФ, поскольку функционально связаны с амплитудой входного сигнала. Таким образом, нормированная статическая АХ РПДФ имеет вид:

$$U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}}) = \sqrt{(1 + \xi) \cdot \cos^2 \left[\arccos(U_{\text{вх}}) + \frac{\Delta\theta}{2} \right] + \frac{\xi^2}{4}}, \quad (1)$$

где: $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}}) \in [0,1]$ и $U_{\text{вх}} \in [0,1]$ – нормированные к максимальному значению амплитуды выходного и входного сигналов.

Нормированная статическая ФАХ РПДФ имеет вид:

$$\varphi_{\text{вых}}(U_{\text{вх}}) = -\arctg \left\{ \frac{\xi}{2 + \xi} \cdot \tg \left[\arccos(U_{\text{вх}}) + \frac{\Delta\theta}{2} \right] \right\}, \quad (2)$$

Математическая модель РПДФ, описываемая выражениями (1) и (2), позволяет исследовать нелинейные искажения выходного сигнала как при отдельном, так и при одновременном воздействии амплитудной и фазовой асимметрии на любых тестовых сигналах.

В качестве примера на рисунке 2 приведены АХ и ФАХ РПДФ при различных видах асимметрии канальных сигналов. Анализ показывает, что характерной особенностью характеристик РПДФ является наличие резких нелинейностей при малых амплитудах формируемого выходного сигнала.

Для анализа внеполосных излучений РПДФ в качестве испытательного сигнала использовался фрагмент реального сигнала ЦРВ стандарта DRM, записанный в виде файла в IQ формате. Такое представление ЦРВ сигнала позволяет вычислить его мгновенные амплитуду и фазу и ввести в сигнал искажения, вызванные реальными АХ и ФАХ исследуемого передатчика (РПДФ).

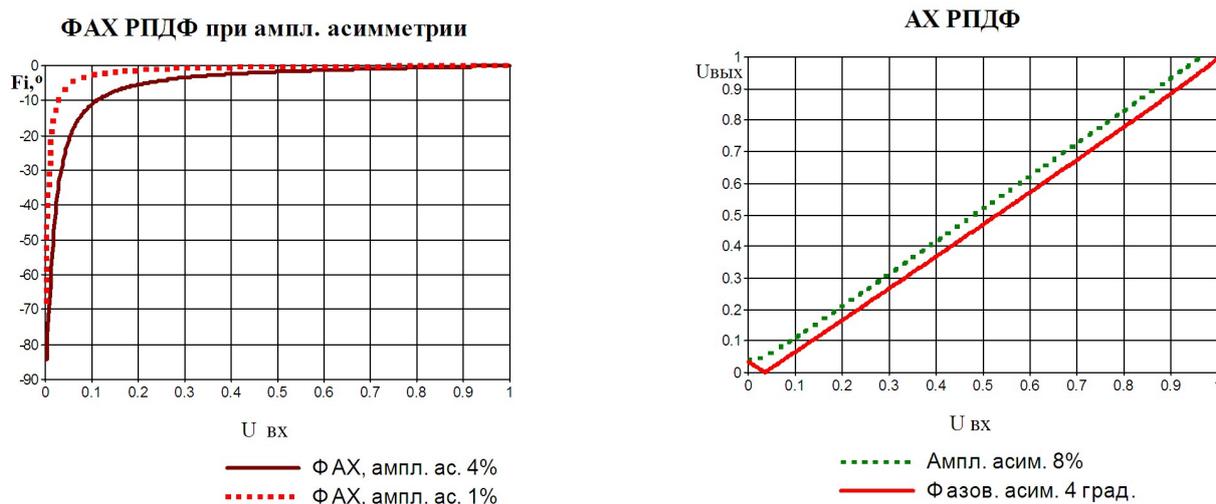


Рисунок 2 – Примеры статических АХ и ФАХ РПДФ

Спектральный анализ полученного таким методом сигнала позволяет определить допустимые величины асимметрии канальных сигналов РПДФ, обеспечивающие требования нормативных документов на уровень внеполосных излучений. Исследования проводились с помощью программы для системного проектирования SystemView компании ELANIX. В качестве примера на рисунке 3 приведены спектры выходного сигнала ЦРВ при различных уровнях асимметрии канальных сигналов РПДФ. Как видно из рисунка 3а, при амплитудной асимметрии $\xi = 1,5\%$ спектр еще удовлетворяет требованиям нормативных документов, а при $\xi = 1,75\%$ уровни внеполосных излучений уже выходят за допустимые пределы (рисунок 3б). Аналогичные расчеты проводились при совместном влиянии различных уровней амплитудной и фазовой асимметрии канальных сигналов РПДФ. По результатам этих расчетов на рисунке 3в, построена замкнутая линия равных (допустимых) уровней внеполосных излучений на плоскости амплитудной и фазовой асимметрии. Как видно из приведенных на рисунке 3, в, результатов, сигнал ЦРВ предъявляет достаточно жесткие требования к симметрии канальных сигналов РПДФ.

Проведенный анализ показал, что асимметрия канальных сигналов РПДФ одновременно приводит к нелинейности АХ и неравномерности ФАХ.

Проведенные с помощью модели расчеты позволили разработать требования к допустимому уровню асимметрии канальных сигналов РПДФ. Так, асимметрия его канальных сигналов не должна превышать следующих значений: – амплитудная асимметрия $|\xi| \leq 1,75\%$; – фазовая асимметрия $|\Delta\theta| \leq 0,75^\circ$.

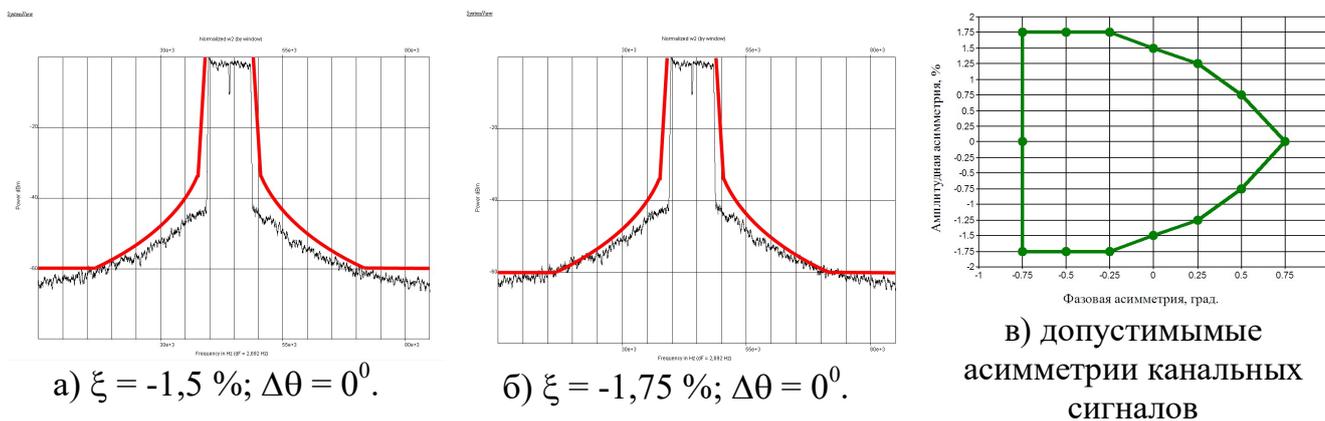


Рисунок 3 – Спектры выходного сигнала РПДФ при работе в режиме ЦРВ при различных уровнях амплитудной асимметрии канальных сигналов, и диаграмма допустимых асимметрий канальных сигналов

В третьей главе анализируются особенности использования передающих антенно-фидерных устройств в режиме DRM. Показано, что выходной спектр современных высокоэффективных передатчиков с ШИМ модулятором при работе на узкополосную антенну может существенно (до 15 дБ) превышать ограничительную линию (маску) на внеполосные радиокосебания. Для устранения данного эффекта КСВ антенны при работе передатчика в цифровом режиме стандарта DRM должен быть не более 1,05 в полосе частот ± 5 кГц от несущей и не более 1,1 в полосе частот ± 10 кГц от несущей. Данные требования к КСВ антенных систем в режиме DRM оказываются намного более жесткими, чем для режима АМ.

Проведенный анализ характеристик большого количества существующих в настоящее время в РТРС антенн диапазона НЧ показал, что их КСВ в полосе цифрового сигнала 10 кГц существенно превышает требуемые значения. В ряде случаев это относится и к антеннам низкочастотной части диапазона СЧ. Поэтому непосредственное использование существующих в настоящее время на сети НЧ вещания антенных систем в режиме DRM не представляется возможным.

Проведенный анализ потенциальных (предельных) возможностей традиционного LC-согласования антенных систем диапазона НЧ с максимально допустимым в практических конструкциях числом элементов 4...6, показал, что в нижней половине диапазона НЧ требуемая для работы передатчиков DRM величина КСВ даже теоретически не может быть обеспечена традиционными методами ни при каких высотах антенн.

Для решения задачи согласования антенных систем диапазона НЧ с требуемым для работы в режиме DRM КСВ предложен не использовавшийся ранее в отечественном мощном радиовещании метод согласования антенных систем с помощью элементов с потерями. Предложенные частотно-расширительные цепи (ЧРЦ) представляют собой устройства RLC типа на основе цепей с постоянным резистивным сопротивлением. Этот класс цепей предусматривает введение дополнительных резистивных нагрузок и не используется в традиционной антенной технике, однако широко применяется для межкаскадного согласования в широкополосных транзисторных передатчиках. За счет введения некоторых дополнительных потерь можно обеспечить возможность требуемого согласования в заданной и более широкой полосе частот.

В зависимости от входного сопротивления антенны, описываемого эквивалентом последовательного либо параллельного контура, ЧРЦ может иметь параллельную или

последовательную конфигурацию. ЧРЦ может устанавливаться либо непосредственно около антенны, либо в здании передатчика. Различные варианты построения ЧРЦ приведены на рисунке 4.

