

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

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1 ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕТЕЙ РАДИОВЕЩАНИЯ	21
1.1 Введение	21
1.2 Качественные характеристики звукового тракта в системе DRM	22
1.3 Сравнение радиусов зон покрытия в режимах АМ и DRM	32
1.4 Эффективность вещания в различных диапазонах частот	40
1.5 Планировавшаяся топология сети цифрового радиовещания стандарта DRM для РФ	43
1.6 Разработка отечественной нормативной базы цифрового радиовещания стандарта DRM	47
1.6.1 Требования на спектральные характеристики выходного сигнала	47
1.6.2 Требования на отношение сигнал-шум в выходном сигнале передатчика	50
1.6.3 Стандарты на систему DRM	52
1.7 Выводы	53
2 ПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА DRM	55
2.1 Требования к передающим устройствам DRM	55
2.2 Способы построения мощных радиовещательных передатчиков с высоким КПД	57
2.2.1 Радиовещательные передатчики диапазона ВЧ	57
2.2.2 Передатчики радиосвязи диапазона ВЧ	61
2.2.3 Радиовещательные передатчики диапазонов НЧ и СЧ	65
2.2.3.1 Мощный радиочастотный тракт	66
2.2.3.2 Передатчики с ШИМ модулятором	68
2.2.3.3 Цифровые передатчики	71
2.2.3.4 Цифровые передатчики с линеаризацией проходной характеристики методом дефазирования	73
2.3. Разработка требований к характеристикам линейных передатчиков	77

2.3.1 Выбор метода анализа	78
2.3.2 Установка для исследования влияния нелинейностей DRM передатчика на величину MER в выходном сигнале	79
2.3.3 Результаты анализа влияния нелинейности характеристик передающего устройства на величину MER и спектральные характеристики выходного сигнала DRM	83
2.4. Разработка требований к характеристикам передатчиков с отдельным усилением	87
2.5. Разработка требований к передатчикам с цифровым преобразованием огибающей	90
2.6. Разработка требований к передатчикам с дефазированием	91
2.6.1 Принцип действия радиовещательного передатчика, построенного по методу дефазирования (РПДФ)	92
2.6.2 Разработка математической модели РПДФ	94
2.6.3 Исследование внеполосных излучений РПДФ при работе в режиме цифрового радиовещания	97
2.6.4 Разработка требований к допустимой асимметрии канальных сигналов РПДФ при работе в режиме ЦРВ	100
2.7 Выводы	100
3 ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ В РЕЖИМЕ DRM	
3.1 Требования к КСВ антенных систем в режимах АМ и DRM	103
3.2 Анализ потенциальных возможностей LC- согласования антенных систем диапазона НЧ	104
3.3 Принципы построения частотно-расширительных цепей	107
3.3.1 Согласование антенных систем диапазона НЧ с помощью RLC цепей.....	107
3.3.2 Варианты построения ЧРЦ в последовательной и параллельной конфигурациях	108
3.4 Методика расчета и энергетическая эффективность ЧРЦ	110

3.4.1	Разработка методики проектирования ЧРЦ	110
3.4.2	Анализ энергетической эффективности ЧРЦ в зависимости от параметров антенной системы	112
3.4.3	Анализ различных вариантов ЧРЦ по критериям технической реализуемости и экономической эффективности	114
3.4.4	Потери в ЧРЦ в различных режимах работы передатчика	117
3.5	Разработка алгоритма проектирования антенно-согласующих цепей	118
3.5.1	Проектирование ФНЧ-трансформаторов	119
3.5.2	Разработка инженерных средств проектирования ЧРЦ	120
3.5.3	Пример проектирования АСЦ, обеспечивающей возможность использования режима Simulcast в диапазоне НЧ	123
3.6	Практическая применимость и ожидаемый экономический эффект	125
3.7	Выводы	126
4	РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ПРИЕМНОМУ ОБОРУДОВАНИЮ СЕТЕЙ ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ СТАНДАРТА DRM	127
4.1	Введение	127
4.2	Измерения чувствительности образцов DRM приемников	128
4.2.1	Измерения чувствительности DRM приемников по входу для внешней антенны	129
4.2.2	Измерения чувствительности по напряженности электромагнитного поля	131
4.3	Анализ возможности обеспечения требуемой чувствительности бытовых приемников DRM в диапазонах НЧ и СЧ	136
4.4	Разработка требований на параметры приемного оборудования сетей ЦРВ стандарта DRM	139
4.4.1	Требования к основным функциональным параметрам	140
4.4.2	Требования к основным радиочастотным параметрам	142
4.5	Разработка методов измерений радиочастотных параметров приемного оборудования сетей ЦРВ стандарта DRM	145
4.6	Выводы	147

5 ЗАЩИТНЫЕ ОТНОШЕНИЯ И РАБОТА СЕТИ ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ В ПЕРЕХОДНЫЙ ПЕРИОД	148
5.1 Введение	148
5.2 Уточнение отдельных величин защитных отношений	149
5.3 Защитные отношения для сигнала ЦРВ при одновременном воздействии произвольного количества мешающих сигналов	154
5.4 Исследование условий использования цифрового радиовещания стандарта DRM при работе в совмещенном режиме (Simulcast) с учетом параметров существующей бытовой радиоприемной аппаратуры	163
5.4.1 Анализ международного опыта вещания в стандарте DRM в НЧ, СЧ диапазонах при работе в совмещенном режиме (Simulcast)	163
5.4.2 Исследование качественных показателей приема АМ в режиме Simulcast	168
5.5 Разработка рекомендаций по соотношению мощностей аналогового и цифрового сигналов на переходный период	171
5.5.1 Соотношение мощностей при замещении аналогового сигнала цифровым	171
5.5.2. Энергетические характеристики и зоны покрытия в режиме Simulcast	172
5.6 Выводы	175
6 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ ОСНОВ МЕТОДИКИ ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ РАДИОВЕЩАНИЯ DRM ДИАПАЗОНОВ НЧ И СЧ	178
6.1 Введение	178
6.2 Анализ и систематизация имеющихся публикаций и международного опыта по теме работы	180
6.2.1 Анализ международных документов (Резолюций, Рекомендаций), относящихся к цифровому радиовещанию	182
6.2.2 Анализ результатов экспериментальных исследований вещания в стандарте DRM в НЧ, СЧ диапазонах	182

6.3	Параметры и критерии, используемые при расчете ЭМС РЭС цифрового радиовещания стандарта DRM	186
6.3.1	Вариации напряженности поля земной волны	187
6.3.2	Референсная точка вариаций напряженности поля земной волны	190
6.3.3	Вариации напряженности поля ионосферной волны	192
6.3.4	Напряженность поля атмосферных шумов и промышленных помех...	193
6.3.4.1	Напряженность поля промышленных помех	193
6.3.4.2	Оценка максимальной напряженности поля атмосферных шумов...	195
6.3.4.3	Распределение атмосферных шумов по территории Земли	196
6.3.4.4	Процедура учета атмосферных шумов	199
6.4	Экспериментальные исследования зон обслуживания сетей радиовещания DRM диапазонов НЧ и СЧ	202
6.4.1	Экспериментальные исследования зоны обслуживания DRM передатчика в диапазоне НЧ	203
6.4.1.1	Подготовка необходимого оборудования для организации опытного радиовещания в диапазоне НЧ	204
6.4.1.2	Расчет зоны покрытия	205
6.4.1.3	Разработка методики измерений и выбор точек на местности	208
6.4.1.4	Проведение измерений зон покрытия	210
6.4.1.5	Проведение экспериментальных исследований цифрового радиовещания стандарта DRM в диапазоне НЧ с передатчиком повышенной мощности	212
6.4.2	Измерение уровня шумов в населенных пунктах и помех от различного электрического и радиооборудования в диапазоне НЧ	213
6.4.2.1	Измерение уровня атмосферных шумов и импульсных помех в различных типах населенных пунктов	213
6.4.2.2	Измерение уровней бытовых помех от различного электрического и радиооборудования	215
6.4.3	Экспериментальные исследования зоны обслуживания DRM передатчика в диапазоне СЧ	220

6.4.3.1 Состав оборудования для проведения измерений в диапазоне СЧ ...	221
6.4.3.2 Расчет зоны покрытия	222
6.4.3.3 Проведение измерений зон покрытия в светлое время суток	226
6.4.3.4 Проведение измерений зон покрытия в темное время суток	229
6.4.4 Исследование цифрового радиовещания DRM в диапазоне СЧ в зоне фединга	231
6.4.5 Мобильный приём в различных ландшафтных условиях - низины, ЛЭП, тоннели	238
6.5 Выводы	240
7 РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ СЕТИ ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ РФ	244
7.1 Введение	244
7.2 Предпочтительные для использования частоты и радиусы зон обслуживания в различных регионах	247
7.3 Преимущества использования диапазона НЧ для ЦРВ в высоких широтах	253
7.4 Решение проблемы темного времени суток	254
7.5 Особенности построения одночастотных сетей ЦРВ стандарта DRM....	260
7.5.1 Методика расчета зоны синхронизма.....	262
7.5.2 Рассмотрение возможных сценариев расположения передатчиков.....	263
7.6 Пример разработки архитектуры сети государственного радиовещания РФ	270
7.7 Выводы	275
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	277
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	282
ПРИЛОЖЕНИЕ А Приемник DRM-30 (для системы цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц) Общие технические условия (Базовые технические характеристики. Предоставляемые сервисы)	300
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Приемник DRM-30 (для системы цифрового	

радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц) Методы электрических высокочастотных измерений	315
ПРИЛОЖЕНИЕ В Моделирование влияния помехи от DRM составляющей приёму АМ сигнала в системе Simulcast	332
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акты внедрения.....	345

ВВЕДЕНИЕ

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 [157, 158] 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 [167], в том числе и отечественная система РАВИС [59, 60]. 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 ИТУ Регионе 1, 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» [89]. 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, 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 ортогонального 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 [136-142, 159, 165, 166]. 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 [116, 133, 149, 154, 155], Д. Гуерры [127, 128, 130, 132, 153], А. Вааля [145, 146, 172], А. Мерфи [111, 147], В. Фишера [143].

По тематике ЦРВ стандарта DRM в РФ известны теоретические работы А.Ю. Никитина [73] и Р.М. Ставиской [94], посвященные исследованию возможности построения синхронных зон вещания в диапазоне ВЧ. Цикл статей,

в том числе с русскоязычным изложением первой редакции стандарта [123], опубликован А.Н. Иванчиным и С.Г. Рихтером [63]. Ряд работ, частично основанных на результатах зарубежных экспериментальных исследований, а частично на результатах собственных измерений в диапазонах СЧ и ВЧ, опубликован Ю.А. Черновым [97-101, 103-105]. Исследования расширения стандарта DRM в диапазоне ОБЧ (DRM+) начаты под руководством Ю.А. Ковалгина [41, 43, 44].

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.

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 [137, 141], вошедших в Отчет МСЭ-Р BS.2384-0 «Implementation considerations for the introduction and transition to digital terrestrial sound and multimedia broadcasting» (07/2015) [166], 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" [90].

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).

Результаты исследований по теме диссертации регулярно докладывались на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава МТУСИ в 1997...2006 годах.

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.

Большую помощь в организации и проведении эфирных исследований оказывали сотрудники ЗАО «МРБ», сотрудники Департамента радиовещания и радиосвязи ФГУП «РТРС», и филиалов ФГУП «РТРС»: Московского регионального центра, Краснодарского КРТПЦ, Калининградского ОРТПЦ, Архангельского ОРТПЦ, Дальневосточного РЦ и Сибирского РЦ, за что автор выражает им искреннюю благодарность.

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, в том числе акты, подтверждающие внедрение и использование результатов.

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 затратами. 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.

1 ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕТЕЙ РАДИОВЕЩАНИЯ

1.1 Введение

Одной из важнейших характеристик любой сети радиовещания является зона обслуживания единичного передатчика, определяющая требуемое количество передатчиков и антенно-мачтовых сооружений для покрытия заданной территории. Количество передатчиков влияет как на капитальные затраты на построение сети, так и на последующие эксплуатационные расходы. Зоны обслуживания передатчиков наземных сетей радиовещания (независимо от вида применяемой модуляции) определяются свойствами распространения радиоволн различных диапазонов частот. Так, радиус зоны обслуживания в диапазоне ОВЧ (частоты выше 30 МГц) определяется расстоянием прямой видимости и не превышает десятков километров. В диапазоне ВЧ (3...30 МГц) при использовании ионосферного распространения радиоволн зона обслуживания может иметь радиус от более пятисот до единиц тысяч километров, находясь при этом в большинстве случаев на удалении от передатчика. В диапазоне НЧ зона обслуживания имеет радиус в сотни километров и практически не зависит от солнечной активности. Таким образом, диапазоны частот ниже 30 МГц обладают уникальными свойствами распространения радиоволн, которые позволяют обеспечить большие зоны покрытия, а также возможность портативного и мобильного приема. Однако использовавшиеся в этих диапазонах частот аналоговые технологии не обеспечивали достаточно высокого качества и требовали применения передатчиков большой мощности.

Для перевода радиовещания в диапазонах частот ниже 30 МГц на цифровые технологии в 1998 году был создан Консорциум Всемирное цифровое радио (DRM – Digital Radio Mondiale) – некоммерческая организация, разработавшая стандарт DRM.

Система цифрового наземного радиовещания DRM – единственная полностью разработанная система ЦРВ для всех диапазонов ниже 30 МГц (НЧ,

СЧ и ВЧ), бесплатная для конечного пользователя. Эта система полностью совместима с существующим в этих диапазонах частотным распределением для аналогового радиовещания с амплитудной модуляцией, и обеспечивает лучшие качественные и энергетические характеристики сети вещания. Рассмотрим их более подробно.

1.2 Качественные характеристики звукового тракта в системе DRM

В отличие от передатчиков аналогового радиовещания с амплитудной и частотной модуляцией, на качественные параметры радиовещательных (т.е. звуковых) трактов которых имеются соответствующие нормативные документы [47, 48], для передатчиков, работающих в стандарте DRM, подобных документов в настоящее время не существует [23]. Данное обстоятельство является совершенно естественным для цифровой техники в целом, поскольку искажения (частотные, нелинейные и т.д.), возникающие в передатчике, не влияют на качество декодированного сигнала – до тех пор, пока не будет превышен допустимый для декодирования порог. Именно поэтому на передатчики ЦРВ стандарта DRM в основном установлены нормы только на параметры, определяющие электромагнитную совместимость [90]. Единственным нормируемым параметром, определяющим «качество» передатчика, является допустимая величина MER, которая выбрана на 10...20 дБ (в зависимости от режима помехоустойчивости сигнала DRM) выше порога декодирования.

Таким образом, качественные параметры радиовещательного передатчика (в привычном понимании это диапазон передаваемых звуковых частот, коэффициент гармоник, интермодуляционные искажения, величина переходного затухания между стереоканалами и т.д.) в системе DRM определяются исключительно параметрами звукового кодирования. Возможность использования того или иного типа кодера, предусмотренного в системе DRM, и их режимов работы определяются доступной скоростью передаваемого

цифрового потока (рисунок 1.1 [165]), которая, в свою очередь, определяется шириной полосы занимаемых частот и режимом помехоустойчивости.

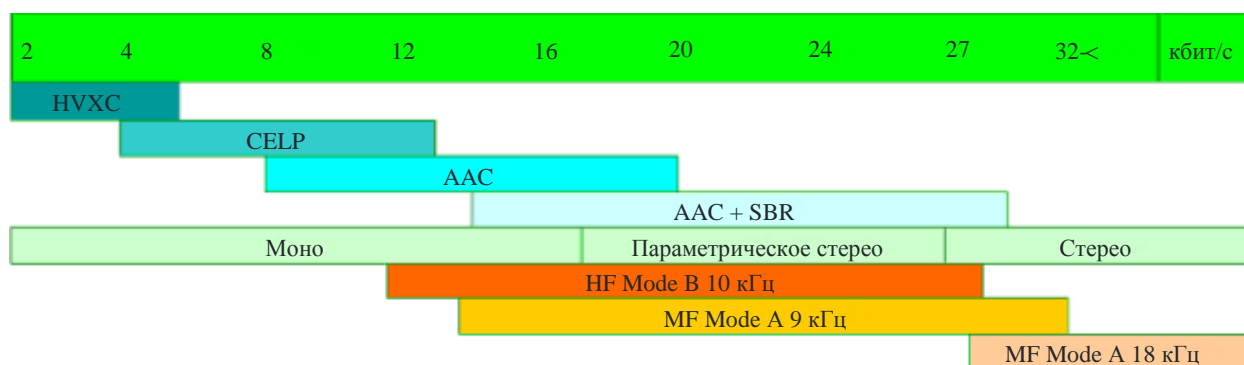


Рисунок 1.1 - Требуемые скорости передачи для различных аудиокодеров, используемых в системе DRM [165]

Основные характеристики используемых кодеров следующие.

Для кодера **HVXC** (только речь) – скорость передачи данных 2000-6560 бит/с, может быть использована технология **SBR** для расширения диапазона аудио частот от 4 кГц до 8 кГц. Может использоваться при организации дополнительных речевых каналов, например, при передаче мультязычных новостей.

Для кодера **CELP** (речь, возможна музыка на высших скоростях) – скорость передачи данных 3860-14000 бит/с, может быть использована технология **SBR** для расширения диапазона аудио частот до 14 кГц.

Для кодера **AAC** (речь, музыка) – при увеличении скорости передачи данных от 8 до 20 кбит/с диапазон аудио частот расширяется от 4 до 6 кГц. Универсальный аудиокодер, который предназначен в основном для «сложных» ВЧ каналов с низкими скоростями передачи данных

Для кодера **AAC+SBR** лимитированы три значения диапазона аудио частот:

- 10 875 Гц – при скоростях передачи данных 14 000-18 460 бит/с;
- 13 125 Гц – при скоростях передачи данных 18 480-22 460 бит/с;
- 15 375 Гц – при скоростях передачи данных 22 480-28 460 бит/с.

Основное применение – в стандартных ВЧ каналах со скоростями 17-21 кбит/с.

Параметрическое стерео (**Parametric Stereo**) – минимальная скорость передачи данных 16480 бит/с, три значения диапазона аудио частот – как у AAC+SBR моно. Может применяться в диапазонах НЧ и СЧ или в «хороших» односкачковых ВЧ каналах.

AAC+SBR Stereo – минимальная скорость передачи данных 26480 бит/с, два значения диапазона аудио частот:

–13 125 Гц – при скоростях передачи данных 26 480-28 480 бит/с;

–15 375 Гц – при скоростях передачи данных 28 480 бит/с.

Может применяться в диапазонах НЧ и СЧ и в сдвоенных (18 кГц) СЧ каналах.

Доступные в основном канале обслуживания системы DRM скорости цифрового потока для режимов помехоустойчивости, применяемых в диапазонах НЧ и СЧ, приведены в таблицах 1.1, 1.2 [165]. Следует отметить, что варианты с минимальной скоростью передачи данных (т.е., с максимальной помехозащитой) не устраивают ни вещателей, ни слушателей по качеству аудио сигнала и могут использоваться только для передачи речевой информации. «Приемлемое качество» звукового контента достигается при скоростях передачи не менее 14 кбит/с (желательно более 20...22 кбит/с), для чего при использовании полос частот 9 или 10 кГц требуется ОСШ в точке приема от 11 дБ до 13 дБ (и от 15 дБ до 20 дБ соответственно) в зависимости от условий распространения. Возможность использования более высоких скоростей передачи (и получения более высокого качества аудио сигнала) требует более высокого ОСШ, и, соответственно, повышения мощности передатчика при сохранении зоны обслуживания, на что вещатели обычно идут неохотно. Более подробно вопросы «размена» качества аудио на радиус зоны обслуживания обсуждаются в параграфе 1.3.

Таблица 1.1 – Скорости цифрового потока в различных комбинациях для режима помехоустойчивости А (земная волна) [165]

Схема модуляции	№ уровня защиты	Средняя скорость кодирования	Полоса частот, кГц					
			4.5	5	9	10	18	20
64-QAM	0	0,5	9392.5	10520	19695	22142.5	40935	45840
	1	0,6	11272.5	12740	23625	26570	49115	54995
	2	0,71	13305	15045	27892.5	31367.5	57982.5	64940
	3	0,78	14745	16660	30910	34770	64260	71970
16-QAM	0	0,5	6262.5	7080	13125	14760	27285	30555
	1	0,62	7827.5	8850	16412.5	18452.5	34112.5	38200

Таблица 1.2 – Скорости цифрового потока в различных комбинациях для режима помехоустойчивости В (ионосферная волна) [165]

Схема модуляции	№ уровня защиты	Средняя скорость кодирования	Полоса частот, кГц					
			4.5	5	9	10	18	20
64-QAM	0	0,5	7200	8280	15332.5	17477.5	31817.5	35760
	1	0,6	8640	9930	18402.5	20975	38180	42905
	2	0,71	10200	11730	21720	24750	45065	50660
	3	0,78	11300	12990	24075	27450	49950	56140
16-QAM	0	0,5	4800	5520	10222.5	11655	21210	23835
	1	0,62	6000	6900	12777.5	14565	26515	29800

Вместе с тем, понятие «приемлемого качества» к настоящему времени не стандартизовано и не формализовано. В рекламных материалах DRM консорциума и многочисленных зарубежных и отечественных публикациях фигурирует понятие «качество, сопоставимое с УКВ вещанием», основанное на экспертных оценках слушателей (например, [111]) без конкретизации технических характеристик.

Известно, что качество работы аудиокодеров с потерями можно определять только на основании экспертных оценок по результатам прослушивания, а инструментальные методы измерения их характеристик не дают адекватного представления о корректности их работы.

Однако большое количество режимов помехоустойчивости, предусмотренное в стандарте DRM, и соответствующее им количество различных скоростей передачи данных с мелким шагом между ними, делают задачу экспертного определения качества звучания для всех возможных комбинаций трудновыполнимой и чрезмерно затратной. При этом у вещателей и операторов,

привыкших ориентироваться на стандартизованные «классы качества» постоянно возникают вопросы – какая же полоса частот будет доступна в том или ином режиме?

Для ответа на эти вопросы и с целью формализации качественных параметров звукового кодирования в различных режимах помехоустойчивости системы DRM (т.е., при различных скоростях передачи данных) была проведена серия инструментальных измерений – при полном понимании того, что они не дадут адекватного представления о действительном качестве аудио.

При проведении инструментальных измерений проверялись все параметры, которые нормируются при испытаниях как АМ, так и ЧМ передатчиков (диапазон модулирующих частот, допустимое отклонение АЧХ, коэффициент гармоник, интермодуляционные искажения, защищенность от интегральной помехи, переходное затухание между стереоканалами). Результаты этих измерений позволяют заинтересованным структурам (вещателям и операторам) проводить сравнение качественных характеристик DRM передатчиков с параметрами передатчиков АМ и ЧМ вещания и проводить первоначальный выбор желательных для них режимов помехоустойчивости DRM, уточняя его посредством последующего прослушивания.

Сводный перечень параметров, характеризующих качество радиовещательного тракта передатчиков АМ и ЧМ вещания, составленный на основании [47, 48], приведен в таблице 1.3.

Инструментальные измерения параметров радиовещательного тракта передатчика в режиме DRM проводились в филиале РЦ-9 МРЦ РТРС на передатчике РВ-71 в составе: передатчик ПСЧ-100, DRM кодер-модулятор DMOD3. В качестве измерительного демодулятора использовался контрольно-измерительный приемник DT700 фирмы Fraunhofer.

Подготовленный набор тестовых сигналов включал в себя все необходимые сигналы для определения параметров АМ и ЧМ передатчиков в соответствии с таблицей 1.3, а также набор музыкальных фрагментов для последующего прослушивания.

Таблица 1.3 – Сводный перечень параметров, характеризующих качество радиовещательного тракта передатчиков АМ и ЧМ вещания

Наименование параметра	АМ	ЧМ стерео
Номинальный диапазон модулирующих частот, Гц	50-10000	30-15000
Допустимое отклонение АЧХ, дБ, не более: ЧМ АМ: до 75 Гц и свыше 6600 Гц АМ: от 75 Гц до 6600 Гц	+0,7;-1,3 ±0,7	±0,8
Коэффициент гармоник, %, не более: ЧМ (м=100%, до 7000 Гц) АМ: до 100 Гц (м=10%, 90%/м=50%) АМ: от 100 Гц до 4000 Гц (м=10%, 90%/м=50%) АМ: свыше 4000 Гц (м=10%, 90%/м=50%)	3,8/1,5 2,0/1,0 4,0/2,0	0,5
Интермодуляционные искажения, %, не более: АМ: м=90% АМ: м=50% ЧМ, 3/5 порядков, дБ, не более	10 6	-50/-55
Уровень невзвешенного (интегрального) шума, дБ, не более	-58	-62
Уровень взвешенного (псофометрического) шума, дБ, не более	-60	-65
Переходное затухание между стереоканалами, дБ: 1000 Гц 120 Гц, 400 Гц, 5000 Гц, 10000 Гц		50 40

Для всех доступных полос частот (4,5; 5; 9 и 10 кГц) был установлен режим помехоустойчивости «А» для модуляции 16 QAM с уровнями помехозащищенности «0» и «1» и для модуляции 64 QAM с уровнями помехозащищенности «0», «1», «2», «3». При достаточных скоростях передачи включался режим SBR (AAC+). Для некоторых режимов помехоустойчивости, кроме режима «моно», также измерялись параметры в режимах «стерео» и «параметрическое стерео». Записанные файлы выходного декодированного сигнала с тестовыми сигналами сохранялись для дальнейшей обработки, а с музыкальными фрагментами – для прослушивания.

Результаты инструментальных измерений были опубликованы автором в [15] и показали, что уровни невзвешенного (интегрального) шума и взвешенного (псофометрического) шума во всех режимах работы составляли менее -75 дБ при

норме на АМ не более -58/-60 дБ и норме на ЧМ не более -62/-65 дБ соответственно.

Переходное затухание между стереоканалами в режимах «стерео» составляло -77/-78 дБ при норме в режиме ЧМ -40/-50 дБ. Переходное затухание между стереоканалами в режиме «Параметрическое стерео», в соответствии с алгоритмом его работы, зависит от частоты и составляет -9 дБ на частоте 120 Гц; -11,6 дБ на частоте 400 Гц; -14 дБ на частоте 1000 Гц; -21 дБ на частоте 5000 Гц и -35 дБ на частоте 10000 Гц. Остальные результаты инструментальных измерений приведены в таблице 1.4. Приведенные значения коэффициента гармоник соответствуют худшему случаю во всем диапазоне частот. Интермодуляционные искажения определены только для тех режимов, полоса пропускания которых позволяет их измерить.

Как видно из таблицы 1.4, передатчик во всех исследованных режимах помехоустойчивости DRM имеет существенно меньшие интермодуляционные искажения и коэффициент гармоник, чем требуется нормами на передатчики АМ и ЧМ вещания. Диапазон модулирующих частот в семи режимах помехоустойчивости не уже, чем для передатчиков с ЧМ. Еще в 10 режимах помехоустойчивости диапазон модулирующих частот уже, чем для передатчиков с ЧМ, но шире, чем для передатчиков с АМ. Графическое представление зависимости диапазона модулирующих частот от режима помехоустойчивости и соответствующей ему скорости передачи данных приведено на рисунке 1.2.

Если исследовать параметры радиовещательного тракта передатчика в режиме DRM с помощью традиционных аналоговых измерительных приборов как «черного ящика», т.е. не обладая априорной информацией о том, что в нем используется цифровое кодирование, можно получить очень высокие характеристики, недостижимые для передатчиков с АМ и с ЧМ.

Применяемая методика инструментальных измерений, использующая спектральный анализ, позволила проявить некоторые известные особенности низкоскоростного цифрового кодирования.

Таблица 1.4 – Сводные результаты инструментальных измерений

Наименование параметра	Диапазон модулирующих частот, Гц	Коэффициент гармоник, %	Интермодуляционные искажения, дБ
Режим работы			
DRM A10/64/3	16700	0,1	-75
DRM A10/64/2	16700	0,05	-75
DRM A9/64/3	16700	0,05	-75
DRM A10/64/3 Стерео	15000	0,1	-75
DRM A10/64/3 Парам. стерео	15000	0,1	-75
DRM A9/64/3 Стерео	15000	0,2	-75
DRM A9/64/1	15000	0,1	-75
Норма на ЧМ стерео	30-15000	0,5	-50/-55
DRM A9/64/2	13800	0,1	-75
DRM A10/64/1	13700	0,2	-75
DRM A9/64/0	12700	0,05	-60
DRM A10/64/0	12000	0,05	-75
DRM A10/16/1	10800	0,05	-60
DRM A10/16/0	10700	0,05	-60
DRM A9/16/1	10700	0,1	-60
DRM A5/64/3	10700	0,2	-60
DRM A5/64/2	10700	0,05	-60
DRM A4,5/64/3	10700	0,05	-60
Норма на АМ	50-10000	3,8/1,5 2,0/1,0 4,0/2,0	-20/-24
DRM A4,5/64/2	3700	0,05	-
DRM A5/64/1	3100	0,05	-
DRM A4,5/64/1	2800	0,1	-
DRM A4,5/64/0	2600	0,1	-
DRM A9/16/0	2500	0,05	-
DRM A5/64/0	2500	0,05	-

В частности, отдельные спектральные составляющие в высокочастотной части спектра могут быть смещены относительно своего исходного положения. Так, на рисунке 1.3 голубым цветом представлен спектр фрагмента входного тестового сигнала, а розовым цветом – соответствующий ему спектр выходного сигнала в режиме «А», 10 кГц, 64QAM, уровень помехозащищенности «3». Из рисунка видно, что входные гармонические колебания на частотах 7, 8, 10 и 15 кГц на выходе представлены гармоническими колебаниями с несколько

другими значениями частоты. Это известная особенность данного типа звуковых кодеров, обусловленная алгоритмом их работы, которая не может быть выявлена при измерении АЧХ с помощью вольтметра.

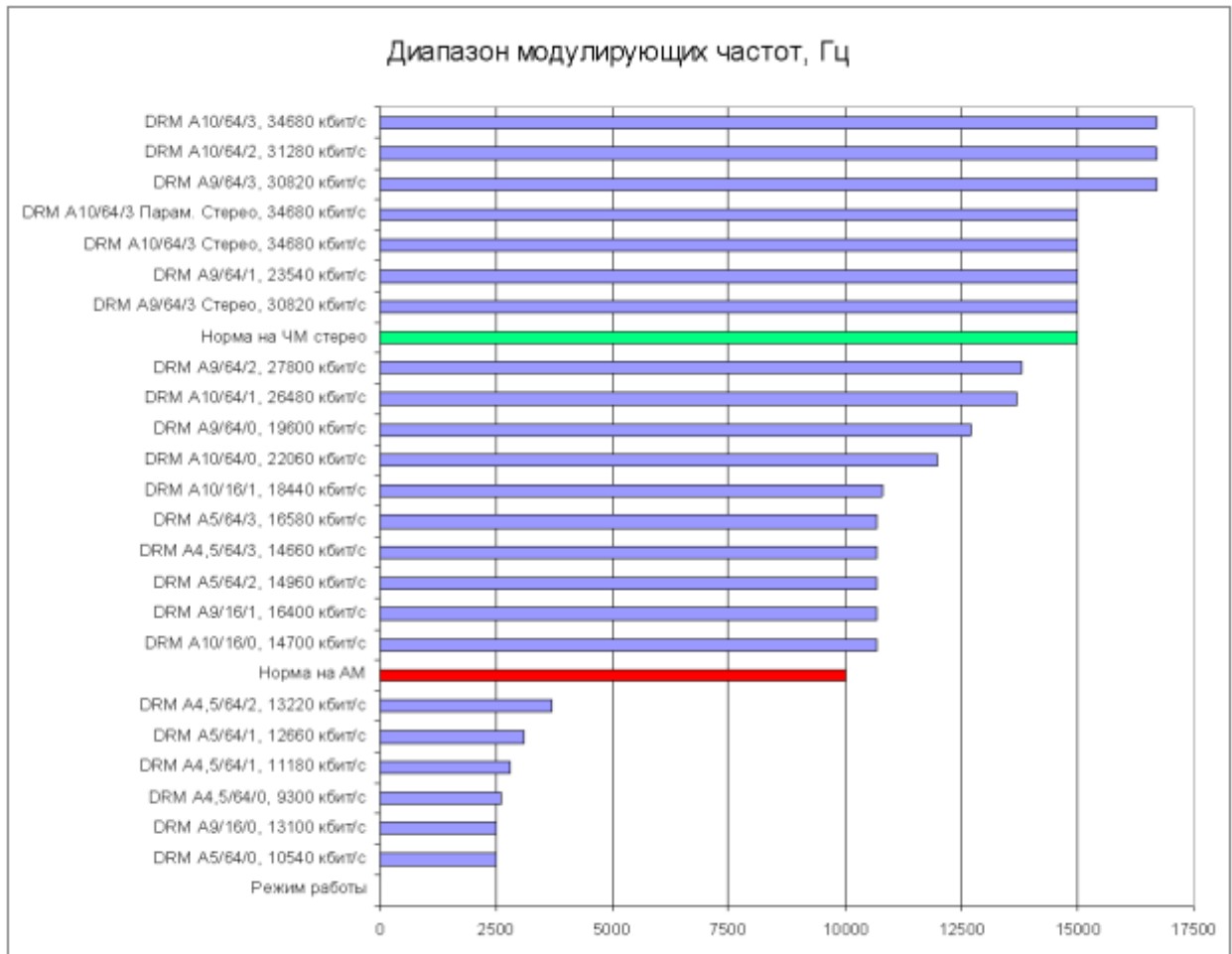


Рисунок 1.2 – Зависимость диапазона модулирующих частот от режима помехоустойчивости и соответствующей ему скорости передачи данных

Отмеченное обстоятельство еще раз подтверждает приведенное выше утверждение о том, что качество работы аудиокодеров с потерями целесообразно определять по результатам прослушивания, а результаты инструментальных измерений их характеристик можно использовать только для предварительного выбора режимов помехоустойчивости и их сравнения.

Полученные с помощью инструментальных измерений данные подтверждают результаты зарубежных исследований о том, что при скоростях передачи данных более 16,5 кбит/с качество сигнала передатчика DRM

становится не хуже, чем качество сигнала передатчика с АМ. При скоростях более 24 кбит/с качество сигнала передатчика DRM становится сопоставимым с качеством сигнала передатчика с ЧМ.

При прослушивании записанных речевых и музыкальных фрагментов, кодированных со скоростями более 20...24 кбит/с, артефакты цифровой обработки на слух практически не замечались, и качество звукового контента можно было назвать «сопоставимым с ЧМ».

Анонсированный DRM консорциумом в сентябре 2013 года новый кодек xHE-AAC (Extended High Efficiency Advanced Audio Coding) позволяет получить еще более высокое качество аудио контента при тех же скоростях кодирования.

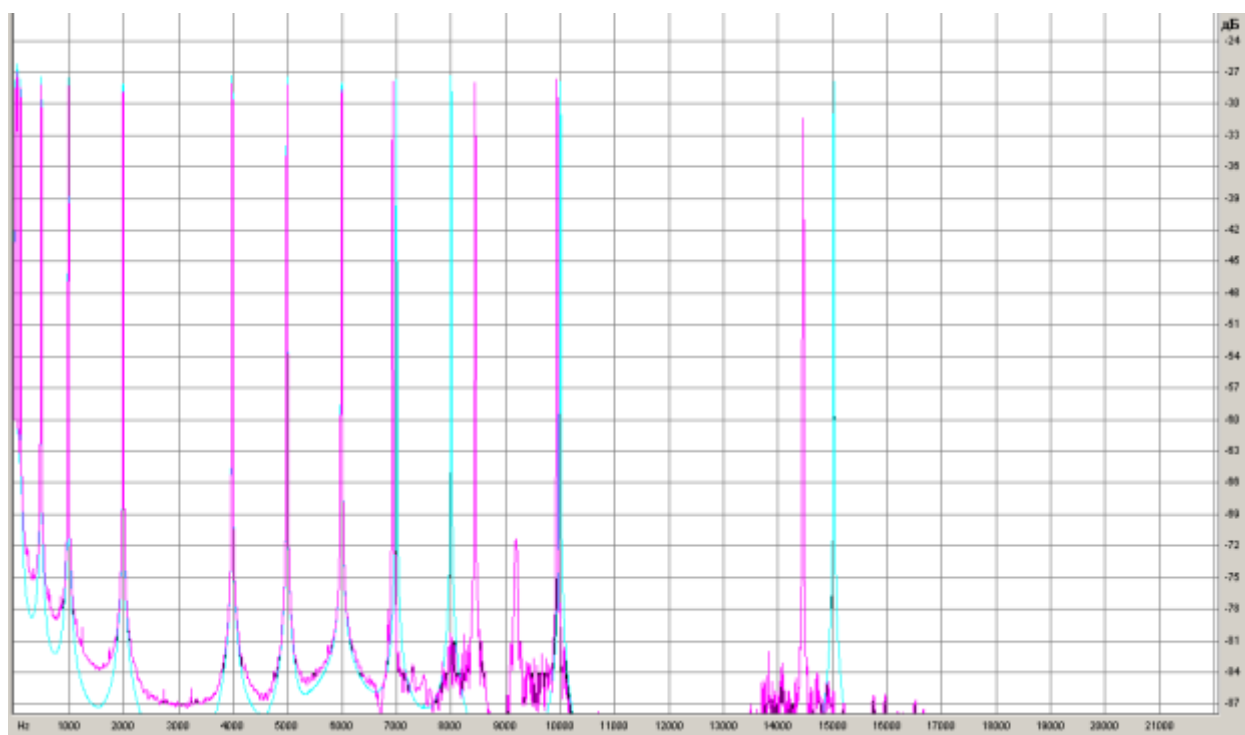


Рисунок 1.3 – Сравнение спектров входного (голубой цвет) и выходного (розовый цвет) фрагментов тестового сигнала в режиме «А», 10 кГц, 64QAM, уровень помехозащитности «3»

1.3 Сравнение радиусов зон покрытия в режимах AM и DRM

Особенностью цифрового радиовещания в диапазонах длинных и средних волн, как и любых других цифровых систем, является резко выраженный пороговый характер приема. При уменьшении отношения сигнал-шум, либо сигнал-помеха (от другой станции) всего на 1 дБ ниже требуемого для декодирования порога прием практически прекращается. Эта особенность требует проведения тщательного частотно-территориального планирования для обеспечения устойчивости работы сети с обязательным учетом статистических свойств как распространения радиоволн (включая вариации напряженности поля земной волны от времени года и от места к месту), так и распределения шумов и помех. Более подробно эти аспекты рассматриваются в Главе 5.