Разработана методика проектирования ЧРЦ для антенн в виде последовательного контура, к которым приводятся типичные короткие ($h < 0,3\lambda$) антенны диапазона НЧ (рисунок 5). Полученные в результате расчетов по данной методике параметры эквивалента антенного контура C_0 , L_0 и R_0 позволяют рассчитать элементы ЧРЦ: $R1 = R_0$ – т.е. сопротивление балластной нагрузки равно активному сопротивлению антенны на рабочей частоте; $L_0C_0 = L2C2 = 1/\omega^2$ – т.е. контур ЧРЦ настроен на рабочую частоту, что упрощает процесс его настройки, который может проводиться по критерию минимального напряжения на балластной нагрузке $R1$ на частоте несущей; $C2 = L_0/R_0^2$; $L2 = C_0R_0^2$.

Проведенный анализ энергетической эффективности ЧРЦ в зависимости от параметров антенной системы показал, что при полосе пропускания антенны более 10 кГц потери в ЧРЦ не превышают 1 дБ (рисунок 6).

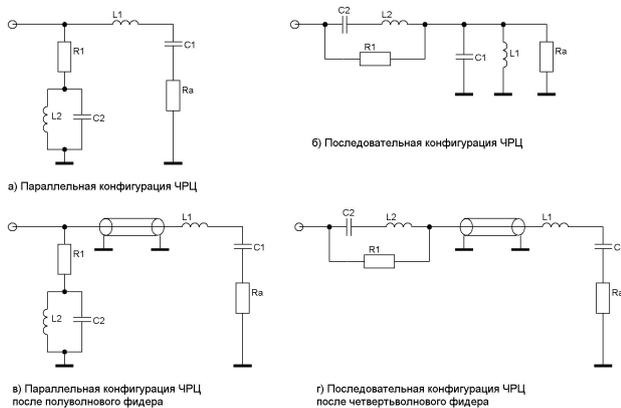


Рисунок 4 – Варианты построения ЧРЦ

1. Определяется знак входного импеданса антенны на рабочей частоте	Если $X_0 > 0$, то:	Если $X_0 < 0$, то:
2. Последовательная индуктивность (или емкость), которую необходимо включить для настройки антенны в резонанс на рабочей частоте	$C_1 = \frac{1}{X_0 \omega_0}$	$L_1 = \frac{-X_0}{\omega_0}$
3. Реактивное сопротивление антенны на нижней и верхней частотах с учетом добавленной индуктивности (емкости)	$X'_n = X_n - \frac{1}{\omega_n C_1}$ $X'_s = X_s - \frac{1}{\omega_s C_1}$	$X'_n = X_n + \omega_n L_1$ $X'_s = X_s + \omega_s L_1$
4. Емкость антенного контура на нижней и верхней частоте	$C_n = \frac{1}{X'_n (\frac{1}{\omega_n} - \frac{\omega_n}{\omega_0^2})}$; $C_s = \frac{1}{X'_s (\frac{1}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega_0^2})}$	
5. Эквивалентная емкость и индуктивность антенны на рабочей частоте	$C_0 = \frac{C_n + C_s}{2}$; $L_0 = \frac{1}{\omega_0^2 C_0}$	
6. Эквивалентное сопротивление антенны на рабочей частоте	R_0	
7. Добротность антенны (для оценки энергетической эффективности)	$Q = \frac{1/\omega_0 C_0}{R_0}$	

Рисунок 5 – методика проектирования ЧРЦ

Проведено сравнение возможностей согласования антенной системы с добротностью 10 на частоте 171 кГц (полоса пропускания 17,1 кГц) с помощью лестничной LC структуры и ЧРЦ. Критерии согласования – $KCB < 1,05$ в полосе 9 кГц и $KCB < 1,1$ в полосе 18 кГц. Даже при использовании лестничной LC структуры 9-ого порядка (не реализуемой на практике) обеспечить требуемые значения KCB не удастся (рисунок 7, красные кривые), при этом согласование близко к теоретическому пределу. Интегральные потери при добротности катушек индуктивности, равной 200, в полосе сигнала DRM 9 кГц составляют 13,1%. Схема согласования с помощью ЧРЦ, состоящая всего из трех элементов, обеспечивает требуемые значения KCB (рисунок 7, синие кривые). Потери в балластной нагрузке в полосе сигнала DRM 9 кГц составляют 7,6%. Общие потери этой схемы при добротности единственной катушки индуктивности ЧРЦ, равной 200, составляют 10,9%. Неравномерность АЧХ в полосе 9 кГц не превышает 1 дБ, что не критично для сигнала DRM. Таким образом, несмотря на потери в балластной нагрузке, в рассмотренном (близком к практике) случае ЧРЦ имеет даже меньшие потери (10,9%), чем LC структура (13,1%), и при этом, в отличие от нее, обеспечивает требуемый уровень согласования.

Проведенный анализ различных вариантов ЧРЦ по критериям технической реализуемости и экономической эффективности показал предпочтительность использования

на практике последовательной конфигурации ЧРЦ в тракте антенны и параллельной конфигурации ЧРЦ в тракте фидера. Последнее решение, предполагающее установку ЧРЦ в здании передатчика, более подходит к климатическим условиям РФ, минимизируя температурные изменения параметров элементов ЧРЦ.

Проведенный анализ потерь в ЧРЦ при различных исходных полосах пропускания антенны для полос сигнала DRM 9 кГц и 10 кГц, а также для режима одновременной передачи аналогового и цифрового сигналов Simulcast с суммарными полосами частот 18 кГц и 20 кГц, показал, что при исходной полосе пропускания антенны более 10 кГц для сигнала DRM потери в ЧРЦ не превышают 1 дБ, и ЧРЦ можно использовать. При исходной полосе пропускания антенны более 34 кГц возможно использование режима Simulcast, при этом потери в ЧРЦ также не превышают 1 дБ, а неравномерность АЧХ – 2 дБ.

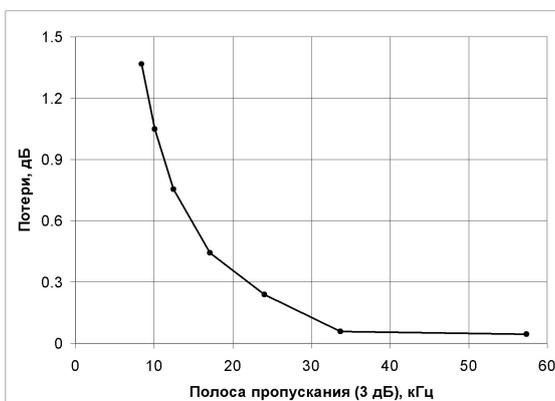


Рисунок 6 - Потери в ЧРЦ для полосы сигнала DRM 9 кГц при различных полосах пропускания антенны

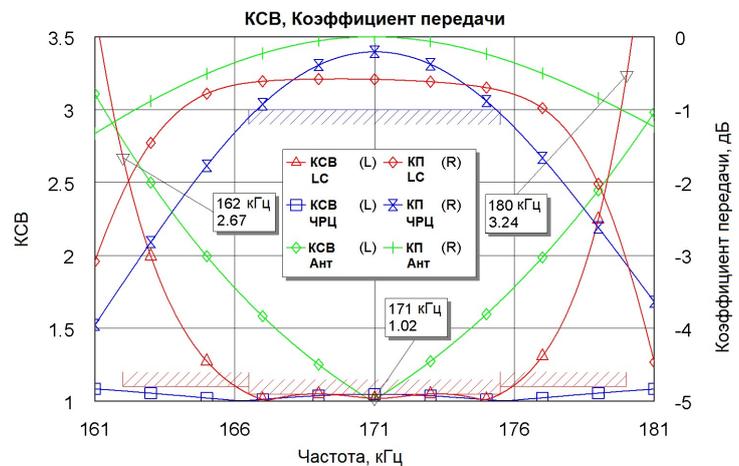


Рисунок 7 - Сравнение возможностей согласования антенной системы с добротностью 10 на частоте 171 кГц с помощью лестничной LC структуры и ЧРЦ

Разработан алгоритм и программные средства проектирования антенно-согласующих цепей (АСЦ) цифровых радиовещательных передатчиков стандарта DRM, которые позволяют использовать существующие антенные системы диапазона НЧ для создания сетей цифрового радиовещания стандарта DRM.

Предложенный способ расширения полосы согласования передающих вещательных антенных систем диапазона НЧ и разработанные методики расчетов ЧРЦ и АСЦ проверены по измеренным входным импедансам более чем 10 экземпляров находящихся в эксплуатации антенных систем различных типов (АРРТ, АМШП и др.). Результаты расчетов показали возможность их согласования с требуемым КСВ при допустимом уровне потерь. Показана потенциальная возможность использования режима Simulcast с двойной полосой частот: для верхней половины диапазона НЧ – с антеннами высотой 257 метров, для нижней – 378 метров.

Прямой экономический эффект при использовании существующей антенной системы, согласуемой с помощью ЧРЦ, вместо строительства новой, высотой 250... 378 метров, составляет от 70 до 110 млн. рублей за одну антенну. При планируемом использовании 14 существующих антенн вместо строительства 8 антенн высотой 257 метров и 6 антенн высотой 378 метров, суммарный экономический эффект от

использования ЧРЦ может превышать 1,2 млрд. рублей. Более важным, хотя и косвенным, эффектом применения ЧРЦ, является сама возможность использования нижней части диапазона НЧ для создания сетей цифрового радиовещания стандарта DRM, в которой иными способами невозможно обеспечить требуемый КСВ передающих вещательных антенных систем ни при каких высотах антенн.

В четвертой главе проводится разработка требований к приемному оборудованию сетей цифрового радиовещания стандарта DRM. Очевидно, что при проектировании сети ЦРВ значения основных параметров приемного оборудования (чувствительности, избирательности и т.д.) должны быть известны заранее. Однако, эти параметры для имеющихся образцов бытовых приемников DRM (особенно диапазонов НЧ и СЧ) в технической документации и литературе не приводятся. Проведены измерения чувствительности существующих образцов бытовых приемников цифрового радиовещания стандарта DRM с помощью разработанных и созданных лабораторных установок для измерения чувствительности с антенного входа и по напряженности электромагнитного поля. Измерения показали, что чувствительность исследованных образцов бытовых приемников DRM по радиочастотному входу соответствует проектам нормативных документов DRM-консорциума, а чувствительность по напряженности электромагнитного поля в диапазонах НЧ и СЧ далека от ожидаемой. Проведенный анализ входных цепей приемников с магнитной антенной диапазонов НЧ и СЧ показал возможность достижения заданных значений чувствительности, и позволил определить необходимые для этого условия (параметры ферритовой антенны и входное сопротивление радиочастотного тракта приемника).

В рамках выполнения Системного проекта «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации (раздел «Разработка требований к приемному оборудованию сетей цифрового радиовещания DRM») проведена разработка требований на параметры приемного оборудования сетей ЦРВ стандарта DRM, включающих в себя требования к основным функциональным параметрам и требования к основным радиочастотным параметрам. Разработанные требования учитывают предполагаемые особенности использования стандарта DRM в качестве сети государственного радиовещания РФ в части обеспечения оповещения, передачи различных видов дополнительной информации, русификации интерфейса пользователя и т.д. для различных по потребительским свойствам классов приемников. Разработанный документ «Приемник DRM-30 (для системы цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц). Общие технические условия» утвержден ФГУП «РТРС».

Методы измерений высокочастотных параметров приемников DRM коренным образом отличаются от традиционных методов измерений аналоговых АМ или ЧМ приемников. Так, в качестве источника сигнала используется генератор сигнала DRM (или возбудитель передатчика). Качество радиочастотного тракта приемника при проведении различных испытаний определяется по критерию вероятности ошибки $BER=10^{-4}$. Учитывая, что не все приемники могут иметь выход «сырых» данных для измерения BER (это не требуется нормативными документами и не нужно пользователю), используются альтернативные методы измерений по вероятности ошибки принятых аудиофреймов (AFER, Audio Frame Error Ratio). Возможность приема и параметры приемника в различных каналах распространения радиоволн, модели которых описаны в стандарте DRM, измеряются с помощью имитаторов канала распространения радиоволн. Параметры чувствительности измеряются с различными (для приемников разного на-

значения) эквивалентами антенных цепей, несколько отличающихся от принятых в нормативных документах РФ.

В связи с этим, для соответствия проектируемых приемников международным нормам, автором разработаны специфические для приемников DRM методы измерений радиочастотных параметров, вошедшие в разработанный документ «Приемник DRM-30. Методы электрических высокочастотных измерений», утвержденный ФГУП «РТРС».

Разработанные документы гармонизированы с требованиями DRM консорциума для обеспечения международного соответствия разрабатываемых приемников, с требованиями нормативных документов РФ, и учитывают особенности планируемого использования DRM вещания в РФ.

В пятой главе проводится анализ радиочастотных защитных отношений и работы сети ЦРВ в переходный период. Знание требуемых защитных отношений необходимо при планировании любой системы вещания. Для цифровых систем, характеризующихся пороговым характером приема, их определение следует проводить более точно, учитывая, в том числе и факторы, которыми обычно пренебрегали при планировании аналоговых сетей радиовещания.

С помощью разработанной и созданной лабораторной измерительной установки, содержащей программный имитатор каналов распространения, проведены измерения отдельных величин защитных отношений для трех видов каналов распространения (однолучевого, двухлучевого и четырехлучевого) при наличии помех от станций с амплитудной модуляцией (с АЧХ по МСЭ и по ГОСТ-Р) и от станций с цифровой модуляцией. Результаты измерений показали:

- значения защитных отношений, рекомендованные МСЭ, подтверждены с достаточной для практики точностью, что позволяет говорить об адекватности разработанных программ и методик исследований;
- измеренные значения необходимых защитных отношений для случая DRM-AM-Россия при расстройке 10 кГц существенно (на 18 дБ) больше, чем для случая DRM-AM-Европа, что может потребовать принятия мер по защите DRM вещания от АМ передатчиков с полосой модулирующих частот 10 кГц, так и мер по защите существующих частотных присвоений отечественных передатчиков на международном уровне;
- значения защитных отношений, рекомендованные МСЭ, справедливы только для однолучевого канала распространения. При многолучевом распространении величины защитных отношений должны уточняться в соответствии с характеристиками канала.

Экспериментальная проверка посредством проведения эфирных измерений защитных отношений в диапазоне ВЧ на скачковой трассе Талдом-Романцево (160 км) подтвердила результаты лабораторных исследований.

Стандарт DRM и рекомендации МСЭ определяют или требуемое для декодирования сигнала DRM отношение сигнал-шум, или радиочастотные защитные отношения при одном единственном мешающем сигнале. В реальных условиях, особенно на границе зоны обслуживания, в точке приема одновременно могут присутствовать и шумы и несколько различных мешающих станций (АМ, DRM) с различными частотными отстройками. Поэтому для правильного планирования зоны обслуживания расчет требуемой мощности полезного сигнала необходимо производить с учетом всех мешаю-

щих сигналов и связанных с ними величинами защитных отношений. Кроме этого, необходимо учитывать параметры применяемого приемного и передающего оборудования.

Эквивалентная мощность помех от станций, расположенных в полезном и соседних каналах, определяется исходя из развиваемой ими напряженности поля в точке приема с учетом коэффициентов, представляющих собой пересчитанные значения защитных отношений.

Эквивалентную мощность шумов в общем виде можно записать как:

$$P_{ш_{экв}} = (P_c / 10^{SNRT/10}) + (P_c / 10^{SNRR/10}) + P_{ш_{пр}} + P_{ш_{пром}} + P_{ш1_{экв}} + P_{ш2_{экв}} + \dots + P_{шn_{экв}},$$

где: $P_c / 10^{SNRT/10}$ - эквивалентная мощность шумов, обусловленных нелинейными искажениями передатчика, P_c - мощность полезного сигнала в точке приема, $SNRT$ - значение ОСШ на выходе передатчика;

$P_c / 10^{SNRR/10}$ - эквивалентная мощность шумов, обусловленных вкладом фазовых шумов гетеродина приемника, $SNRR$ - максимальное значение собственного ОСШ приемника;

$P_{ш_{пр}}$ - эквивалентная мощность тепловых шумов приемника, пересчитанная относительно напряженности поля;

$P_{ш_{пром}}$ - мощность промышленных (или атмосферных, что больше) шумов;

$P_{ш1_{экв}}, P_{ш2_{экв}}, \dots, P_{шn_{экв}}$ - эквивалентные мощности шумов, обусловленных помехами от станций.

Требуемая для декодирования мощность полезного сигнала ЦРВ:

$$P_c = 10^{ОСШ_{дек}/10} * P_{ш_{экв}},$$

где $ОСШ_{дек}$ - требуемое для декодирования значение ОСШ на входе приемника для заданного режима помехоустойчивости, ширины полосы частот, типа канала распространения и т.д.

Подставляя в выражение для требуемой мощности сигнала значение эквивалентной мощности шумов, получим:

$$P_c = 10^{ОСШ_{дек}/10} * \left(\frac{P_c}{10^{SNRT/10}} + \frac{P_c}{10^{SNRR/10}} + P_{ш_{пр}} + P_{ш_{пром}} + P_{ш1_{экв}} + P_{ш2_{экв}} + \dots + P_{шn_{экв}} \right), \text{ откуда:}$$

$$P_c = \frac{P_{ш_{пр}} + P_{ш_{пром}} + P_{ш1_{экв}} + P_{ш2_{экв}} + \dots + P_{шn_{экв}}}{10^{-ОСШ_{дек}/10} - (10^{-SNRT/10} + 10^{-SNRR/10})}.$$

Переходя к общепринятым единицам измерения уровней сигналов станций и помех через напряженность поля в дБмкВ/м, получим требуемую напряженность поля полезного сигнала:

$$E_c = 10 * \lg \frac{(10^{E_{ш_{пр}}/10} + 10^{E_{ш_{пром}}/10} + 10^{E_{ш1_{экв}}/10} + 10^{E_{ш2_{экв}}/10} + \dots + 10^{E_{шn_{экв}}/10})}{10^{-ОСШ_{дек}/10} - (10^{-SNRT/10} + 10^{-SNRR/10})},$$

или, в более наглядном виде:

$$E_c = ОСШ_{дек} + 10 * \lg \frac{(10^{E_{ш_{пр}}/10} + 10^{E_{ш_{пром}}/10} + 10^{E_{ш1_{экв}}/10} + 10^{E_{ш2_{экв}}/10} + \dots + 10^{E_{шn_{экв}}/10})}{1 - (10^{-SNRT/10} + 10^{-SNRR/10}) / 10^{-ОСШ_{дек}/10}}.$$

Из полученного выражения видно, что требуемая напряженность поля полезного сигнала определяется необходимым для декодирования ОСШ, суммой абсолютных эквивалентных мощностей помех (числитель дроби) и поправочным коэффициентом,

учитывающим относительный вклад искажений передатчика и фазовых шумов приемника (знаменатель дроби). Выведенное выражение для расчета требуемой напряженности поля полезного сигнала позволяет учитывать произвольное количество помех различного происхождения и осуществлять корректный расчет зоны обслуживания.