В разных источниках приводятся подчас противоречащие друг другу сравнительные данные о зонах покрытия в режимах AM и DRM. Рассчитаем их более корректно на практических примерах. Примем условно величину вариаций напряженности поля земной волны от времени года и от места к месту равной X дБ. Как будет показано в Главе 6, в диапазоне НЧ эта величина не превышает 5 дБ, а в диапазоне СЧ может достигать 10-13 дБ.

Требуемые для декодирования в точке приема значения ОСШ для модели канала распространения №1, соответствующего земной волне в дневное время в диапазонах НЧ и СЧ, приведены в таблице 1.5 [159]. Для модели канала распространения №2, соответствующего комбинации земной и ионосферной волн в диапазоне СЧ в темное время суток, требуемые значения ОСШ приведены в таблице 1.6 [159].

Как видно из таблиц 1.1-1.2 и 1.5-1.6, в каналах с занимаемой полосой частот 9 (10) кГц, доступные скорости цифрового потока находятся в пределах от 10,222 кбит/с до 34,77 кбит/с, а требуемое для декодирования ОСШ – в пределах от 8,6 дБ до 22,3 дБ. Это соответствует изменению требуемой мощности передатчика в 23 раза. В таких пределах и возможен «размен» качественных

характеристик передаваемого аудио сигнала на мощность передатчика или (не пропорционально) на радиус зоны покрытия.

Таблица 1.5 – Требуемое для декодирования ОСШ в модели канала распространения №1 (земная волна) [159]

Схема модуляции	№ уровня защиты	Средняя скорость кодирования	Режим устойчивости/тип занятости спектра			
			A/0 (4,5 кГц) A/1 (5 кГц)	A/2 (9 кГц) A/3 (10 кГц)	B/0 (4,5 кГц) B/1 (5 кГц)	B/2 (9 кГц) B/3 (10 кГц)
16-QAM	0	0,5	8,8	8,6	9,5	9,3
	1	0,62	10,9	10,7	11,5	11,3
64-QAM	0	0,5	14,3	14,1	14,9	14,7
	1	0,6	15,8	15,3	16,2	15,9
	2	0,71	17,5	17,1	17,9	17,7
	3	0,78	19,2	18,7	19,5	19,3

Таблица 1.6 – Требуемое для декодирования ОСШ в модели канала распространения №2 (комбинация земной и ионосферной волн) [159]

Схема модуляции	№ уровня защиты	Средняя скорость кодирования	Режим устойчивости/тип занятости спектра			
			A/0 (4,5 кГц)	A/2 (9 кГц)	B/1 (5 кГц)	B/3 (10 кГц)
16-QAM	0	0,5	9,8	9,4	10,3	10,2
	1	0,62	12,7	12,5	13,2	13,1
64-QAM	0	0,5	15,2	14,9	15,8	15,6
	1	0,6	16,6	16,3	17,3	16,9
	2	0,71	19,7	19,2	20,4	19,7
	3	0,78	22,9	22,0	22,8	22,3

Принятому для АМ-вещания в диапазонах НЧ и СЧ «нормативному» качеству [160] соответствует отношение сигнал/шум в детектированном сигнале: $ОСШ_{нч} = 26$ дБ, измеренное при 30%-ной модуляции. Это соразмерно с ОСШ по высокочастотному сигналу: $ОСШ_{вч} = 36,4$ дБ. При традиционном планировании АМ-вещания на границе зоны обслуживания передатчика (проходящей обычно в сельской местности) допускался прием с заданным качеством в течение 90% времени в 50% приемных пунктов. В течение 10% времени позволялось наличие заметных помех. В этом случае вариации напряженности поля земной волны от времени года и от места к месту можно было не учитывать. Действительно, незначительное ухудшение качества относительно «нормативного» значения

практически не влияло на разборчивость и понятность передаваемых информационных программ.

В диапазоне ВЧ для информационного АМ-вещания допускается отношение сигнал/помеха (от соканального АМ-передатчика) $ОСП_{вч} = 17$ дБ. Некоторые авторы по аналогии с этой величиной вводят понятие «информационного» качества с $ОСШ_{нч} = 17$ дБ. Следует отметить, что с юридической точки зрения использование данного критерия в диапазонах НЧ и СЧ неприменимо и рассматривается исключительно в ознакомительных целях. Будем считать эту величину критерием «информационного» качества, обеспечивающим достаточную понятность передаваемой программы и соответствующее ему $ОСШ_{вч} = 27,4$ дБ. Нужно ли в этом случае учитывать вариации напряженности поля? Очевидно, что при таких низких $ОСШ_{нч}$ о восприятии музыкальной составляющей вещания в режиме АМ говорить не приходится. Для ответа на поставленный вопрос необходимо определить $ОСШ$, соответствующее предельной разборчивости речевой компоненты вещательной программы, при ее гипотетическом использовании для передачи сигналов массового оповещения.

Рассмотрим соотношения между разборчивостью русской речи, понятностью передачи и $ОСШ$. Определение понятности речи для обычных абонентов в процессе телефонных переговоров, соответствие между различными градациями понятности передачи, а также слоговой и словесной разборчивостями приведены в [5]. Используя полученные на основании артикуляционных испытаний данные [88], можно определить зависимость показателей разборчивости (слоговой, словесной, фразовой) русской и английской речи от $ОСШ_{нч}$ по низкой частоте (рисунок 1.4). Таким образом, для каждой градации понятности передачи существует соответствующий ей диапазон значений $ОСШ_{нч}$. Учитывая средний индекс модуляции, равный 30%, можно также вычислить требуемое $ОСШ_{вч}$ по высокой частоте для режима АМ. Сводные результаты расчетов приведены в таблице 1.7.

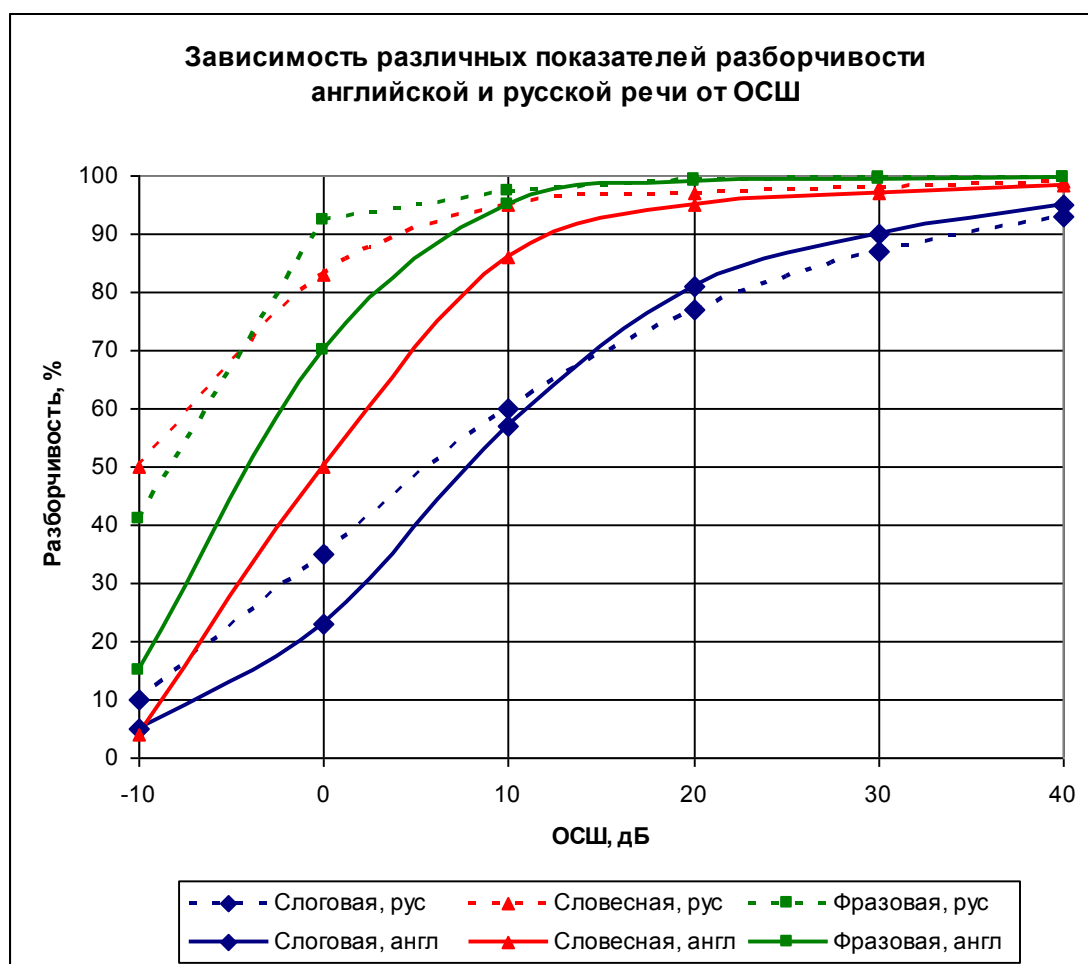


Рисунок 1.4 – Зависимость показателей разборчивости при комфортных уровнях прослушивания от ОСШ, полученная на основании данных артикуляционных испытаний [88]

Таблица 1.7 – Разборчивость речи при различных градациях понятности передачи и требуемые ОСШ по низкой и высокой частоте для АМ

Понятность передачи		Разборчивость, %			Допустимое ОСШ, дБ	
Наименование	Определение	Слоговая	Словесная	Фразовая	По НЧ	По ВЧ
Отличная	Переговоры без переспросов	80 и выше	98 и выше	99,5 и выше	23 и выше	33,4 и выше
Хорошая	Отдельные переспросы редко встречающихся слов, неизвестных фамилий, названий и т.п.	56...80	93...98	97...99,5	8...23	18,4 -33,4
Удовлетворительная	Частые переспросы, трудно разговаривать	40...56	87...93	95...97	2...8	12,6 -18,5
Предельно допустимая	Неоднократные переспросы одного и того же материала, передача отдельных слов по буквам с полным напряжением слушателей	25...40	75...87	89...95	-4...2	7-12,6

Как видно из таблицы 1.7, для «хорошей» понятности передачи требуется $OSШ_{вч}$ более 18,5 дБ, а для «удовлетворительной» – более 12,6 дБ. При $OSШ_{вч}$ менее 12,6 дБ понятность передачи становится «предельно допустимой». При $OSШ_{вч}$ менее 7 дБ наступает полная неразборчивость связного текста (срыв связи). Для английской речи, в соответствии с рисунком 1.4, ситуация будет еще хуже. Следует отметить, что данные критерии были выработаны для телефонных переговоров, в которых при «предельно допустимой» понятности передачи можно обеспечить «неоднократные переспросы одного и того же материала и передачу отдельных слов по буквам». При вещании такая возможность отсутствует, поэтому границей предельной разборчивости речевой компоненты вещательной программы следует считать $OSШ_{вч}$, равное 12,6 дБ ($OSШ_{нч}$ равно 2 дБ).

При условно принятом выше запасе на вариации напряженности поля земной волны от времени года и от места к месту, не превышающем 13 дБ, на границе зоны покрытия АМ-передатчика с «информационным» качеством ($OSШ_{вч} = 27,4$ дБ) значение $OSШ_{вч}$ может опускаться до 14,4 дБ. При этом понятность передачи переходит из категории «хорошая» в категорию «удовлетворительная», а значение $OSШ_{вч}$ пока еще остается на 2 дБ выше границы предельной разборчивости. Таким образом, при вещании с «информационным» качеством вариации напряженности поля в большинстве случаев можно не учитывать.

При определении границы зоны обслуживания передатчика с АМ по критерию предельной разборчивости речевой компоненты вещательной программы учет вариаций напряженности поля становится такой же необходимостью, как и для передатчика DRM.

Сравнение требуемых $OSШ$ в режимах АМ и DRM в сопоставимых условиях приведено в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Требуемые ОСШ в режимах АМ и DRM, $X(НЧ)=5$ дБ, $X(СЧ)=10...13$ дБ

Режим АМ		Режим DRM	
Качество аудио	Требуемое ОСШ _{Вч} , дБ	Требуемое ОСШ _{Вч} , дБ	Качество аудио
Нормативное качество (ОСШ _{НЧ} .=26 дБ)	36,4	17,1+X	А, 64QAM(2). Диапазон частот до 15 кГц, параметрическое стерео. Качество «как в УКВ ЧМ».
«Информационное» качество (ОСШ _{НЧ} .=17 дБ)	27,4	10,7+X	А, 16QAM(1). Диапазон частот 10,8 кГц.
Предельная разборчивость речи (ОСШ _{НЧ} .=2 дБ)	12,6+X	8,6+X	А, 16QAM(0). Диапазон частот 10,8 кГц. Качество «как в АМ».

При использовании для вещания одного и того же передатчика соотношение его выходной мощности в режимах АМ и DRM будет следующим:

- мощность в режиме АМ (нормируется по мощности немодулированной несущей) составит 0,25 от пиковой мощности передатчика;
- мощность в режиме DRM (нормируется как средняя мощность OFDM сигнала с пик-фактором 10 дБ) составит 0,1 от пиковой мощности передатчика;
- таким образом, средняя мощность в режиме DRM в 2,5 раза (на 4 дБ) меньше, чем в режиме АМ.

В этих вычислениях для чистоты проводимого сравнения не учитывается потенциальная (и реализованная многими производителями) возможность увеличения за счет клиппирования средней мощности сигнала DRM до уровня 0,5...0,6 от мощности в АМ.

Из последней строки таблицы 1.8 видно, что разница в требуемом ОСШ_{Вч} для случая «предельной разборчивости речи» между режимом АМ и самым помехоустойчивым режимом DRM составляет 4 дБ, т.е. точно равна разнице в средней выходной мощности при использовании одного и того же передатчика.

Это совпадение следует считать случайным, поскольку система DRM разрабатывалась не для русской речи, с ее несколько большей разборчивостью в

шумах по сравнению с английской. Тем не менее из этого следует важный практический вывод: при использовании одного и того же передатчика там, где перестанет декодироваться сигнал DRM (в его самом помехоустойчивом режиме), там и понятность передачи в режиме АМ тоже перестанет быть удовлетворительной. Таким образом, зоны обслуживания в этих режимах всегда будут равными. Аналогичная ситуация наблюдается и с «информационным» качеством. При этом средняя мощность передатчика в режиме DRM в 2,6 раза меньше, чем в режиме АМ ($P_{\text{DRM}}/P_{\text{AM}} = 0,4/(1+0,5*0,3^2) = 2,61$).

Сравнивая разницу в требуемом ОСШ_{ВЧ} в режиме АМ с «нормативным качеством» (верхняя строка таблицы 1.8) с режимом DRM А, 64QAM(2), обеспечивающим качество «как в УКВ ЧМ», составляющую 6,3 дБ, можно сделать вывод, что зона обслуживания в режиме DRM будет несколько больше. При этом переход в более помехоустойчивые режимы DRM позволит существенно увеличить радиус зоны обслуживания.

Таким образом, при правильном выборе режима помехоустойчивости, радиус зоны обслуживания в режиме DRM никогда не будет меньше, чем в АМ, – при лучшем качестве и меньшей потребляемой мощности.

Для получения строгих количественных примеров радиуса зоны обслуживания в режиме АМ следует воспользоваться зависимостью минимального значения напряженности поля от частоты, определенной для АМ-вещания в диапазонах НЧ и СЧ Планом «Женева-75» (рисунок 1.5 [61, рис. 24]). Для расчета минимальной напряженности поля в режиме DRM (на примере Московского региона) следует использовать напряженность поля атмосферных шумов (см. ниже рисунок 6.10) или величину собственного шума приемника: что больше. К ней надо прибавить необходимое для декодирования ОСШ: 10,7 дБ для режима А, 16QAM(1); в диапазоне НЧ 5 дБ (сезонные вариации напряженности поля «вниз» от принятой при планировании проводимости почвы 3 мСм/м); в диапазоне СЧ – 13 дБ (максимальные сезонные вариации напряженности поля плюс вариации от места к месту).

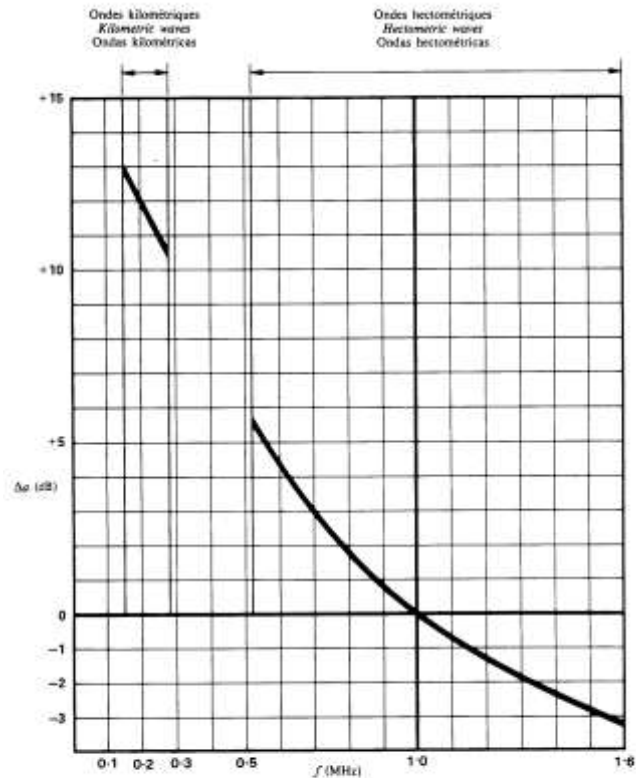


FIGURE 24 – FIGURA 24
 Variation de la valeur minimale du champ en fonction de la fréquence
 Variation of Minimum Value of Field Strength with the Frequency
 Variación del valor mínimo de la intensidad de campo en función de la frecuencia

Рисунок 1.5 – Изменение минимального значения напряженности поля с частотой для АМ-вещания в диапазонах НЧ и СЧ [61]

Соответствующие значения минимальной напряженности поля для режимов АМ («нормативное» качество) и DRM представлены в таблице 1.9. Там же в качестве примера приведены рассчитанные радиусы зон покрытия для одного и того же передатчика в режимах АМ (с мощностью 100 кВт) и DRM (40 кВт) на различных частотах диапазонов НЧ и СЧ для проводимости почвы 3 мСм/м.

Таблица 1.9 – Пример радиусов зон покрытия в режимах АМ и DRM (А, 16QAM(1)), на различных частотах диапазонов НЧ и СЧ для параметров почвы с проводимостью $\sigma = 3 \cdot 10^{-3}$ См/м и проницаемостью $\epsilon = 22$

F, кГц	150	200	300	500	1000	1500
Емин АМ, дБмкВ/м	73	72	70,5	65,5	60	57
Емин DRM А, 16QAM(1), дБмкВ/м	60,0	56,3	51,2	52,9	48,2	48,2
R АМ, 100 кВт, км	306	264	196	143	90	74
R DRM, 40 кВт, км	500	465	375	203	126	86

Как видно из таблицы 1.9, 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 AM. 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 AM. При желании вещателя увеличение зоны обслуживания, достигаемое в режиме DRM, можно разменять на повышение качества передаваемого аудиоконтента (например, стерео) или на передачу двух различных звуковых программ с помощью одного передатчика.

Приведенные примеры расчетов (для светлого времени суток и при отсутствии помех от соканальных станций) аргументировано развенчивают миф о том, что «DRM сорвется, а AM еще слышно будет». Технические основы методики частотно-территориального планирования сетей радиовещания DRM диапазонов НЧ и СЧ будут разрабатываться далее в Главе 6. Там же будут приведены подтверждающие их результаты экспериментальных измерений.

1.4 Эффективность вещания в различных диапазонах частот

Эффективность вещания можно определять как совокупность капитальных (на построение сети вещания) и эксплуатационных затрат, отнесенную к количеству слушателей или к обслуживаемой территории. Очевидно, что для коммерческих радиостанций представляют интерес только территории с достаточно высокой плотностью населения, поэтому в основном они функционируют в населенных пунктах и используют диапазон ОВЧ, радиоволны которого распространяются в пределах прямой видимости. Государственное вещание, несущее функции информирования и оповещения, должно приниматься на территории всей страны.

Для проведения сравнительной оценки эффективности вещания в различных диапазонах частот на примере ЦФО использовались "Тарифы на услуги общедоступной электросвязи для целей эфирной аналоговой наземной

трансляции и по доставке сигналов общероссийских обязательных общедоступных телеканалов и радиоканалов, оказываемые ФГУП «Российская телевизионная и радиовещательная сеть»" (Приложение 2 к приказу Федеральной службы по тарифам от «26» ноября 2014 г. № 266-с/1). Выдержки из данного документа для представляющих интерес мощностей и диапазонов частот приведены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Выдержки из "Приложения 2 к приказу Федеральной службы по тарифам от «26» ноября 2014 г. № 266-с/1"

Передатчики	Мощность, кВт	Тариф (руб./час), без НДС	Антенные устройства	Тариф (руб/час), без НДС
КМВ, ГМВ, ДКМВ диапазона волн	1	101,81	КМВ, ГМВ диапазона волн: "Диск", ША-106, АШП-275, АРД, ШАРРТ	161,4
	5	181,89		
	20	374,07		
	40	601,83	ДКМВ диапазона волн: СГД 4/4 РА; СГД 4/8 РА; СГДП 4/4 РА; СГД 4/2 РА; СГДП 6/4 РА	219,43
	100	1 280,38		
	250	3 924,30		
	500	5 680,92		
МВ-ЧМ вещания (стерео)	1	84,60		
	2	176,26		
	4	260,11		

Рассчитав радиусы зон обслуживания передатчиков соответствующих мощностей и диапазонов частот, можно найти стоимость обслуживания одного квадратного километра территории в год. Результаты расчетов приведены в таблице 1.11 и в графическом виде на рисунке 1.6. Радиусы зон покрытия в диапазонах НЧ и СЧ рассчитывались для средних частот диапазонов аналогично таблице 1.9. В диапазоне ВЧ в режиме DRM требуемая надежность в большинстве случаев может быть обеспечена только при синхронном вещании двух передатчиков с различных направлений. Данные результаты были получены в проводившейся под руководством автора НИР (более подробно в Главе 7) и отражены во вкладе администрации связи РФ в МСЭ [141]. Радиусы зон покрытия

в диапазоне ОВЧ рассчитывались при высоте установки антенны 150 метров для $E_{мин} = 54$ дБмкВ/м (сельская местность, стерео).

Таблица 1.11 – Стоимость обслуживания одного квадратного километра территории в год (руб. без НДС) передатчиками различной мощности и диапазонов частот

Мощность передатчика, кВт	DRM НЧ (200 кГц)	АМ НЧ (200 кГц)	DRM СЧ (1000 кГц)	АМ СЧ (1000 кГц)	DRM ВЧ	АМ ВЧ	ОВЧ ЧМ
1	17,5	203,8	203,8	815,2			262,2
2							424,7
4							502,3
5	10,3	79,1	149,5	472,5			
20	8,9	51,6	123,4	414,6			
40	9,8	48,3	136,2	434,4	18,3	9,2	
100	13,8	57,2	178,7	496,3	8,4	4,2	
250	29,6	104,6	351,7	1033,7	19,1	9,6	
500	35,2	112,9	407,5	1131,8	22,9	11,4	

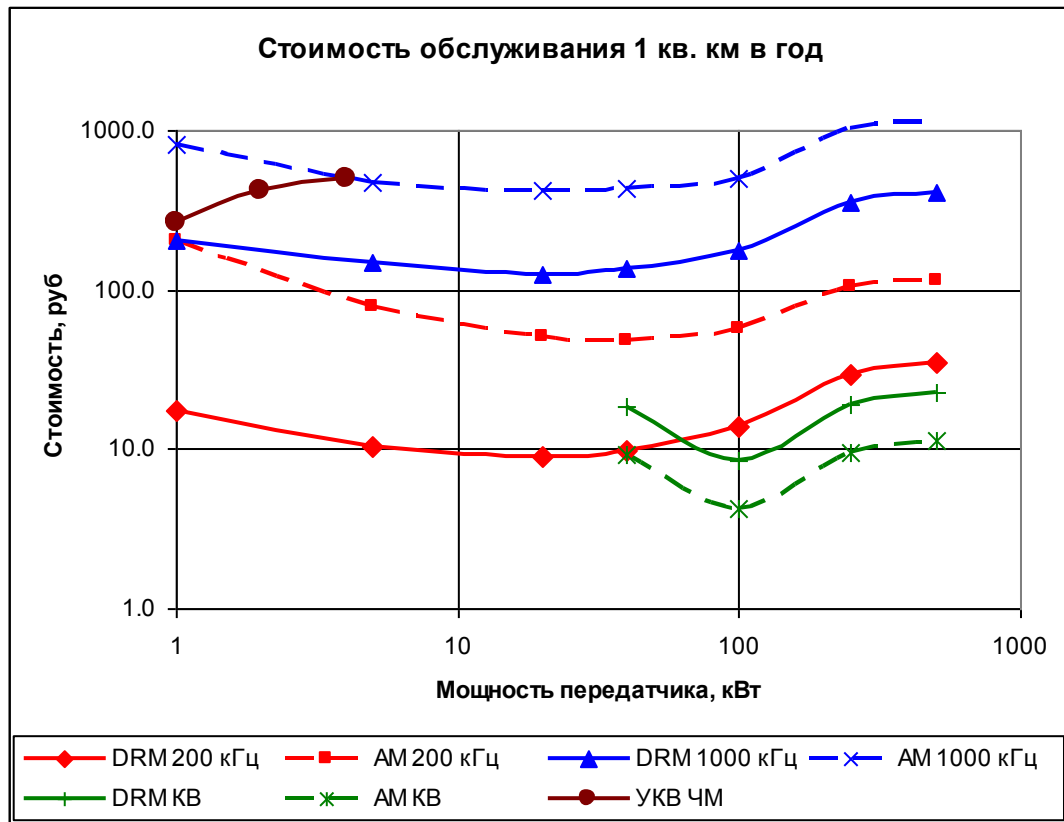


Рисунок 1.6 – Стоимость обслуживания одного квадратного километра территории в год (руб. без НДС) передатчиками различной мощности и диапазонов частот

Как видно из рисунка 1.6, минимальная стоимость обслуживания достигается в режиме АМ в диапазоне ВЧ. Вещание в режиме DRM также имеет минимальную стоимость обслуживания в диапазоне ВЧ. Однако свойственная этому диапазону нестабильность распространения радиоволн, особенно сильно проявляющаяся в полярных широтах, не позволяет рекомендовать его применение в государственной сети вещания для круглосуточного и круглогодичного обслуживания территории РФ. Тем не менее, такое решение может использоваться при организации вещания на удаленные территории, не имеющие собственных мощных источников электропитания, а также в качестве элемента резервирования сети вещания.

Сопоставимую с вещанием в диапазоне ВЧ стоимость может иметь использование режима DRM в диапазоне НЧ при мощностях передатчиков 20...40 кВт. Однако для уменьшения числа объектов вещания, что может быть особенно актуальным при обслуживании малонаселенных удаленных территорий, рациональнее использовать передатчики с мощностью 50...100 кВт. Так, в разработанном далее в Главе 7 примере архитектуры сети государственного вещания РФ средняя мощность передатчиков составляет 68 кВт, что позволяет обеспечить стоимость вещания достаточно близкую к минимально возможным значениям.

1.5 Планировавшаяся топология сети цифрового радиовещания стандарта DRM для РФ

Системный проект «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации» был выполнен в 2011 году по заказу ФГУП "РТРС" в рамках Федеральной целевой программы "Развитие телерадиовещания в Российской Федерации на 2009 – 2015 годы». Головным исполнителем системного проекта являлся ОАО «Российский институт мощного радиостроения» (ОАО «РИМР»), соисполнителями: ФГУП «НИИР», ФГУП «ГРЧЦ», ФГУП «ГСПИ РТВ», ООО «АТТ ГРУППА», ЗАО «Ватсон».

При разработке системного проекта в соответствии с ТЗ были поставлены следующие целевые показатели:

- доля населения Российской Федерации, охваченного радиовещанием заданного качества, – 100 процентов;
- доля населения Российской Федерации, охваченного телерадиооповещением о чрезвычайных ситуациях, – 100 процентов.

В процессе разработки системного проекта использовались результаты ряда теоретических и экспериментальных исследований, проведенных с участием автора. В результате этого по сравнению с первоначальным вариантом топологии сети вещания РФ, планировавшейся в ФЦП, в разработанной в системном проекте топологии значительно уменьшено количество передатчиков диапазона СЧ, и увеличено количество передатчиков диапазона НЧ (Таблица 1.12). Данное решение достаточно хорошо соответствует проведенному выше анализу эффективности вещания в различных диапазонах частот. Так, суммарная мощность всех передатчиков уменьшалась с 42,5 МВт (в сети вещания 2005 года) до 11,77 МВт. Предлагавшееся в Системном проекте 2011 года топологическое решение размещения и покрытия территории РФ радиовещательными программами «Радио России» приведено на рисунке 1.7.

Как видно из рисунка 1.7, большую часть территории РФ (удаленные и малонаселенные территории) предлагалось обслуживать с использованием диапазона ВЧ. Следует отметить, что разработка системного проекта проводилась раньше получения результатов, изложенных в [141], поэтому планировавшиеся в нем решения на настоящий момент нельзя считать наиболее перспективными для создания государственной сети вещания РФ. Также не были решены вопросы взаимных помех от передатчиков диапазона НЧ в темное время суток (планировалось использование 27 передатчиков при наличии всего 15 номиналов радиочастот в этом диапазоне).

Данные недостатки устранены 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.

Таблица 1.12 – Количество передатчиков различных диапазонов частот, планировавшихся в ФЦП и в Системном проекте 2011 года.

Вещатель	ФЦП					Системный проект				
	НЧ	СЧ	ВЧ	Всего	Строительство новых антенн	НЧ	СЧ	ВЧ	Всего	Строительство новых антенн
«Радио России»	17	79	30	126	0	27	6	17	50	10-НЧ 12-СГД 3-АЗИ

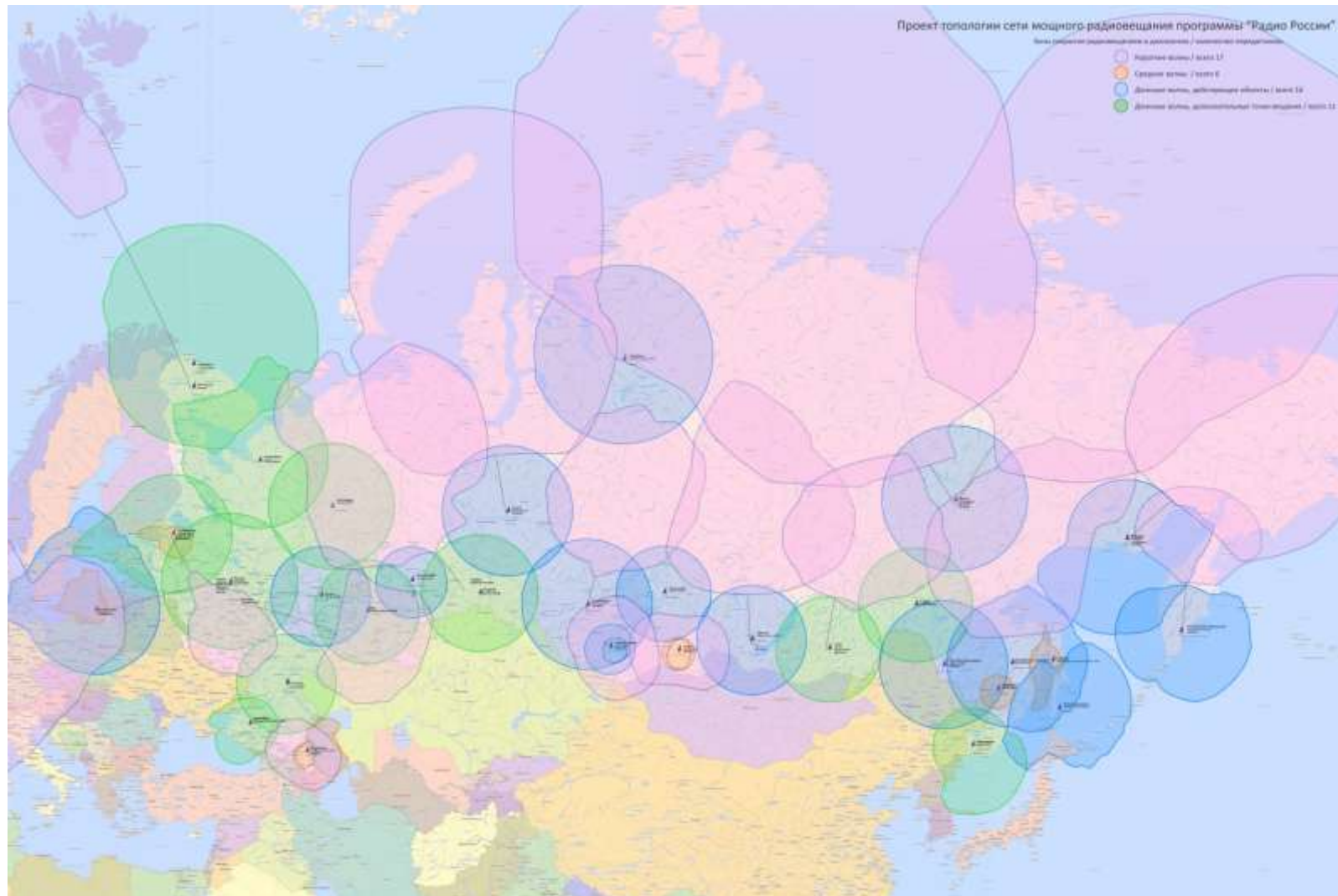


Рисунок 1.7 – Предлагаемое в Системном проекте «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации» (2011) топологическое решение размещения и покрытия территории РФ радиовещательными программами «Радио России»

1.6 Разработка отечественной нормативной базы цифрового радиовещания стандарта DRM

Регулярное вещание в цифровом формате стандарта DRM в России началось летом 2003 года на коротких волнах радиостанцией «Голос России» в направлении на Западную Европу. Для этого использовался модернизированный передатчик РВ-807 (г. Талдом), в настройке которого в режиме DRM принимали участие специалисты МТУСИ. В то время каких-либо нормативных документов, как отечественных, так и международных, регламентирующих качественные характеристики передающего устройства, работающего в режиме DRM, еще не существовало. Разработка предварительных требований к передающим устройствам DRM была проведена автором в 2001...2002 годах в рамках НИР «Радикал» (Заказчик ОАО «ЦКБ Связь») и ОКР «Инфразвук» (Заказчик ОАО «Телеком»).

1.6.1 Требования на спектральные характеристики выходного сигнала

Нелинейность характеристик любого передающего устройства, независимо от способа его построения, проявляется в расширении полосы частот излучаемого сигнала и выходе ее за допустимые пределы.

При разработке систем ЦРВ в диапазонах ниже 30 МГц одним из главных требований являлось обеспечение ширины полосы излучения, равной полосе частот стандартного радиовещательного сигнала с амплитудной модуляцией (АМ). Допустимые внеполосные излучения радиовещательных передатчиков с АМ в НЧ, СЧ, ВЧ диапазонах регламентировались на международном уровне рекомендацией Международного союза электросвязи (МСЭ) ITU-R SM.328-10 "Spectra and bandwidth of emissions". В этом документе приводится способ построения кривой, ограничивающей допустимые уровни внеполосных излучений.

В качестве примера на рисунке 1.8 пунктиром приведена кривая, ограничивающая уровень внеполосных излучений АМ передатчика (далее будем ее называть маской МСЭ), для необходимой полосы частот 10 кГц. При других значениях необходимой полосы частот данная кривая масштабируется по оси абсцисс. Здесь же приведена спектрограмма выходного сигнала возбудителя стандарта DRM для режима работы А, 64QAM, 10 кГц. Как видно из рисунка, спектр неискаженного сигнала ЦРВ вписывается в приведенную кривую с большим запасом. Таким образом, для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) в соответствии с требованиями МСЭ спектр сигнала DRM на выходе передающего устройства не должен выходить за пределы указанной кривой. Этот критерий и применялся в дальнейшем для оценки допустимого уровня нелинейности передатчиков при использовании их в режиме DRM.