Проведенные лабораторные исследования и эфирные испытания в диапазоне СЧ для различных комбинаций мешающих сигналов и частотных отстроек подтвердили справедливость разработанной методики расчета требуемой напряженности поля сигнала ЦРВ при воздействии нескольких мешающих сигналов. Экспериментальная проверка проводилась в московской области на частоте 1017 кГц с использованием эфирных передатчиков DRM (Псарьки) и АМ (Чкаловская) сигналов, и дополнительного эфирного имитатора помех. Приемный пункт располагался в месте с низким уровнем промышленных помех (Купавна).

Спектры сигналов на входе приемника, иллюстрирующие некоторые граничные ситуации при одновременном воздействии двух помех в соседних каналах приведены на рисунке 8. Эфирные испытания подтвердили теоретические расчеты с точностью до 1 дБ.

На основании результатов проведенных исследований решением ГКРЧ № 09-01-05 от 20.01.2009 было признано возможным использование диапазона СЧ и радиовещательных участков диапазона ВЧ для создания на территории РФ сетей цифрового звукового радиовещания стандарта DRM.

В 2011 году в ходе выполнения НИР «Исследование возможности и условий использования цифрового радиовещания стандарта DRM в Российской Федерации в полосе частот 0,1485-0,2835 МГц (длинные волны)» (Заказчик ФГУП РТРС) была организована опытная зона DRM радиовещания в диапазоне НЧ. По результатам проведенных исследований решением ГКРЧ №12-14-06 от 16.03.2012 радиовещательный диапазон НЧ также был выделен для создания на территории РФ сетей цифрового радиовещания стандарта DRM.

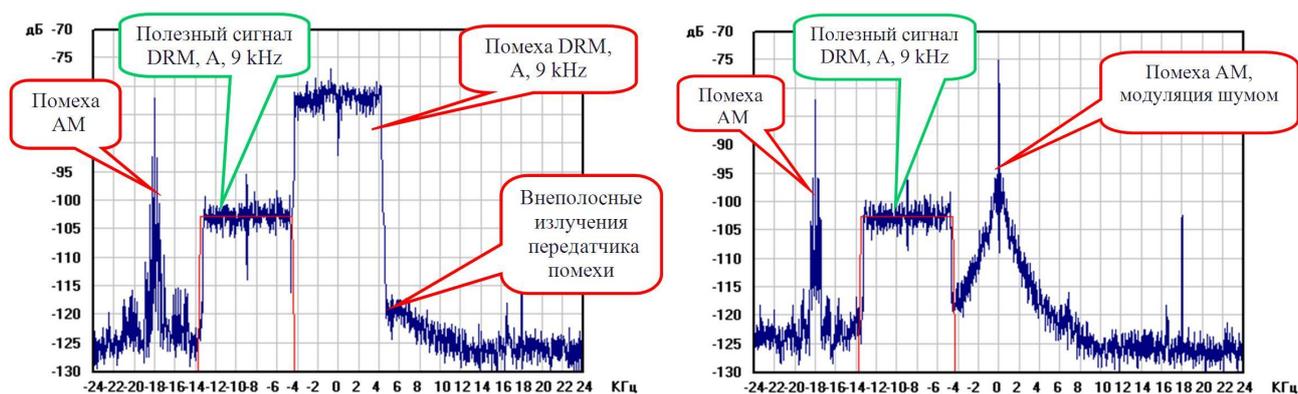


Рисунок 8 – Спектры сигналов на входе приемника, иллюстрирующие граничные ситуации при одновременном воздействии двух помех в соседних каналах

Проведено исследование условий использования цифрового радиовещания стандарта DRM при работе в совмещенном режиме (Simulcast) с учетом параметров существующей аналоговой бытовой радиоприемной аппаратуры. Моделирование влияния помехи от DRM составляющей приему АМ сигнала в режиме Simulcast выполнено методом компьютерной симуляции для различных классов приемников. Показано, что при одновременной передаче цифрового и аналогового сигнала с соотношением мощ-

ностей около минус 10 дБ для большинства имеющихся у населения АМ приемников ухудшение качества приёма аналогового сигнала будет незначительным. Рассмотрены соотношения радиусов зон обслуживания аналоговой и цифровой компонентами при работе в совмещенном режиме в диапазонах НЧ и СЧ. Показано, что равенство зон обслуживания обеспечивается при отношении мощностей около 10 дБ (рисунок 9). Данное отношение мощностей (в отличие от предлагаемого DRM консорциумом 16 дБ) рекомендовано для использования в переходный период с целью обеспечения равенства зон обслуживания в обоих режимах при сохранении качества приема аналогового сигнала.

В шестой главе проводится разработка технических основ методики частотно-территориального планирования сетей цифрового радиовещания стандарта DRM диапазонов НЧ и СЧ с учетом результатов проведенных экспериментальных исследований и существующих материалов МСЭ-Р. Используется международно-признанный эмпирический «критерий качества», соответствующий корректному декодированию сигнала в течение не менее 98% времени. Показано, что для земной волны необходимо учитывать сезонные и территориальные вариации напряженности поля; для ионосферной волны необходимо учитывать запас на изменения ото дня ко дню и кратковременные изменения уровней напряженности поля, а также коэффициент потерь, учитывающий влияние солнечной активности. Напряженность поля атмосферных шумов необходимо учитывать по уровню, превышаемому в течение 2% времени в час.

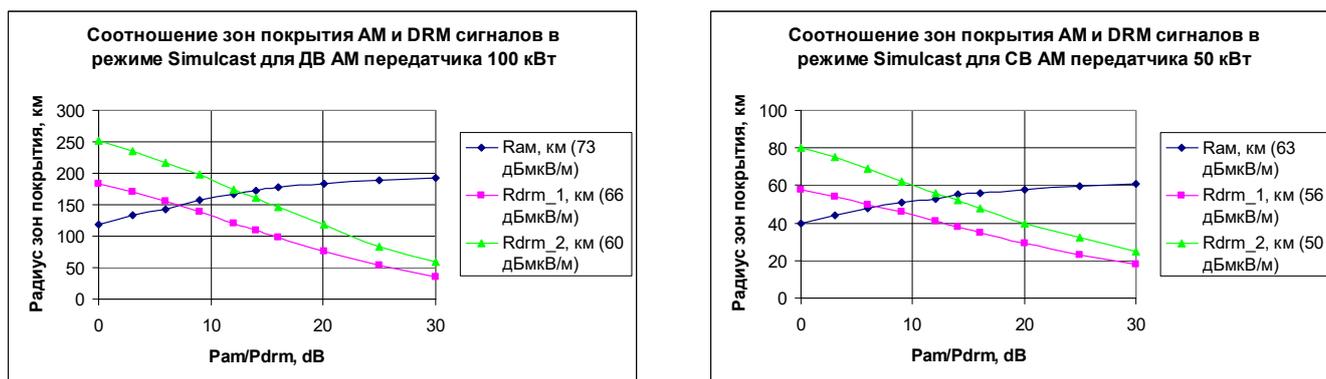


Рисунок 9 – Радиусы зон покрытия при различных отношениях мощности АМ и DRM сигналов в диапазонах НЧ и СЧ в режиме Simulcast

На основании экспериментальных результатов, полученных автором в ходе множества натурных испытаний системы DRM в диапазонах НЧ и СЧ в Московском регионе в летние периоды 2003...2012 гг., определена референсная точка для сезонных вариаций напряженности поля земной волны, соответствующая принятому при планировании в Московском регионе значению проводимости почвы 3 мСм/м. Сезонные вариации напряженности поля земной волны в этом случае характеризуются уменьшением напряженности относительно референсной точки в летний период на 4–5 дБ и увеличением ее в зимний период более чем на 10 дБ.

Проведен анализ напряженности поля промышленных помех и атмосферных шумов. Рассмотрено распределение атмосферных шумов по территории Земли. На основании рекомендаций МСЭ проведена оценка максимально ожидаемой напряженности поля атмосферных радишумов в полосе 10 кГц, превышаемой в течение 2% времени, для различных частот диапазонов НЧ и СЧ в северных, средних и тропических широ-

тах (Тикси, Норильск, окрестности Москвы, Хошимин, рисунок 10). Показана необходимость расчетов напряженности поля атмосферных шумов при определении зоны обслуживания передатчика в каждом географическом регионе. Так, напряженность поля атмосферных шумов в северных широтах (Тикси, Норильск) существенно ниже шумов приемника и промышленных шумов в сельской местности. В этих регионах при определении зоны обслуживания системы ЦРВ стандарта DRM земной волной следует пользоваться минимально используемой напряженностью поля, определенной в рекомендациях МСЭ. В тропических широтах (Хошимин) напряженность поля атмосферных шумов близка к максимальной и в диапазоне СЧ превышает собственный шум DRM-приемника на 14...23 дБ. При определении зоны обслуживания соответствующие значения должны быть прибавлены к минимально используемой напряженности поля. На территории РФ максимальная напряженность поля атмосферных шумов прогнозируется несколько южнее Москвы. Для Московского региона в верхней части диапазона СЧ напряженность поля атмосферных шумов несколько ниже шумов приемника, в нижней части диапазона СЧ – несколько выше (до 5 дБ), а в нижней части диапазона НЧ – выше практически на 14 дБ.

Экспериментальные исследования зон обслуживания сетей радиовещания DRM диапазонов НЧ и СЧ проводились в ходе выполнения более 10 НИР в 2001 – 2013 годах под руководством автора и при его непосредственном участии. Разработанное для выполнения НИР измерительное оборудование включало профессиональные приемники DRM и калиброванные антенны диапазонов НЧ и СЧ с коэффициентом преобразования, обеспечивающим выполнение «Минимальных требований к приемнику» по чувствительности, предъявляемых консорциумом DRM, что позволяло проводить корректные измерения уровней шумов и зон обслуживания.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что измеренный уровень шумов в сельской местности определяется атмосферными шумами и не превышает рассчитанных максимальных значений. Большинство источников бытовых помех от различного электрического и радиооборудования на расстоянии более 4 метров не влияют на возможность приема сигнала ЦРВ на границе зоны обслуживания.

Наиболее масштабные измерения в диапазоне СЧ в Московском регионе проводились в 2012 году. Впервые в отечественной практике проведено широкомасштабное (более 80 точек измерений на расстояниях от 10 до 260 км от передатчика, рисунок 11) исследование зоны покрытия DRM передатчика в различных режимах помехоустойчивости, в дневное и ночное время, включая зону фединга, в сельской местности и различных типах населенных пунктов, в стационарных позициях и в движении. Основной целью исследований было более точное определение необходимых параметров сигнала DRM для планирования сетей ЦРВ в диапазоне СЧ. Измерения проводились в летнее время, что соответствует практически минимальной напряженности поля с учетом ее сезонных вариаций.

Результаты измерений зоны обслуживания в диапазоне СЧ при мощности передатчика в режиме DRM 40 кВт (AM – 75 кВт) в светлое время суток показали, что в режиме AM радиус зоны обслуживания составлял 75–90 км (при нормативном ОСШ_{нч} 26 дБ при 30%-ной модуляции). На расстоянии 160 км от передатчика ОСШ в режиме AM был равен 13,4 дБ. В режиме DRM 64QAM(3) было возможно 100%-ное декодирование аудиосигнала до расстояний 120–180 км от передатчика (в зависимости от направления). Измерения в точках, отстоящих от передатчика на 150 км в юго-восточном

направлении, показали 100%-ное декодирование при наличии вариаций напряженности поля от места к месту до 8 дБ. Площадь зоны обслуживания в режиме DRM 64QAM(3) (качество «как в УКВ ЧМ стерео») в 4 раза больше, чем в режиме AM, при мощности DRM-передатчика в 2 раза меньше.

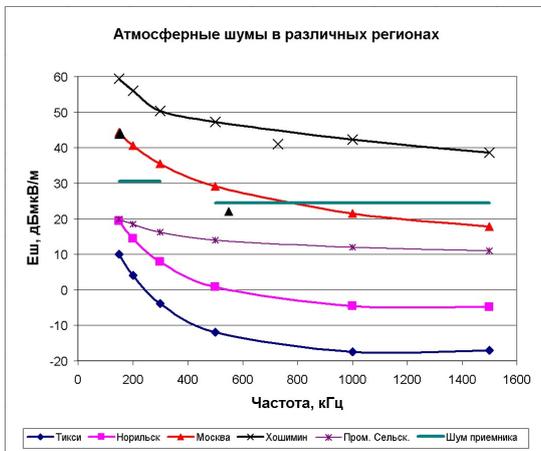


Рисунок 10 – Максимальная ожидаемая напряженность поля атмосферных шумов, превышаемая в течение 2% времени

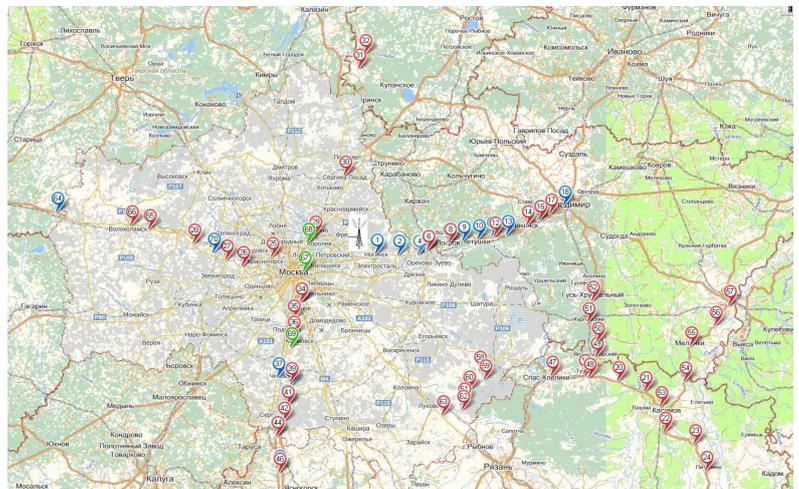


Рисунок 11 – Расположение на карте точек приемных позиций, в которых проводились измерения

В режиме 64QAM(0) 100%-ное декодирование аудиосигнала в юго-восточном направлении наблюдалось до расстояния 260 км от передатчика. Измерения в точках, отстоящих от передатчика на 220 км в этом направлении, показали устойчивое декодирование при незначительных вариациях напряженности поля от места к месту. Площадь зоны обслуживания в режиме DRM 64QAM(0) (качество, «близкое к УКВ ЧМ») в 9 раз больше, чем в режиме AM, при мощности DRM-передатчика в 2 раза меньше.

В темное время суток в режиме 64QAM(3) было возможно 100% декодирование аудиосигнала до расстояний 70...90 км от передатчика (в зависимости от направления) при преобладании поверхностной волны. На расстояниях до 150 км было возможно 100% декодирование аудиосигнала в режиме 64QAM(0). В этом же режиме наблюдался устойчивый прием пространственной (ионосферной) волны на расстояниях свыше 200 км. В режиме AM на расстоянии 150 км от передатчика ОСШ составлял 8...12 дБ с заметным на слух федингом.

Проведенные экспериментальные исследования цифрового радиовещания DRM в диапазоне СЧ в зоне фединга показали, что в рассматриваемых условиях режим «А» обладает большей помехоустойчивостью, чем режим «В». Учитывая, что в режиме «А» доступна большая скорость передачи данных и для достижения такого же качества передачи звукового контента можно использовать меньшую кодовую скорость, требующую для декодирования меньшего ОСШ, можно рекомендовать применение режима помехоустойчивости «А» в диапазоне СЧ в темное время суток на рабочих частотах ниже 700 кГц.

Проведенные экспериментальные исследования мобильного приема в различных ландшафтных условиях показали, что плавные изменения ландшафта не оказывают существенного влияния на параметры приема.

В целом, проведенные исследования и измерения показали, что цифровое радиовещание стандарта DRM обеспечивает большую зону покрытия с лучшим качеством аудио контента при меньшей мощности передатчика, чем традиционное радиовещание с АМ. Результаты экспериментальных исследований были использованы при подготовке двух вкладов администрации связи РФ в МСЭ, вошедших в Отчет МСЭ-Р BS.2384-0 «Implementation considerations for the introduction and transition to digital terrestrial sound and multimedia broadcasting» (07/2015). На основании результатов проведенных исследований приняты три решения ГКРЧ о возможности использования диапазонов НЧ, СЧ и ВЧ для создания на территории РФ сетей цифрового звукового радиовещания стандарта DRM.

Проведенные экспериментальные исследования зон обслуживания сетей радиовещания DRM диапазонов НЧ и СЧ подтвердили разработанные технические основы методики частотно-территориального планирования сетей цифрового радиовещания стандарта DRM диапазонов НЧ и СЧ.

В седьмой главе проводится разработка топологии сети цифрового радиовещания РФ. Напряженность поля земной волны с увеличением расстояния от передатчика уменьшается для различных частот с разной скоростью, а также зависит от проводимости почвы. При этом во всех случаях, чем ниже используемая частота, тем меньше ее затухание и тем выше напряженность поля полезного сигнала. Напряженность поля атмосферных шумов, как показано выше, также увеличивается с понижением частоты. Скорости изменения обоих процессов в общем случае различны. Поскольку для декодирования сигнала DRM требуется не только определенное значение напряженности поля, но и требуемое для используемого режима помехоустойчивости значение ОСШ, для планирования сетей ЦРВ в диапазонах НЧ и СЧ разработан метод преобразования кривых распространения земной волны МСЭ в кривые ОСШ, учитывающие частотную зависимость напряженности поля атмосферных шумов в локальном географическом регионе (рисунок 12). Как видно из рисунка 12, для Московского региона на расстояниях до 15 км наибольшее значение ОСШ обеспечивается на частоте 1 МГц, и далее, до 60 км, на частоте 500 кГц. Эти значения радиуса зоны обслуживания могут быть интересны для организации местного (локального) вещания. В практически востребованных в РФ случаях радиус зоны обслуживания передатчиков в диапазонах НЧ и СЧ превышает 100–200 км. На расстояниях от 60 до 150 км наибольшее значение ОСШ обеспечивается на частоте 300 кГц, а на расстояниях более 300 км – на частоте 150 кГц. Таким образом, в практически востребованных случаях, несмотря на повышение напряженности поля атмосферных шумов с уменьшением частоты, использование более низких частот обеспечивает существенно больший радиус зоны обслуживания.

На основе разработанного метода преобразования кривых распространения земной волны МСЭ в кривые ОСШ определены предпочтительные для вещания частоты в отдельных регионах высоких, средних и тропических широт (рисунок 13). Проведенный анализ показал, что для организации сетей цифрового радиовещания стандарта DRM предпочтительными частотами можно считать: – нижнюю часть диапазона НЧ – в северных широтах; – нижнюю и среднюю часть диапазона НЧ – в средних широтах; – верхнюю часть диапазона НЧ – в тропических регионах.

Как видно из рисунка 13, в северных широтах в нижней части диапазона НЧ, несмотря на большее затухание распространяющегося поверхностной волной полезно-

го сигнала, из-за малой напряженности поля атмосферных шумов радиус обслуживания может быть больше, чем в Московском регионе.

Таким образом, затраты на систему ЦРВ стандарта DRM в диапазоне НЧ оказываются минимальными из всех возможных вариантов. Также система ЦРВ в диапазоне НЧ может использоваться как средство распространения программ с последующей ретрансляцией маломощными передатчиками диапазона ОВЧ в малых населенных пунктах. При радиусе зоны обслуживания 550 – 600 км для покрытия всей территории РФ теоретически минимально потребуется 16...18 передатчиков. Учитывая реальную конфигурацию территории РФ, а также необходимость покрытия прибрежных морских акваторий и территорий сопредельных государств с большой долей русскоязычного населения, общее количество передатчиков может составить 27...30.