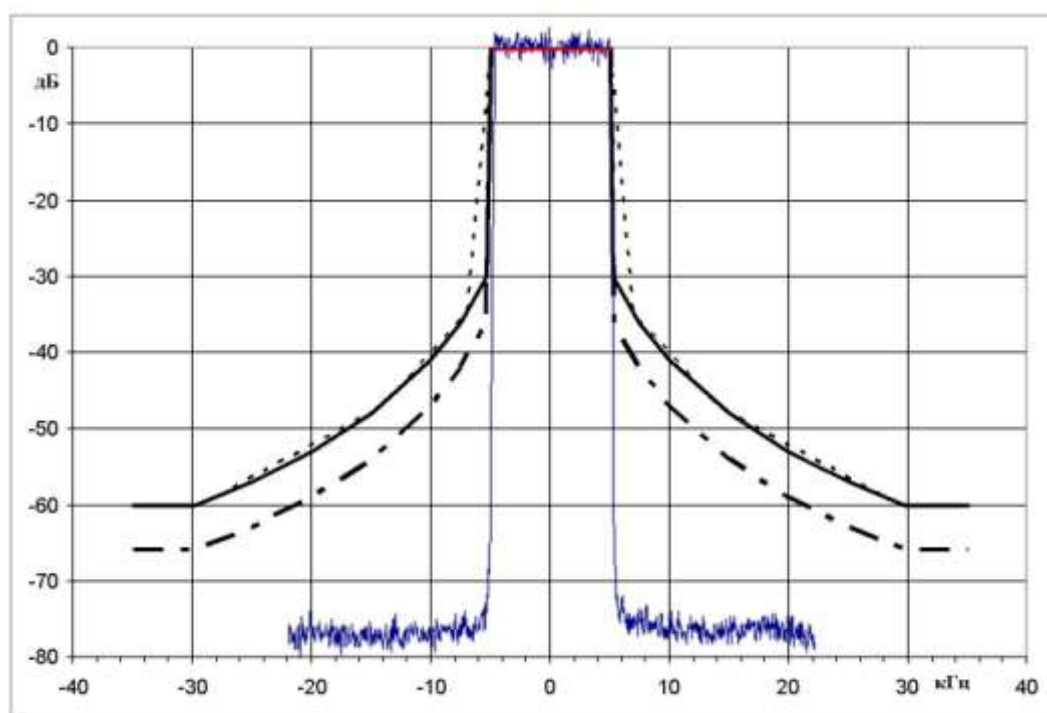


Рисунок 1.8 – Ограничительные линии (маски) на внеполосные излучения DRM передатчиков. Сплошная линия – ETSI [121], пунктирная – РФ [74], штрихпунктирная – норма на возбудитель, синяя – спектр DRM сигнала на выходе возбудителя

Использование данной маски для цифрового радиовещания стандарта DRM в РФ законодательно было закреплено в решении ГКРЧ от 01.12.2003 [74] с последующим принятием второй редакции этого документа в 2005 году.

По мере накопления практического опыта использования передатчиков DRM консорциум пришел к выводу, что данные требования в ближней (от сигнала) области могут быть ужесточены. Это нашло свое отражение в принятых в 2005 году документах ETSI [121, 122] и показано на рисунке 1.8 сплошной линией. Данные изменения были учтены в последующих НИР, проводившихся по заказу РТРС, на основании которых были разработаны «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» [90].

В этом документе впервые в международной практике по результатам исследований автора были выделены отдельной строкой требования на внеполосные излучения возбуждителя (формирователя, кодера-модулятора) DRM сигнала. В соответствии с законодательством РФ радиопередающие устройства и их составные части подлежат обязательной сертификации. В большинстве случаев (при использовании современных передатчиков с отдельным усилением) определить параметры возбуждителя без передатчика невозможно. Но производителями передатчиков и возбуждителей зачастую являются разные организации. Не имея сертифицированного возбуждителя, нельзя изготовить передатчик в целом, а не имея передатчика, нельзя сертифицировать возбуждитель. Для «разрыва» этого замкнутого круга, учитывая, что большую часть искажений вносит передатчик как мощное устройство, в котором зачастую может происходить «размен» искажений на КПД, допустимые требования на внеполосные излучения возбуждителя были приняты на 6 дБ ниже требований на передатчик в целом. Эта кривая приведена на рисунке 1.8 штрихпунктирной линией. Также, учитывая, что фильтрация гармонических составляющих побочных радиоклебаний осуществляется после работающего в нелинейном режиме оконечного каскада передатчика, требования к данному параметру в возбуждители были существенно снижены – до уровня минус 30 дБ.

Перечисленные выше особенности также были учтены в ГОСТ на цифровой кодер-модулятор DRM [50].

1.6.2 Требования на отношение сигнал-шум в выходном сигнале передатчика

Помимо расширения полосы частот излучаемого сигнала нелинейность характеристик любого передающего устройства, независимо от вида модуляции (АМ, ОМ, OFDM и т.д.), приводит также к ухудшению качества приема радиовещательной программы. Для обеспечения качественного приема сигналов с традиционно используемыми видами модуляции (АМ, ОМ) соответствующими стандартами были определены допустимые пределы искажений передаваемого сигнала и методы их измерения (например, уровень гармонических искажений огибающей сигнала с амплитудной модуляцией или уровень комбинационных искажений сигнала с однополосной модуляцией). Для систем цифрового вещания аналогичным показателем, определяющим возможность уверенного декодирования звуковых программ, может являться величина вероятности ошибки приема символов (BER) на входе звукового декодера. Однако время измерения этого параметра для получения достоверных значений должно быть весьма продолжительным, что делает нерациональным практическое использование этого критерия для оперативной настройки радиопередающего устройства и контроля качества излучаемого сигнала ЦРВ. Поэтому целесообразно перейти к использованию другого параметра, а именно, к отношению сигнал-шум (ОСШ) в выходном сигнале передатчика, позволяющему контролировать качество излучаемого сигнала в режиме реального времени.

При отсутствии нормативных документов для определения количественных значений данного критерия в проведенных НИР «Радикал» и ОКР «Инфразвук» учитывались два фактора.

С одной стороны, этот параметр (величина ОСШ) определен как критерий для устойчивого декодирования сигнала в приемнике. Его минимально необходимые значения указаны в стандарте DRM (ETSI ES 201 980, “Digital Radio

Mondiale (DRM); System Specification” [123]) и составляют для различных каналов распространения в режиме работы 64 QAM от 14,9 до 23,2 дБ.

С другой стороны, измерение параметра ОСШ на выходе первых образцов возбудителей DRM различных производителей показало, что значение ОСШ в сформированном сигнале ЦРВ не превышает величины 40...42 дБ.

Из вышесказанного становится очевидным, что значение параметра ОСШ на выходе передатчика не может быть выше 40 дБ и не должно быть ниже 23 дБ. Поскольку ухудшение ОСШ на выходе передатчика будет приводить к сокращению зоны обслуживания, целесообразно свести этот эффект к минимуму, обеспечив на выходе передатчика запас не менее 10 дБ по отношению к значению ОСШ, равному 23 дБ и необходимому для декодирования в сложных условиях распространения. Требование обеспечения более высокой линейности передатчика и, соответственно, более высокого значения ОСШ может вступать в противоречие с параметрами его энергетической эффективности.

Поэтому в качестве количественного значения критерия ОСШ на выходе передатчика, используемого для работы в режиме ЦРВ, была рекомендована величина 33...36 дБ. Настроенный в соответствии с этим критерием передатчик РВ-807 (г. Талдом) долгие годы считался в Европе «эталоном» и его сигнал использовался для настройки приемного оборудования DRM.

Для высокоэффективных передатчиков, построенных по методу отдельного усиления, получение указанных значений ОСШ было более проблематичным. По этой причине в принятом в 2005 году документе ETSI [121] было установлено среднеквадратическое значение коэффициента ошибок модуляции (MER – Modulation Error Ratio, аналог ОСШ) на выходе передатчика не менее 30 дБ.

Данные требования нашли свое отражение в последующих НИР, проводившихся автором в МТУСИ, и вошли в отечественные нормативные документы [90]. Аналогично, отдельное требование на MER не менее 36 дБ было сформулировано для возбудителей DRM передатчиков, которое вошло в [50].

1.6.3 Стандарты на систему DRM

В 2011-2012 годах отраслевыми институтами были разработаны и введены в действие все необходимые стандарты на систему DRM и ее компоненты, гармонизированные с документами ETSI [123 – 126]:

- ГОСТ Р 54462-2011. Система цифрового радиовещания DRM. Требования и параметры [49];
- ГОСТ-Р 54718-2011. Система цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц. Цифровой кодер-модулятор. Основные параметры и технические требования [50];
- ГОСТ Р 54706-2011. Система цифрового звукового радиовещания DRM. Интерфейс распределения мультиплекса (MDI) [51];
- ГОСТ Р 54707-2011. Система цифрового звукового радиовещания DRM. Одноканальная одновременная передача программ (SCS) [52];
- ГОСТ Р 54708-2011. Система цифрового звукового радиовещания DRM. Протокол распределения и коммуникации (DCP) [53];
- ГОСТ Р 54709-2011. Система цифрового звукового радиовещания DRM. Специфические ограничения по применению протокола распределения и коммуникации (DCP) [54];
- ГОСТ Р 54710-2011. Система цифрового звукового радиовещания DRM. Руководство по приложениям данных [55];
- ГОСТ Р 54716. Система цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц. Контрольный радиоприемник. Основные параметры и технические требования [56];
- ГОСТ Р 54717-2011. Система цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц. Технические основы [57];
- ГОСТ Р 54997-2012. Система цифрового звукового радиовещания DRM. Цифровое звуковое радиовещание DAB. Требования транспортировки и бинарного кодирования для электронного справочника программ (EPG) [58].

На основании результатов проведенных исследований и эфирных испытаний системы цифрового радиовещания стандарта DRM (см. подробнее в Главе 5) 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. 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.

Таким образом, к настоящему времени имеется вся необходимая нормативная и разрешительная база для практического внедрения цифрового радиовещания в РФ. В следующих главах работы будут подробно рассмотрены все необходимые компоненты для построения сети цифрового радиовещания DRM для РФ.

1.7 Выводы

1. Рассмотрены качественные характеристики звукового тракта в системе DRM и проведены их формальные инструментальные измерения в 23 различных режимах помехоустойчивости со скоростями передачи от 10,5 до 34,7 кбит/с. Проведенное сравнение с нормами на характеристики радиовещательных передатчиков с АМ и ЧМ показало, что система DRM имеет меньшие уровни шума, коэффициент гармоник и интермодуляционные искажения. Диапазон модулирующих частот в семи режимах помехоустойчивости не уже, чем для передатчиков с ЧМ. Еще в 10 режимах помехоустойчивости диапазон модулирующих частот уже, чем для передатчиков с ЧМ, но шире, чем для передатчиков с АМ.

2. Показано, что качество работы аудиокодеров с потерями целесообразно определять по результатам прослушивания, а результаты инструментальных измерений можно использовать для предварительного выбора режимов помехоустойчивости.

3. При прослушивании записанных речевых и музыкальных фрагментов, кодированных со скоростями более 20...24 кбит/с, артефакты цифровой обработки на слух практически не замечались, и качество звукового контента можно было назвать «сопоставимым с ЧМ», что подтверждает результаты зарубежных исследований.

4. Проведено сравнение радиусов зон покрытия в режимах АМ и DRM. На основании критерия предельно допустимой понятности передачи для русской речи 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 меньшей мощности передатчика в режиме DRM и лучшем качестве аудио.

5. Приведенные примеры расчетов радиусов зон покрытия 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. 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.

6. Проведенный сравнительный анализ эффективности аналогового и цифрового вещания в различных диапазонах частот (на примере ЦФО) показал, что минимальная стоимость 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.

7. Рассмотрена планировавшаяся ранее топология сети цифрового радиовещания стандарта DRM для РФ и определены ее недостатки, которые устраняются в данной работе.

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

2 ПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА DRM

2.1 Требования к передающим устройствам DRM

Передающие устройства цифрового радиовещания стандарта DRM должны обеспечивать как выполнение требований на электромагнитную совместимость (ЭМС), так и выполнение требований на специфические качественные параметры выходного сигнала DRM [90].

К требованиям на электромагнитную совместимость относятся выходная мощность (определяется как средняя мощность, подаваемая в нагрузку), отклонение рабочей частоты, уровни побочных и внеполосных радиоколечаний (излучений). Требования на отклонение рабочей частоты стандартны для вещательных передатчиков и обеспечиваются возбудителем. Уровни побочных радиоколечаний также стандартны и обеспечиваются фильтрующими системами. Требования на внеполосные излучения приведены в Нормах РФ [75], в документах ETSI [121] и в графическом виде представлены на рисунке 1.8 (Глава 1). Следует отметить, что в документах РФ маска, ограничивающая уровень внеполосных излучений, соответствует ранней редакции европейской и является несколько более "мягкой". Для обеспечения совместимости с международными результатами далее в работе будет использоваться европейская (более жесткая) маска на внеполосные излучения.

Помимо расширения полосы частот излучаемого сигнала нелинейность характеристик любого передающего устройства, независимо от вида модуляции (АМ, ОМ, OFDM и т.д.), приводит также к ухудшению качества приема радиовещательной программы. Для обеспечения качественного приема сигналов с традиционно используемыми видами модуляции (АМ, ОМ) соответствующими стандартами были определены допустимые пределы искажений передаваемого сигнала и методы их измерения (например, уровень гармонических искажений огибающей сигнала с амплитудной модуляцией и уровень комбинационных искажений сигнала с однополосной модуляцией). Для систем цифрового вещания

аналогичным показателем, определяющим возможность уверенного декодирования звуковых программ, является величина вероятности ошибки приема символов (BER) на входе звукового декодера. Однако время измерения этого параметра для получения достоверных значений должно быть весьма продолжительным, что делает нерациональным практическое использование этого критерия для оперативной настройки радиопередающего устройства и контроля качества излучаемого сигнала ЦРВ. Поэтому для оперативного контроля качества выходного сигнала передатчика в режиме реального времени используется среднеквадратическое значение коэффициента ошибок модуляции (MER – Modulation Error Ratio). Данный параметр является единственным, характеризующим специфические качественные параметры выходного сигнала DRM передатчика и определяется в [121] как:

$$MER = 10 \times \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{j=1}^N (I_j^2 + Q_j^2)}{\sum_{j=1}^N (\delta I_j^2 + \delta Q_j^2)} \right\}, \text{ дБ}$$

Значение MER в выходном сигнале передатчика должно быть не менее 30 дБ [90, 121].

Радиовещательные передатчики – мощные устройства, с выходной мощностью десятки и сотни кВт. При этом сигнал DRM, как сигнал с амплитудно-фазовой модуляцией, предъявляет высокие требования к линейности амплитудной и фазоамплитудной характеристик радиопередатчиков, что нередко вступает в противоречие с задачей обеспечения высокого КПД, особенно актуальной при больших мощностях. Для решения этой задачи применяются различные методы высокоэффективного усиления. Ниже будут рассмотрены методы, по которым строятся современные радиовещательные передатчики, и проведен анализ требований к их трактам.

2.2 Способы построения мощных радиовещательных передатчиков с высоким КПД

Кроме рассмотренных выше качественных характеристик, для мощных радиовещательных передатчиков существенное значение имеет его энергетическая эффективность (КПД), которая в значительной степени определяет эксплуатационные затраты.

Рассмотрим кратко основные этапы эволюции построения передающих трактов диапазонов НЧ, СЧ и ВЧ и способы высокоэффективного усиления, применяемые в настоящее время.

Исторически для радиовещания в диапазонах ниже 30 МГц использовалась амплитудная модуляция. Требуемые мощности (десятки и сотни кВт) могли быть получены только на электровакуумных приборах – мощных генераторных триодах и тетродах. Для повышения КПД режим линейного усиления модулированного сигнала не использовался, а применялась анодная (анодно-экранная для тетродов) амплитудная модуляция в выходном каскаде. Модуляция обеспечивалась двухтактным ламповым модулятором, работающим в классе В. Все основные методы высокоэффективного усиления (автоматическая регулировка режима, раздельное усиление составляющих, или метод Кана, метод дефазирования, усилитель с дельта-сигма модулятором [38]) теоретически были разработаны к середине XX века, но широкого практического применения в ламповой технике не находили. Также практически не использовались ключевые режимы работы активных элементов.

2.2.1 Радиовещательные передатчики диапазона ВЧ

В диапазоне ВЧ вещание в мире в начале XXI века осуществлялось более чем 2300 передатчиками мощностью 0,5 – 1000 кВт [17]. Мощные коротковолновые передатчики представляют собой весьма сложные и энергоемкие устройства. Необходимость периодического изменения рабочей

частоты в весьма широких пределах (в соответствии с волновым расписанием) обуславливает наличие перестраиваемых колебательных систем. В мощных моделях применяется водяное охлаждение, как радиоламп, так и элементов колебательных систем оконечного каскада.

Практически все ВЧ вещательные передатчики имеют ламповый выходной каскад в радиочастотном тракте. На транзисторах в ВЧ диапазоне в настоящее время, в принципе, возможно достижение уровня мощности в единицы – десятки киловатт, однако такие решения оказываются существенно более дорогими, и применяются только в военных системах ВЧ радиосвязи и на мобильных объектах [30, 68-70, 77-81, 83-87].

Выходной каскад для получения высокого КПД как правило работает в классе С с анодной (анодно-экранной) модуляцией. Предоконечный каскад чаще всего также ламповый, а все остальные предварительные каскады – транзисторные, построенные по широкополосным схемам (для уменьшения числа перестраиваемых элементов при смене рабочих частот). В передатчиках последних разработок мощностью до 250 кВт широкополосные транзисторные усилители применяют и в предоконечном каскаде. Процесс совершенствования характеристик радиочастотного тракта основан, в основном, на применении новых мощных генераторных радиоламп (как правило, тетродов) с увеличенным сроком службы и повышенным коэффициентом усиления.

Не обладая особой свободой в выборе структуры ВЧ тракта, производители передатчиков сосредоточили основные усилия на совершенствовании модуляционного тракта, во многом определяющего энергетические и массогабаритные характеристики всего передатчика в целом.

Традиционный ламповый двухтактный модулятор в новых разработках (особенно в передатчиках большой мощности) практически не применяется из-за невысокого КПД (общий КПД передатчика с таким модуляционным трактом обычно не превышает 55% при 100% модуляции) и невозможности работать с перспективными видами модуляции. Применение лампового модулятора с ШИМ позволило увеличить результирующий КПД до 60 – 65%. Подобный способ

построения модуляционного тракта применялся в выпускавшихся ранее передатчиках достаточно широко (передатчики SW-50, SW-100 фирмы Harris и другие). Впоследствии он был вытеснен полупроводниковыми ШИМ и импульсно-ступенчатыми модуляторами (ИСМ), позволяющими увеличить КПД передатчика до 70% и более, и использовать любые виды модуляции. Применение полупроводниковых модуляторов позволило также снизить эксплуатационные расходы – по сравнению с ламповыми модуляторами, связанные с периодической заменой мощных радиоламп, стоимость которых при уровне мощности свыше 50 кВт находится в пределах 10 – 50 тысяч долларов США.

Полупроводниковый ШИМ модулятор передатчика с S-4015 фирмы Telefunken Sendertechnik содержал 32 последовательно соединенных модуля на мощных MOSFET транзисторах. Для расширения полосы модулирующих частот и уменьшения задержки в тракте формирования огибающей (при усилении сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией) применялась многофазная ШИМ. Высокий КПД модулятора позволял обойтись только воздушным охлаждением для этого блока.

Развитие полупроводниковой элементной базы позволило к середине 80-х годов реализовать в ВЧ передатчиках импульсно-ступенчатый модулятор – сначала на тиристорах, а впоследствии на IGBT транзисторах. Пионером в этом направлении следует считать фирму Brown Boveri & Company, которая одной из первых начала промышленно выпускать передатчики с ИСМ (в настоящее время данное подразделение принадлежит фирме Ampegon, имевшей ранее названия Thomcast и Thomson).

В 80-х годах появился новый класс переключательных полупроводниковых приборов – IGBT транзисторы (Insulated Gate Bipolar Transistor, отечественное название БСИТ – биполярные транзисторы со статической индукцией). Они позволяют с достаточно высокой скоростью и малыми потерями коммутировать большие уровни мощности, что привело к широкому использованию ИСМ модуляторов на основе этих приборов практически во всех новых передатчиках мощностью более 50 кВт. Модульная конструкция таких модуляторов, состоящая

из 32 – 64 последовательно соединенных блоков (с одинаковыми или с различными выходными напряжениями), обеспечивает непрерывность вещания даже при выходе из строя нескольких из них. Высокий КПД ИСМ модуляторов на IGBT транзисторах (до 97%) позволяет обойтись воздушным охлаждением. Передатчики с ИСМ модулятором способны с высоким качеством работать с однополосным сигналом и другими видами модуляции, в т.ч. цифровыми.

Обобщенная структурная схема передатчиков с ИСМ модулятором приведена на рисунке 2.1. Силовой трансформатор содержит 32 – 64 вторичных обмотки (в соответствии с числом IGBT модулей) с выходным напряжением 500 – 700 вольт. Входной низкочастотный сигнал (или огибающая $A(t)$ произвольного сигнала с амплитудно-фазовой модуляцией) поступает на АЦП и далее подвергается цифровой обработке в коммутаторе, который формирует управляющие сигналы для IGBT модулей. Модули представляют собой управляемые ключи, и соединены последовательно.

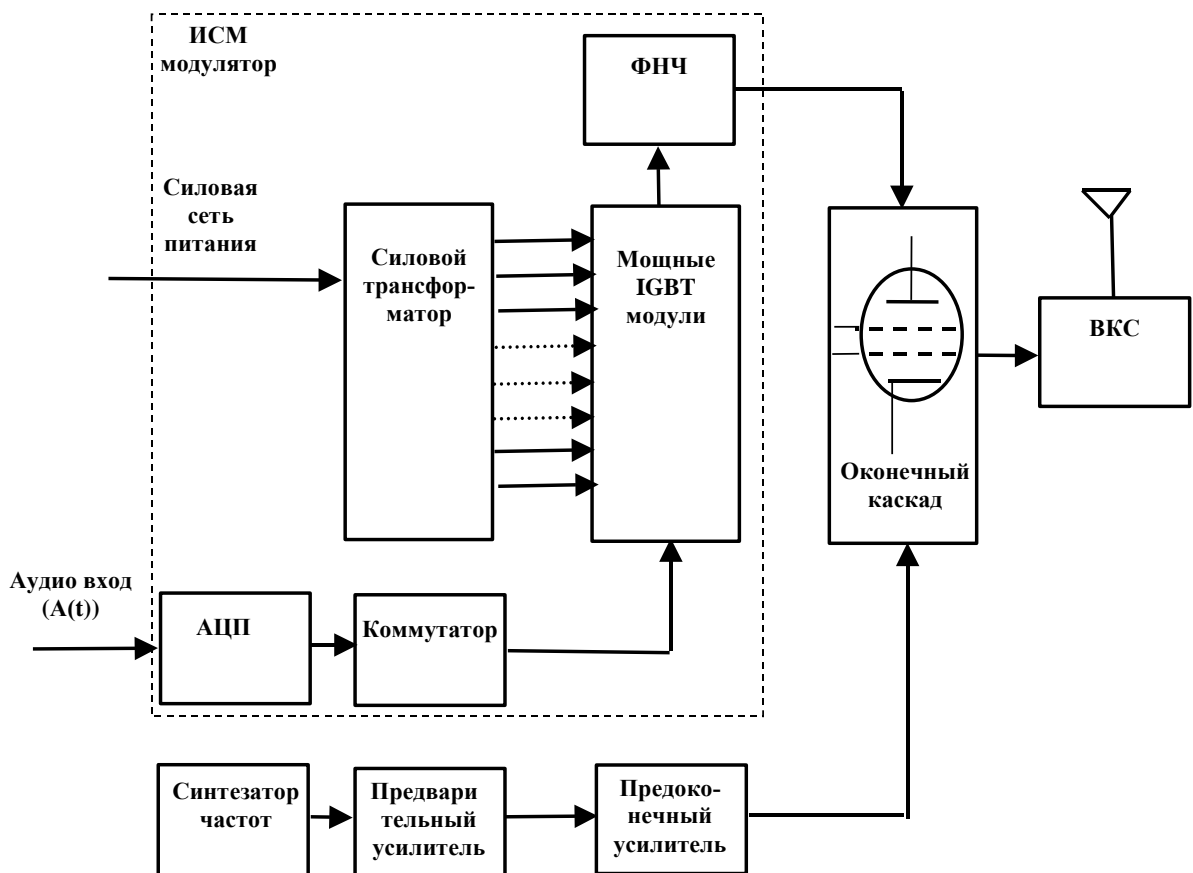


Рисунок 2.1 – Обобщенная структурная схема передатчиков с ИСМ модулятором

Для формирования ступенчатого приближения модулирующего напряжения (0 – 28 кВ) подключается соответствующее количество модулей. После прохождения ФНЧ, модулирующее напряжение поступает в цепь питания окончного каскада, осуществляя анодную модуляцию. Для уменьшения уровня нелинейных искажений ИСМ модулятора в качестве одного из модулей может применяться маломощный ШИМ усилитель, обеспечивающий плавное изменение выходного напряжения на этапах между переключениями модулей.

Применение импульсно-ступенчатого модулятора, способного, в отличие от модулятора класса В, усиливать постоянную составляющую (т.е., реализовывать метод отдельного усиления), может являться одним из способов модернизации передатчиков старых разработок для работы со всеми перспективными видами модуляции, включая системы цифрового радиовещания.

Внедрение такого способа построения запустило процесс замены устаревшего парка передатчиков по всему миру. В частности, с 1989 по 1997 годы было введено в эксплуатацию более 450 передатчиков [17] новых типов.

Коротковолновые радиовещательные передатчики серийно производились всего 13 – 15 крупными фирмами в мире. Более подробно это рассмотрено автором в [17]. За последние годы в результате ряда слияний фирм – производителей их число еще более сократилось. Среди фирм – производителей несомненными лидерами по количеству действующих передатчиков являются Ampegon (бывш. Thomcast) и Continental Electronics Corporation, обеспечившие в сумме поставку трети всех ВЧ передатчиков. В РФ мощные передатчики производились в Российском институте мощного радиостроения (РИМР), в котором в настоящее время также разработана технология производства ВЧ передатчика с импульсно-ступенчатым модулятором ("Серенада").

2.2.2 Передатчики радиосвязи диапазона ВЧ

ВЧ передатчики, используемые для радиосвязи, и работающие с сигналами с однополосной модуляцией, традиционно строились как линейные усилители

мощности (усилители модулированных колебаний, УМК). Обладая высокой линейностью, они могут использоваться и для передачи сигналов цифрового радиовещания, однако с недостаточно высоким КПД. Тем не менее, их применение может быть обоснованным, особенно при проведении экспериментального вещания. Определим условия, при выполнении которых использование линейных передатчиков становится экономически целесообразным.

Мощность, потребляемая радиопередатчиком от сети электропитания, является весьма важным параметром и определяет примерно половину эксплуатационных расходов. Для получения сопоставимых зон обслуживания вещанием в режимах АМ и ЦРВ пиковые мощности передатчиков должны быть приблизительно равны. При этом средняя излучаемая мощность передатчика, работающего в режиме DRM, примерно в 2,5 раза ниже средней мощности передатчика с АМ. На этом основании консорциумом DRM рекламируется возможность существенного снижения потребляемой мощности. Это действительно справедливо при использовании для цифрового вещания рассмотренных выше современных зарубежных вещательных передатчиков с ШИМ или ИСМ модуляторами, которые имеют высокий КПД при всех, в том числе малых, уровнях выходной мощности.

В России такие передатчики отсутствуют. Использование в режиме DRM действующих радиовещательных передатчиков с анодно-экранной модуляцией и модулятором класса В невозможно без существенной модернизации. Наиболее простым решением является перевод передатчика в режим усиления модулированных колебаний или использование существующих однопольных передатчиков. Однако при работе в режиме DRM (пик-фактор сигнала DRM около 10 дБ) такие передатчики будут иметь весьма низкий средний КПД (в районе 10...15%). Мощность, потребляемая передатчиком DRM, может оказаться даже больше, чем потребляемая мощность радиовещательного передатчика с АМ (с анодно-экранной модуляцией) с равной зоной обслуживания. При этом вместо ожидаемого выигрыша от перехода на цифровое

вещание, в виде экономии электроэнергии, можно получить увеличение эксплуатационных затрат.

В ГОСТ Р 51742-2001 «Передатчики радиовещательные стационарные с амплитудной модуляцией диапазонов низких, средних и высоких частот. Основные параметры, технические требования и методы измерений» [48] определены «Минимально допустимые значения промышленного КПД передатчиков» (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Минимально допустимый КПД АМ передатчиков по ГОСТ [48]

Диапазон	Мощность передатчика, кВт	КПД, %, не менее		
		При отсутствии модуляции	При коэффициенте АМ, равном	
			50 %	100 %
НЧ, СЧ	От 50 до 250	65	59	62
	500	68	61	65
	1000	70	63	67
ВЧ	От 50 до 100	55	50	53
	250	60	54	57

Действующие нормы оплаты стоимости вещания с учетом стоимости электроэнергии соответствуют параметрам передатчиков по ГОСТу. При переходе на ЦРВ зона обслуживания передатчика больше или равна зоне обслуживания передатчика с АМ, имеющего мощность в несущей в 2,5 раза больше средней мощности передатчика ЦРВ (пиковые мощности передатчиков при этом равны). Предположим, что на первом этапе вещатель будет оплачивать аренду передатчика ЦРВ по тарифам эквивалентного по зоне обслуживания передатчика с АМ. В этом случае для недопущения дополнительных материальных затрат радиосеть должен обеспечить потребление мощности передатчиком в режиме ЦРВ не более, чем среднее потребление мощности в режиме АМ. При этом минимально допустимые значения промышленного КПД передатчиков, приведенные в таблице 2.1, могут быть пересчитаны для режима ЦРВ. Так, при среднем коэффициенте модуляции в режиме АМ, равном 30%, и КПД, соответствующем 50-процентной модуляции ($KПД_{AM}$), КПД в режиме ЦРВ ($KПД_{ЦРВ}$) должен быть не менее:

$$(KПД_{ЦРВ}) = 100 * 0,4 * P_{нecAM} / (100 * 1,1 * P_{нecAM} / KПД_{AM}) = 0,36 * KПД_{AM}.$$

Исходя из этого, были рассчитаны значения минимально допустимого промышленного КПД передатчиков в режиме ЦРВ для различных диапазонов частот и уровней мощности, которые приведены в таблице 2.2. При превышении этих значений внедрение ЦРВ начнет приносить экономический эффект в виде снижения затрат на оплату электроэнергии.

Таблица 2.2 – Рассчитанный минимально допустимый КПД DRM передатчиков

Диапазон	Средняя мощность ЦРВ передатчика, кВт	КПД в режиме ЦРВ, %, не менее
НЧ, СЧ	От 20 до 100	21
	200	22
	400	23
ВЧ	От 20 до 40	18
	100	19

В связи с вышеизложенным, при настройке передатчиков, модернизируемых для работы в режиме DRM, следует применять все доступные меры по повышению их среднего КПД до величины 20 – 25%, при которой обеспечивается как минимум равенство в потребляемых мощностях с АМ передатчиками с равной зоной обслуживания. Очевидно, что меры по повышению среднего КПД передатчиков, работающих в режиме DRM, необходимо проводить при строгом контроле качественных параметров, рассмотренных выше. Более подробно этот вопрос рассмотрен автором в [32, 33, 35].

Разработанные критерии оценки качественных и энергетических характеристик передатчиков ЦРВ, а также созданное в МГУСИ измерительное оборудование позволили автору в мае-июне 2003 года провести успешную настройку передатчика РВ-807 (г. Талдом). Этот передатчик впоследствии более 10 лет использовался радиостанцией «Голос России» для ежедневного вещания в цифровом формате на Западную Европу. В частности, проведенные расчеты и измерения на передатчике РВ-807 показали возможность ограничения амплитуды выходного сигнала ЦРВ на 18...20% от раскрытия амплитудной характеристики передатчика. В результате этого:

- средняя выходная мощность передатчика была увеличена практически в два раза – до величины не менее 40 кВт;
- КПД анодной цепи выходного каскада увеличен в 1,5 раза – до 33%;
- MER на выходе передатчика составлял 36 дБ, требования маски МСЭ выполнялись.

Аналогичным образом впоследствии были настроены передатчики РВ-354 и РВ-352.

2.2.3 Радиовещательные передатчики диапазонов НЧ и СЧ

В РФ по данным на конец 1995 г. радиовещание в диапазонах НЧ и СЧ осуществлялось более чем 270 радиопередатчиками различной мощности от 5 до 500 кВт, ВЧ вещание – 163 передатчиками мощностью 100 – 200 кВт и 15 передатчиками мощностью 200 – 2000 кВт [25]. При этом обеспечивался прием программ «Радио России» с охватом населения на 96,5%, программ радиостанции «Маяк» с охватом на 94,2% и радиостанции «Радио-1» – на 70% [25]. Для сравнения, можно отметить, что в США, при меньшей территории, по данным FCC, в 1998 году было зарегистрировано более 4700 средневолновых вещательных радиостанций, которые, как правило, имеют основной и резервный передатчики, а также более 5600 FM радиостанций.

Средневолновые радиовещательные передатчики серийно производятся также всего 10 – 15 крупными фирмами в мире. В отличие от передатчиков диапазона ВЧ, имеющих ламповый оконечный каскад, современные НЧ-СЧ радиовещательные передатчики являются полностью полупроводниковыми, широко используют ключевые режимы работы активных элементов, обладают высоким промышленным КПД (75...85%), малыми габаритами и способны работать с различными видами модуляции. Несмотря на то, что количество радиовещательных станций за рубежом в конце XX века изменилось незначительно, спрос на новые модели оставался высоким, что было обусловлено

активно проводимой модернизацией оборудования. Действительно, новый малогабаритный полупроводниковый передатчик, не требующий специальной системы охлаждения, может быть установлен на свободное место в том же помещении, где располагается старый ламповый (без его демонтажа, с возможностью использования в качестве резервного). Экономия расходов на оплату электроэнергии позволяла за несколько лет окупить стоимость нового передатчика.

Традиционная амплитудная модуляция поддерживается всеми моделями производимых в настоящее время передатчиков. При этом современные передатчики, как правило, имеют равномерную АЧХ в полосе модулирующих частот от 0 до 10 кГц при коэффициенте гармоник не более 1% (за счет широкополосности радиочастотного и модуляционного трактов), что повышает качество передачи вещательных сигналов. Применение ШИМ или цифрового метода формирования модуляции позволяет, помимо повышения промышленного КПД, передавать сигналы ЦРВ, использовать режимы с динамическим управлением несущей, а также оперативно уменьшать выходную мощность в «ночном» режиме работы.

2.2.3.1 Мощный радиочастотный тракт

Способ построения оконечного каскада радиочастотного тракта во многом определяет энергетические и массогабаритные характеристики всего передатчика, его надежность, устойчивость к рассогласованию нагрузки, стоимостные и другие параметры. В связи с этим всеми фирмами – производителями постоянно ведутся работы, направленные на совершенствование ВЧ тракта передатчиков. Основной задачей в данном направлении является получение как можно более высокого КПД, так как это не только снижает потребляемую мощность, но и вследствие уменьшения рассеиваемой на транзисторах мощности резко повышает надежность и уменьшает габариты системы охлаждения. Действительно, при

увеличении КПД с 80% до 90% или с 80% до 95% рассеиваемая мощность уменьшается в два или в четыре раза.

Непрерывное совершенствование мощных MOSFET транзисторов, применяемых в СЧ радиопередатчиках (в частности, увеличение мощности и уменьшение времени переключения), позволяет повышать КПД передатчиков при одновременном снижении их стоимости и уменьшении числа используемых компонентов. Например, передатчики фирмы Nautel предыдущего поколения (серия AMPFET, 80-е годы) имели КПД 70...75% при мощности одного блока 1,25 кВт (по три усилителя класса D в параллель в каждом) или 2,1 кВт (по пять усилителей в более мощных моделях). Пришедшие им на смену новые серии XL и NA имели КПД 84...85% при мощности единичного блока 6,25 кВт. Современные серии (NX и XR) имеют промышленный КПД до 88%.

Также активно ведется поиск более эффективных (по сравнению с классом D с фильтровой нагрузкой) режимов работы – не в абстрактном теоретическом плане, а применительно к имеющимся полупроводниковым приборам, с учетом их стоимости. Фирма Harris применяла в передатчиках DX серии «специальную патентованную фильтрующую систему», уменьшающую коммутативные потери в транзисторах радиочастотных модулей (аналог класса DE). Фирма Broadcast Electronics Inc. применяла в выходном каскаде своих передатчиков режим работы полупроводниковых приборов в классе E [115]. Передатчики фирмы Broadcast Electronics имеют наименьшие массу и габариты по сравнению с другими при равных мощностях. Возможности использования в радиочастотном тракте вещательных передатчиков класса DE рассмотрены в [7].

Следует отметить также проблему оптимизации выбора напряжения питания выходного каскада. Данная задача решается не только с учетом характеристик большой номенклатуры MOSFET транзисторов (учитываются потери на сопротивлении насыщения, коммутативные потери, потери при рассогласовании нагрузки и т.д.), но и с учетом построения всего передатчика в целом: коэффициентов трансформации в ВЧ тракте и в источнике питания (чем они меньше, тем меньше потерь), КПД выпрямителя, потерь в системе

охлаждения. Как правило, решения у различных фирм несколько отличаются в зависимости от категории мощности и способа построения передатчика. Далее рассматриваются применяемые в настоящее время структуры передатчиков.