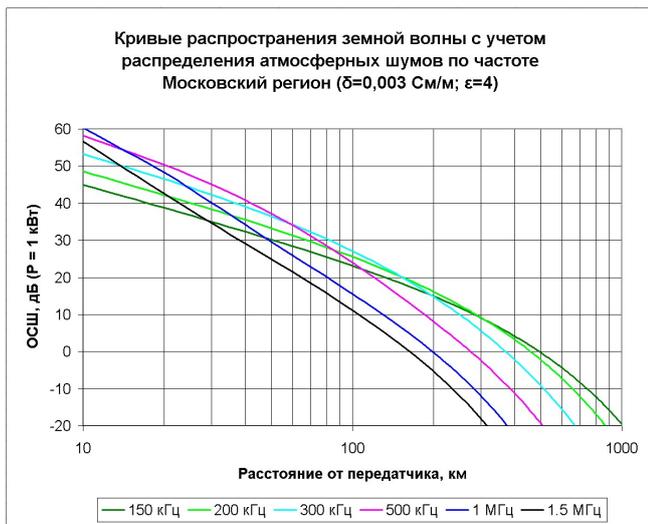


Рисунок 12 – Пересчитанные в ОСШ кривые распространения земной волны с учетом распределения атмосферных шумов по частоте для излучаемой мощности 1 кВт для Московского региона

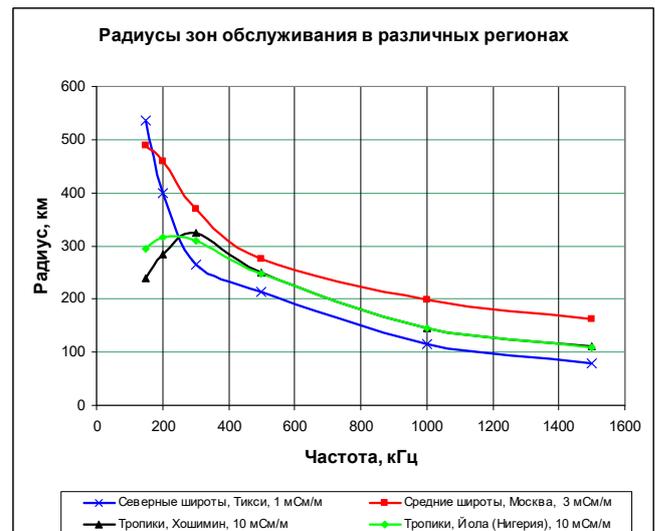


Рисунок 13 – Радиусы зон обслуживания, учитывающие атмосферные радишумы, для различных географических регионов. Мощность передатчика 40 кВт, требуемое для декодирования ОСШ = 16 дБ

В темное время суток в диапазоне НЧ при появлении ионосферной волны возникают помехи от соканальных станций. Прогнозируемая величина напряженности поля ионосферной волны в ночное время для региона 1, в который входит территория РФ, определяется в соответствии с рекомендациями МСЭ. Рассчитанные зависимости напряженности поля ионосферной волны от расстояния от мешающего передатчика для различных геомагнитных широт (30° , 40° , 50° и 60°) приведены пунктирными линиями на рисунке 14. Ионосферная волна от мешающих станций распространяется на значительные расстояния, сокращая зону обслуживания полезной станции. Изменения ото дня ко дню и кратковременные изменения уровней напряженности поля в ночное время (вариации напряженности поля ионосферной волны) практически не поддаются строгому расчету и учитываются статистически. Для достижения надежности приема 98%, необходимо принимать запас на вариации, равный 16 дБ¹.

¹ - Чернов, Ю.А. Цифровое радиовещание до 30 МГц: иллюзии и реальность, часть 2. Длинные и средние волны. Темное время суток / Ю.А.Чернов // Электросвязь. – 2012. – №2. – С. 43-47.

Как видно из рисунка 14, необходимые защитные отношения сигнал/помеха (16 дБ для декодирования + 16 дБ запас на вариации) начинают выполняться для 50° геомагнитной широты при расстояниях между передатчиками около 5000 км. В более высоких широтах это расстояние уменьшается, а ближе к экватору – увеличивается. В этой ситуации при традиционном построении сети вещания частотно-территориальное планирование не может быть осуществлено на больших территориях, т.к. имеющихся в НЧ диапазоне 15 номиналов радиочастот оказывается недостаточно (рисунок 15). В частности, протяжённость территории РФ с севера на юг превышает 4 000 км, с запада на восток – приближается к 10 000 км, и при радиусах зоны обслуживания передатчиков 500 – 600 км частот НЧ диапазона в ночное время было недостаточно даже для РФ.

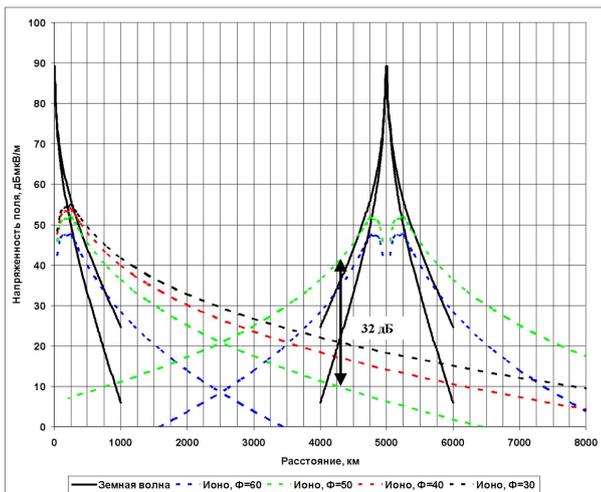


Рисунок 14 – Ход напряженности поля земной и ионосферной волн (для передатчика 1 кВт). Для напряженности поля земной волны показаны 2 варианта – для разных частот или для разных проводимостей почвы

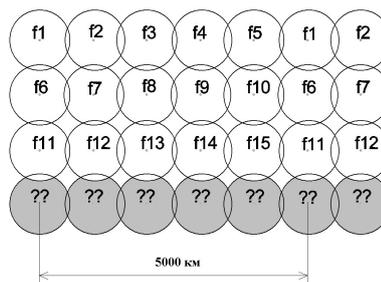


Рисунок 15 – Иллюстрация невозможности осуществления частотно-территориального планирования в диапазоне НЧ на больших территориях при традиционном построении сети вещания

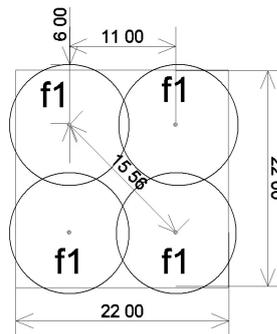


Рисунок 16 – Пример зоны с синхронным вещанием для диапазона НЧ

Для решения данной задачи предложен метод использования крупно-кластерных зон одночастотного синхронного вещания в диапазоне НЧ для построения глобальных сетей цифрового радиовещания. Данный метод позволяет сменить концептуальный подход, отказавшись от привычного принципа частотно-территориального планирования одиночных передатчиков с чередованием частот, и перейти к крупно-кластерному (зональному) планированию, состоящему из зон с одночастотным синхронным вещанием, что позволяет реализовать все преимущества ЦРВ. В цифровом радиовещании стандарта DRM в режиме помехоустойчивости «В» длительность защитного интервала составляет 5,333 мс. В этой ситуации передатчики, находящиеся на расстоянии пути длины волны меньше 1600 км, будут находиться в синхронном режиме и не будут создавать помех друг другу. Пример зоны с синхронным вещанием для диапазона НЧ приведен на рисунке 16. Из таких крупно-кластерных синхронных зон можно построить глобальную сеть вещания РФ, используя всего 8 радиочастот. Остаточные частоты можно использовать для организации второго мультиплекса радиовещания – там, где территория суши имеет вытянутый характер по одной из осей (восточная часть РФ).

Для РФ реализация данного предложения позволит организовать покрытие всей территории, включая акватории, двумя программами радиовещания, одна из которых может быть глобальной, а вторая – региональной в пределах кластера. Данное предложение реализует «цифровой дивиденд» и позволяет получить возможность вещания в диапазоне НЧ для стран, которые его ранее не имели. Данное предложение также позволяет решить проблемы внутри Регионального содружества в области связи (РСС) с распределением оставшихся от СССР синхронных частот между государствами СНГ.

Параметры кластера (максимальное расстояние между передатчиками, размер, режимы помехоустойчивости) определены из общих условий синхронизма. Зона покрытия синхронной сети ЦЗРВ стандарта DRM ограничивается длительностью защитного интервала OFDM символа, которая в режиме помехоустойчивости «В» составляет 5,3 мс. Время разности хода лучей с учетом отражения от ионосферы не должно превышать указанной величины. Для одноканальной трассы с отражением на высоте h границы зоны синхронизма можно найти в соответствии с геометрическими правилами.

В диапазоне НЧ в темное время суток отражение происходит от слоя D, находящегося на высоте до 90 км. При этом задержка между земным и двухканальным ионосферным лучами на расстоянии 1000 км составляет 0,2 мс, уменьшаясь с увеличением длины трассы, и ее влиянием можно пренебречь. Действительно, при наибольшем удалении передатчиков друг от друга на расстоянии 1560 км (по 780 км до центра зоны обслуживания от каждого передатчика), область синхронизма имеет протяженность более 3500 км, что превышает максимальный размер кластера. При меньшем расстоянии между передатчиками зона синхронизма потенциально бесконечна.

На основе предложенного метода использования крупно-кластерных зон одночастотного синхронного вещания разработана топология сети государственного наземного цифрового радиовещания стандарта DRM для РФ (рисунок 17). При разработке топологии для расчетов зон покрытия вещанием в диапазоне НЧ в режиме DRM принимались расчеты для земной волны, т.е. для светлого времени суток. В темное время суток за счет предложенного принципа планирования с использованием крупно-кластерных зон с синхронным вещанием и повторным использованием частот на расстоянии более 5000 км зоны покрытия передатчиков не уменьшаются.

В регионах, имеющих инфраструктуру НЧ радиовещания, использовались территориальные позиции существующих радиоцентров (задействовано две трети радиоцентров, предусматривавшихся в системном проекте 2011 года «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации»). При этом разработанные в третьей главе работы технические решения позволяют использовать существующие антенно-мачтовые сооружения для работы в режиме DRM, а в верхней части диапазона НЧ и в режиме Simulcast для одновременной передачи цифровой и аналоговой программ в переходный период. Данное обстоятельство совместно с минимизацией суммарной излучаемой мощности привело к необходимости использования 10 зон (в 10-й зоне только один передатчик) при сохранении 8 номиналов радиочастот. Разработанный пример архитектуры сети государственного вещания РФ содержит 29 передатчиков общей мощностью 1940 кВт. Передатчики, работающие в кластерах синхронной сети, на рисунке 17 соединены линиями.

Количество передатчиков, используемых в данном случае, существенно меньше, чем в предлагавшихся ранее вариантах (ФЦП и системном проекте 2011 г.), а их сум-

марная мощность по сравнению с сетью вещания 2005 г. уменьшается практически в 22 раза и становится вдвое меньше сети объектов ЦТВ по потребляемой мощности. Расходы на электроэнергию, составлявшие в 2005 году (в сегодняшних ценах) 2 млрд. руб. в год, что и являлось одной из основных причин сворачивания мощного радиовещания, сокращаются до 90 млн. руб. в год.

Разработанный пример архитектуры сети государственного радиовещания РФ показывает эффективность предложенного способа организации глобальной сети цифрового радиовещания в диапазоне НЧ с использованием крупно-кластерных зон синхронного вещания. Данная архитектура сети позволяет обеспечить круглосуточное покрытие цифровым радиовещанием всей территории РФ при достаточно малой суммарной мощности передатчиков.

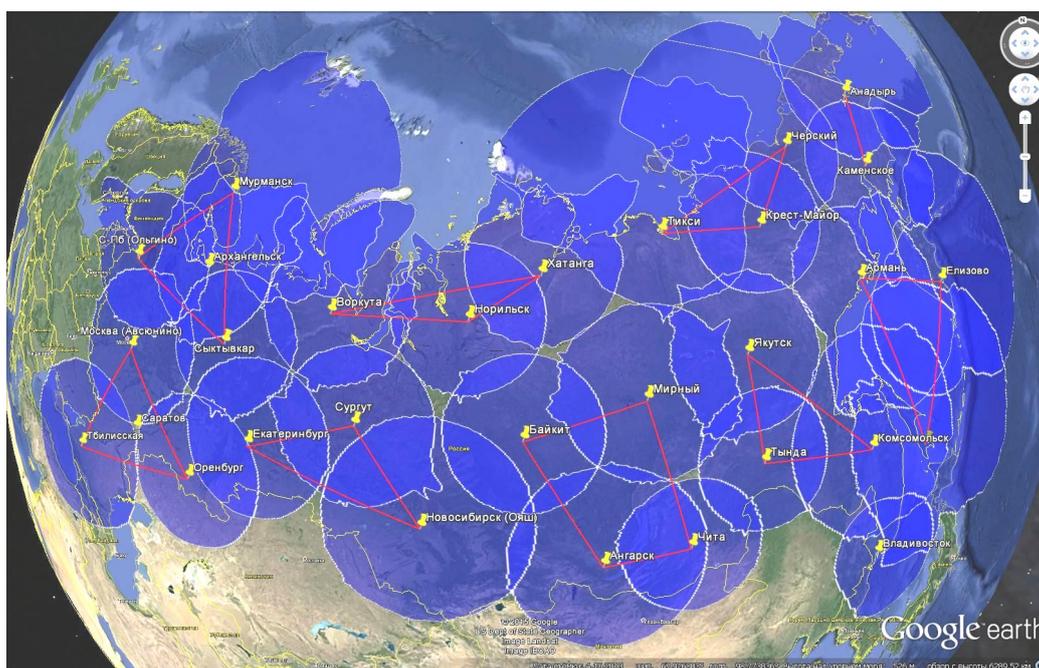


Рисунок 17 – Пример архитектуры сети государственного цифрового радиовещания РФ в диапазоне НЧ

В заключении перечислены основные научные и практические результаты работы.

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Предложен метод частотно-территориального планирования с использованием крупно-кластерных зон одночастотного синхронного вещания в диапазоне НЧ для построения глобальных сетей цифрового радиовещания. Разработаны параметры кластера (максимальное расстояние между передатчиками, размер, режимы помехоустойчивости) и определены расстояния между передатчиками, на которых возможно повторное использование частот в глобальной крупно-кластерной сети вещания диапазона НЧ при круглосуточной работе. На основе предложенного метода разработана топология сети государственного наземного цифрового радиовещания стандарта DRM для РФ в диапазоне НЧ. Разработанная топология позволяет с меньшими затратами покрыть круглосуточным вещанием всю территорию РФ. При этом остаются свободные частоты для стран РСС и для большинства территориально крупных стран 1-го региона МСЭ.

2. Разработаны технические основы методики частотно-территориального планирования сетей цифрового радиовещания стандарта DRM диапазонов НЧ и СЧ, учитывающие, в том числе, распределение атмосферных шумов по поверхности Земли. Определены значения максимальных ожидаемых напряженностей поля атмосферных шумов, превышаемых в течение 2% времени, для различных частот диапазонов НЧ и СЧ (в полосе частот 10 кГц) в северных, средних и тропических широтах. Разработанные технические основы подтверждены экспериментальными исследованиями и позволили определить параметры передающей сети наземного цифрового радиовещания стандарта DRM для РФ.

3. Определены отдельные величины защитных отношений для трех видов каналов распространения (однолучевого, двухлучевого и четырехлучевого) при действии одной помехи от станции с амплитудной модуляцией (с АЧХ по МСЭ и по ГОСТ-Р), а также от станции с цифровой модуляцией. Разработана методика расчета защитных отношений для сигнала ЦРВ при одновременном воздействии произвольного количества мешающих сигналов, шумов, искажений передатчика и фазовых шумов приемника.

4. Показана возможность одновременной передачи цифрового и аналогового сигнала с соотношением мощностей около 10 дБ, что обеспечивает примерное равенство зон покрытия при работе в режиме Simulcast в переходный период. При этом ухудшение качества приёма аналогового сигнала будет незначительным для большинства имеющихся у населения АМ приемников.

5. Разработан комплекс требований к техническим характеристикам высокоэффективных передающих устройств, отличающийся учетом нелинейности АХ и ФАХ, относительной задержки составляющих и полосы пропускания тракта огибающей. Требования на нелинейность передатчика, обусловленные допустимым уровнем внеполосных излучений, являются наиболее жесткими и должны использоваться в качестве критерия при проведении настройки передатчиков ЦРВ. Выполнение этих требований обеспечивает одновременно допустимую величину коэффициента ошибок модуляции (MER, Modulation Error Ratio) в выходном сигнале передатчика.

6. Предложенный способ расширения полосы согласования передающих вещательных антенных систем диапазонов НЧ и СЧ на основе применения частотно-расширительных цепей с потерями и разработанные методика расчетов и средства инженерного проектирования частотно-расширительных цепей позволяют использовать для ЦРВ в диапазоне НЧ существующие антенны высотой 257 метров, в том числе в режиме Simulcast с двойной полосой частот в верхней половине диапазона НЧ.

7. На основании результатов проведенных исследований приняты три решения ГКРЧ о возможности использования диапазонов НЧ, СЧ и ВЧ для создания на территории РФ сетей цифрового звукового радиовещания стандарта DRM. Результаты исследований, проведенных в диссертации, были использованы при подготовке двух вкладов администрации связи РФ в МСЭ, вошедших в Отчет МСЭ-Р BS.2384-0 «Implementation considerations for the introduction and transition to digital terrestrial sound and multimedia broadcasting» (07/2015), и при разработке «Правил применения оборудования систем радиовещания. Часть I. Правила применения эфирных цифровых радиовещательных передатчиков, работающих в диапазонах частот 0,1485 – 0,2835 МГц; 0,5265 – 1,6065 МГц; 3,95 – 26,10 МГц».

8. Разработанные требования на параметры приемного оборудования сетей ЦРВ стандарта DRM, включающие в себя требования к основным функциональным и

радиочастотным параметрам, а также методы измерений радиочастотных параметров этого оборудования, вошли в системный проект «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации».

В целом в работе проведена разработка совокупности новых научно обоснованных технических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны – технологии создания сети государственного наземного цифрового радиовещания стандарта DRM для Российской Федерации, основанной на предложенном и разработанном автором методе крупно-кластерных зон одночастотного синхронного вещания в диапазоне НЧ.

Результаты проведенных в работе исследований рекомендуется использовать при актуализации Системного проекта «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации», разработке методик расчетов ЭМС РЭС цифрового радиовещания стандарта DRM в диапазонах НЧ и СЧ, а также при разработке и производстве передающего и приемного оборудования сетей цифрового радиовещания DRM и их антенных устройств.