2.2.3.2 Передатчики с ШИМ модулятором

Передатчики с полупроводниковым ШИМ модулятором в настоящее время являются наиболее распространенными и широко освещенными в научно-технической литературе. Они серийно производятся уже более 30 лет, имеют хорошо отработанные схемотехнические и конструктивные решения, малую массу и габариты, и достаточно высокие качественные характеристики.

Передатчики имеют модульную конструкцию. Каждый усилительный блок, как правило, содержит оконечный каскад ШИМ модулятора с фильтром и широкополосный оконечный каскад ВЧ усилителя мощности. Выходная мощность блока составляет 1 – 6 кВт. В передатчиках различной мощности одного производителя используются одинаковые блоки в соответствующем количестве с последующим сложением мощностей.

Для расширения полосы модулирующих частот и уменьшения задержки в тракте формирования огибающей в последних разработках все чаще применяется многофазная ШИМ, что позволяет с высоким качеством усиливать сигналы с амплитудно-фазовой модуляцией.

Вопросы построения высокоэффективного ШИМ модуляционного тракта, имеющего повышенный КПД в области малых значений усиливаемого сигнала, что особенно актуально для DRM передатчиков, рассмотрены автором в [22, 82].

Далее будет показано, что сигналы с цифровыми видами модуляции более критичны к искажениям в нижней части амплитудной характеристики. По этой причине линейный динамический диапазон амплитудной характеристики ШИМ модулятора должен составлять не менее 35...40 дБ. Традиционно применявшееся схемотехническое решение для оконечного каскада усилителя ШИМ (последовательный ключ с рекуперационным диодом) может обеспечить

достаточно высокий КПД (более 90%) при снижении мощности до уровня на 14 дБ меньше максимальной, однако не обеспечивает линейности в нижней части амплитудной характеристики.

Синхронная (двухтактная) схема оконечного каскада усилителя ШИМ позволяет обеспечить требуемую линейность и может рассматриваться в качестве основы для разработки модуляционного тракта с заданными параметрами. Для более корректного анализа энергетической эффективности усилителя ШИМ в широком диапазоне выходных напряжений использовалась предложенная расширенная (по сравнению с традиционными) методика учета потерь. Она включает в себя следующие элементы:

1. Потери на сопротивлении насыщения «верхнего» транзистора:

$$P_{Внас} = I_n^2 * r * D,$$

где D – рабочий цикл ($E_{ВЫХ}/E_{ВЫХ\ макс}$),

$$I_n = E_{ВЫХ} / R_n, R_n - \text{сопротивление нагрузки модулятора,}$$

r – сопротивление насыщения транзистора.

2. Потери на переключение «верхнего» транзистора:

$$P_{Впер} = 0.5 * E_{ПИТ} I_n * (t_r + t_f) * f_{такт},$$

где $f_{такт}$ – тактовая частота ШИМ,

t_r и t_f – времена фронта и спада транзистора.

3. Коммутативные потери «верхнего» транзистора:

$$P_{Вком} = 0.5 * C_{ВЫХ} * E_{ПИТ}^2 * f_{такт},$$

где $C_{ВЫХ}$ – выходная емкость транзистора.

4. Потери на сопротивлении насыщения «нижнего» транзистора:

$$P_{Ннас} = I_n^2 * r * (1 - D).$$

5. Потери в диоде подложки «нижнего» транзистора:

$$P_{ДП} = V_f * I_n * (t_{dr} + t_{df}) * f_{такт},$$

где V_f – прямое напряжение диода подложки,

t_{dr} , t_{df} – времена фронта и спада диода подложки.

6. Потери на восстановление диода подложки:

$$P_{rr} = Q_{rr} * E_{ПИТ} * f_{макт},$$

где Q_{rr} – накопленный заряд диода подложки.

7. Потери в ФНЧ:

$$P_{фил} = I_n^2 * R_{фил},$$

где $R_{фил}$ – сопротивление катушек индуктивности ФНЧ и датчика тока.

Результирующий КПД усилителя ШИМ можно определить как:

$$\eta = \frac{E_{ВЫХ} * I_n}{E_{ВЫХ} * I_n + P_{Внас} + P_{Впер} + P_{Вком} + P_{Ннас} + P_{ДП} + P_{rr} + P_{фил}}.$$

Проведенный по данной методике анализ различных конфигураций усилителей ШИМ показал следующее:

– для низковольтных применений (до напряжений питания 20...25 В) энергетически более выгодной оказывается синхронная схема окончного каскада;

– в диапазоне напряжений питания от 25...30 В до 100...150 В наилучшие энергетические характеристики обеспечивает синхронная схема окончного каскада с подключенным параллельно «нижнему» транзистору диодом Шотки, который устраняет потери на восстановление диода подложки (не давая ему открыться) и вносит незначительные коммутативные потери на своей емкости. Такая конфигурация обеспечивает КПД более 90% при снижении выходного сигнала на 20 дБ от максимального и превосходит параметры существующих решений. Она была использована при разработке ключевого ВЧ усилителя мощности с отдельным усилением составляющих однополосного сигнала, который в настоящее время внедряется в производство в ОАО "РИМР";

– в высоковольтных применениях, в том числе в модуляционных трактах вещательных передатчиков с напряжением питания 300...500 В из-за отсутствия высоковольтных диодов Шотки приходится применять традиционную схему окончного каскада усилителя ШИМ с рекуперационным диодом. Для обеспечения требуемой линейности в нижней части амплитудной характеристики

(за счет некоторого снижения КПД) применяется дополнительный «нижний» параллельный ключ, подключенный через резистор.

Следует отметить, что принципиальная задержка в фильтре ШИМ усилителя мощности в настоящее время компенсируется в цифровых возбуждателях и не ограничивает область применения таких передатчиков. Тем не менее, наличие двух мощных усилительных трактов (высокочастотного и модуляционного) снижает результирующий КПД и надежность при увеличении стоимостных и массогабаритных показателей.

2.2.3.3 Цифровые передатчики

Выпускаемые с 1989 года фирмой Harris цифровые передатчики DX серии не содержат мощного модуляционного тракта, а осуществляют формирование огибающей усиливаемого сигнала на высоком уровне мощности посредством подключения к нагрузке различного числа радиочастотных усилителей (рисунок 2.2). Следует отметить, что входной и выходной сигналы цифрового передатчика являются аналоговыми, а термин «цифровой» относится к способу обработки и формирования сигналов «внутри» передатчика.

Входной низкочастотный сигнал (или огибающая $A(t)$ произвольного сигнала с амплитудно-фазовой модуляцией) поступает на быстродействующий 12-разрядный АЦП, частота преобразования которого равна частоте несущей (или соответствует фазомодулированной составляющей $\omega_{0+\varphi}(t)$ произвольного АФМ сигнала) при работе на частотах до 1 МГц или ее половине на более высоких частотах. В полученном 12-разрядном цифровом коде шесть старших разрядов через коммутатор управляют равновесными РЧ усилителями, а шесть младших разрядов – усилителями, выходные напряжения которых находятся в двоичном соотношении и составляют $1/2$, $1/4$, $1/8$, $1/16$, $1/32$ и $1/64$ от равновесных усилителей. Высокочастотный делитель мощности распределяет напряжение возбуждения от предварительного усилителя на 48 (для передатчика DX-10) или 64 (DX-50) идентичных радиочастотных мостовых усилителей мощности,

образующих совместно с системой сложения мощный ЦАП. Большинство из них «равновесные» и подключены к общей нагрузочной цепи с коэффициентом трансформации 1:1. Шесть «двоичных» усилителей подключены с коэффициентами трансформации $1/2$, ..., $1/64$ соответственно. Радиочастотные усилители, не участвующие в какой-либо момент времени в формировании выходного напряжения, переключаются в режим с низким выходным сопротивлением. Таким образом, в общей нагрузочной цепи формируется мощный радиосигнал, огибающая которого аппроксимирована 11,5 разрядами двоичного кода, что обуславливает уровень шумов квантования не более -70 дБ.

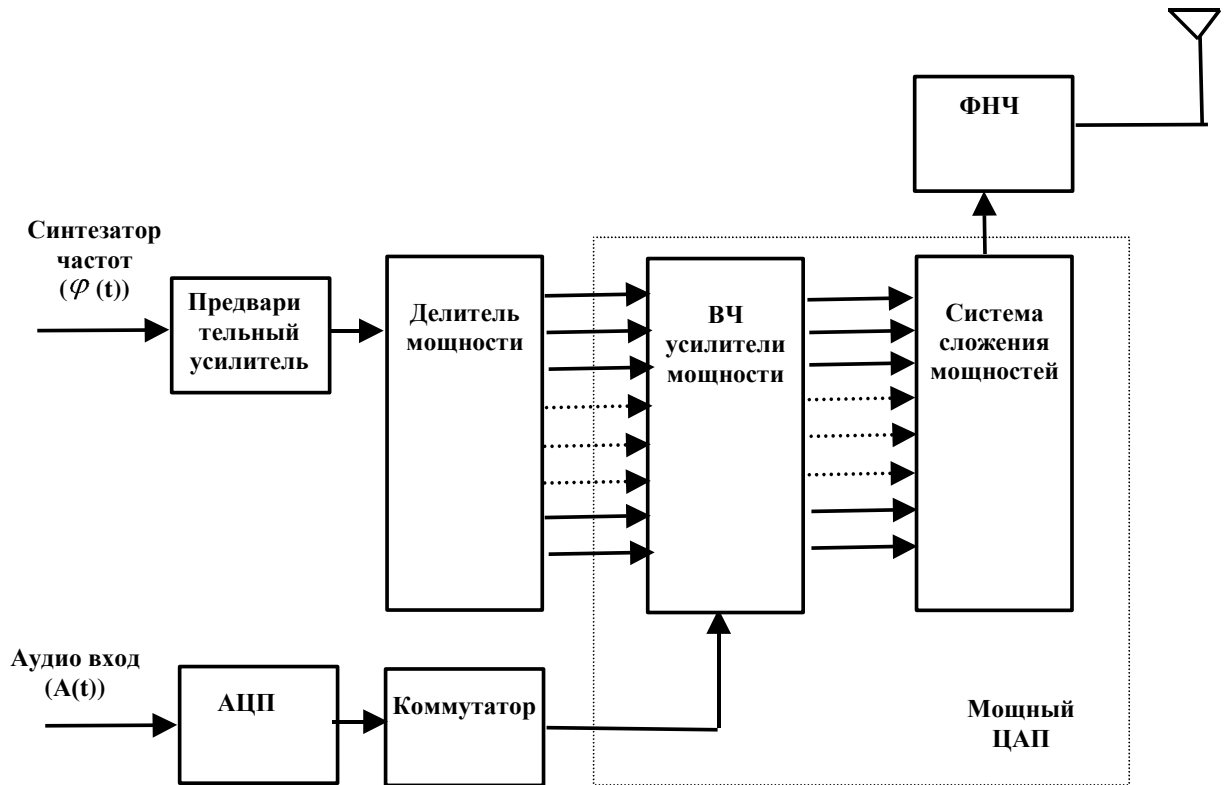


Рисунок 2.2 – Структурная схема передатчика с цифровым методом формирования огибающей.

Отсутствие мощного модуляционного тракта позволяет увеличить средний КПД передатчика до 86% и не ограничивать полосу модулирующих частот [168], позволяя работать с любыми перспективными методами модуляции. В результате

более 700 цифровых передатчиков DX-серии фирмы Harris мощностью от 10 кВт до 2000 кВт были установлены по всему миру за последние 10 лет XX века.

Цифровые передатчики (цифровые усилители мощности АФМ сигналов) диапазонов СЧ-ВЧ активно исследовались, в том числе автором, в лаборатории связанных транзисторных передатчиков МТУСИ в 1986 – 1994 годах [40]. В частности, вопросы непосредственного сложения мощности (без применения мостовых устройств) ключевых генераторов рассматривались в [29], способы построения мощного ЦАПа – в [27], получено четыре авторских свидетельства СССР [1-4]. Были разработаны математические модели различных разновидностей цифровых передатчиков, программы и методики расчета их характеристик, определены требования к отдельным узлам и блокам, проведена оптимизация структур цифровых передатчиков в зависимости от требуемых параметров. Все теоретические выводы получили экспериментальное подтверждение на лабораторных макетах.

Проведенные исследования показали целесообразность применения цифрового способа усиления только при достаточно большом уровне выходной мощности (десятки киловатт и более). При меньшей выходной мощности конструкция передатчика неоправданно усложняется из-за необходимости применения большого числа относительно маломощных модулей, что приводит также к снижению общего КПД и увеличению стоимости изделия. В этом случае целесообразно применять сочетание цифрового способа формирования малоразрядной ступенчатой аппроксимации огибающей (3...5 двоичных разрядов) с различными методами линеаризации амплитудной характеристики тракта огибающей.

2.2.3.4 Цифровые передатчики с линеаризацией проходной характеристики методом дефазирования

Как показано в [37], наиболее целесообразным методом линеаризации амплитудной характеристики тракта огибающей малоразрядного цифрового

передатчика (по критерию получения высоких энергетических и качественных показателей) является использование хорошо известного метода дефазирования. Предложенная и исследованная в [37], данная разновидность цифрового усилителя мощности была реализована в новых сериях вещательных передатчиков фирмы Thomcast: S7HP и M²W, также предназначенных для работы с перспективными видами модуляции.

Следует отметить, что фирма Thomcast (в настоящее время Ampegon) называет применяемый способ модуляции комбинацией импульсно-ступенчатой модуляции (Pulse Step Modulation) и дефазирования (Ampliphase). Существующая терминологическая разница в корпоративных названиях используемых методов формирования выходного сигнала между фирмами Harris и Thomcast обусловлена скорее юридическими, а не техническими аспектами. Фирма Harris запатентовала термин «цифровой передатчик» (Digital AM Transmitter), его принцип действия, варианты структурной схемы и схемотехнической реализации основных узлов. Фирма Thomcast (подразделение Thomson – CSF) приобрела радиовещательное подразделение ABB (Asea Braun Bowery) с патентами на «импульсно-ступенчатую модуляцию» (Pulse Step Modulation) и часть прав на RCA (Radio Corporation of America), выпускавшей в 70-е годы ламповые передатчики с модуляцией дефазированием (Ampliphase).

В свою очередь, МТУСИ также имеет ряд авторских свидетельств на «усилители мощности» с цифровым формированием выходного сигнала, позволяющих обеспечить юридическую чистоту собственных разработок.

В мощных ВЧ вещательных передатчиках фирма Thomcast действительно применяет импульсно-ступенчатую модуляцию, используя полупроводниковый модулятор в виде совокупности большого числа коммутируемых развязанных вторичных источников питания для осуществления анодной модуляции лампового оконечного каскада. В СЧ передатчиках фирмы Thomcast модулятор как устройство отсутствует, а ступенчатая аппроксимация огибающей выходного сигнала формируется посредством сложения мощностей различного числа радиочастотных усилителей – также, как и в цифровых передатчиках фирмы

Harris. Для устранения терминологических расхождений в данной работе применяется сложившаяся в русскоязычной научно-технической литературе классификация высокоэффективных методов усиления [40], по которой передатчики фирмы Thomcast определяются как цифровые с линеаризацией проходной характеристики методом дефазирования.

Структурная схема передатчика серии M²W фирмы Thomcast [144] приведена на рисунке 2.3. Входной низкочастотный сигнал (или огибающая $A(t)$ произвольного сигнала с амплитудно-фазовой модуляцией) поступает на АЦП и далее подвергается цифровой обработке сигнальным процессором и быстродействующими специализированными ИМС высокой степени интеграции (ПЛИС), в результате которой синтезируются управляющие сигналы для формирователя кодов уровней ступенчатого приближения огибающей и управляемого ВЧ генератора. Формирователь кодов уровней осуществляет включение необходимого числа ВЧ усилителей мощности для обеспечения грубой аппроксимации огибающей выходного сигнала. Управляемый ВЧ генератор, построенный по принципу прямого цифрового синтеза, по сигналам тракта обработки огибающей осуществляет цифровую фазовую модуляцию несущей частоты (или фазомодулированной составляющей $\omega_{0+\varphi}(t)$ произвольного АФМ сигнала). На двух его выходах формируются высокочастотные колебания с фазами $\varphi(t)+\Delta\Phi(t)$ и $\varphi(t)-\Delta\Phi(t)$, которые через высокочастотный коммутатор поступают на входы ВЧ усилителей мощности, работающих в режиме дефазирования, в результате чего осуществляется плавная регулировка их выходного напряжения и восстанавливается исходная форма огибающей.

Микропроцессорный блок контроля осуществляет ротацию ВЧ усилителей мощности с целью поддержания одинаковой рабочей температуры блоков и создания им равных рабочих условий.

Передатчик TMW 2010 мощностью 10 кВт содержит всего восемь усилительных блоков (Harris DX-10 той же мощности – 48), что позволяет уменьшить потери в межблочных соединениях, упростить конструкцию и

повысить надежность. Для более мощных моделей эта разница стремительно сокращается: TMW 2050 (50 кВт) содержит уже 40 блоков, а Harris DX-50 – 64, и различия в характеристиках передатчиков практически исчезают.

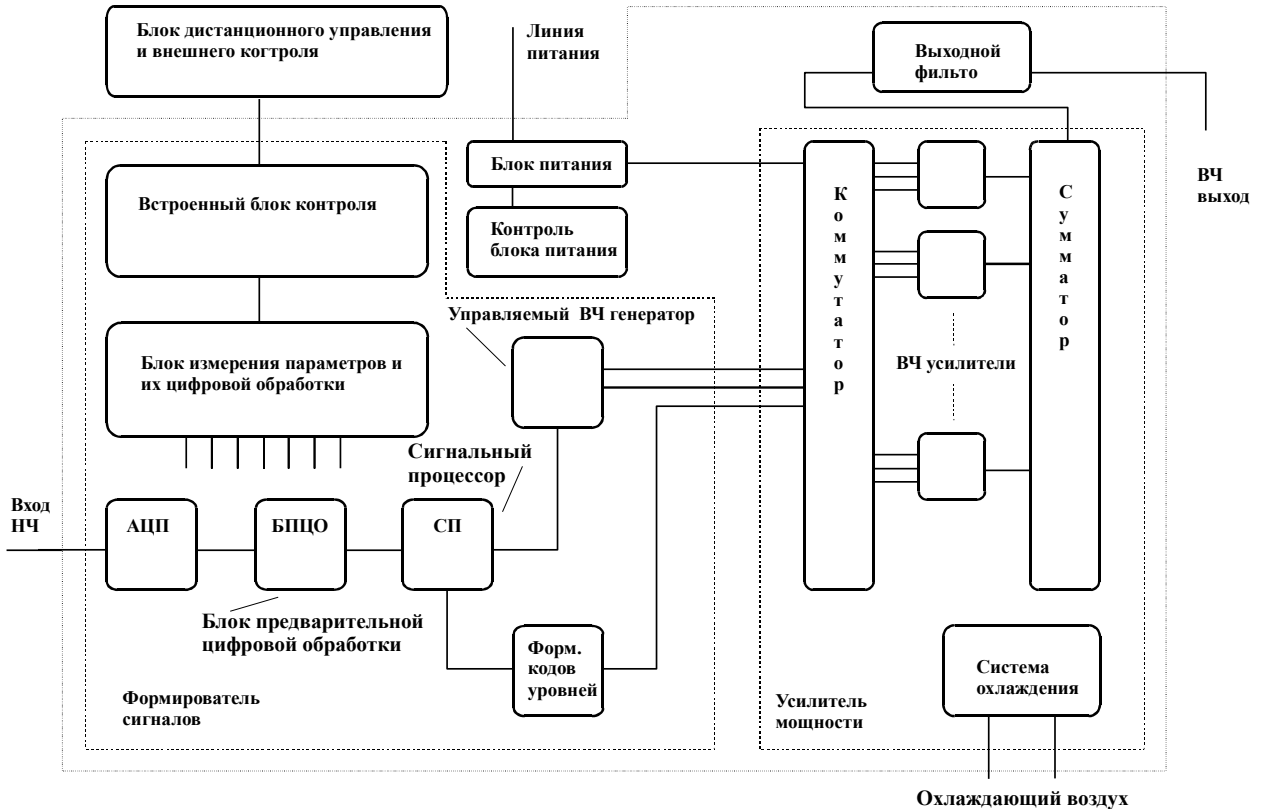


Рисунок 2.3 – Структурная схема передатчика с цифровым формированием огибающей и линейризацией методом дефазирования.

Совместное использование методов цифрового формирования огибающей и модуляции дефазированием позволяет, с одной стороны, уменьшить число усилительных блоков и, соответственно, потери в системе сложения мощностей, а с другой стороны, уменьшить среднее время нахождения усилительных блоков в энергетически менее выгодных режимах с большой расфазировкой, что свойственно передатчикам с модуляцией дефазированием.

Таким образом, сочетание методов цифрового формирования огибающей и модуляции дефазированием (или наоборот) наиболее целесообразно в диапазоне выходных мощностей 5 – 50 кВт. При меньших выходных мощностях (0,5 – 5 кВт) использование цифрового формирования огибающей теряет свою актуальность.

В этом случае достаточно построения передатчика по методу дефазирования, характеризующегося высоким КПД, меньшими ограничениями на полосу модулирующих частот, чем у передатчиков с ШИМ модулятором, и отсутствием задержки в тракте огибающей. Отдельно взятый ВЧ блок передатчика серии M²W фирмы Thomcast фактически является окончательным усилителем передатчика с дефазированием мощностью 1 кВт. Передатчики, построенные по методу дефазирования, производились в начале XXI века в небольшом количестве фирмой Broadcast Electronics (серия 4MX с мощностями 25 и 50 кВт).

Таким образом, современные НЧ-СЧ радиовещательные передатчики являются полностью полупроводниковыми, широко используют ключевые режимы работы активных элементов, обладают высоким промышленным КПД (75...88%), малыми габаритами и способны работать с различными видами модуляции. В них широко используются различные способы высокоэффективного усиления. Далее будут рассмотрены требования к характеристикам отдельных узлов передатчиков, обеспечивающих выполнение требований на ЭМС и качественные параметры.

2.3 Разработка требований к характеристикам линейных передатчиков

Любое радиопередающее устройство, способное усиливать сигнал с амплитудно-фазовой модуляцией, для выходного сигнала представляет собой линейный усилитель мощности – независимо от применения различных рассмотренных выше «синтетических» методов усиления. По этой причине, несмотря на то, что собственно линейные (в виде УМК) усилители мощности для ЦРВ применяются достаточно редко (из-за невысокого КПД), рассмотрение их характеристик актуально для всех типов передатчиков. Применение различных «синтетических» методов высокоэффективного усиления только добавляет к ним специфические особенности каждого из методов.

Линейный усилитель мощности характеризуется линейностью его амплитудной характеристики (АХ, зарубежное название АМ-АМ) и

неравномерностью фазоамплитудной характеристики (ФАХ, зарубежное название АМ-РМ). Далее проводится анализ влияния неидеальностей этих характеристик передатчика на спектральные характеристики его выходного сигнала и величину MER.

2.3.1 Выбор метода анализа

Разработку требований на допустимые отклонения характеристик передатчика от идеальных (по критерию соответствия спектра выходного сигнала маске на внеполосные излучения), можно провести с помощью современных систем компьютерного моделирования. Данная процедура не требует проведения анализа в реальном времени и была выполнена с помощью программы для системного проектирования SystemView компании ELANIX [156] на записанном тестовом фрагменте DRM сигнала. Однако определить значение MER для DRM сигнала ни одна из систем компьютерного моделирования не позволяет – из-за отсутствия специализированных библиотек обработки сигнала. Написание подобных библиотек по степени трудоемкости сопоставимо с написанием программного декодера DRM и не является целесообразным при наличии свободно распространяемых программных приемников DRM с открытым кодом [119]. Тем не менее, без решения этой задачи остается неясным вопрос: будут ли обеспечиваться при выполнении требований ЭМС требования на величину MER, или же требования на MER окажутся более жесткими.

Существует несколько возможных подходов к определению величины параметра MER в выходном сигнале радиопередатчика, работающего в режиме ЦРВ. Один из них основан на использовании математических расчетов, как, например, в [107, 108, 113], где показано, что продукты нелинейных искажений передатчика имеют Гауссовское распределение и влияют на сигнал ЦРВ аналогично шуму в канале распространения. Учитывая сложность используемого математического аппарата, расчеты спектральных характеристик выходного сигнала проводятся только для относительно простых нелинейностей

передающего устройства. Кроме того, невысокая точность получаемых результатов и необходимость преобразования всего математического аппарата при переходе от одного режима работы системы ЦРВ к другому (16 QAM, 64 QAM и пр.), затрудняют применение этого метода на практике. Несмотря на то, что подобный аналитический подход позволяет получить обобщенные теоретические результаты, представляется нецелесообразным использование его для разработки требований на характеристики конкретных реальных передающих устройств.

Другой способ определения величины параметра MER основан на непосредственном его измерении в выходном сигнале действующего радиопередатчика, работающего в режиме ЦРВ. Однако, учитывая сложную помеховую обстановку на радиочастотах и ограниченный набор оперативных регулировок в действующем радиопередатчике, данный способ также не позволит получить достаточно точные результаты в широком диапазоне изменения нелинейностей характеристик передатчика.

В связи с вышесказанным, в настоящей работе для исследования влияния передающего устройства на величину MER в сигнале ЦРВ был выбран метод компьютерной имитации нелинейности характеристик передатчика в реальном времени с использованием тестового передатчика и измерительного приемника стандарта DRM. Использование такого подхода позволяет провести измерения MER в выходном сигнале ЦРВ для большого набора характеристик, близких к характеристикам реальных передающих устройств.

Ниже приводится описание разработанной измерительной установки, и обсуждаются результаты проведенных с ее помощью исследований.

2.3.2 Установка для исследования влияния нелинейностей DRM передатчика на величину MER в выходном сигнале

Ширина полосы частот сигнала DRM не превышает 20 кГц, а число поднесущих OFDM сигнала относительно невелико (не более 460). Данные

характеристики сигнала позволяют проводить программную симуляцию нелинейного передатчика в реальном времени с использованием персонального компьютера и звуковых карт в качестве устройств ввода-вывода. Более широкая полоса частот внеполосных излучений обуславливает использование звуковых карт с частотой дискретизации 96 кГц. Структурная схема разработанной и созданной измерительной установки представлена на рисунке 2.4.

Измерительная установка состоит из персональных компьютеров ПК1 (передатчик) и ПК2 (приемник). Выход звуковой карты ПК1 соединен с входом звуковой карты ПК2. Таким образом, ПК1 работает в качестве передатчика стандарта DRM и имитатора нелинейности передающего устройства, а ПК2 работает в качестве измерительного приемника стандарта DRM. Компьютер ПК1 осуществляет чтение предварительно записанного в файл испытательного DRM сигнала на несущей частоте 12 кГц или квадратурных компонент сигнала на нулевой частоте. Для имитации искаженного испытательного сигнала ЦРВ в ПК1 используется разработанная в НИЛ-6 МТУСИ программа «Модель радиочастотного усилителя мощности». В данной программе исходный испытательный DRM сигнал преобразуется в сигналы огибающей и фазомодулированной составляющей. Далее в них вводятся соответствующие искажения, после чего происходит обратное преобразование и выдача сигнала на выход звуковой карты ПК1. Программа позволяет считывать файлы, записанные с частотами дискретизации 44,1 кГц, 48 и 96 кГц, вводить полиномиальные нелинейности АХ и ФАХ, как совместно, так и по отдельности, до пятого порядка включительно. Программа позволяет также отображать на экране монитора внешний вид амплитудной и фазоамплитудной характеристик. Интерфейс программы «Модель радиочастотного усилителя мощности» представлен на рисунке 2.5. Сформированный таким образом искаженный сигнал DRM передатчика подается на ПК2, содержащий программы анализатора спектра и декодера DRM [119] с функцией измерения MER.

При испытаниях описанной выше измерительной установки были определены ее предельные возможности по измерению величины MER.

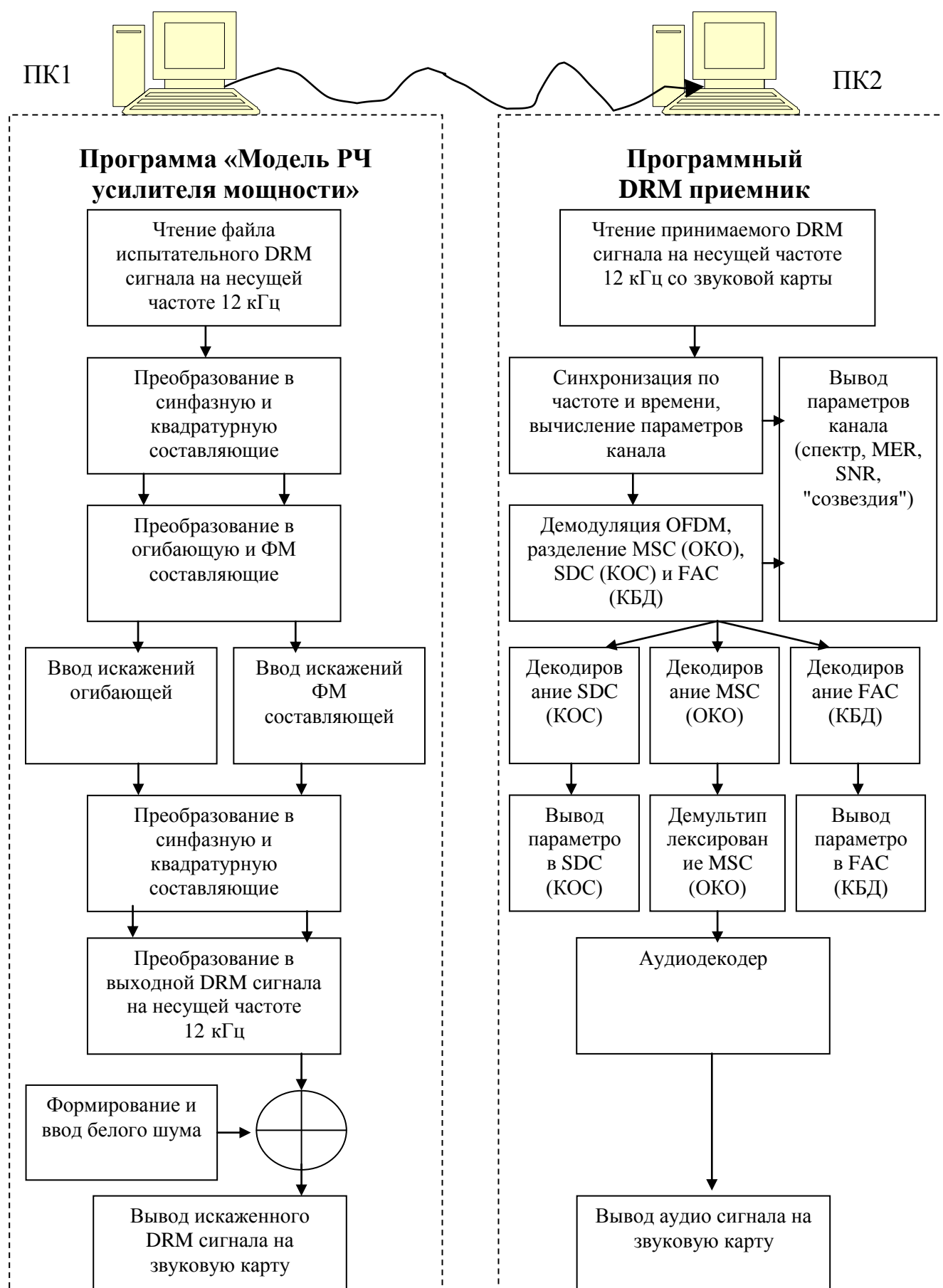


Рисунок 2.4 – Структурная схема установки для анализа влияния нелинейности передающего устройства на величину MER в выходном сигнале ЦРВ

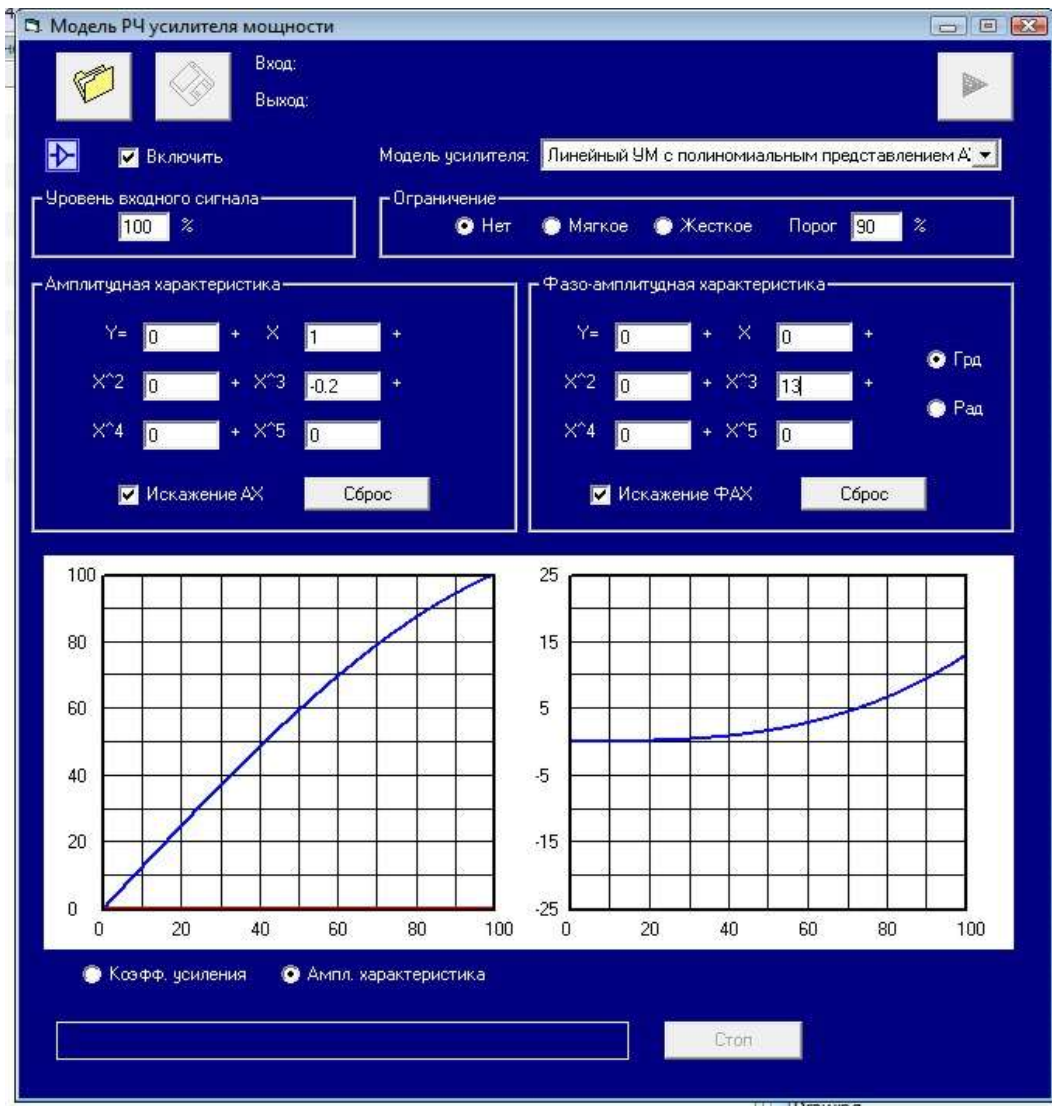


Рисунок 2.5 – Интерфейс программы «Модель радиочастотного усилителя мощности» с загруженным модулем симуляции УМК

Так, при использовании в нелинейной модели передатчика идеальных амплитудных и фазо-амплитудных характеристик величина MER, измеренная в выходном сигнале ЦРВ, составляла 45 дБ, что обусловлено значением MER исходного файла DRM сигнала, а также шумами квантования и аналоговыми шумами устройств ввода-вывода (звуковых карт примененных персональных компьютеров ПК). Поскольку нормируемый уровень MER в выходном сигнале передающего устройства должен быть не менее 30 дБ, можно считать характеристики измерительной установки достаточными для проведения исследований.

2.3.3 Результаты анализа влияния нелинейности характеристик передающего устройства на величину MER и спектральные характеристики выходного сигнала DRM

Реальные амплитудные и фазоамплитудные характеристики (АХ и ФАХ) передатчиков обладают целым комплексом различного вида нелинейностей, каждая из которых приводит к соответствующим искажениям спектра выходного сигнала. В связи с этим автором были проанализированы типичные виды нелинейностей передатчиков различного построения и различных диапазонов частот, в результате чего были выбраны для исследования как идеализированные амплитудные характеристики с «резкими изломами», так и амплитудные и фазоамплитудные характеристики с «гладкими» нелинейностями [11]. Среди всего многообразия рассмотренных характеристик приводятся результаты для тех, которые в наибольшей степени могут повлиять на величину MER в выходном сигнале передатчика. Так, среди АХ, имеющих «резкие изломы», наиболее актуальным является рассмотрение «амплитудной отсечки снизу»:

$$y(x) = \begin{cases} x \cdot (1 + a) - a, & \text{при } x > a/(1 + a) \\ 0, & \text{при } x \leq a/(1 + a) \end{cases}.$$

«Гладкие» нелинейности в реальных передатчиках встречаются значительно чаще, чем АХ и ФАХ с «резкими изломами». Амплитудные характеристики с «гладкими» нелинейностями описываются полиномиальным выражением (полиномиальные нелинейности) вида:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n.$$

В реальных передатчиках основной вклад в нелинейность АХ вносят первые несколько членов ряда. Поэтому приводятся результаты анализа для нелинейных АХ, описываемых следующими полиномиальными выражениями:

– квадратичная нелинейность вида: $y(x) = ax^2 + x$;

– кубичная нелинейность вида: $y(x) = ax^3 + x$;

– S-образная нелинейность вида: $y(x) = ax^3 + bx^2 + x$, при $a < 0$, $b > 0$;

– N-образная нелинейность вида: $y(x) = ax^3 + bx^2 + x$, при $a > 0$, $b < 0$, где a и b – параметры нелинейности, изменяемые в процессе анализа.