Основные публикации по теме диссертации

В ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Варламов, О.В. Сложение мощностей двухтактных ключевых генераторов ПН с резистивной нагрузкой / О.В.Варламов, В.Н.Громорушкин, В.Б.Козырев, А.В.Меланьин // Радиоэлектроника. Известия высших учебных заведений, Киев. – 1989. – Том 32. – № 7. – С. 31-36.
2. Варламов, О.В. Мощный ВЧ цифроаналоговый преобразователь для усилителя мощности ОМ сигналов / О.В.Варламов, И.А.Гончаров, В.Г.Лаврушенков // Электро-связь. – 1989. – № 8. – С. 54-57.
3. А/С СССР № 1532995, H03F3/20. Усилитель мощности. Варламов О.В., Гончаров И.А., Лаврушенков В.Г., Дегтев В.И. 30 декабря 1989.
4. А/С СССР № 1573535, H03K17/60. Транзисторный ключ. Варламов О.В., Гончаров И.А., Дегтев В.И., Лаврушенков В.Г. 23 июня 1990.
5. А/С СССР № 1667221, H03F3/20. Усилитель мощности. Богатов А.Н., Гончаров И.А., Лоцманов А.Н., Лушина О.В., Петяшин Н.Б., Варламов О.В. 30 июля 1991.
6. А/С СССР № 1771064, H03F3/20. Усилитель мощности. Варламов О.В., Гончаров И.А., Лаврушенков В.Г., Царев А.Ю. 23 октября 1992.
7. Патент РФ № 2019206, А61N1/40. Устройство для УВЧ-терапии. Викторов К.А., Варламов О.В., Громорушкин В.Н. 15 сентября 1994.
8. Международный патент (PCT) WO2004070877 A1, H01Q21/00. Radiation efficient antenna circuit. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 19.08.2004.
9. Международный патент (PCT) WO2004075395 A1, H03C3/40. Efficient modulation of RF signals. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 02.09.2004.
10. Международный патент (PCT) WO2004091097 A1, H03F1/02. Glitch-free controllable RF power amplifier. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 21.10.2004.
11. Патент ФРГ 102005047135 A1, H03H11/04. . Filter arrangement, e.g. for radio transceiver, has first impedance which is connected at first connection to input and with first resonant frequency with second impedance connected at first connection to input of filter.

Itkin Grigory, Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Gromorushkin Viktor, Chugunov Igor. 12.04.2007.

12. Патент США 7365599 B2, H03F1/02. Glitch-free controllable RF power amplifier. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 29.04.2008.

13. Патент ЕС 1229642 B1, H03F1/02. Power amplifier circuit for amplifying RF-Signals. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, 17.12.2008.

14. Патент КНР 100483922 С H03C3/40. Efficient modulation of RF signals. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 29.04.2009.

15. Патент КНР 100514852 С, H03F1/02. Power amplifier circuit and method for amplifying RF signals. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 15.07.2009.

16. Патент США US7724837 B2, H03C3/40. Efficient modulation of RF signals. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 25.05.2010.

17. Патент Японии 4527713 B2, H03C3/40. Efficient modulation of RF signals. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 18.08.2010.

18. Патент Кореи 101014065 B1, H03C3/40. Efficient modulation of RF signals. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 14.02.2011.

19. Варламов, О.В. Разработка коротковолнового ключевого усилителя мощности с отдельным усилением составляющих однополосного сигнала / О.В.Варламов, В.Н.Громорушкин, В.Г.Лаврушенко // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – Т. 5. – № 9. – С. 42-44.

20. Варламов, О.В. Разработка высокоэффективного модуляционного тракта для ВЧ усилителя мощности с отдельным усилением составляющих однополосного сигнала / О.В.Варламов // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – №9. – С. 45-46.

21. Варламов, О.В. Генератор испытательных сигналов для измерительных характеристик ключевых усилителей мощности с отдельным усилением составляющих однополосного сигнала / О.В.Варламов, В.Н.Громорушкин, В.Г.Лаврушенко, И.В.Чугунов // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. –2011. – № 9. – С. 47-49.

22. Патент США 8060025 B2, H04B1/38. Filter arrangement and method for filtering a signal. Itkin Grigory, Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Chugunov Igor, Gromorushkin Viktor, 15.11.2011.

23. Патент Австрии 551773 Т H03C3/40. Efficient modulation of RF signals. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 15.04.2012.

24. Варламов, О.В. Расширение полосы согласования передающих вещательных антенных систем диапазона ДВ для работы в режиме DRM / О.В.Варламов, В.Д.Горегляд // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – №1. – С. 18-22.

25. Варламов, О.В. Разработка алгоритма и программных средств проектирования антенно-согласующих цепей цифровых радиовещательных передатчиков стандарта DRM / О.В.Варламов // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – №2. – С. 47-50.

26. Варламов, О.В. Разработка отечественной нормативной базы цифрового радиовещания стандарта DRM / О.В.Варламов // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Т. 7. – № 9. – С. 47-50.

27. Варламов, О.В. Особенности частотно-территориального планирования сетей радиовещания DRM диапазонов НЧ и СЧ / О.В.Варламов // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – № 9. – С. 43-46.

28. Варламов, О.В. Разработка требований к приемному оборудованию сетей цифрового радиовещания стандарта DRM / О.В.Варламов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – № 9. – С. 39-42.

29. Варламов, О.В. Качественные характеристики звукового тракта в системе DRM / О.В.Варламов // Век качества. – 2014. – № 1. – С. 48-52.

30. Варламов, О.В. Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters / О.В.Варламов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – № 2. – С. 59-60.

31. Варламов, О.В. Корректное планирование сетей DRM вещания / О.В.Варламов // Электросвязь. – 2014. № 6. – С. 26-34.

32. Варламов, О.В. Использование необыкновенной волны для цифрового радиовещания DRM зенитным излучением / О.В.Варламов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – № 1. – С. 32-38.

33. Варламов, О.В. Исследование цифрового радиовещания DRM в диапазоне СВ в зоне фединга / О.В.Варламов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9. – № 2. – С. 41-45.

34. Varlamov O. The radio noise effect on the coverage area of DRM broadcast transmitter in different regions // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т.9. – № 2. – С. 90-93.

35. Варламов, О.В. Способ организации глобальной сети цифрового радиовещания в диапазоне ДВ / О.В.Варламов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – № 5. – С. 63-68.

36. Варламов О.В., Чугунов И.В. Расчет частотно-расширительной цепи для DRM передатчиков диапазонов ДВ и СВ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611512 от 04.02.2016 (дата публикации 20.02.2016).

37. Varlamov O.V. Analog to digital signal power ratio in simulcast DRM transmission // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Т. 10. – №12. – С. 81-84.

В других изданиях:

38. Варламов, О.В. Современные средневолновые радиовещательные передатчики / О.В.Варламов // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 1999. – №1. – С. 28-34.

39. Варламов, О.В. Мощные коротковолновые радиовещательные передатчики / О.В.Варламов // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 1999. – №3. – С. 40-47.

40. Варламов, О.В. Критерии качества передающего устройства для стандарта DRM и измерительное оборудование / О.В.Варламов, В.Г.Лаврушенков // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2004. – №3. – С. 44-48.

41. Варламов, О. Уточнение отдельных величин защитных отношений для цифрового радиовещания стандарта DRM. Результаты лабораторных и эфирных измерений / О.Варламов, В.Лаврушенков, Б.Козыревский, В.Калюга // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2006. – № 5. – С. 56-59.

42. Иванюшкин Р.Ю., Варламов О.В., Сягаев А.К. Нелинейные искажения сигнала стандарта DRM в синтетических схемах линейного усиления / В сборнике: Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения. Материалы XV межрегиональной научно-технической конференции. Нижний Новгород, 2007. – С. 301-310.

43. Варламов О.В., Громорушкин В.Н., Лаврушенков В.Г., Чугунов И.В. Измерительный прибор для оперативного контроля параметров передатчиков цифровой радиосвязи и радиовещания диапазонов длинных, средних и коротких волн / В книге:

«Труды Московского Технического Университета Связи и Информатики». – Москва, 2008. – С. 211-215.

44. Варламов О.В., Лаврушенков В.Г. Защитные отношения в системе цифрового радиовещания DRM при нескольких мешающих сигналах / В книге: «Труды Московского Технического Университета Связи и Информатики». – Москва, 2008. – С. 216-219.

45. Варламов О.В., Громорушкин В.Н., Лаврушенков В.Г. Передатчики для перспективных систем радиосвязи / В книге: «Труды Московского Технического Университета Связи и Информатики». – Москва. – 2008. – С. 220-223.

46. Варламов, О.В. Использование зенитного излучения для организации цифровой радиосвязи, цифрового радиовещания и передачи сигналов оповещения / В книге: Применение космических технологий для развития арктических регионов. Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции с международным участием. Архангельск. – 2013. – С. 330.

47. Варламов, О.В. Об организации общегосударственной сети цифрового радиовещания в диапазоне ДВ / Международная конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий». Труды РНТОРЭиС имени А.С. Попова. Серия: Научная сессия, посвященная Дню радио. Выпуск: LXIX. Москва. – 2014. – С. 16-19.

48. Варламов О.В., Пестряков А.В., Чугунов И.В. Программно-аппаратный комплекс для изучения работы радиопередатчиков, построенных по методу раздельного усиления составляющих модулированных колебаний при передаче сложных АФМ сигналов // XIII Международная научно-методическая конференция образовательных организаций, реализующих направление подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Труды конференции. – Москва-Ярославль, 2014. – С. 93-97.

49. Варламов О.В. Исследование энергетических характеристик цифрового усилителя мощности OFDM сигналов диапазона УВЧ с дельта-сигма модулятором / О.В.Варламов, И.В.Чугунов // Научные технологии в космических исследованиях земли. – 2015. – № 2. – С. 30-33.

50. Варламов, О.В. Применение крупно-кластерных синхронных зон диапазона ДВ для организации сетей DRM вещания на территориях стран РСС / В книге: 10-я Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества». Сборник трудов. Москва. – 2016. – С. 89-90.

Подписано в печать 07.02.2017.
Формат 60x84/16. Печать офсетная.
Печ. л. 2. Тираж 120 экз. Заказ 72.

Отпечатано в типографии
ООО «ИД Медиа Пабlishер»
111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8, стр. 1