Результаты анализа влияния нелинейности АХ передатчика на величину MER в его выходном сигнале в графическом виде приведены на рисунках 2.6...2.8. Предельные значения параметров a и b для соответствия спектра выходного сигнала маске на допустимые внеполосные излучения показаны на всех рисунках синими точками. Пример полученного в результате симуляции спектра выходного сигнала для предельных значений S-образной нелинейности с параметром $a = -0,7$ приведен на рисунке 2.9.

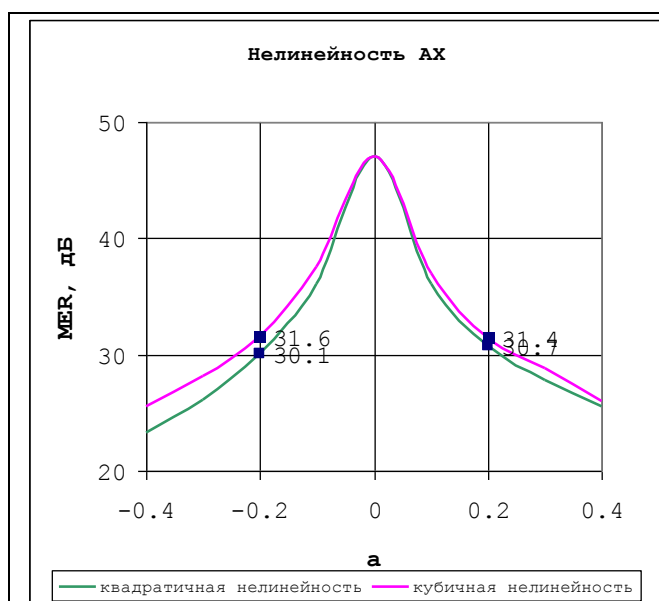


Рисунок 2.6 – Нелинейность АХ: квадратичная и кубическая

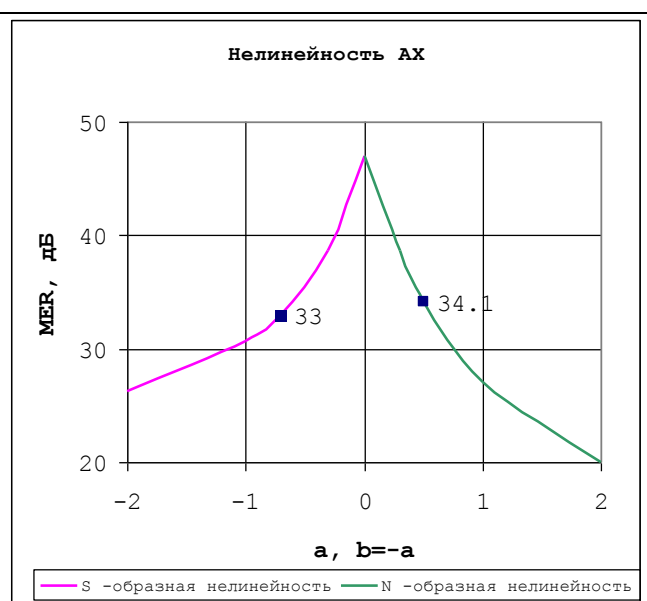


Рисунок 2.7 – Нелинейность АХ: S-образная и N-образная

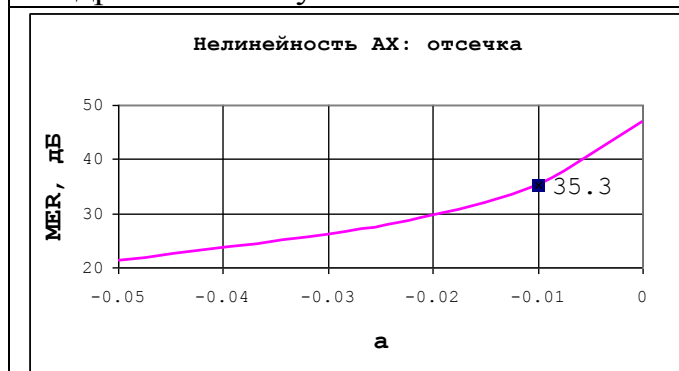


Рисунок 2.8 – Нелинейность АХ: отсечка снизу (уход нуля)



Рисунок 2.9 – Пример спектра выходного сигнала для предельных значений S-образной нелинейности с параметром $a = -0,7$

Для ФАХ приводятся результаты анализа для характеристик, описываемых следующими выражениями:

- $y(x) = ax^2$;
- $y(x) = ax^3$;
- $y(x) = a(1-x)^2$;
- $y(x) = a(1-x)^3$;
- $y(x) = ax^2 + bx^3$;
- $y(x) = a(1-x)^2 + b(1-x)^3$,

где a и b – параметры неравномерности.

Результаты анализа влияния неравномерности ФАХ передатчика на величину MER в его выходном сигнале в графическом виде приведены на рисунке 2.10.

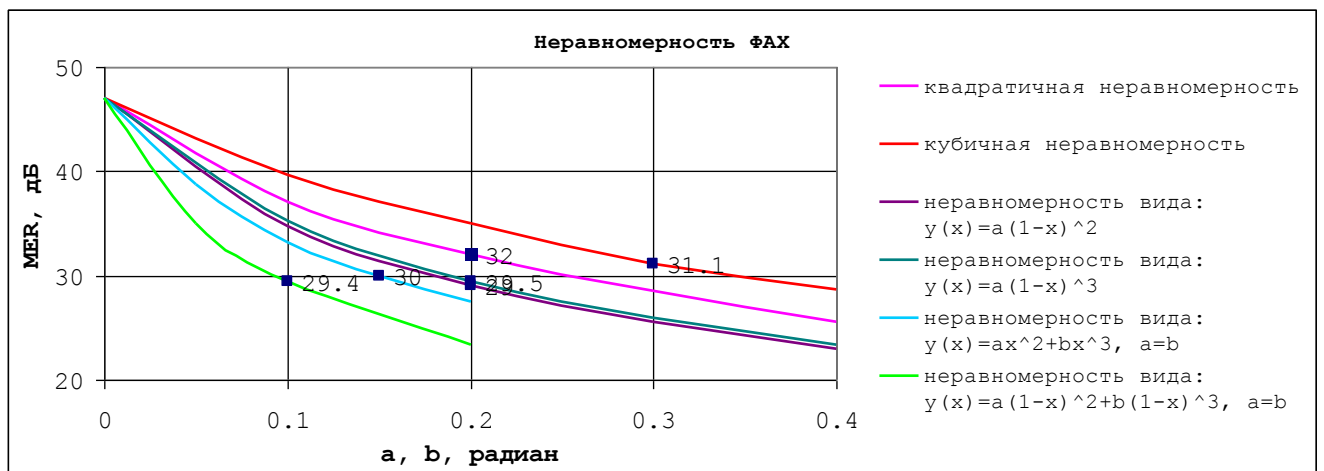


Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициента ошибок модуляции (MER) от неравномерности ФАХ передатчика

Анализ полученных результатов (рисунки 2.6...2.10) показывает, что для предельно допустимых значений параметров нелинейности исследованных характеристик, при которых выполняются требования ЭМС по ограничению уровней внеполосных излучений, значения MER в выходном сигнале достаточно высоки и превышают требуемые. Таким образом, влияние нелинейности

передатчика на величину MER менее критично, чем на выходной спектр. Поскольку требования на допустимую нелинейность передатчика по критерию допустимого уровня внеполосных излучений являются более жесткими, соответствие спектральной маске и должно использоваться в качестве критерия при проведении настройки передатчиков, модернизируемых для работы с сигналами ЦРВ.

Также необходимо отметить следующее:

- 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 ($0 < u_{\text{вх}} < 0,3 u_{\text{вх макс}}$), то требование ужесточается до 0,05 радиан. И, наоборот, если максимальная неравномерность ФАХ наблюдается в области больших амплитуд входного сигнала ($0,5U_{\text{вх макс}} < U_{\text{вх}} < U_{\text{вх макс}}$), то требование смягчается до 0,2 радиан;

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

Рассмотрение случаев совместного влияния нелинейности АХ и неравномерности ФАХ показало, что 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.

В современных передатчиках широко применяются различные устройства предкоррекции характеристик. В этом случае требования к характеристикам собственно усилительного тракта могут быть снижены, а полученные значения следует рассматривать как требования к характеристикам точности предкорректоров.

Разработанные требования на нелинейность АХ и неравномерность ФАХ для линейных передатчиков являются одной из составных частей требований к передатчикам, использующих методы высокоэффективного усиления. Кроме этого, такие передатчики имеют ряд специфических (обусловленных способом построения) причин для возникновения искажений, требования к которым будут рассматриваться ниже.

2.4 Разработка требований к характеристикам передатчиков с отдельным усилением

Причины нелинейных искажений в передатчиках с отдельным усилением (к ним относятся передатчики с ШИМ или ИСМ модуляторами) рассмотрены в литературе достаточно широко, в частности, автором в [40, 65]. В общем виде они обусловлены следующими факторами: задержкой в амплитудном детекторе, АФК в амплитудном ограничителе, АФК в модулируемом усилителе ФМ составляющей, нелинейностью амплитудной характеристики (АХ) усилителя огибающей, нелинейностью модуляционной характеристики модулируемого усилителя ФМ составляющей (включая «уход нуля»), ограниченностью полосы пропускания усилителя огибающей и задержкой в его ФНЧ. Данные характеристики могут быть получены в результате моделирования усилителя на этапе его проектирования или измерены в реальном устройстве на простых тестовых сигналах.

Таким образом, модель ключевого передатчика с отдельным усилением, включающая в себя вышеперечисленные причины искажений выходного сигнала, интегрально должна содержать:

- блок, описывающий амплитудную характеристику (АХ);
- блок, описывающий фазоамплитудную характеристику (ФАХ);
- блок, описывающий ограниченность полосы пропускания тракта усиления огибающей;
- блок относительной задержки между трактами усиления огибающей и ФМ составляющей.

Необходимо отметить, что первые два блока, описывающие АХ и ФАХ передатчика, рассматривались выше при анализе работы линейных усилителей мощности. В данном параграфе исследуются специфические искажения передатчиков с отдельным усилением, определяемые наличием в них тракта усиления огибающей. Для анализа используется описанная выше измерительная установка (см. рисунок 2.4). Интерфейс программы «Модель радиочастотного усилителя мощности» с загруженным модулем симуляции усилителя с отдельным усилением приведен на рисунке 2.11.

При работе модуля, для корректного расчета широкополосного сигнала огибающей, применяется внутренняя передискретизация на частоту 384 кГц.

Результаты исследований зависимости искажений от величины относительной взаимной некомпенсированной задержки между огибающей и фазомодулированной составляющей сигнала приведены на рисунке 2.12.

Представленный на рисунке 2.12 график показывает зависимость «запаса» спектра выходного сигнала до ограничительной линии маски ЭМС от взаимной нормированной задержки между составляющими сигнала. Нормированная задержка определяется как: $\Theta = \tau/T$, где τ – взаимная задержка между огибающей и ФМ составляющей (в мкс), $T = 1/B_n$ – величина (в мкс), обратная необходимой полосе частот сигнала. В частности, для сигнала DRM с необходимой шириной полосы частот 10 кГц допустимая задержка составляет не более 1 мкс.

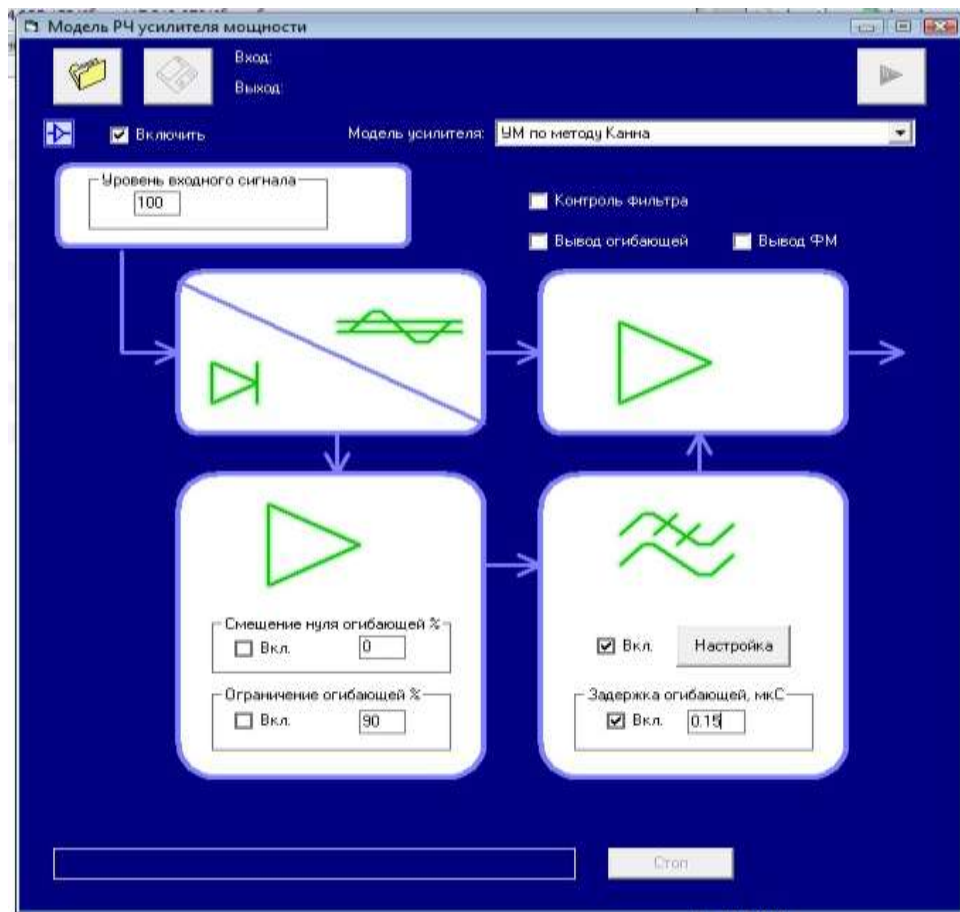


Рисунок 2.11 – Интерфейс программы «Модель радиочастотного усилителя мощности» с загруженным модулем симуляции усилителя с отдельным усилением



Рисунок 2.12 – Зависимость запаса спектра выходного сигнала до маски ЭМС от нормированной относительной задержки ($\Theta = \tau/T$) между огибающей и ФМ составляющей усиливаемого сигнала

При наличии некомпенсированной задержки, как и в случае со смещением нуля, спектр внеполосных излучений спадает достаточно медленно при малом уровне искажений в непосредственной близости от полезного сигнала.

Другим важным фактором, влияющим на параметры усиливаемого сигнала, является ограничение полосы пропускания тракта усиления огибающей. Причем, если смещение нуля огибающей и относительную задержку можно сделать сколь угодно малыми, то ограничение полосы частот огибающей принципиально неустранимый фактор, поскольку огибающая OFDM сигнала имеет бесконечный спектр. Проведенный анализ показал, что 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 требования к DRM передатчикам, сформулированные DRM консорциумом, изложенные в [117, 135], дополняя их в части требований к характеристикам АХ и ФАХ.

Основные полученные результаты анализа были практически подтверждены на макете усилителя мощности с отдельным усилением диапазона ВЧ, разработанном в НИЛ-6 МТУСИ [31]. Результаты работы были также внедрены в учебный процесс МТУСИ в виде созданного программно-аппаратного комплекса и организации лабораторного практикума, направленного на изучение принципа работы радиопередающих устройств, использующих высокоэффективный метод отдельного усиления [36].

2.5 Разработка требований к передатчикам с цифровым преобразованием огибающей

Передатчики с цифровым преобразованием огибающей характеризуются рядом специфических причин для возникновения нелинейных искажений, обусловленных принципом их работы. Изменение количества подключенных к нагрузке ключевых генераторов (КГ) при изменении амплитуды входного сигнала приводит к изменению сопротивления нагрузки, приводимой к отдельным КГ [27].

При постоянстве сопротивления насыщения транзисторов КГ и их выходных емкостей, изменение сопротивления нагрузки приводит к изменению выходного напряжения и фазы сигнала каждого отдельного КГ при смене кодовых комбинаций. Данные эффекты приводят к возникновению нелинейности АХ и неравномерности ФАХ, которые в УМЦПО имеют ступенчатый характер. При достаточно большом числе разрядов цифрового тракта (необходимом для обеспечения малого уровня шумов квантования), можно использовать аппроксимацию АХ и ФАХ, и применять требования к ним, разработанные выше для линейных усилителей.

Следующей причина искажений в УМЦПО обусловлена инерционностью КГ, которая приводит к динамическим искажениям формы выходного сигнала в момент смены кодовых комбинаций. Данные особенности подробно рассмотрены автором в [40], и могут приводить с одной стороны к дополнительной нелинейности АХ, а с другой стороны к задержке огибающей, требования к которой были рассмотрены при анализе усилителей с раздельным усилением.

Наконец, необходимо учитывать шумы квантования мощного блока ЦАП, которые определяют уровень внеполосных излучений. Для обеспечения этих требований используют разрешающую способность цифрового тракта более 11 разрядов или применяют дополнительный маломощный линеаризующий канал с ШИМ-модуляцией.

2.6 Разработка требований к передатчикам с дефазированием

Выше рассматривались способы построения радиопередатчиков, основанные на применении метода Кана, когда огибающая выходного сигнала восстанавливается на высоком уровне мощности за счет анодной (стоковой) модуляции оконечного каскада ВЧ тракта или формируется посредством сложения мощностей переменного количества радиочастотных усилителей. В этом случае требуется мощный, построенный тем или иным способом модулятор (или сумматор мощностей), а также устройства для согласования

времен распространения составляющих сигнала ЦРВ в НЧ и ВЧ трактах передатчика.

В тоже время существует способ осуществления амплитудной модуляции без применения мощных модуляционных устройств. Это известный еще с 1935 года и предложенный М. Ширексом метод дефазирования [112], позволяющий формировать огибающую выходного сигнала путем сложения двух специально сформированных и усиленных до необходимого уровня мощности фазомодулированных колебаний. Причем, поскольку суммируемые сигналы имеют постоянную амплитуду, они могут быть усилены до необходимого уровня мощности высокоэффективными нелинейными усилителями (классов С, D, E). В тоже время, несмотря на имеющиеся в зарубежных источниках сведения по практическому использованию метода дефазирования при построении радиовещательных АМ передатчиков НЧ и СЧ диапазонов [144], теоретические исследования метода дефазирования ограничены лишь работами [64, 66]. Однако они не дают ответа на многие вопросы и не учитывают особенностей сигнала ЦРВ и возможностей современной элементной базы. В связи с этим далее будут рассмотрены основные причины искажений сигналов в радиопередатчике с дефазированием (РПДФ) и разработаны требования к характеристикам его узлов, обеспечивающие заданные параметры выходного сигнала.

2.6.1 Принцип действия радиовещательного передатчика, построенного по методу дефазирования (РПДФ)

Передатчик, построенный по методу дефазирования, помимо типовых узлов (синтезатора, возбuditеля, усилительных трактов, выходных колебательных систем и пр.) должен содержать специфические узлы, осуществляющие модуляцию дефазированием. К таким узлам относится прежде всего расщепитель (signal separator) [114], осуществляющий операцию разложения сформированного на низком уровне мощности модулированного ВЧ сигнала (в общем случае с амплитудно-фазовой модуляцией (АФМ)) на огибающую и ФМ составляющую

(аналогично методу Кана) с последующим формированием из них двух канальных сигналов с постоянной амплитудой и требуемой фазовой модуляцией (либо расщепитель сразу формирует канальные сигналы непосредственно из низкочастотного передаваемого сообщения и сигнала несущей частоты, т.е. без осуществления модуляции на низком уровне мощности). Расщепитель АФМ-сигнала (независимо от того, что поступает на его вход – АФМ-сигнал или непосредственно передаваемое сообщение) ниже будем именовать «формирователь канальных сигналов» (ФКС). Кроме ФКС передатчик с модуляцией дефазированием обязательно содержит сумматор Σ , осуществляющий синтез исходного АФМ-сигнала на высоком уровне мощности путем пассивного сложения усиленных канальных сигналов. Еще одной особенностью передатчика, построенного по методу дефазирования, является наличие двух идентичных усилительных ВЧ трактов (УМ), каждый из которых рассчитан на половину пиковой мощности передатчика (с учетом КПД сумматора, выходной колебательной системы (ВКС) и схемы согласования (СУ) с антенно-фидерным трактом (АФТ)). Структурная схема передатчика, построенного по методу дефазирования и содержащего вышеперечисленные узлы, приведена на рисунке 2.13. Поскольку амплитуда канальных ФМ-сигналов постоянна, канальные усилители (УМ) могут работать в перенапряженном режиме класса С или в ключевом режиме классов D или E, обеспечивая тем самым самую высокую эффективность всего передатчика в целом.

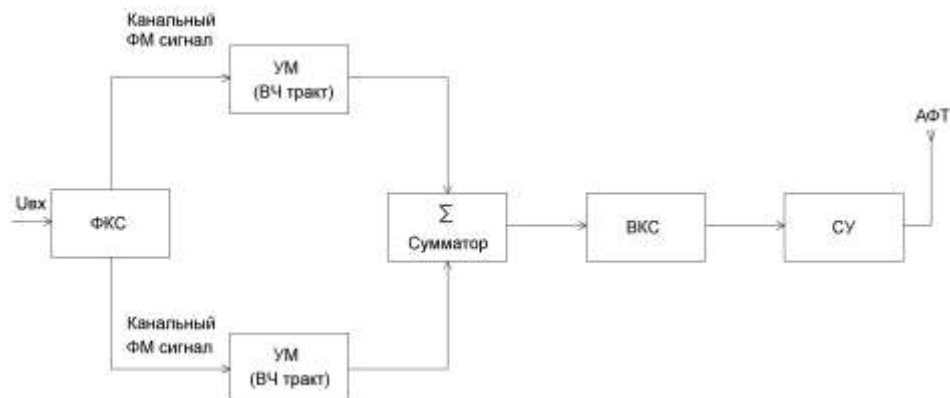


Рисунок 2.13 – Структурная схема передатчика, построенного по методу дефазирования

Из структурной схемы на рисунке 2.13 и изложенного принципа работы РПДФ следует, что уровень искажений выходного модулированного сигнала определяется точностью формирования канальных сигналов и идентичностью характеристик канальных УМ. Так как между выходами ФКС и входами УМ могут находиться тракты переноса частоты (если канальные сигналы сформированы не в рабочем диапазоне), то они также должны быть идентичными.

2.6.2 Разработка математической модели РПДФ

Поскольку РПДФ является линейным устройством, способным усиливать (формировать на своем выходе) сигналы с амплитудно-фазовой модуляцией, то наиболее рациональным математическим описанием представляются его статические амплитудная (АХ) и фазо-амплитудная (ФАХ) характеристики. Эти характеристики можно получить при исследовании сигнала на выходе РПДФ с учетом амплитудной и фазовой асимметрии канальных сигналов.

Идеальные канальные сигналы описываются выражениями [134]:

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

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

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.

Запишем эти выражения в показательной форме:

$$\dot{S}_1 = U_1 \cdot e^{j(\arccos(U_{\text{вх}}) + \theta_1)},$$

$$\dot{S}_2 = U_2 \cdot e^{j(-\arccos(U_{\text{вх}})+\theta_2)}.$$

Выражение для сигнала на выходе РПДФ, являющегося суммой канальных сигналов, в этом случае имеет 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 определение коэффициента фазовой асимметрии: $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ – разность фазовых набегов канальных сигналов. После преобразований выражение для выходного сигнала примет вид:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = e^{\frac{\theta_1+\theta_2}{2}} \cdot \left[U_1 \cdot e^{j\left[\arccos(U_{\text{вх}})+\frac{\Delta\theta}{2}\right]} + U_2 \cdot e^{-j\left[\arccos(U_{\text{вх}})+\frac{\Delta\theta}{2}\right]} \right].$$

Сомножитель $e^{\frac{\theta_1+\theta_2}{2}}$ представляет собой постоянный фазовый сдвиг выходного сигнала, который не вызывает искажений и может быть принятым равным 1. После преобразования получим:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = (U_2 - U_1) \cdot e^{-j\left[\arccos(U_{\text{вх}})+\frac{\Delta\theta}{2}\right]} + 2 \cdot U_1 \cdot \cos\left[\arccos(U_{\text{вх}}) + \frac{\Delta\theta}{2}\right].$$

Введем определение коэффициента амплитудной асимметрии $\xi = \frac{U_2 - U_1}{U_1}$.

С учетом этого выражение для выходного сигнала можно представить в следующем виде:

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

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:

$$U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}}) = \sqrt{(1 + \xi) \cdot \cos^2 \left[\arccos(U_{\text{ВХ}}) + \frac{\Delta\theta}{2} \right] + \frac{\xi^2}{4}}, \quad (2.1)$$

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:

$$\varphi_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}}) = -\text{arctg} \left\{ \frac{\xi}{2 + \xi} \cdot \text{tg} \left[\arccos(U_{\text{ВХ}}) + \frac{\Delta\theta}{2} \right] \right\}. \quad (2.2)$$

Проанализируем полученные выражения (2.1) и (2.2). Допустим, в РПДФ присутствует только амплитудная асимметрия канальных сигналов ($\Delta\theta = 0$), тогда выражения (2.1) и (2.2) принимают вид:

$$U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}}) = \sqrt{(1 + \xi) \cdot U_{\text{ВХ}}^2 + \frac{\xi^2}{4}}, \quad (2.3)$$

$$\varphi_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}}) = -\text{arctg} \left[\frac{\xi \cdot (1 - U_{\text{ВХ}})}{(2 + \xi) \cdot U_{\text{ВХ}}} \right]. \quad (2.4)$$

Допустим, в РПДФ присутствует только фазовая асимметрия канальных сигналов ($\xi = 0$), тогда выражения (2.1) и (2.2) принимают вид:

$$U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}}) = \cos \left[\arccos(U_{\text{ВХ}}) + \frac{\Delta\theta}{2} \right], \quad (2.5)$$

$$\varphi_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}}) = 0. \quad (2.6)$$

Математическая модель РПДФ, описываемая выражениями (2.1) и (2.2), позволяет исследовать нелинейные искажения выходного сигнала как при раздельном, так и при одновременном воздействии амплитудной и фазовой асимметрии на любых тестовых сигналах.

В качестве примера на рисунке 2.14 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.

Необходимо отметить, что преимуществом теоретического анализа РПДФ с помощью его статических АХ и ФАХ является возможность исследования как

совместного, так и раздельного влияния амплитудной и фазовой асимметрий канальных сигналов. Это дает возможность найти связь между асимметрией канальных сигналов и результирующими АХ и ФАХ РПДФ, оценить наиболее весомые причины нелинейных искажений и рекомендовать способы их снижения.

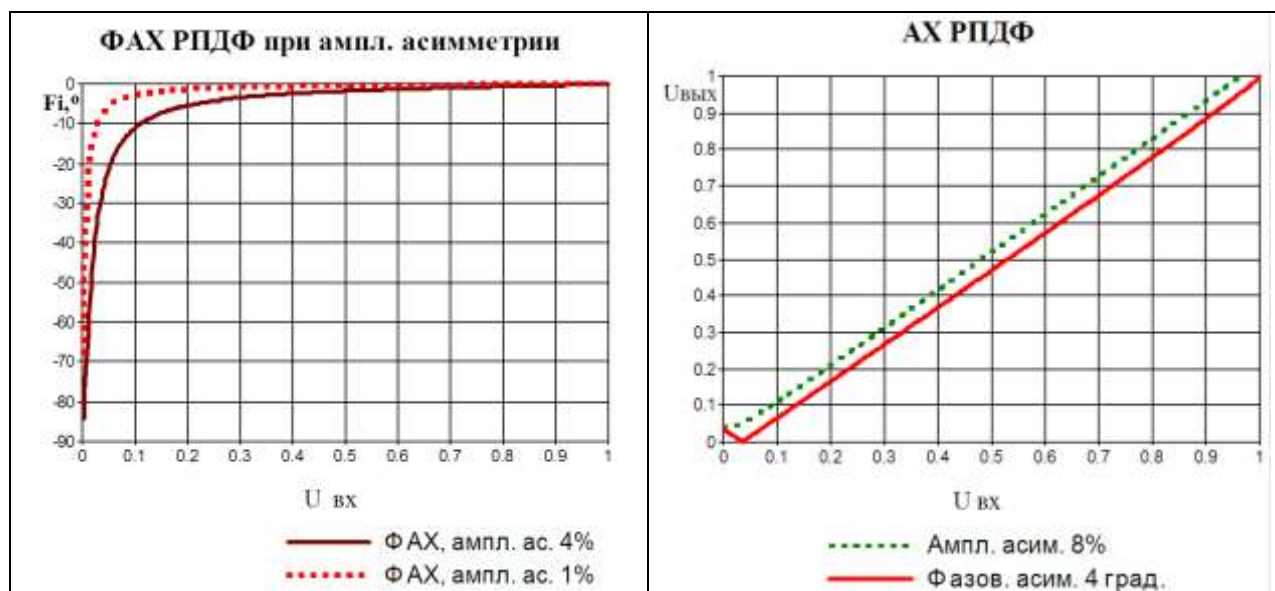


Рисунок 2.14 – Примеры статических АХ и ФАХ РПДФ

В следующих параграфах настоящей главы на основе разработанной модели РПДФ проводится оценка уровней внеполосных излучений при работе в режиме ЦРВ.

2.6.3 Исследование внеполосных излучений РПДФ при работе в режиме цифрового радиовещания

Поскольку разработанная математическая модель РПДФ представляет собой аналитические выражения его статических АХ и ФАХ, то исследуемые сигналы целесообразно представить в виде произведения их мгновенной амплитуды и ВЧ ФМ составляющей. В этом случае для вычисления мгновенной амплитуды выходного сигнала необходимо подставить мгновенную амплитуду входного сигнала в выражение амплитудной характеристики (2.1). Для вычисления паразитной фазовой модуляции выходного сигнала необходимо

подставить мгновенную амплитуду входного сигнала в выражение ФАХ (2.2). Добавив к мгновенной фазе исходного сигнала выражение для паразитной фазовой модуляции, получим закон изменения мгновенной фазы выходного сигнала. Получение аналитических зависимостей искажений спектра выходного OFDM сигнала, вызванных неравномерностью ФАХ, практически невозможно (в настоящее время спектральный состав ФМ сигнала определен только для случая модуляции моногармоническим сигналом). В связи с этим в настоящей работе спектр выходного сигнала РПДФ определяется численными методами.

При анализе внеполосных излучений РПДФ в качестве испытательного сигнала использовался фрагмент реального сигнала ЦРВ в стандарте DRM, записанный в виде файла в IQ формате на персональном компьютере (ПК). Такое представление ЦРВ сигнала позволяет вычислить его мгновенную амплитуду и мгновенную фазу и ввести в сигнал искажения, вызванные реальными амплитудной (АХ) и фазоамплитудной (ФАХ) характеристиками исследуемого передатчика (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 [156].

В качестве примера на рисунке 2.15 приведены спектры выходного сигнала ЦРВ при различных уровнях асимметрии канальных сигналов РПДФ. Как видно из рисунка 2.15а, 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 2.15б).

Аналогичные расчеты проводились при совместном влиянии различных уровней амплитудной и фазовой асимметрии канальных сигналов РПДФ. По результатам этих расчетов на рисунке 2.16 построена замкнутая линия равных (допустимых) уровней внеполосных излучений на плоскости амплитудной и фазовой асимметрии. Как видно из приведенных на рисунке 2.16 результатов,

сигнал ЦРВ предъявляет достаточно жесткие требования к симметрии канальных сигналов РПДФ.

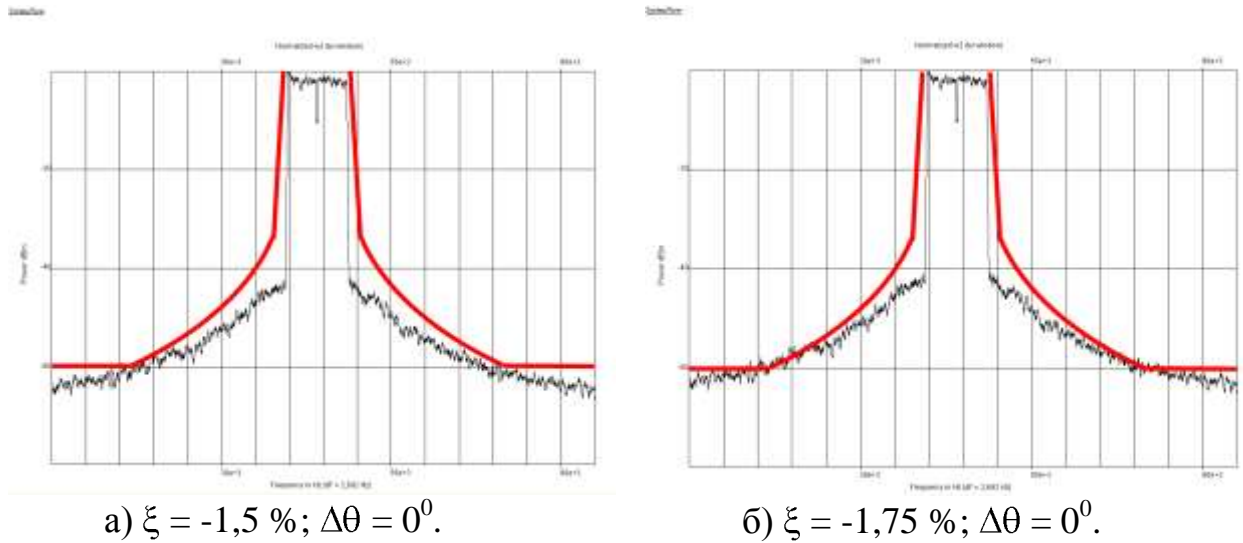


Рисунок 2.15 – Спектры выходного сигнала РПДФ при работе в режиме ЦРВ при различных уровнях амплитудной асимметрии канальных сигналов

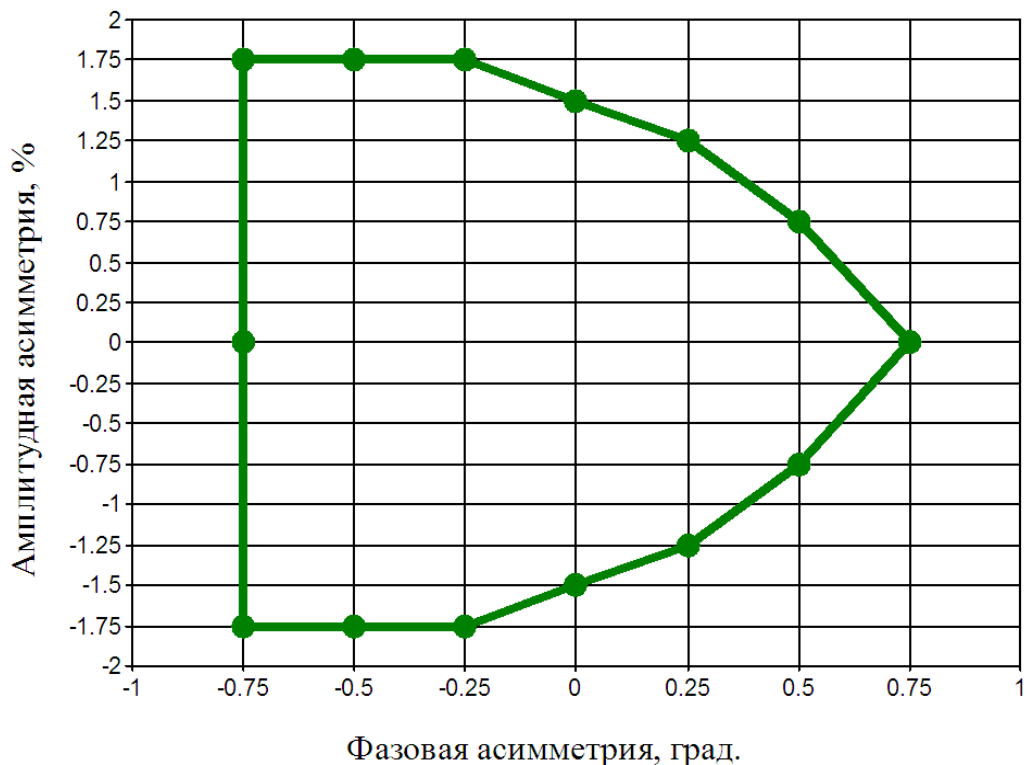


Рисунок 2.16 – Диаграмма допустимых асимметрий канальных сигналов РПДФ, обеспечивающих требования по внеполосным излучениям при работе в режиме цифрового радиовещания

2.6.4 Разработка требований к допустимой асимметрии канальных сигналов РПДФ при работе в режиме ЦРВ

Проведенные в предыдущих разделах исследования позволяют разработать требования к допустимой асимметрии канальных сигналов РПДФ, исходя из требуемого качества выходного сигнала ЦРВ и заданного уровня внеполосных излучений.

Как показали расчеты, проведенные в параграфе 2.3, самые жесткие требования к допустимой асимметрии канальных сигналов предъявляются исходя из необходимости обеспечения заданного уровня подавления внеполосных излучений передатчика. В соответствии с этим, по приведенной на рисунке 2.16 диаграмме видно, что для того, чтобы спектр выходного сигнала ЦРВ удовлетворял требованиям [121] на внеполосные излучения, амплитудная и фазовая асимметрии канальных сигналов должны находиться в пределах:

- амплитудная асимметрия $|\xi| \leq 1,75\%$;
- фазовая асимметрия $|\Delta\theta| \leq 0,75^\circ$.

2.7 Выводы

1. Сформулированы требования к передающим устройствам цифрового радиовещания стандарта DRM.

2. Рассмотрены способы построения современных вещательных радиопередатчиков диапазонов НЧ, СЧ и ВЧ с высоким КПД. Разработана расширенная методика анализа энергетической эффективности ШИМ модулятора в широком диапазоне выходных напряжений.

3. Разработаны требования к характеристикам линейных передатчиков, передатчиков с отдельным 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.

4. Проведенный анализ 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 ($0,5U_{ВХ \text{ МАКС}} < U_{ВХ} < U_{ВХ \text{ МАКС}}$), то требование смягчается до 0,2 радиан;

– искажения выходного сигнала передатчика в большей степени определяются абсолютной величиной неравномерности $\Delta\phi$ 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 характеристикам АХ и ФАХ.

5. Разработана математическая модель РПДФ в виде его статических амплитудной (АХ) и фазоамплитудной (ФАХ) характеристик. Проведенный анализ показал, что асимметрия канальных сигналов РПДФ одновременно приводит к нелинейности АХ и неравномерности ФАХ.

6. 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 $|\Delta\theta| \leq 0,75^\circ$.

3 ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ В РЕЖИМЕ DRM

3.1 Требования к КСВ антенных систем в режимах АМ и DRM

Антенны диапазонов НЧ и СЧ вместе с элементами настройки и согласования обычно образуют систему, аналогичную резонансному контуру. Для высококачественного радиовещания с АМ полоса пропускания этого эквивалентного контура должна быть не менее ± 8 кГц по уровню 3 дБ [8]. Границы полосы пропускания антенны с элементами настройки и согласования определяются значением КБВ в фидере, равным 0,37 (КСВ = 2,7) [8].

При работе современного передатчика с ШИМ модулятором в режиме DRM на узкополосную антенну возможно существенное (до 15 дБ) превышение его выходного спектра над ограничительной линией (маской) допустимых внеполосных радиоколечаний [135].

Для устранения данного эффекта в [135] сформулированы требования к КСВ антенны при работе передатчика в цифровом режиме стандарта DRM: $КСВ \leq 1,05$ в полосе частот ± 5 кГц от несущей и $\leq 1,1$ в полосе частот ± 10 кГц от несущей. Перечисленные требования к допустимому КСВ нагрузки относятся только к конкретному, исследованному в [135] типу передатчиков, с применяемой в них тактовой частотой ШИМ, и могут быть несколько увеличены для передатчиков других типов и производителей. Тем не менее, требования к КСВ антенных систем в режиме DRM оказываются намного более жесткими, чем для режима АМ.

Как показал проведенный анализ характеристик большого количества существующих в настоящее время в РТРС длинноволновых антенн, их КСВ в полосе цифрового сигнала 10 кГц существенно превышает требуемые значения. В ряде случаев это относится и к антеннам средневолнового диапазона при работе передатчика в его низкочастотной части. Поэтому непосредственное использование существующих в настоящее время на сети длинноволнового

вещания антенных систем в режиме DRM не представляется возможным. Более того, указанные требования не могут быть выполнены и при использовании простых реактивных согласующих устройств [42].

Для решения этой задачи далее рассматриваются потенциальные (предельные) возможности согласования антенных систем традиционными методами, а также предлагается не использовавшийся ранее в отечественном мощном радиовещании метод согласования антенных систем с помощью элементов с потерями. Приводится методика расчета согласующих устройств в соответствии с предложенным методом, их сравнение с традиционными СУ и экономический эффект от их применения.

3.2 Анализ потенциальных возможностей LC- согласования антенных систем диапазона НЧ

Входной импеданс используемых в диапазоне НЧ антенных систем, высота опор которых, как правило, не превышает 375 метров, в большинстве случаев эквивалентен полному сопротивлению последовательного RLC контура. В этом случае полосовая добротность нагрузки

$$Q' = (\Delta f / f_0) Q,$$

где: $\Delta f = f_v - f_n$ – полоса согласования; f_0 – средняя частота полосы согласования; Q – добротность последовательного контура, эквивалентного антенной системе.

Известно [95], что предельные возможности согласования произвольной комплексной нагрузки с генератором в заданной полосе частот $\Delta\omega$ определяются соотношением:

$$|\Gamma| \geq \exp(-\pi / Q').$$

При требуемом КСВ нагрузки 1,05, допустимый коэффициент отражения

$$|\Gamma| = (КСВ - 1) / (КСВ + 1)$$

составляет 0,0244, и предельная (по Фано) полосовая добротность нагрузки Q' равна 0,846. Достижение предельного (по Фано) согласования возможно лишь

при бесконечном числе элементов согласующей цепи, что не применимо в практических условиях. Максимально допустимое число элементов в практических конструкциях составляет 4...6. При увеличении их количества растут потери, увеличивается стоимость, повышаются требования к точности и температурной стабильности элементов при незначительном увеличении качества согласования.

Предельные соотношения, связывающие достижимый КСВ с полосовой добротностью нагрузки для одно-, двух- и трехзвенных полиномиальных и оптимальных согласующих цепей (СЦ) с максимально плоской и Чебышевской характеристиками, приведены в [110]. Решая обратную задачу, можно найти значения полосовой добротности нагрузки для $КСВ=1,05$ (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Допустимые значения полосовой добротности нагрузки при использовании различных LC- согласующих цепей

Тип СЦ		Порядок СЦ	Q` доп для $КСВ \leq 1,05$
Полиномиальная		Однозвенная	0.049
Оптимальная			0.049
Полиномиальная	Чебышевская	Двухзвенная	0.316
	Максимально плоская		0.221
Оптимальная	Чебышевская	Двухзвенная	0.320
	Максимально плоская		0.287
Полиномиальная	Чебышевская	Трехзвенная	0.486
	Максимально плоская		0.290

Как видно из Таблицы 3.1, максимально допустимое в реальных конструкциях значение полосовой добротности нагрузки обеспечивается полиномиальной Чебышевской СЦ 3-го порядка и составляет 0,486.

Как показали измерения и моделирование входного импеданса распространенных на сети вещания антенн-мачт шунтового питания (АМШП) высотой 257 метров (рисунок 3.1), величина полосовой добротности нагрузки эквивалентного им контура становится меньше максимально допустимой для согласования LC элементами, начиная с частот выше 183 кГц. Аналогичные результаты были получены и для других используемых типов антенн (АРРТЗ,

ШАРРТ). Кроме этого, необходимо учитывать изменение активной части входного импеданса антенны в полосе рабочих частот, которое во многих случаях, особенно с увеличением отношения высоты антенны к длине волны, само по себе обуславливает КСВ на уровне 1,05. По этой причине и более высокие (например, 375 метров) антенны также не могут быть согласованы LC цепями в нижней половине диапазона НЧ. Использование для согласования шлейфов, широко распространенных на действующей сети вещания, может только ухудшить ситуацию при согласовании в достаточно широкой полосе с малым КСВ, ввиду их собственных резонансных свойств.

Таким образом, в нижней половине диапазона НЧ требуемая для работы передатчиков DRM величина КСВ даже теоретически не может быть обеспечена традиционными методами с помощью согласования LC элементами ни при каких высотах антенн.

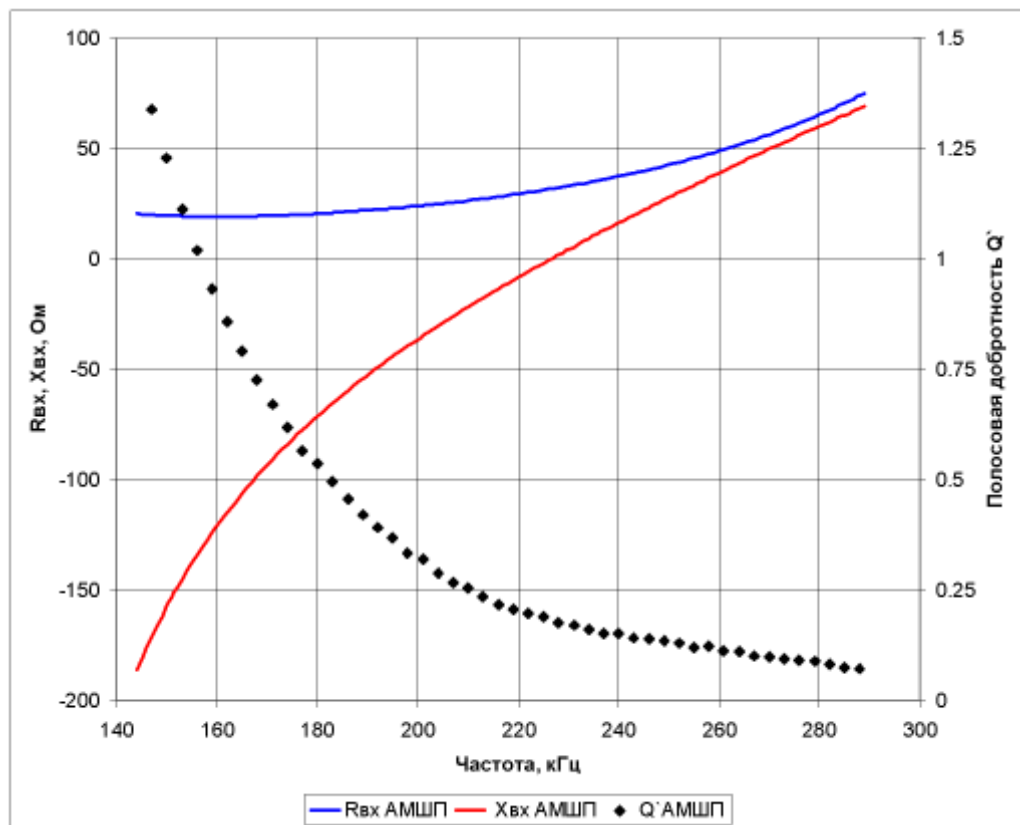


Рисунок 3.1 – Зависимость входного импеданса и полосовой добротности антенн АМШП высотой 257 метров от частоты

3.3 Принципы построения частотно-расширительных цепей

3.3.1 Согласование антенных систем диапазона НЧ с помощью RLC цепей

Задачу согласования антенных систем диапазона НЧ с требуемым для работы в режиме DRM КСВ предлагается решать с помощью согласующих устройств RLC типа, в частности, 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. Для определенности далее будем называть эти устройства частотно-расширительными цепями (ЧРЦ).

Канонический вид цепи с постоянным входным резистивным сопротивлением, примененной в качестве входной корректирующей цепи транзисторного усилителя по схеме с ОЭ [6] и примеры графиков комплексной проводимости (результатирующей и отдельных ветвей схемы) приведены на рисунке 3.2.

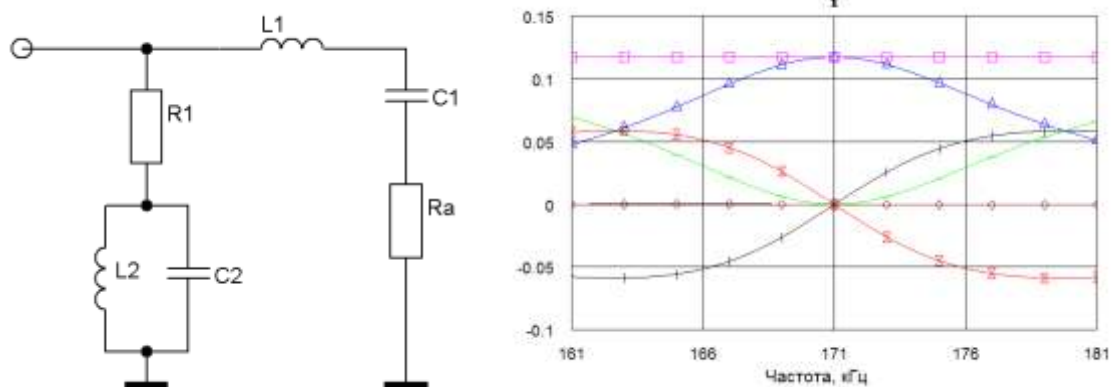


Рисунок 3.2 – Цепь с постоянным входным резистивным сопротивлением и примеры графиков комплексной проводимости

Правая часть схемы ($C1, Ra$) совпадает с эквивалентной схемой короткой штыревой антенны, а индуктивность $L1$ обычно присутствует для настройки антенного контура в резонанс на рабочей частоте. При $L1C1 = L2C2 = 1/\omega^2$, $R1=Ra$ и соответствующем выборе добротностей контуров $L1C1$ и $L2C2$ ($C2 = L1/Ra^2$, $L2 = C1Ra^2$), входное сопротивление такой цепи не зависит от частоты и равно Ra . Таким образом, теоретически обеспечивается идеальное согласование антенны с $KCB=1$. В реальных условиях параметры антенны ($C1, Ra$) меняются с изменением рабочей частоты, поэтому идеальное согласование может быть обеспечено только в определенной полосе частот.

Рассмотренную выше конфигурацию ЧРЦ далее будем называть параллельной, поскольку дополняющая цепь с балластной нагрузкой подключается параллельно антенне. Если эквивалентная схема антенны представляет собой не последовательный контур, а параллельный (что возможно при больших отношениях высоты антенны h к длине волны λ или в результате трансформации в фидере), то следует использовать дуальную последовательную конфигурацию ЧРЦ (рисунок 3.3,б), элементы которой рассчитываются аналогично.

3.3.2 Варианты построения ЧРЦ в последовательной и параллельной конфигурациях

Рассмотрим теоретически возможные варианты построения ЧРЦ.

Вариант 1. ЧРЦ устанавливается непосредственно у антенны. Если входное сопротивление антенны описывается эквивалентом последовательного контура, ЧРЦ должна иметь параллельную конфигурацию (рисунок 3.3,а). Если входное сопротивление антенны описывается эквивалентом параллельного контура, ЧРЦ должна иметь последовательную конфигурацию (рисунок 3.3,б).

Вариант 2. ЧРЦ устанавливается в здании передатчика, после антенного фидера. Если входное сопротивление антенны описывается эквивалентом последовательного контура, и длина фидера кратна половине длины

волны, ЧРЦ должна иметь параллельную конфигурацию (рисунок 3.3,в). Если входное сопротивление антенны описывается эквивалентом последовательного контура, и длина фидера кратна нечетному количеству четвертей длины волны, ЧРЦ должна иметь последовательную конфигурацию (рисунок 3.3,г).

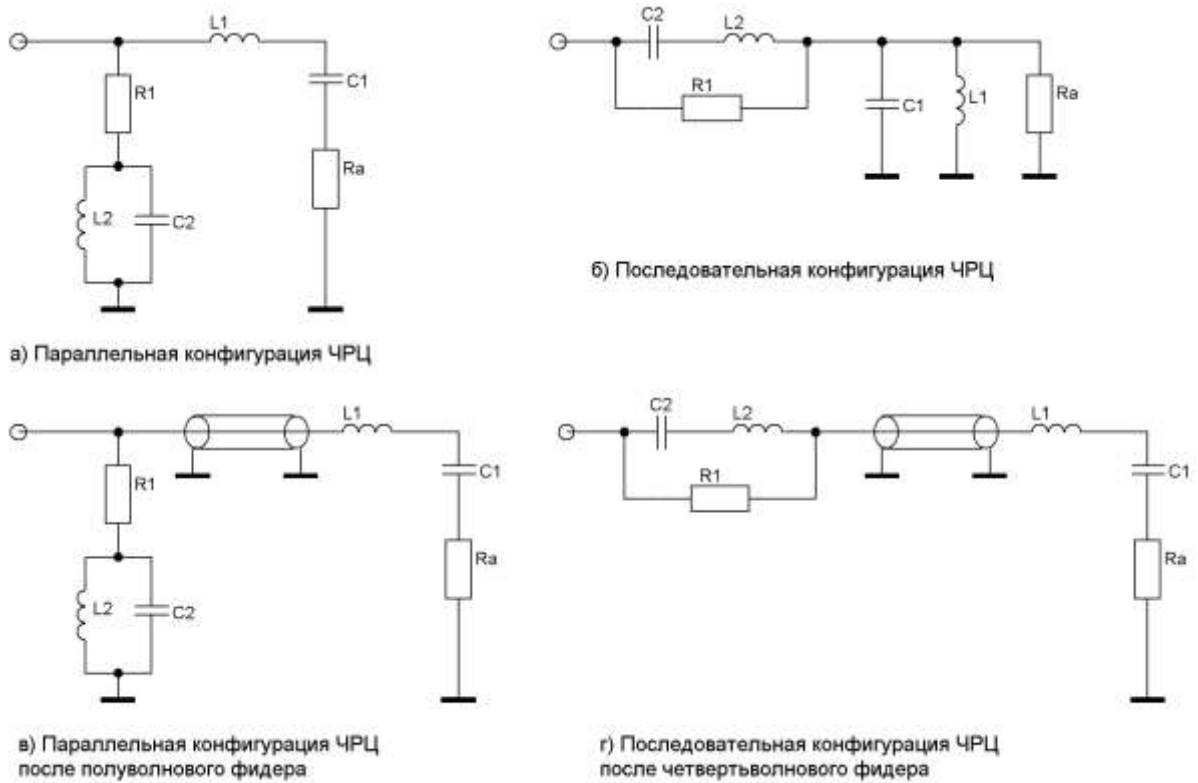


Рисунок 3.3 – Варианты построения ЧРЦ

Аналогичные рассуждения можно провести и для случая, когда входное сопротивление антенны описывается эквивалентом параллельного контура. При длине фидера, кратной половине длины волны, ЧРЦ должна иметь последовательную конфигурацию, а при длине фидера, кратной нечетному количеству четвертей длины волны, ЧРЦ должна иметь параллельную конфигурацию.

Напомним, что во всех случаях для нормальной работы ЧРЦ входное сопротивление антенны должно быть активным на рабочей частоте, а ее импеданс симметричным, т.е. антенна должна быть настроена в резонанс, для чего могут потребоваться дополнительные элементы (емкость или индуктивность). Кроме

того, поскольку входное сопротивление антенны в общем случае не равно волновому сопротивлению стандартного фидера, требуется дополнительное Г- (или Т-, или П-) звено для трансформации сопротивлений.

При этом если ЧРЦ устанавливается у антенны, она может быть подключена как до звена трансформации сопротивлений, так и после. В последнем случае, поскольку трансформирующее звено вносит дополнительный фазовый набег, он должен быть скомпенсирован. Если ЧРЦ устанавливается в здании передатчика, после антенного фидера, длина которого в общем случае может быть не кратной четверти длины волны, перед ЧРЦ необходимо провести фазовую коррекцию, приведя импеданс фидера в точке подключения ЧРЦ к эквиваленту последовательного либо параллельного контура.

Таким образом, использование ЧРЦ возможно в большом количестве вариантов. Выбор варианта для практической реализации ЧРЦ зависит как от условий реализуемости его компонентов, так и от экономических критериев, и во многом определяется исходными параметрами антенны.

3.4 Методика расчета и энергетическая эффективность ЧРЦ

3.4.1 Разработка методики проектирования ЧРЦ

Методика проектирования элементов ЧРЦ для последовательной и параллельной конфигураций базируется на знании значений индуктивности, емкости и сопротивления контура, эквивалентного антенной системе. Для реальных антенн эти параметры, как правило, не известны и не могут быть измерены непосредственно. Единственным доступным методом измерения параметров антенн в инженерной практике являются измерения их комплексного входного сопротивления в диапазоне рабочих частот, на основании которых можно, в свою очередь, определить параметры контура, эквивалентного антенной системе.

В частности, для антенн в виде последовательного контура, к которым приводятся типичные короткие ($h < 0,3\lambda$) антенны диапазона НЧ, можно вывести методами теории линейных цепей следующую методику расчетов.

Исходными данными являются: нижняя частота – f_n ; центральная (рабочая) частота – f_0 ; верхняя частота – f_v ; входные сопротивления антенны на нижней ($R_n + iX_n$), центральной ($R_0 + iX_0$) и верхней ($R_v + iX_v$) частотах.

Алгоритм методики проектирования ЧРЦ заключается в следующем:

1. Определяется знак входного импеданса антенны на рабочей частоте	Если $X_0 > 0$, то:	Если $X_0 < 0$, то:
2. Рассчитывается 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. Определяется реактивное сопротивление антенны на нижней и верхней частотах с учетом добавленной индуктивности (емкости)	$X'_n = X_n - \frac{1}{\omega_n C_1};$ $X'_v = X_v - \frac{1}{\omega_v C_1}$	$X'_n = X_n + \omega_n L_1;$ $X'_v = X_v + \omega_v L_1$
4. Рассчитывается емкость антенного контура на нижней и верхней частоте	$C_n = \frac{1}{X'_n} \left(\frac{1}{\omega_n} - \frac{\omega_n}{\omega_0^2} \right);$	$C_v = \frac{1}{X'_v} \left(\frac{1}{\omega_v} - \frac{\omega_v}{\omega_0^2} \right)$
5. Определяется эквивалентная емкость и индуктивность антенны на рабочей частоте	$C_0 = \frac{C_n + C_v}{2};$	$L_0 = \frac{1}{\omega_0^2 C_0}$
6. Эквивалентное сопротивление антенны на рабочей частоте	R_0	
7. Добротность антенны (для оценки энергетической эффективности)	$Q = \frac{1/\omega_0 C_0}{R_0}$	

Полученные в результате расчетов по данной методике параметры эквивалента антенного контура C_0 , L_0 и R_0 позволяют рассчитать элементы ЧРЦ:

$R_1 = R_0$ – т.е. сопротивление балластной нагрузки равно активному сопротивлению антенны на рабочей частоте;

$L_0 C_0 = L_2 C_2 = 1/\omega^2$ – т.е. контур ЧРЦ настроен на рабочую частоту, что упрощает процесс его настройки, который может проводиться по критерию

минимального напряжения на балластной нагрузке R_1 на частоте несущей;
 $C_2 = L_0/R_0^2$, $L_2 = C_0R_0^2$.

3.4.2 Анализ энергетической эффективности ЧРЦ в зависимости от параметров антенной системы

Частотно-расширительная цепь, образуя с согласовываемой антенной цепь постоянного сопротивления, независимо от своей конфигурации направляет в балластную нагрузку часть мощности на краях полосы пропускания антенны. Очевидно, что чем выше добротность антенны (т.е. чем уже ее полоса пропускания), тем большая часть мощности будет рассеиваться в балластной нагрузке ЧРЦ, и наоборот. Результаты проведенных расчетов потерь в ЧРЦ для полосы сигнала DRM 9 кГц при различных полосах пропускания антенны, приведены на рисунке 3.4. При полосе пропускания антенны более 10 кГц потери в ЧРЦ не превышают 1 дБ.

Проведем 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 – $K_{СВ} < 1,05$ в полосе 9 кГц и $K_{СВ} < 1,1$ в полосе 18 кГц. Исходные характеристики антенны показаны на рисунке 3.5 зеленым цветом. Даже при использовании лестничной LC структуры 9-ого порядка (не реализуемой на практике) обеспечить требуемые значения $K_{СВ}$ не удастся (рисунок 3.5, красные кривые), при этом согласование близко к теоретическому пределу [95]. Интегральные потери при добротности катушек индуктивности, равной 200, в полосе сигнала DRM 9 кГц составляют 13,1%.

Схема согласования с помощью ЧРЦ, состояя всего из трех элементов, обеспечивает требуемые значения $K_{СВ}$ (рисунок 3.5, 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.

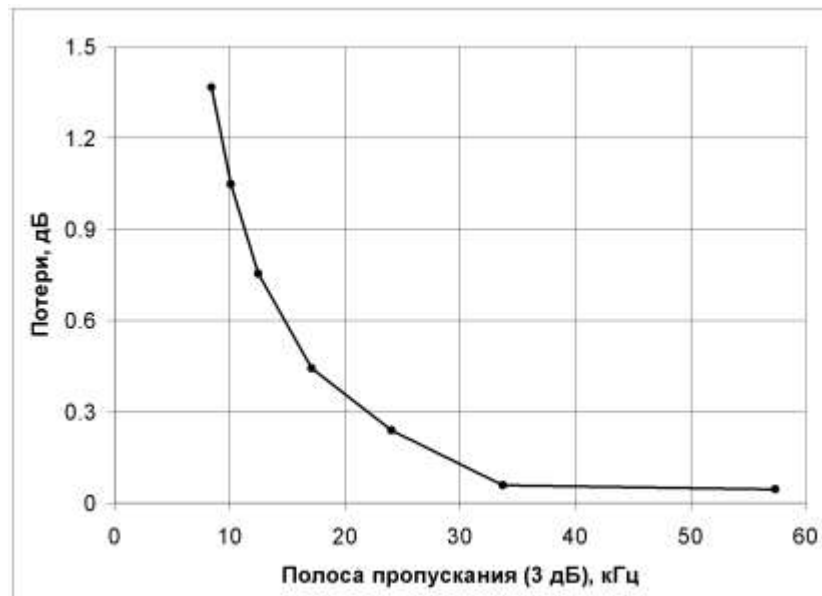


Рисунок 3.4 – Потери в ЧРЦ для полосы сигнала DRM 9 кГц при различных полосах пропускания антенны

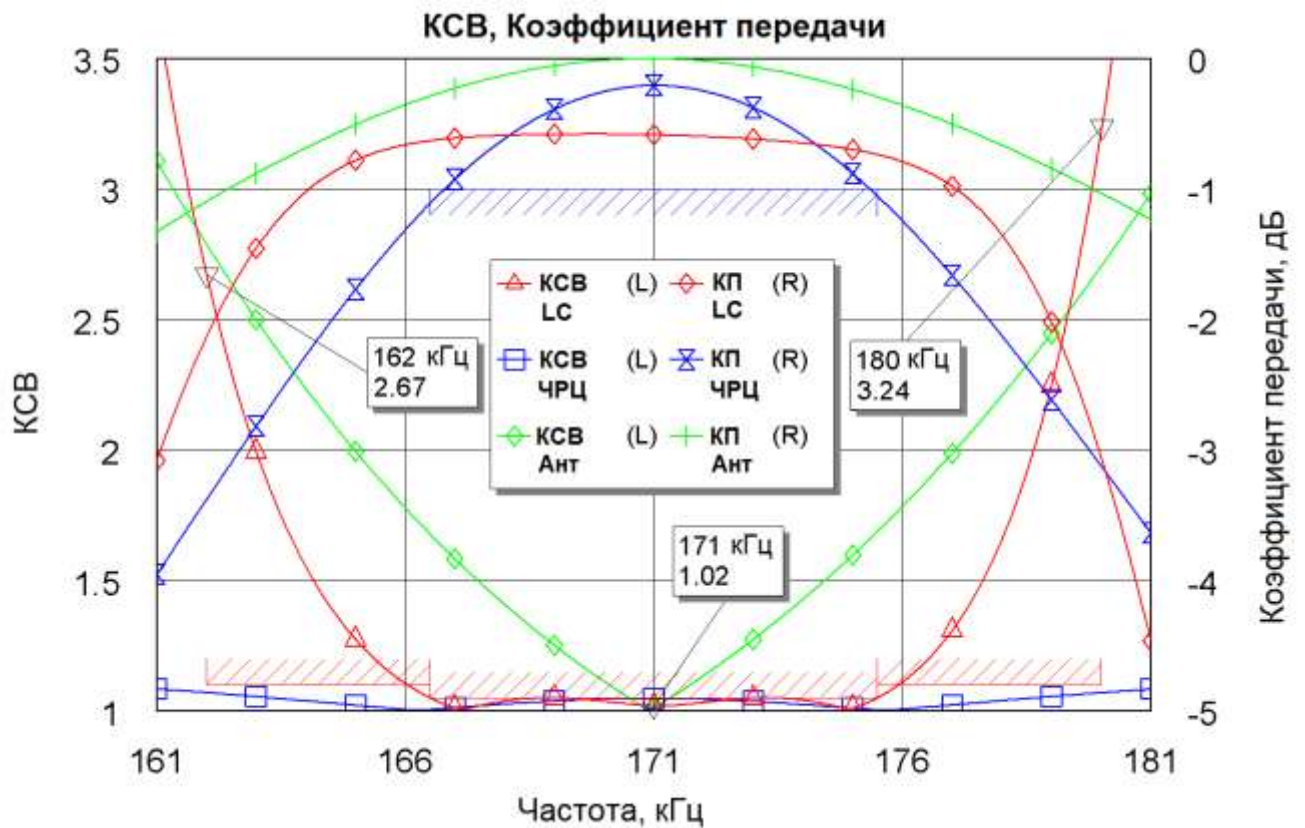


Рисунок 3.5 – Сравнение возможностей согласования антенной системы с добротностью 10 на частоте 171 кГц (полоса пропускания 17,1 кГц) с помощью лестничной LC структуры и ЧРЦ

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. При более высоких значениях добротности антенной системы альтернативы ЧРЦ не существует.

3.4.3 Анализ различных вариантов ЧРЦ по критериям технической реализуемости и экономической эффективности

Под технической реализуемостью следует понимать допустимую электрическую прочность элементов (их пробивное напряжение), которое обычно не превышает 30 кВ, а для наиболее распространенных типов керамических высокочастотных конденсаторов ограничено величиной 15 кВ. Сравним по этому критерию параллельную и последовательную конфигурации ЧРЦ.

В параллельной конфигурации ЧРЦ максимальные напряжения на реактивных элементах равны напряжению в точке подключения и определяются как: $U = \sqrt{PR}$, где P – мощность передатчика, R – волновое сопротивление тракта, в который подключается ЧРЦ. Напомним, что ЧРЦ может быть включена как около антенны в тракте с типичными значениями активной составляющей сопротивления антенны 7...20 Ом, так и в тракте фидера (в том числе в здании передатчика) с типичными значениями сопротивления 60 или 150 Ом.

В последовательной конфигурации ЧРЦ максимальные напряжения на реактивных элементах в добротность эквивалента антенной системы раз больше напряжения в точке подключения и определяются как: $U = Q\sqrt{PR}$, где P – мощность передатчика, R – волновое сопротивление тракта, в который подключается ЧРЦ, Q – добротность эквивалента антенной системы.

В качестве примера рассчитаем номиналы элементов ЧРЦ и напряжения на них для различных конфигураций ЧРЦ и различных точек их подключения. Для определенности используем данные рассмотренного выше примера, где добротность эквивалента антенной системы $Q=10$ на частоте 171 кГц, величина

активной составляющей сопротивления антенны $R=8,5$ Ом, волновое сопротивлением фидера 60 Ом. Средняя мощность DRM передатчика 100 кВт, что соответствует 1000 кВт пиковой мощности или передатчику АМ с мощностью 250 кВт в несущей. Результаты расчетов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Пример расчета номиналов элементов ЧРЦ и напряжения на них

Конфигурация ЧРЦ и место подключения	L, мкГн	C, пФ	Uэфф, В
Параллельная, в тракте антенны 8,5 Ом	0,791	1095000	2915
Параллельная, в тракте фидера 60 Ом	5,583	155125	7746
Последовательная, в тракте антенны 8,5 Ом	79,1	10950	29150
Последовательная, в тракте фидера 60 Ом	558,35	1551	77447

Анализ данных таблицы 3.2 показывает, что последовательная конфигурация ЧРЦ в тракте фидера с сопротивлением 60 Ом является нереализуемой на практике из-за очень высоких значений напряжения на элементах, а также большой величины требуемой индуктивности (индуктивность практически используемых катушек обычно не превышает 200 мкГн).

Также мало практично использование параллельной конфигурации ЧРЦ в тракте антенны с сопротивлением 8,5 Ом, поскольку стоимость высокочастотных керамических конденсаторов составляет примерно 35 тысяч рублей за 1000 пФ емкости, и суммарная стоимость требуемого набора конденсаторов превысит 38 миллионов рублей.

Параллельная конфигурация ЧРЦ в тракте фидера и последовательная конфигурация ЧРЦ в тракте антенны могут быть использованы на практике. Для проведения выбора из этих двух вариантов в каждом конкретном случае следует учитывать большее количество технико-экономических факторов.

В частности, проведенный для данного примера анализ схем ЧРЦ на чувствительность к изменениям номиналов элементов показал, что допуски на них не должны превышать 7% для величины сопротивления балластной нагрузки, и 0,2% на величину емкости конденсатора или индуктивности катушки.

Совместное влияние допусков элементов ЧРЦ (емкость конденсатора и индуктивность катушки по 0,1%, сопротивление балластной нагрузки 5%) соответствует предельно допустимым заданным значениям КСВ (рисунок 3.6).

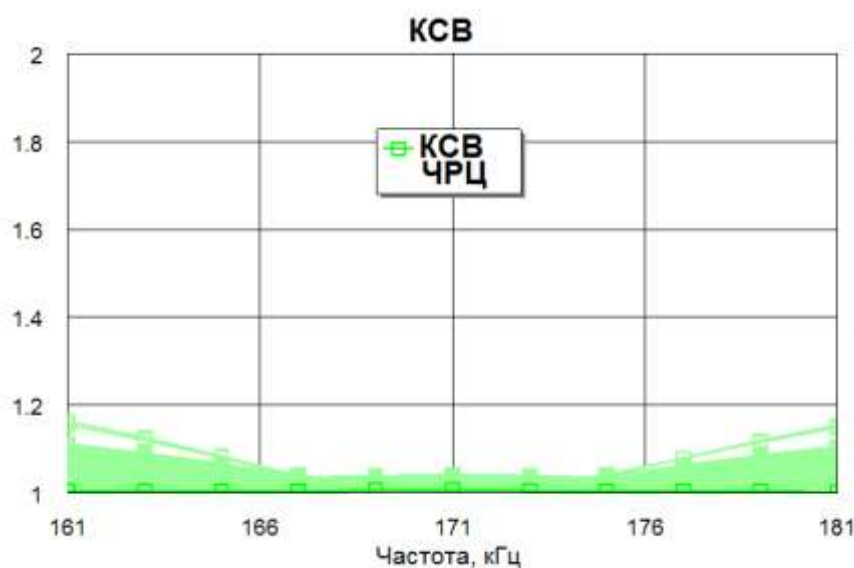


Рисунок 3.6 – Совместное влияние на КСВ допусков элементов ЧРЦ (емкость конденсатора и индуктивность катушки по 0,1%, сопротивление нагрузки 5%)

При типичном температурном коэффициенте индуктивности (ТКИ), равном 10^{-4} /°С, и температурном коэффициенте емкости (ТКЕ) конденсаторов, равном $100 \cdot 10^{-6}$ /°С (группы МП0, М75, П100), обеспечить допуск в 0,1% возможно при изменении температуры только на 10°С. По этой причине в диапазоне НЧ в климатических условиях РФ ЧРЦ предпочтительнее устанавливать в здании передатчика, следовательно, она будет иметь параллельную конфигурацию. Установка ЧРЦ в здании передатчика также позволит проводить оперативную подстройку при сезонном изменении температурных условий.

Следует отметить, что при работе передатчика в режиме АМ ЧРЦ не является необходимой и может быть отключена без изменения параметров всех остальных элементов согласования антенны. В параллельной конфигурации для этого достаточно одного, не очень мощного размыкателя (соответствующего мощности балластной нагрузки), а в последовательной конфигурации потребуется два переключающих контакта на полную выходную мощность передатчика.

3.4.4 Потери в ЧРЦ в различных режимах работы передатчика

Результаты проведенных расчетов 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 приведены на рисунке 3.7. Там же показана неравномерность АЧХ в полосе сигнала DRM в режиме Simulcast. Следует отметить, что при работе в режиме Simulcast ЧРЦ настраивается на частоту несущей АМ сигнала, и потери, вносимые ЧРЦ в сигнал АМ, пренебрежимо малы. Как видно из рисунка 3.7, 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.

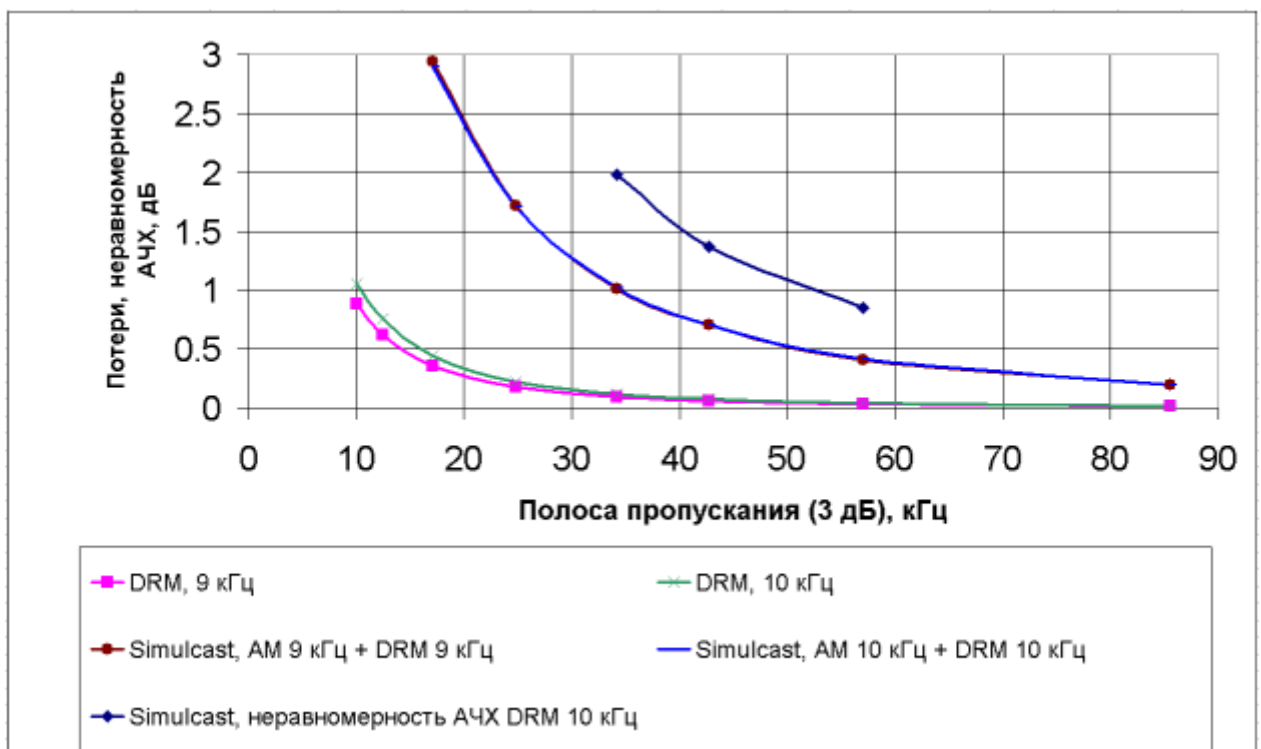


Рисунок 3.7 – Потери в ЧРЦ в различных режимах работы передатчика в зависимости от исходной полосы пропускания антенны

3.5 Разработка алгоритма проектирования антенно-согласующих цепей

Для проектирования антенно-согласующих цепей (АСЦ) необходимо провести измерения входного импеданса собственно антенны в полосе частот ± 10 кГц от значения рабочей частоты. Для проведения инженерных расчетов можно считать достаточным шаг измерений, равный 1 кГц.

По полученным значениям входного импеданса по выражениям, приведенным в параграфе 3.4 или с помощью описанного ниже калькулятора ЧРЦ, определяется добротность антенны и ее полоса пропускания на рабочей частоте. В соответствии с рисунком 3.7 определяются потери в различных режимах работы передатчика, и принимается решение либо об использовании ЧРЦ (потери менее 1 дБ) либо о строительстве новой антенны.

Имеющуюся на большом числе антенн схему согласования сопротивления антенны с сопротивлением питающего фидера с помощью шлейфов в большинстве случаев придется отключать, поскольку такое согласование дополнительно сужает полосу пропускания антенны. Реактивную составляющую входного сопротивления антенны на рабочей частоте компенсируют включением последовательной реактивности с обратным знаком. Далее необходимо трансформировать активное сопротивление антенны на центральной частоте в сопротивление питающего фидера. Для этого можно использовать Г- или П- цепочки, которые рассчитываются по общеизвестным методикам. Меньшее дополнительное рассогласование в требуемой полосе частот может быть обеспечено с помощью ФНЧ-трансформаторов, проектирование которых рассматривается в следующем параграфе.

С целью обеспечения температурной стабильности параметров, требования к которой достаточно высоки [28], собственно ЧРЦ рекомендуется устанавливать в здании передатчика. Питающий фидер вносит дополнительный фазовый сдвиг, величина которого достаточно сложно поддается расчету с требуемой точностью – в основном, из-за сложности определения электрической длины и реального волнового сопротивления. Поэтому можно рекомендовать еще раз провести

измерения импеданса антенны в точке входа в здание передатчика (вместе с питающим фидером и ФНЧ-трансформатором). На основании этих измерений определяется требуемый сдвиг фаз, который необходим для приведения сопротивления антенны к эквиваленту последовательного, либо параллельного контура. Напомним, что в соответствии с [28] более предпочтительной в большинстве практических случаев является параллельная конфигурация ЧРЦ, для которой входное сопротивление антенны должно быть приведено к эквиваленту последовательного контура.

Фазосдвигающие цепочки, выполненные в виде Т- или П-цепей рассчитываются по общеизвестным методикам [8].

Учитывая, что элементы согласования антенны с питающим фидером и фазосдвигающие цепочки, как и сам фидер протяженной длины [8], дополнительно ограничивают полосу пропускания антенной системы, рекомендуется еще раз провести измерения входного импеданса антенны в точке после фазосдвигающей цепи, и по этим измерениям окончательно рассчитать номиналы элементов ЧРЦ.

3.5.1 Проектирование ФНЧ-трансформаторов

ФНЧ-трансформаторы, также, как Г-, Т- или П-цепочки, обеспечивают трансформацию соответствующих сопротивлений, но в заданной полосе частот имеют нормированный КСВ.

Методика проектирования ФНЧ-трансформаторов приведена в [106, 109]. Для инженерного проектирования разработан калькулятор ФНЧ-трансформаторов (рисунок 3.8), позволяющий по заданным сопротивлениям $R_{вх}$, $R_{вых}$ в полосе частот от $F_{нижн}$ до $F_{верхн}$ проводить расчеты для случаев максимально гладкой и равноколебательной АЧХ с заданным КСВ. Калькулятор определяет необходимое число элементов и их номиналы, а также потери при заданных добротностях индуктивностей Q . Рассчитываемое количество элементов ограничено четырьмя,

поскольку применение большого числа мощных реактивных элементов в рассматриваемом случае является непрактичным.

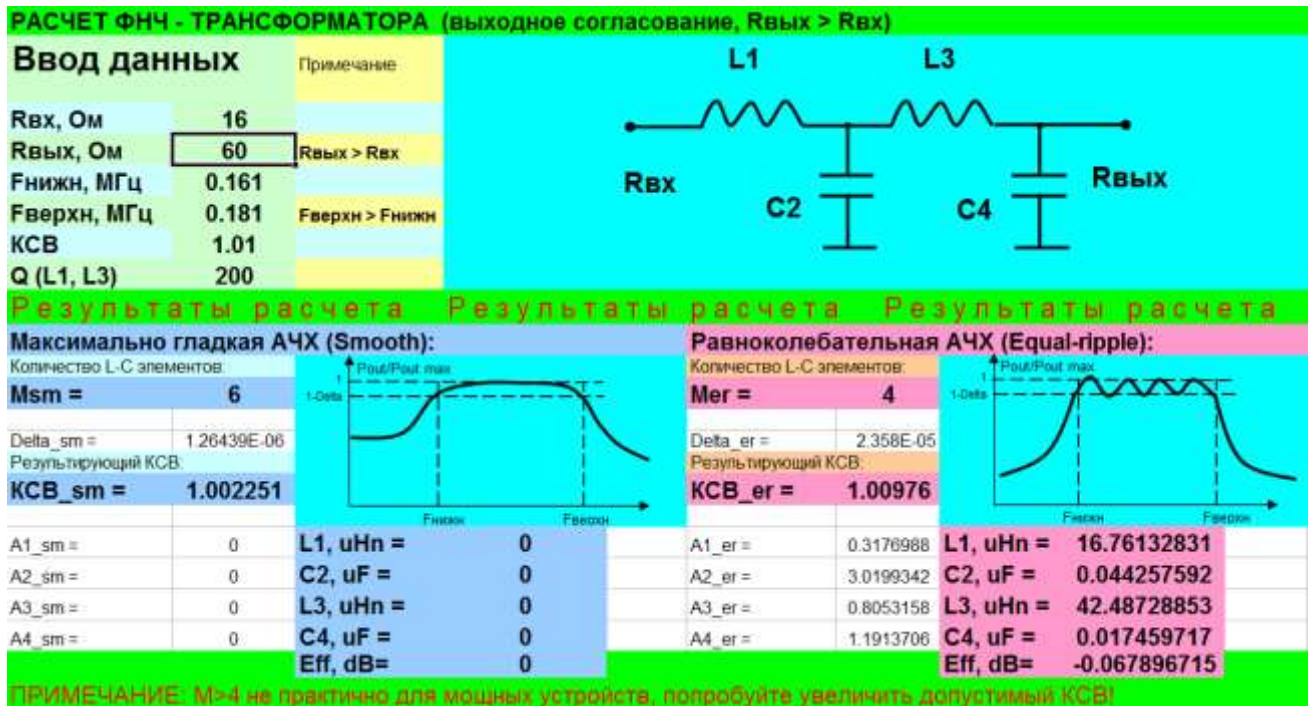


Рисунок 3.8 – Калькулятор ФНЧ-трансформаторов

3.5.2 Разработка инженерных средств проектирования ЧРЦ

Ввиду сложной зависимости импеданса антенны от частоты (изменяется и активная, и реактивная компоненты, и, соответственно, эквивалентная добротность антенной системы), проектирование ЧРЦ с оптимальными параметрами рекомендуется проводить в достаточно мощных программных средах, имеющих встроенные алгоритмы оптимизации по нескольким критериям.

Для инженерного проектирования и предварительной оценки возможных вариантов можно пользоваться разработанным автором калькулятором ЧРЦ [21].

Поскольку наиболее реализуемым на практике является вариант с параллельной конфигурацией ЧРЦ, в калькуляторе ЧРЦ проводится расчет именно параллельной конфигурации, причем одновременно как для включения ЧРЦ в тракте антенны, так и в тракте фидера.

Калькулятор ЧРЦ выполнен в виде расчетного листа программы Microsoft Office Excel 2003 (рисунок 3.9), в котором предусмотрен ввод исходных данных для расчета, содержатся все необходимые формулы и средства для графического отображения исходного КСВ антенны и результирующего КСВ при применении ЧРЦ. Также разработана программа для ЭВМ «Расчет частотно-расширительной цепи для DRM передатчиков диапазонов ДВ и СВ» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611512 от 04.02.2016, [39]), позволяющая проводить аналогичные расчеты. Интерфейс программы представлен на рисунке 3.10.

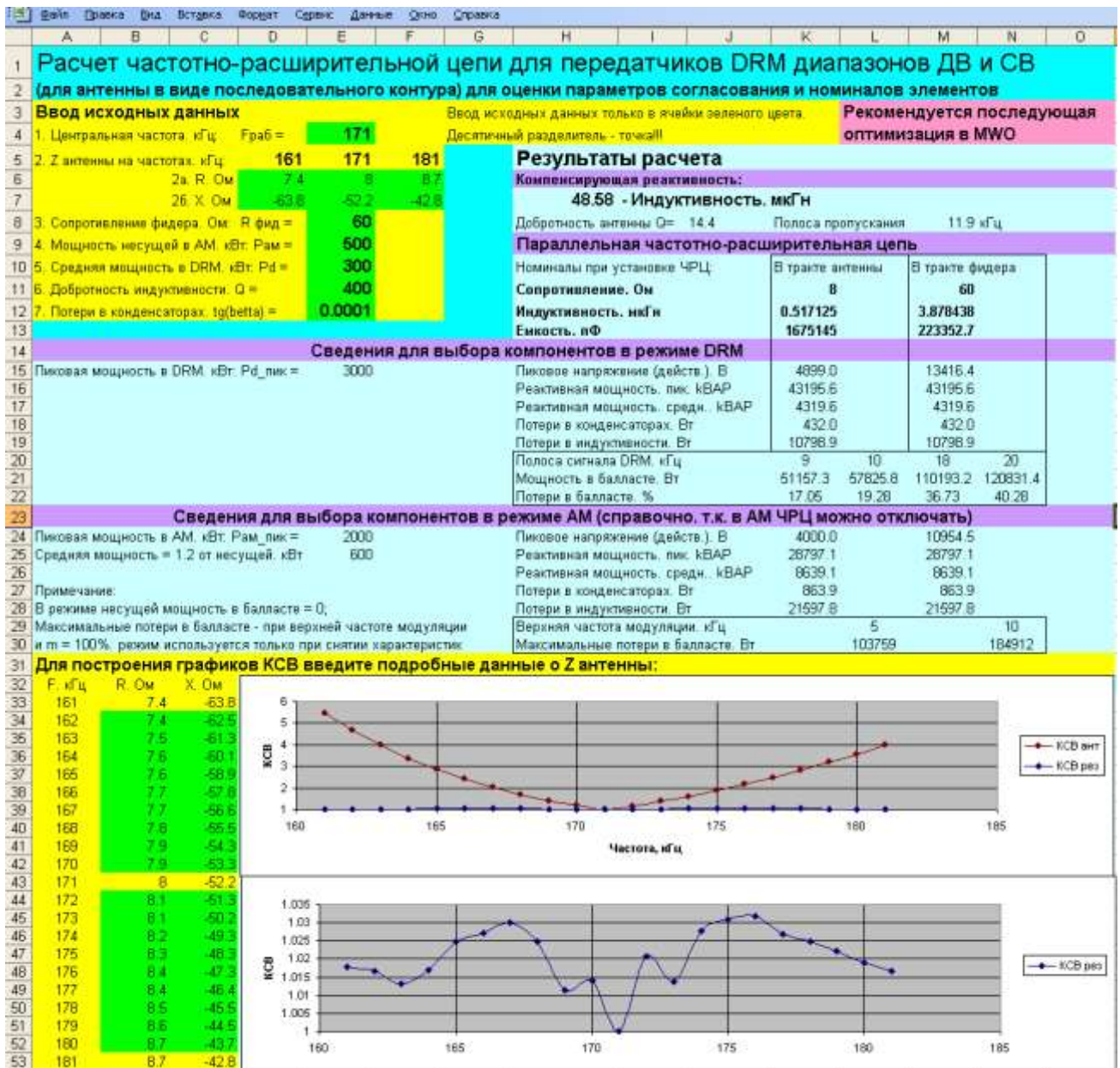


Рисунок 3.9 – Калькулятор ЧРЦ

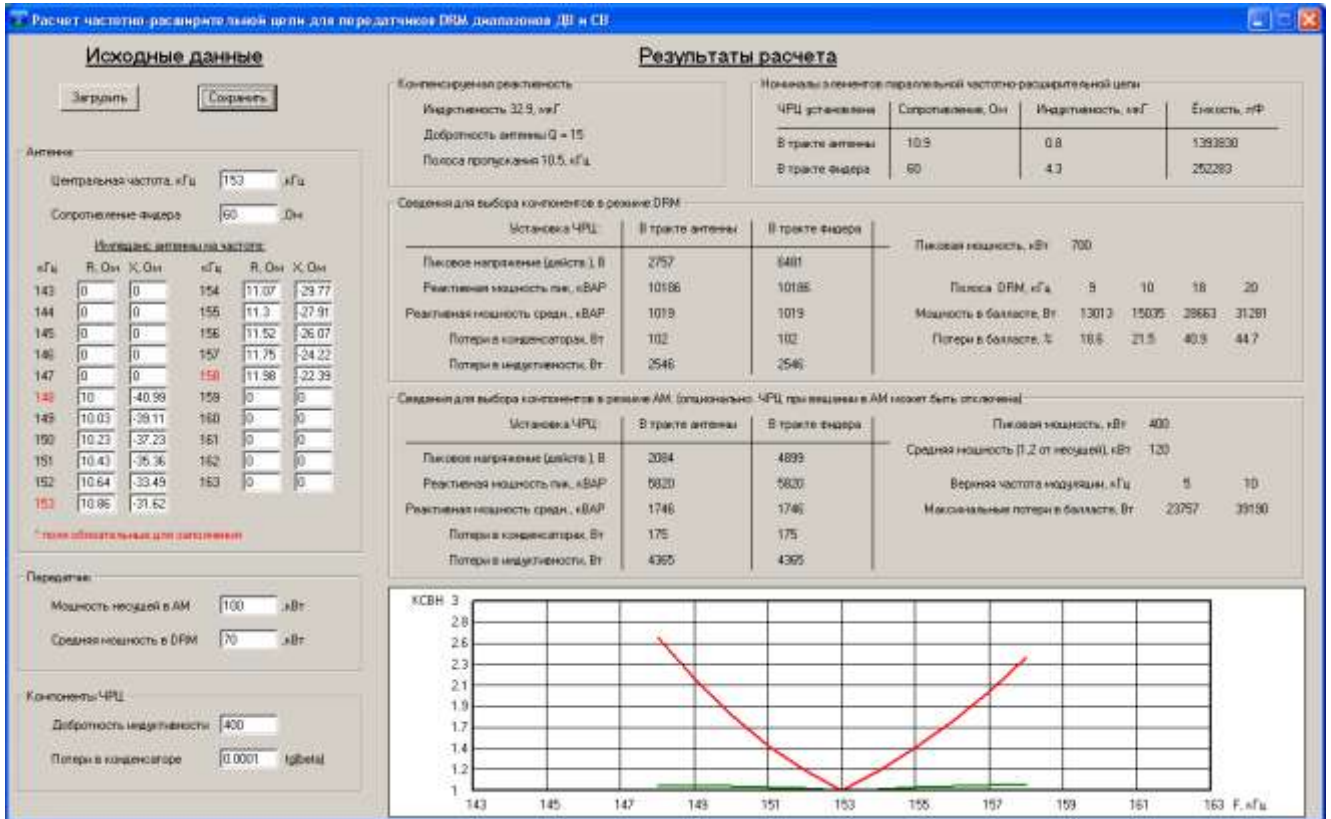


Рисунок 3.10 – Интерфейс программы для ЭВМ «Расчет частотно-расширительной цепи для DRM передатчиков диапазонов ДВ и СВ» [39]

Базовыми исходными данными для ввода в программу являются:

- центральная частота;
- значения импеданса антенны Z (R_a , X_a) на центральной частоте;
- значения импеданса антенны на частотах, отстоящих на ± 10 кГц от центральной частоты;
- значение волнового сопротивления фидера.

Этих данных достаточно для определения параметров ЧРЦ и потерь в балластной нагрузке.

Дополнительно можно вводить значения мощности передатчика в режимах АМ и DRM, значение добротности катушки индуктивности и конденсаторов (тангенс угла потерь). Эти данные позволяют определить пиковые напряжения на конденсаторах ЧРЦ, их реактивную мощность, величину активных потерь в конденсаторах, катушке индуктивности и балластной нагрузке как в режиме

DRM, так и в режиме АМ (справочно, поскольку в АМ ЧРЦ можно отключать), что необходимо для выбора компонентов и оценки их стоимости.

Также можно ввести значения импеданса антенны Z (R_a , X_a) на центральной частоте и на частотах, отстоящих на ± 10 кГц от центральной частоты с шагом 1 кГц, при этом будут построены графики исходного КСВ антенны и КСВ при применении ЧРЦ.

Приведенный на рисунке 3.9 пример расчетов параметров ЧРЦ относится к одному из наиболее «сложных» случаев, когда антенна (ШАРРТ высотой 257 метров на частоту 171 кГц) имеет полосу пропускания 11,9 кГц. Как видно из нижнего графика на рисунке 3.9, ЧРЦ обеспечивает результирующий КСВ не более 1,035 в полосе частот ± 10 кГц при потерях в полосе сигнала DRM 9 кГц менее 1 дБ.

3.5.3 Пример проектирования АСЦ, обеспечивающей возможность использования режима Simulcast в диапазоне НЧ

В настоящее время в диапазоне НЧ зарубежными вещателями используется только поочередное вещание в режимах АМ или DRM. На протяжении переходного периода актуальна одновременная передача аналоговых и цифровых сигналов, для чего потребуется удвоенная полоса частот и соответствующее согласование антенной системы в этой полосе. Как видно из рисунка 3.7, использование режима Simulcast потенциально возможно при исходной полосе пропускания антенны более 34 кГц (по критерию допустимых потерь в ЧРЦ не более 1 дБ). Такие полосы пропускания имеют ряд находящихся в эксплуатации антенн высотой 257 метров, работающих в верхней половине диапазона НЧ, в частности, антенна ШАРРТ на частоту 234 кГц (п. Красный Бор). По описанному выше алгоритму проведено проектирование антенно-согласующей цепи, включающей в себя 4-х элементный ФНЧ-трансформатор с равноколебательной АЧХ для согласования с питающим фидером, Т-образную фазосдвигающую цепочку и собственно ЧРЦ в параллельной конфигурации (рисунок 3.11). Анализ

спроектированной антенно-согласующей цепи (рисунок 3.12) показал возможность получения КСВ не более 1,05 в полосе частот 20 кГц при настройке ЧРЦ на частоту несущей АМ сигнала (в качестве примера на 229 кГц). При этом неравномерность АЧХ в полосе сигнала DRM не превышает 1 дБ, а потери в полосе сигнала DRM составляют менее 0,5 дБ.

Аналогичные результаты были получены для антенны АРРТ высотой 260 метров на частоте 225 кГц. В нижней половине диапазоне НЧ использование режима Simulcast возможно с антеннами высотой 378 метров. В частности, антенна АМШП может быть согласована с КСВ не более 1,05 в полосе частот 18 кГц на частоте 171 кГц с потерями не более 0,5 дБ, и на частоте 153 кГц с потерями не более 0,65 дБ.

Таким образом, предложенная методика согласования антенных систем позволяет обеспечить работу в режиме Simulcast в переходный период (или последующее использование двойной ширины полосы частот) во всем диапазоне НЧ.

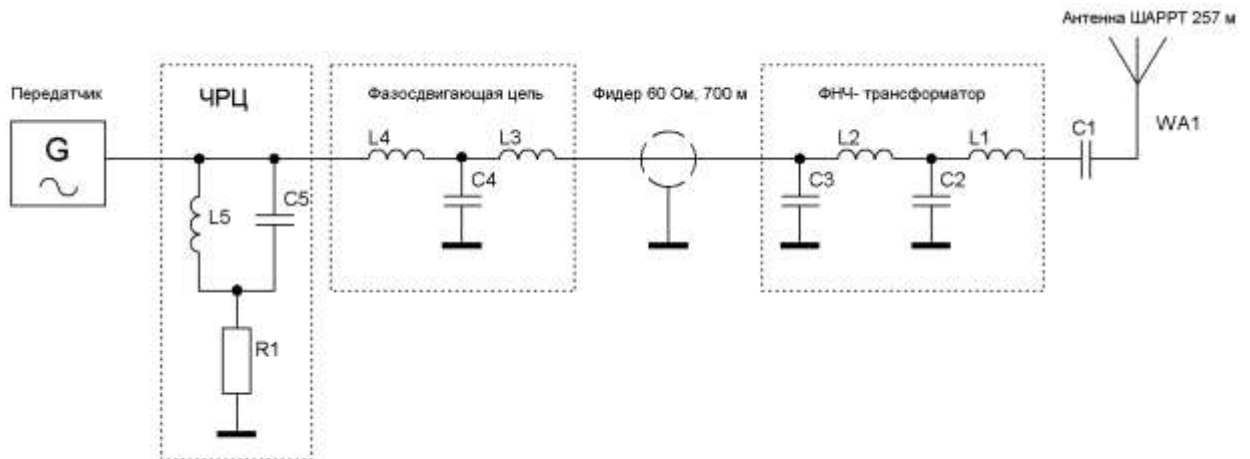


Рисунок 3.11 – Структура антенно-согласующей цепи для антенны ШАРРТ
234 кГц

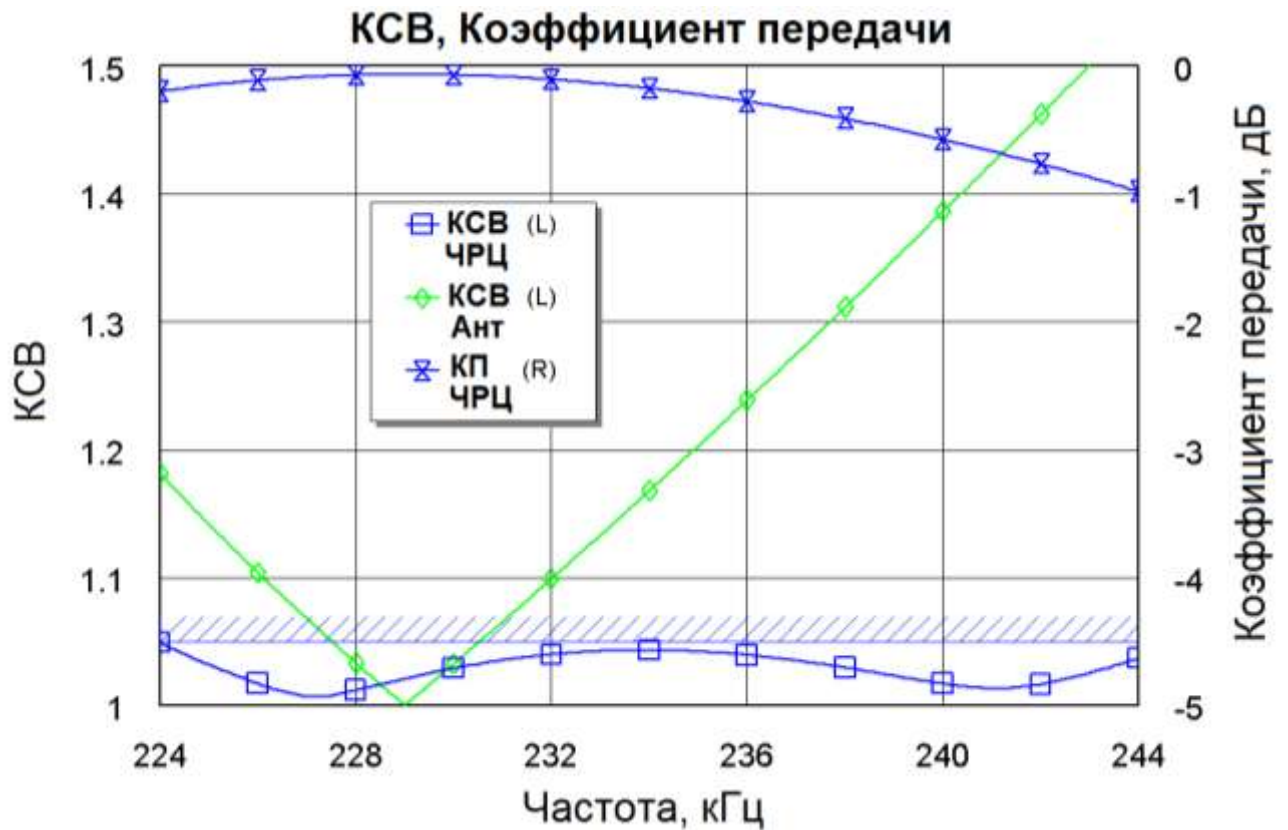


Рисунок 3.12 – Характеристики АСЦ для использования антенны ШАРРТ 234 кГц в режиме Simulcast

3.6 Практическая применимость и ожидаемый экономический эффект

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.

Также применение ЧРЦ эффективно в нижней части диапазона СЧ при относительно невысоких антеннах.

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 превышает 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.

3.7 Выводы

1. Предложен способ расширения полосы согласования передающих вещательных антенных систем диапазонов НЧ и СЧ.

2. Разработаны методики расчетов и средства инженерного проектирования частотно-расширительных цепей и антенно-согласующих цепей на их основе.

3. Разработанный алгоритм и программные средства проектирования антенно-согласующих цепей цифровых радиовещательных передатчиков стандарта DRM позволяют использовать существующие антенные системы диапазона НЧ для создания сетей цифрового радиовещания стандарта DRM.

4. Показана потенциальная возможность использования режима Simulcast с двойной полосой частот: для верхней половины диапазона НЧ – с антеннами высотой 257 метров, для нижней – 378 метров.

4 РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ПРИЕМНОМУ ОБОРУДОВАНИЮ СЕТЕЙ ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ СТАНДАРТА DRM

4.1 Введение

При проектировании сети цифрового радиовещания стандарта DRM значения основных параметров приемного оборудования (чувствительности, избирательности) 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.

В опубликованном в 2010 году документе DRM-консорциума «Минимальные требования к приемнику» [118] изложены требования к его основным параметрам и методы их измерения. В частности, значения чувствительности по напряженности поля определены как 46 дБмкВ/м для диапазона НЧ и 40 дБмкВ/м для диапазона СЧ. Однако проведенные измерения чувствительности по полю образца приемника Himalaya DRM-2009 показали, что она составляет 73...88 дБмкВ/м в диапазоне НЧ и 53...62 дБмкВ/м в диапазоне СЧ, что на 13...42 дБ хуже требуемой (см. подробнее параграф 4.2).

В связи с этим задача определения реально достижимой чувствительности бытовых приемников DRM и способов ее обеспечения (с учетом уровня развития современной элементной базы, массогабаритных характеристик бытовых приемников и их антенных устройств) является актуальной и рассматривается в параграфе 4.3.

Кроме того, изложенные в [118] требования не учитывают предполагаемых особенностей использования стандарта DRM в качестве сети государственного радиовещания РФ в части обеспечения оповещения, передачи некоторых видов дополнительной информации и т.д., в том числе, русификации интерфейса пользователя. В связи с этим в параграфе 4.4 разрабатывается проект документа, нормирующего параметры приемного оборудования сетей цифрового радиовещания стандарта DRM для различных по потребительским свойствам

классов приемников: «Приемник DRM-30. Общие технические условия (Базовые технические характеристики. Предоставляемые сервисы)».

Методы электрических высокочастотных измерений, специфические для приемников DRM, рассматриваются в параграфе 4.4.3, где разрабатывается документ «Приемник DRM-30. Методы электрических высокочастотных измерений» (первая редакция).

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

4.2 Измерения чувствительности образцов DRM приемников

В настоящем параграфе описываются разработанные лабораторные установки для измерения чувствительности образцов бытовых DRM приемников как с антенного входа (для диапазонов НЧ, СЧ и ВЧ), так и по напряженности электромагнитного поля (для приемников со встроенной магнитной антенной в диапазонах СЧ и НЧ), приводится методика и результаты измерений.

Измерения чувствительности проводилось для трех образцов DRM приемников различных типов: «Орленок» CP3 РП-227 DRM, «Himalaya DRM-2009» и «Roberts MP40». Следует отметить, что все они были выполнены на основе одного и того же DRM модуля RS-500 фирмы RadioScape и отличались (кроме дизайна) построением антенной цепи диапазонов НЧ и СЧ. В частности, в приемнике «Himalaya DRM-2009» ферритовая антенна находится внутри корпуса, в «Roberts MP40» она внешняя, а в «Орленке» отсутствует.

4.2.1 Измерения чувствительности DRM приемников по входу для внешней антенны

Разработанная и созданная лабораторная установка для измерения реальной чувствительности DRM приемников на сигнале цифрового радиовещания (с антенного входа, с учетом измеренного номинального значения входного сопротивления 50 Ом) состоит из:

- испытуемых приемников;
- источника сигнала цифрового радиовещания DRM (генератор DRM);
- селективного микровольтметра SMV-11;
- регулируемых и нерегулируемых ВЧ аттенюаторов;
- соединительных кабелей с волновым сопротивлением 50 Ом, разветвляющего согласующего устройства и переходников на антенные разъемы испытуемых приемников.

Методика измерений. DRM сигнал с требуемым режимом помехоустойчивости с выхода генератора DRM через ВЧ аттенюаторы подается на вход разветвляющего согласующего устройства, к выходам которого подключены входы испытуемого приемника и селективного микровольтметра. Уменьшая затухание аттенюаторов до появления устойчивого декодирования, записываются показания SMV-11 (режим работы SMV-11 – RMS детектор, ширина полосы пропускания 9 кГц, поправка для полосы 10 кГц составляет 0,9 дБ).

Результаты измерения реальной чувствительности образцов бытовых DRM приемников на сигнале DRM в режиме В, 10 кГц, 64/16 QAM в лабораторных условиях с антенного входа приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерения чувствительности образцов бытовых DRM приемников на сигнале DRM в режиме В, 10 кГц, 64/16 QAM

Частота, МГц	1,62	2,3	4	6	9	12	17	27
«Орленок», дБмкВ	2	5	5	10	11	9	10	8
“Roberts”, дБмкВ	5	5	6	7	9	9	6	9

Таким образом, среднее значение чувствительности на сигнале DRM в диапазоне ВЧ составляет для приемника «Орленок» 8,3 дБмкВ и для приемника «Roberts» 7,3 дБмкВ с неравномерностью не более ± 3 дБ. Это достаточно высокие значения чувствительности, сопоставимые с параметрами профессионального оборудования и удовлетворяющие требованиям [118], составляющим 8 дБмкВ.

Для приемника «Орленок» была измерена чувствительность в диапазонах НЧ и СЧ (таблица 4.2). Приемник «Roberts» в этих диапазонах со входа внешней антенны не работает.

Таблица 4.2 – Результаты измерения чувствительности DRM приемника «Орленок» в диапазонах НЧ и СЧ в режиме В, 10 кГц, 64/16 QAM

Частота, МГц	0,156	0,288	0,522	0,999	1,62
«Орленок», дБмкВ	10	9	2	2	2

Максимально индицируемое отношение сигнал/шум (SNR) у приемника «Орленок» (индицируется в специальном инженерном режиме его работы), характеризующее собственные фазовые шумы гетеродина и измеряемое при большом уровне входного сигнала, составляет 35 дБ. Это достаточно высокое значение, сопоставимое с профессиональным оборудованием (у связного приемника AR-7030 SNR = 36 дБ, у приемника сигналов DRM DT-700 SNR = 40 дБ). Отсюда следует, что при нормируемом значении SNR на выходе передатчика 30 дБ собственные фазовые шумы приемника на возможность приема и декодирования сигнала DRM не влияют.

Результаты измерений чувствительности испытуемых приемников в различных режимах помехоустойчивости сигнала DRM на частоте 4 МГц приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты измерений чувствительности в различных режимах помехоустойчивости сигнала DRM, полоса сигнала 10 кГц, частота 4 МГц

Режим DRM	В, 64/16 QAM	В, 16/16 QAM	Д, 64/16 QAM	Д, 16/16 QAM
«Орленок», дБмкВ	5	0	5	0
«Roberts», дБмкВ	6	1	6	1

Погрешность проведенных измерений можно оценить, используя приведенные в [159] значения SNR, требуемые для декодирования сигнала DRM в различных режимах. Так, принимая значение SNR, требуемое для декодирования в режиме В, 16/16 QAM, за 0 дБ, рассчитываем разницу в требуемом SNR для различных режимов помехоустойчивости (см. таблицу 4.4, верхняя строка). Ниже в таблице 4.4 приведена разница в требуемом SNR, определенная по результатам измерения чувствительности испытуемых приемников (см. таблицу 4.3).

Таблица 4.4 – Оценка погрешности измерений для различных режимов помехоустойчивости сигнала DRM

Режим DRM	В, 64/16 QAM	В, 16/16 QAM	Д, 64/16 QAM	Д, 16/16 QAM
Разница по REC BS-1615, дБ	4,6	0	5,9	0,8
«Орленок», разница, дБ	5	0	5	0
«Roberts», разница, дБ	5	0	5	0
Погрешность измерений, дБ	+0,4	0	-0,9	-0,8

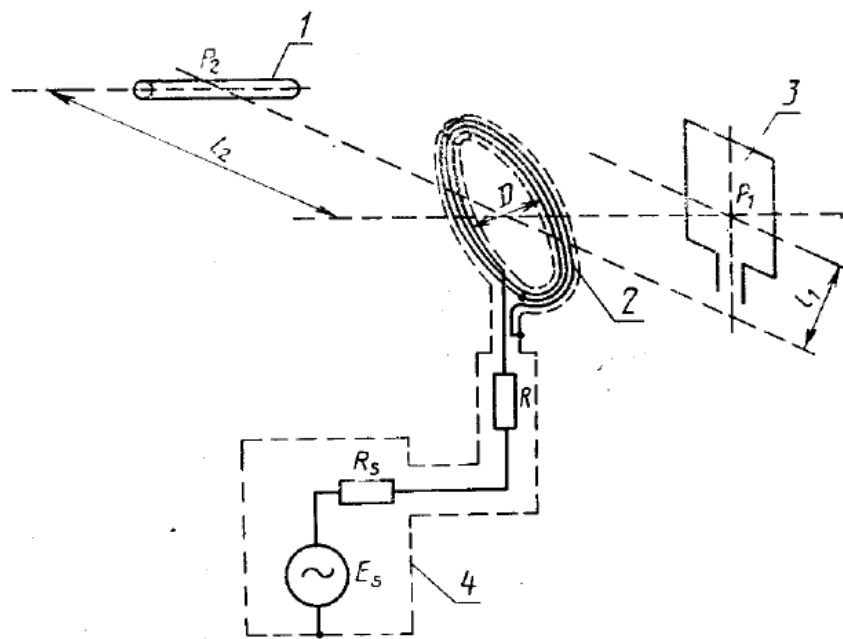
Как видно из таблицы 4.4, погрешность измерений не превышает 1 дБ, что соответствует параметрам используемого оборудования и достаточно для дальнейших исследований.

Выполнение требований [118] по чувствительности с антенного входа при постоянстве входного сопротивления 50 Ом обеспечит также и выполнение требований по чувствительности с соответствующими эквивалентами антенных цепей, описанных в [118].

4.2.2 Измерения чувствительности по напряженности электромагнитного поля

Измерения чувствительности образцов DRM приемников по напряженности электромагнитного поля проводились в диапазонах НЧ и СЧ для приемника «Himalaya DRM-2009», как единственного, имеющего встроенную магнитную антенну. Для диапазона ВЧ результаты измерений приведены в [151].

Для проведения измерений реальной чувствительности приемников по напряженности электромагнитного поля был изготовлен однорамочный генератор электромагнитного поля в соответствии с рекомендациями [46], более подходящий для решения данной задачи, чем описанный в [150]. Генератор (рисунок 4.1 [46]) состоит из экранированной рамочной антенны, выполненной из трех витков медного изолированного провода диаметром 0,8 мм. Витки помещены в медную трубку диаметром 10 мм, которая согнута в виде кольца со средним диаметром 250 мм и имеет зазор 8 мм в вершине кольца. Индуктивность экранированной рамочной антенны 7,5 мкГн. Резистор R последовательно включен между незаземленным концом обмотки и внутренним проводником экранированного коаксиального кабеля, соединенного с генератором сигнала DRM полностью экранированным коаксиальным разъемом. Длина коаксиального кабеля 1250 мм.



1 — антенна с ферритовым сердечником; 2 — экранированная рамочная антенна; 3 — антенна с воздушным сердечником; 4 — генератор ГСВ1; R_s — номинальное выходное сопротивление генератора; E_s — ЭДС генератора; R — резистор сопротивлением, определяемым из условия $R_s + R = 409$ Ом.

Рисунок 4.1 – Однорамочный генератор электромагнитного поля [46]

Антенна с ферритовым сердечником устанавливается в положение P_2 . Эквивалентная напряженность поля E в микровольтах на метр вычисляется по формуле:

$$E = 30SE_s N / L^3 (R_s + R),$$

где: S – площадь экранированной рамочной антенны, рассчитанная по ее среднему диаметру, m^2 ;

E_s – ЭДС генератора DRM сигнала, мкВ (среднеквадратическое значение);

L – расстояние от выбранного положения до центра экранированной рамочной антенны, м;

R_s – выходное сопротивление генератора DRM сигнала, Ом;

R – сопротивление у основания экранированной рамочной антенны, Ом.

Для дополнительного контроля напряженности электромагнитного поля в диапазоне НЧ была изготовлена измерительная магнитная антенна с заведомо большей действующей высотой (и коэффициентом передачи), чем у испытуемых образцов приемников.

Измерительная ферритовая антенна (ИФА) содержит три размещенных параллельно стержня с магнитной проницаемостью 400, диаметром 10 мм и длиной 200 мм. Контурная катушка содержит 128 витков с длиной намотки 83 мм (начало в 25 мм от края стержней). На расстоянии 20 мм от контурной катушки расположена катушка связи из 7 витков. Измеренная индуктивность контурной катушки $L=2$ мГн. Для настройки в резонанс с рабочей частотой используется конденсатор переменной емкости 12...500 пФ, параллельно которому подключен конденсатор 100 пФ. Расчетный коэффициент пересчета антенны составляет $-47,7$ дБ.

Калибровка измерительной ферритовой антенны проводилась по сигналам удаленных радиостанций с использованием селективного микровольтметра SMV-11 (№ 03354) и его штатной измерительной антенны FMA-11 (№ 06-114, рама №1, 0,01-1,6 МГц). К входу SMV-11 поочередно подключались рамочная антенна FMA-11 и измерительная ферритовая антенна, которая настраивалась в резонанс по максимуму сигнала (при одинаковой ориентации витков ИФА и рамки

FMA-11). Режим работы SMV-11 – полоса измерений 9 кГц, детектор среднеквадратический (RMS). Результаты калибровки ИФА показали, что ее коэффициент пересчета составляет 48,3 дБ с неравномерностью не более 1 дБ во всем НЧ диапазоне, что очень близко к расчетному значению (47,7 дБ).

Далее была разработана и создана лабораторная установка для измерения реальной чувствительности по напряженности электромагнитного поля образцов бытовых приемников на сигнале DRM. Установка состоит из:

- испытуемого приемника Himalaya DRM-2009;
- однорамочного генератора электромагнитного поля (рисунок 4.1);
- генератора сигнала DRM;
- измерительной ферритовой антенны;
- измерителя уровня сигнала – приемника AR-7030 с подключенным компьютером для считывания значений входного напряжения;
- рулетки для измерения расстояния от однорамочного генератора электромагнитного поля до испытуемого приемника.

Методика измерений. DRM сигнал с требуемым режимом помехоустойчивости с выхода генератора сигнала DRM подается на однорамочный генератор электромагнитного поля. Уменьшая расстояние от генератора поля до приемника, добиваемся появления устойчивого декодирования. Измеряется расстояние от генератора поля до приемника (до места расположения его антенны) и рассчитывается напряженность поля. Для контроля напряженности поля на такое же расстояние помещается измерительная ферритовая антенна и вычисляется напряженность поля как произведение коэффициента пересчета ИФА на измеренное входное напряжение измерителя уровня сигнала.

Следует отметить, что проведение измерений чувствительности по напряженности электромагнитного поля должно осуществляться в условиях малого (по отношению к измеряемым величинам) влияния внешних помех и шумов. Создание экранированной камеры достаточно больших размеров (не влияющей на характер распределения электромагнитного поля СЧ и НЧ

диапазонов) представляет собой достаточно сложную задачу. Поэтому для проведения измерений было выбрано место с низким уровнем эфирных помех в сельской местности, измерения проводились в будние дни при отсутствии в радиусе 100 м источников бытовых электромагнитных помех.

Измеренная (с помощью ИФА) напряженность поля шума эфира составляла 29 дБмкВ/м на свободных от радиостанций частотах диапазона НЧ. Данное значение является достаточным для измерения чувствительности в диапазоне НЧ, которое, в соответствии с требованиями [118], составляет 46 дБмкВ/м при требуемом для декодирования SNR=16 дБ. Для устранения помех от применяемых компьютеров, измерительное оборудование и испытуемые образцы были размещены вдоль одной линии с максимальным удалением друг от друга.

Результаты измерения реальной чувствительности по напряженности электромагнитного поля бытового DRM приемника Himalaya DRM 2009 в режиме А, 9 кГц, 64/16 QAM приведены в таблице 4.5 и на рисунке 4.2. На рисунке 4.2 также приведены требуемые значения, в соответствии с [118]. Как видно из рисунка, измеренная чувствительность приемника Himalaya по напряженности электромагнитного поля составляет 73...88 дБмкВ/м в диапазоне НЧ и 53...62 дБмкВ/м в диапазоне СЧ, что на 13...42 дБ хуже требуемой.

Таблица 4.5 – Результаты измерения чувствительности по напряженности электромагнитного поля образца бытового DRM приемника Himalaya DRM-2009 на сигнале DRM в режиме А, 9 кГц, 64/16 QAM

Частота, кГц	Расстояние L, м	Напряженность поля E, мВ/м	Чувствительность по полю, дБмкВ/м	Контроль ИФА, дБмкВ/м	с
153	0,31	25,38	88,09		
159	0,32	23,07	87,26		
174	0,36	16,20	84,19	82	
240	0,48	6,84	76,70	78,5	
282	0,55	4,54	73,15	73	
522	0,85	1,23	61,81		
1017	1,14	0,51	54,16		
1611	1,18	0,46	53,26		

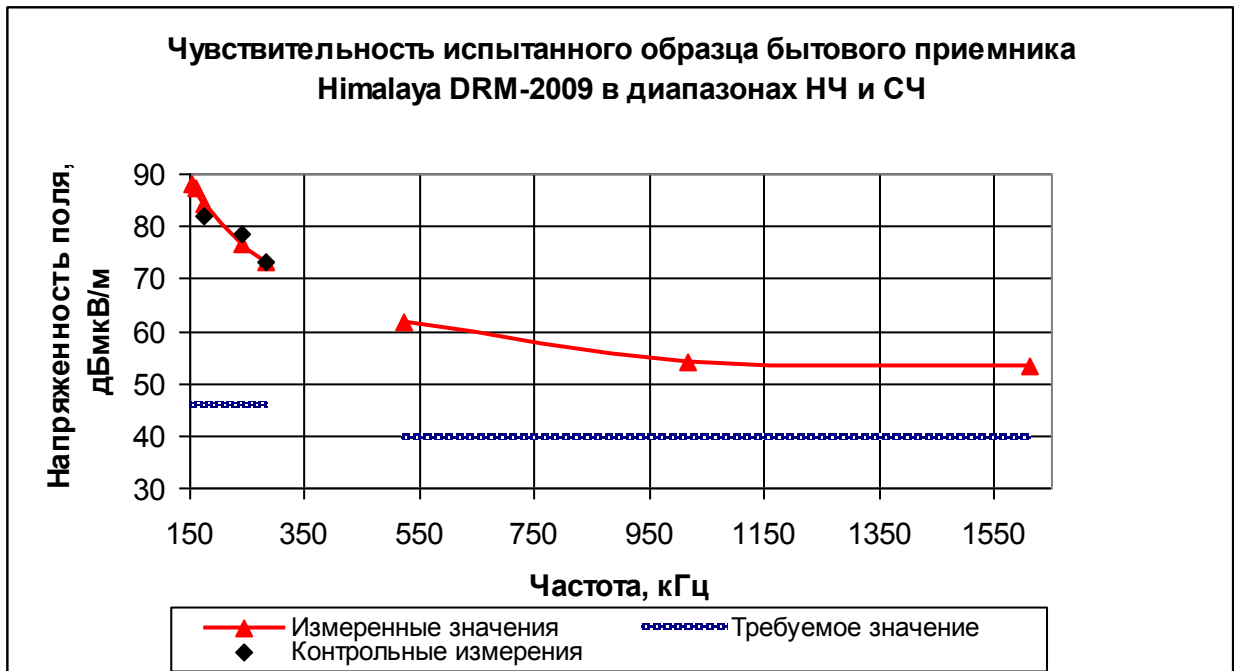


Рисунок. 4.2 – Результаты измерения чувствительности образца приемника Himalaya DRM-2009 по напряженности электромагнитного поля на сигнале DRM в режиме А, 9 кГц, 64/16 QAM

Проведенные измерения не дают ответа на вопрос о причинах низкой чувствительности приемников в НЧ и СЧ диапазонах, среди которых может быть как принципиальная невозможность достижения заданного результата, так и неоптимальное проектирование или неточная настройка в резонанс антенного контура, или недостаточная экранировка от шумов и помех цифровой части приемника. Далее рассматривается возможность построения антенной цепи, обеспечивающей требуемые значения чувствительности по электромагнитному полю.

4.3 Анализ возможности обеспечения требуемой чувствительности бытовых приемников DRM в диапазонах НЧ и СЧ

Приведенные выше результаты измерения чувствительности по напряженности электромагнитного поля образца бытового DRM приемника

Himalaya DRM-2009 в диапазонах НЧ и СЧ показали ее существенную недостаточность. В связи с этим представляется весьма актуальным определить возможность обеспечения максимальной чувствительности с учетом уровня развития современной элементной базы, массогабаритных характеристик бытовых приемников и их антенных устройств.

Исходя из нормативной чувствительности DRM приемников по входу для внешней антенны $U_{\text{в}}$, равной 8 дБмкВ, и требуемой чувствительности по электромагнитному полю $U_{\text{э}}$ (40 дБмкВ/м в диапазоне СЧ и 46 дБмкВ/м в диапазоне НЧ), можно определить требуемый коэффициент передачи антенной цепи $K_{\text{ГР}} = 10^{(U_{\text{в}} - U_{\text{э}}) / 20}$.

Коэффициент передачи входной цепи с магнитной антенной традиционно определяется как: $K = h_{\text{д}} * n * Q_{\text{н}}$,

где n – коэффициент трансформации цепи связи, $n \leq 1$;

$Q_{\text{н}}$ – нагруженная добротность контура, зависящая от величины входного сопротивления ВЧ тракта приемника и величины n ;

$h_{\text{д}} = \mu_{\text{д}} * 2 * \pi * \omega * S / \lambda$ – действующая высота магнитной антенны [96],

где ω – число витков антенной катушки; S – площадь сечения сердечника; λ – длина волны; $\mu_{\text{д}}$ – действующая магнитная проницаемость ферритового сердечника, зависящая от начальной магнитной проницаемости феррита μ_0 и соотношения геометрических размеров сердечника.

Следует отметить, что в традиционных приемниках АМ сигналов добротность ферритовой антенны стараются повышать до максимально реализуемых величин (определяющихся потерями в сердечнике), достигающих значений 100...150. При этом ограничение полосы пропускания антенного контура в диапазоне НЧ приводит лишь к сужению полосы воспроизводимых звуковых частот. Иная ситуация при приеме сигналов DRM с равномерным распределением спектра в полосе частот 9...10 кГц. Ограничение полосы пропускания входного контура может приводить к ошибкам декодирования или даже делать его невозможным. Поэтому полоса пропускания антенного контура

DRM приемника должна составлять не менее 10 кГц (неравномерностью АЧХ в 3 дБ можно пренебречь). Таким образом, чтобы обеспечить полосу пропускания 10 кГц на нижней частоте диапазона НЧ (150 кГц), максимальная нагруженная добротность антенного контура должна быть не более 15 (и не более 53 на частоте 530 кГц для диапазона СЧ). Это значение существенно ниже, чем в приемниках АМ, и не позволяет существенно повысить коэффициент передачи антенны.

Исходя из заданных величин добротности, можно определить допустимые значения входного сопротивления. Искомое входное сопротивление ВЧ тракта определяется как:

$$R_{вх} = R_{вн} * n^2,$$

$$\text{где } R_{вн} = 2 * \pi * f * L * Q_n,$$

$$L = \omega^2 * D^2 * \mu_0 * 10^{-6} / l * 1,27,$$

где: D – диаметр катушки; l – длина намотки,

и, с учетом приведенных выше выражений, может быть определено через требуемый коэффициент передачи и параметры магнитной антенны:

$$R_{вх} = 72 * K_{TP}^2 * 10^{10} / (Q_n * \pi^3 * \mu_0 * l * f * D^2 * 1,27).$$

Типичные параметры сердечников ферритовых антенн бытовых носимых приемников: длина 80 мм, диаметр 8 мм, $\mu_0 = 60$. С учетом этого искомое входное сопротивление ВЧ тракта составит 4100 Ом для диапазона НЧ и 1324 Ом для диапазона СЧ. Необходимое для конструктивной реализации число витков контурной катушки и катушки связи может быть определено из приведенных выше выражений.

Таким образом, проведенный анализ показал, что требуемое значение чувствительности бытовых приемников DRM в диапазонах НЧ и СЧ может быть достигнуто. Для этого необходимо включение достаточно высокоомного буферного каскада с единичным коэффициентом передачи напряжения, работающего на входное сопротивление радиотракта, равное 50 Ом.

Следует отметить, что данное значение входного сопротивления включает в себя и собственные потери антенны, поэтому реальное значение требуемого

входного сопротивления первого каскада радиотракта должно быть несколько выше. Для диапазона НЧ этот эффект пренебрежимо мал ввиду низкой нагруженной добротности.

Проведенные дополнительные исследования причин недостаточной чувствительности по напряженности электромагнитного поля бытового DRM приемника «Himalaya DRM-2009» показали, что она ограничена недостаточной экранировкой магнитной антенны от шумов и помех цифровой части приемника.

4.4 Разработка требований на параметры приемного оборудования сетей ЦРВ стандарта DRM

Разработка требований на параметры приемного оборудования сетей ЦРВ стандарта DRM проведена автором в рамках выполнения Системного проекта «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации (раздел «Разработка требований к приемному оборудованию сетей цифрового радиовещания DRM»).

При этом, по согласованию с Заказчиком (ФГУП «РТПС»), разрабатываемые требования к приемному оборудованию сетей цифрового радиовещания DRM излагаются согласно сложившейся в РФ школе разработки стандартов, в соответствии с которой приводится сводная таблица параметров, а затем методы их измерений. Причем методы измерений могут содержаться и в отдельном документе, как это было, например, с последними ГОСТ-ами СССР на радиоприемники: «Аппаратура радиоприемная бытовая. Общие технические условия» – ГОСТ 5651-89 [45], и «Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Методы электрических высокочастотных измерений» – ГОСТ 9783-88 [46].

Следует отметить, что разработка стандартов не является задачей данной работы, тем не менее, общий стиль изложения и построения материала в значительной степени приближен к форме написания стандартов для облегчения дальнейшего использования в качестве исходной базы при разработке стандартов.

Основные разработанные требования изложены автором в [24]. В частности, предлагается в зависимости от условий эксплуатации, конструктивного исполнения и области применения подразделять приемники DRM на:

1. Приемники общего применения:

1.1 Стационарные для домашнего применения;

1.2 Автомобильные;

1.3 Переносные;

1.4 Носимые (малогабаритные с батарейным питанием);

1.5 Приемники в составе комбинированного устройства, используемого населением при чрезвычайных ситуациях.

2. Приемники, используемые для оповещения.

Перечень технических характеристик разделен на две части:

– основные функциональные параметры (контролируются без проведения измерений);

– основные радиочастотные параметры, которые измеряются по разработанным методикам.

4.4.1 Требования к основным функциональным параметрам

Требования к основным функциональным параметрам включают в себя:

– требования к диапазону принимаемых частот, шагу сетки частот, полосе захвата сигнала DRM;

– требования к звуковой подсистеме (поддержка форматов кодирования HVXC, CELP и AAC с соответствующими частотами дискретизации, метода реконструкции высоких частот SBR, декодирование стерео и параметрического стерео);

– требования к декодеру канала и демодулятору (поддержка режимов помехоустойчивости A, B, C, D, модуляции 4-QAM и 16-QAM для канала SDC, и 16-QAM и 64-QAM для канала MSC, уровней защиты: 0, 1, 2, 3 (64-QAM) и 0, 1 (16-QAM), иерархической модуляции: SPP, VSPP (SP, HMsym, HMmix), схемы

защиты от ошибок EEP, UEP, короткий и длинный интервалы интерливинга, полосы частот сигнала DRM: 4,5 кГц, 5 кГц, 9 кГц, 10 кГц).

Функциональные параметры должны обеспечивать:

– прием аналоговых станций с АМ и декодирование AMSS, приём ОБЧ станций с декодированием RDS (радиочастотные параметры приёма вещательных ОБЧ-радиостанций должны отвечать соответствующим техническим требованиям, действующим в РФ);

– индикацию возможности приема на данной частоте во время настройки;

– индикацию уровня сигнала или отношения сигнал-шум (для портативных приемников или приемников с внешними антеннами);

– отображение доступных звуковых служб и служб данных, передаваемых внутри одного мультиплекса (до четырех служб), и возможность ручного переключения между ними;

– автоматическое переключение на альтернативную частоту: приёмник должен обеспечивать приём идентификаторов программ в стандартах DRM, RDS и AMSS;

– приём сигналов оповещения и оперативного информирования населения: радиоприемники DRM общего применения должны принимать сигнал оповещения, передаваемый в каналах SDC, AMSS или RDS, переключаться на соответствующую радиопрограмму, содержащую информацию МЧС, а по окончании передачи информации МЧС вернуться к воспроизведению предыдущей программы. Дополнительно может быть предусмотрена возможность переключения на воспроизведение информации МЧС из других режимов работы радиоприемного устройства, в том числе из дежурного режима.

Требования по приему текстовой информации включают в себя:

– прием и декодирование символов алфавита русского языка в кодировке ISO/IEC 10646 (Unicode) в форме UTF-8;

– индикацию времени, транслируемого вещателем;

– поддержка приема информации о чрезвычайных ситуациях;

– отображение названия передающей станции.

Прочие требования включают в себя:

- наличие разъёма для внешней антенны, цифрового выхода SPDIF, выхода на головные телефоны, USB стыка;
- автоматический поиск вещательных программ во всех диапазонах;
- наличие цветного графического дисплея с разрешением не менее 320x240 точек. В приемниках низшего ценового диапазона возможно применение буквенно-символьного (2-х строкового, 16-ти символьного) дисплея. Специальные приемники (тюнеры), подключаемые к внешнему контроллеру, могут не иметь собственного дисплея;
- русифицированный интерфейс управления;
- рекомендуется расширить пользовательские характеристики приёмника родственными функциями (воспроизведение с внешнего носителя, запись радиопрограмм, ГЛОНАСС/GPS навигация и т.д.);
- при декодировании вещательных DRM-сигналов рекомендуется декодировать следующие протоколы дополнительной информации: EPG, MOT Slideshow, MOT web-site, Journaline, TPEG, TMC;
- приёмник должен обладать интерфейсом обновления программного обеспечения для добавления пользователем декодеров перспективных служб дополнительной информации;
- питание от сухих элементов, внешнего сетевого источника питания, USB стыка. Если вместо сухих элементов используются аккумуляторные батареи, необходима индикация состояния заряда, возможность подзарядки от внешних источников питания.

4.4.2 Требования к основным радиочастотным параметрам

Требования к основным радиочастотным параметрам приведены в Таблице 4.6. Помимо традиционных для всех радиоприемных устройств параметров – чувствительности, избирательности, динамическому диапазону и интермодуляционным искажениям, в ней присутствуют и специфические для

приемников DRM характеристики. К ним относятся: задержка начала декодирования и требуемое для декодирования минимальное отношение сигнал/шум в различных каналах распространения.

Таблица 4.6 – Требования к основным радиочастотным параметрам

1. Чувствительность, не хуже, в диапазонах частот:	ДВ	СВ	КВ1 (2,3 – 6,2 МГц)	КВ2 (6,2 - 27 МГц)		
Измеренная по напряженности поля для носимых приемников со встроенными антеннами, дБмкВ/м	46	40	32	28		
Измеренная с эквивалентом антенны №1 для носимых приемников, дБмкВ	68	62	54	50		
Измеренная с эквивалентом антенны №2 для носимых приемников, дБмкВ	37	31	23	19		
Для автомобильных и стационарных приемников, дБмкВ	8	8	8	8		
2. Динамический диапазон, дБ	84	90	80	80		
3. Избирательность по соседнему каналу	Частотный интервал, кГц		Подавление для всех диапазонов частот, не менее, дБ			
1 канал	9/10		25			
2 канал	18/20		35			
3 канал	27/30		45			
4 и более	$\geq 36/40$ и < 400		50			
Удаленные каналы	≥ 400		≥ 60			
4. Динамический диапазон по блокированию	Более 60 дБ					
5. Подавление со-канального АМ сигнала	Более -5 дБ					
6. Интермодуляционные искажения	Не менее 40 дБ от уровня принимаемого сигнала (для частот, отстоящих на 200 и 400 кГц от принимаемого сигнала)					
7. Требуемое для декодирования отношение сигнал/шум в различных каналах распространения	Номер канала распространения и № тестового набора (см. [1])					
	1	2	3	4	5	6
Требуемое ОСШ, не более, дБ	21	22	31	26	20	25
8. Задержка начала декодирования сигнала в различных каналах распространения при заданном ОСШ, дБ:	26	27	39	31	25	30
Задержка начала декодирования, не более, мсек:	3200			4000		

Введено подразделение приемников DRM общего применения по электрическим и электроакустическим параметрам на три группы сложности: высшую (0), первую (1) и вторую (2), аналогично [45]. Требования на полосы звуковых частот, принимаемых в стандарте DRM в зависимости от ширины полосы передатчика и способа кодирования, и требования к диапазону воспроизводимых частот для приемников различных групп сложности приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Требования к диапазону воспроизводимых частот для приемников различных групп сложности

Ширина полосы радиочастот	Частота дискретизации	Полоса декодируемых звуковых частот с SBR* / без SBR	Стандарт кодирования и область применения	Диапазон воспроизводимых частот звукового давления всего тракта при неравномерности частотной характеристики звукового давления 14 дБ, Гц, не уже:		
				Норма для аппаратов групп сложности		
кГц	кГц	Гц		0	1	2
4,5	16 (8)	50 – 10000/ 50 -7000 (50 - 7000/ 100 – 3800)	MPEG-4 CELP. Используется в каналах с большим уровнем помех, при одновременной передаче AM и DRM сигналов	80-12500	125-10000	200-10000 (стерео) 315-6300 (моно)
5						
9	24 (12)	20 –15000/ 50 -10000 (50- 10000/ 100 –6000)	MPEG-4 AAC. Перспективное звуковое кодирование, включающее средства повышения помехоустойчивости для универсального монофонического и стереофонического радиовещания;	80-12500	125-10000	200-10000 (стерео) 315-6300 (моно)
10						
18	Такие же, как при ширине полосы радиочастот 9 и 10 кГц		Используется для организации 2-х высококачественных радиоканалов, передачи стереосигнала, дополнительных сервисов	80-12500	125-10000	200-10000 (стерео) 315-6300 (моно)
20						

* Для кодирования области верхних частот по технологии SBR используется удвоенная (относительно базовой) частота дискретизации.

В целом, документ гармонизирован как с [118] для обеспечения международного соответствия разрабатываемых приемников, так и с требованиями нормативных документов РФ, и учитывает особенности планируемого использования DRM вещания на территории РФ.

Разработанный документ «Приемник DRM-30 (для системы цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц). Общие технические условия» утвержден ФГУП «РТРС» и приведен в Приложении А.

Далее приводятся разработанные методы измерений радиочастотных параметров.

4.5 Разработка методов измерений радиочастотных параметров приемного оборудования сетей ЦРВ стандарта DRM

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 радиотракта 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 [123], измеряются с помощью имитаторов канала распространения радиоволн. Параметры чувствительности измеряются с различными (для приемников разного назначения) эквивалентами антенных цепей, несколько отличающихся от принятых в нормативных документах РФ.

В связи с этим, для соответствия проектируемых приемников международным нормам, разрабатываемые в настоящем параграфе методы

электрических высокочастотных измерений максимально приближены к документу DRM консорциума [118] как по форме, так и по стилю изложения. Дополнительно предусмотрена возможность использования однорамочного генератора электромагнитного поля (в соответствии с [46]) при проведении измерений чувствительности по напряженности поля в диапазонах НЧ и СЧ.

Традиционные измерения, такие как: измерения параметров в части требований к диапазону воспроизводимых частот по звуковому давлению, уровней создаваемых радиопомех, соответствие требованиям по помехозащищенности, соответствие по устойчивости к климатическим и механическим воздействиям, соответствие требованиям безопасности, – проводятся по существующим в РФ методикам и нормативным документам, поэтому в данной работе не рассматриваются.

Разработанный документ «Приемник DRM-30 (для системы цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц). Методы электрических высокочастотных измерений» утвержден ФГУП «РТРС» и приведен в Приложении Б.

Разработанные технические условия и методы измерений вошли в качестве составной части в Системный проект «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации (исполнитель ФГУП «РТРС», раздел «Разработка требований к приемному оборудованию сетей цифрового радиовещания DRM»). Разработанные методы измерений также были использованы в ОКР «Разработка базовых технологий создания унифицированных электронных модулей для радиоприёмников и измерительных средств цифрового радиовещания», шифр «Гиперзвук» (исполнитель МНИТИ, 2012) при разработке программы и методики предварительных испытаний опытного образца унифицированного электронного модуля для цифровых радиоприёмников DRM.

4.6 Выводы

1. Проведены измерения чувствительности существующих образцов бытовых приемников цифрового радиовещания стандарта DRM. Для этого:

– разработаны и созданы лабораторные установки для измерения чувствительности с антенного входа и по напряженности электромагнитного поля;

– разработаны методики проведения измерений чувствительности приемников DRM.

Проведенные измерения показали, что чувствительность исследованных образцов бытовых приемников DRM по радиочастотному входу соответствует проектам нормативных документов, а чувствительность по напряженности электромагнитного поля в диапазонах НЧ и СЧ далека от ожидаемой.

2. Проведен анализ входных цепей приемников с магнитной антенной диапазонов НЧ и СЧ, который показал возможность достижения заданных значений чувствительности, и определены необходимые для этого условия.

3. Разработаны требования на параметры приемного оборудования сетей ЦРВ стандарта DRM, включающие в себя требования к основным функциональным параметрам и требования к основным радиочастотным параметрам.

4. Разработаны методы измерений радиочастотных параметров приемного оборудования сетей ЦРВ стандарта DRM.

5. Разработан пакет документов, нормирующих параметры приемного оборудования сетей цифрового радиовещания стандарта DRM и методы их измерений:

– «Приемник DRM-30 (для системы цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц) Общие технические условия (Базовые технические характеристики. Предоставляемые сервисы)».

– «Приемник DRM-30 (для системы цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц) Методы электрических высокочастотных измерений».

5 ЗАЩИТНЫЕ ОТНОШЕНИЯ И РАБОТА СЕТИ ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ В ПЕРЕХОДНЫЙ ПЕРИОД

5.1 Введение

Знание требуемых защитных отношений необходимо при планировании любой системы вещания. Для цифровых систем, характеризующихся пороговым характером приема (см. рисунок 6.1 в следующей главе), их определение следует проводить более точно, учитывая, в том числе и факторы второго порядка малости, которыми обычно пренебрегали при планировании аналоговых сетей радиовещания.

Базовые значения защитных отношений для системы ЦРВ стандарта DRM приведены в документе ETSI и рекомендации МСЭ [91, 123]. Они включают в себя случаи помехи аналоговому сигналу с АМ от цифрового сигнала DRM, помехи цифровому сигналу DRM от аналогового сигнала с АМ, и помехи цифровому сигналу DRM от цифрового сигнала DRM, для различных расстроек по частоте.

Следует отметить, что в [91, 123] рассмотрены помехи сигналу DRM только от АМ передатчиков с полосой модулирующих частот 4,5 кГц (соответствующих Европейским нормам), и не определены защитные отношения в случае помехи от АМ передатчиков с полосой модулирующих частот 10 кГц, соответствующих стандартам РФ и ряда других стран. Кроме того, сформулированные в [91, 123] величины защитных отношений относятся к случаю одной и единственной помехи, тогда как в реальной эфирной помеховой обстановке как правило одновременно присутствует несколько мешающих сигналов (в рабочем и в соседних каналах), и методика учета их совместного влияния не разработана. Также не учитываются возможные изменения защитных отношений для сигналов (или помех), прошедших через многолучевые каналы распространения.

В данной главе проводится анализ перечисленных выше факторов, приводятся результаты проведенных исследований на лабораторной

измерительной установке и результаты эфирных испытаний в различных диапазонах частот и на различных радиотрассах.

С проблематикой защитных отношений тесно связан вопрос работы сети цифрового радиовещания в переходный период, когда для осуществления совместимости с имеющимся у населения парком аналоговых приемников может осуществляться одновременное вещание одним передатчиком цифрового и аналогового сигналов (режим Simulcast). Данные сигналы располагаются в соседних частотных каналах и могут рассматриваться как мешающие друг для друга. Имеющиеся международные рекомендации [52, 123] предполагают передачу цифрового сигнала с существенно меньшей (на 16 дБ) мощностью, чем аналогового, что не позволяет обеспечить равенство зон обслуживания для обоих режимов.

Проведенные исследования показывают возможность перераспределения данного соотношения с целью увеличения доли цифровой компоненты сигнала.

5.2 Уточнение отдельных величин защитных отношений

С целью определения возможности и условий создания в Российской Федерации сетей цифрового звукового радиовещания стандарта DRM ГКРЧ при Минсвязи РФ было принято решение № 30/3 от 01.12.2003 «Об организации опытных зон экспериментального цифрового звукового радиовещания стандарта DRM в диапазоне 3,95 – 26,1 МГц». В целях исполнения этого решения в НИР «Луч-2-МТУСИ» (заказчики ОАО «НТЦ-РС» и ФГУП «РТРС») была разработана и создана лабораторная измерительная установка, аналогичная приведенной в [91]. В этой установке часть радиоизмерительного оборудования была заменена разработанными в МТУСИ программными симуляторами, а также добавлен программный имитатор каналов распространения сигнала.

По результатам лабораторных исследований временные значения защитных отношений, рекомендуемые МСЭ, были подтверждены с достаточной для

практики точно, что позволяет говорить о возможности использования разработанных программ и методик исследований.

В отличие от приведенных в [91] результатов исследований, были рассмотрены помехи сигналу DRM не только от АМ передатчиков с полосой модулирующих частот 4,5 кГц (соответствующих Европейским нормам), но и от АМ передатчиков с полосой модулирующих частот 10 кГц, соответствующих стандартам РФ и ряда других стран. АЧХ используемых фильтров и огибающие спектров модулирующих сигналов для передатчиков помехи с амплитудной модуляцией различных стандартов приведены на рисунке 5.1. Как видно из рисунка 5.2, для декодирования сигнала DRM при наличии в соседнем канале помехи от АМ передатчика со спектром модулирующих частот 10 кГц, ее допустимый уровень должен быть существенно (на 18 дБ) ниже, чем в случае помехи от АМ передатчика с полосой модулирующих частот 4,5 кГц.

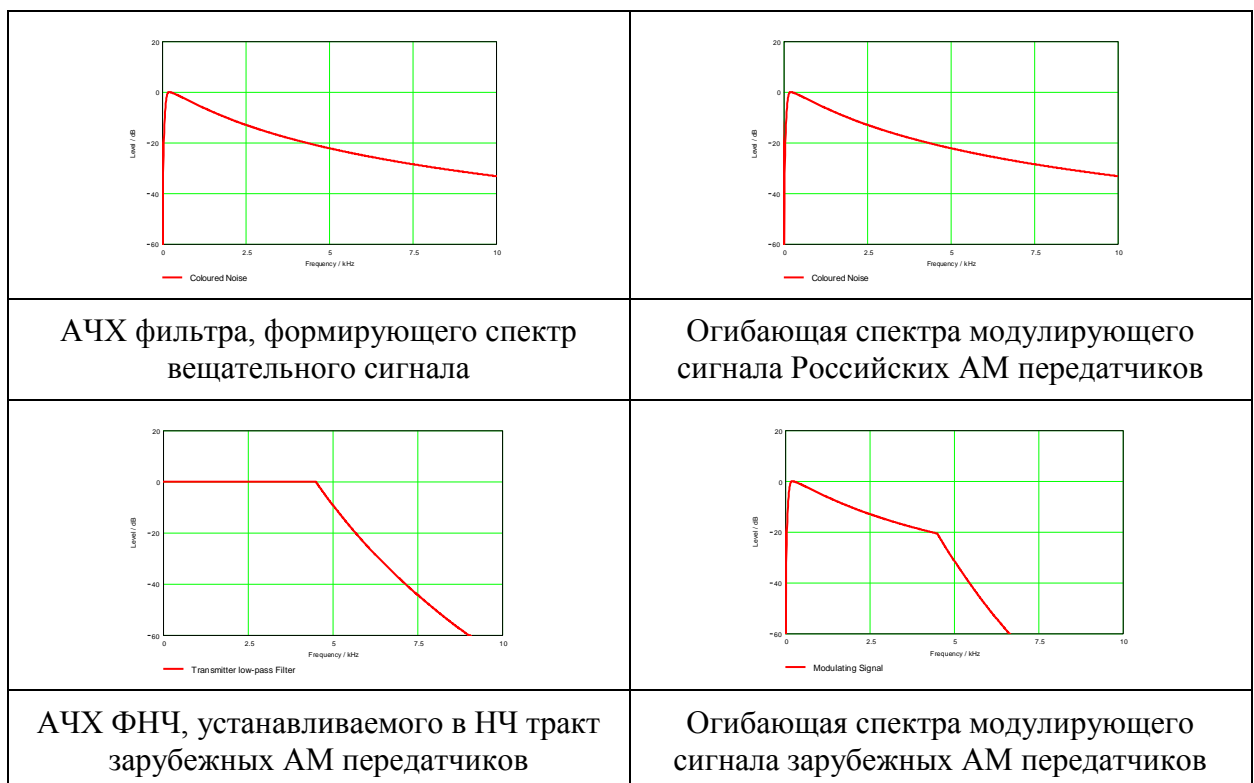


Рисунок 5.1 – АЧХ используемых фильтров и огибающие спектров модулирующих сигналов для передатчика помехи с амплитудной модуляцией

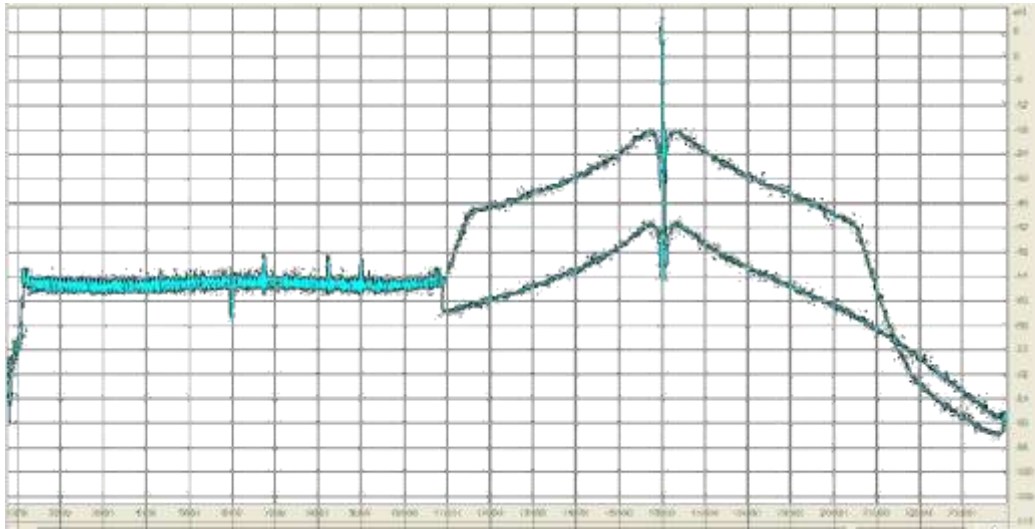


Рисунок 5.2 – Спектры полезного сигнала DRM и двух мешающих сигналов АМ с полосами модулирующих частот 4,5 и 10 кГц при частотной расстройке 10 кГц

Также было показано, что временные значения защитных отношений, рекомендуемые МСЭ, справедливы только для случая однолучевого канала распространения. При многолучевом распространении величины защитных отношений должны уточняться в соответствии с характеристиками канала, что пока не рассматривалось МСЭ. Основные результаты исследований для канала распространения №1 (АБГШ) приведены на рисунке 5.3.

Экспериментальная проверка проводилась посредством эфирных измерений защитных отношений в диапазоне ВЧ на скачковой трассе Талдом-Романцево (160 км). Для этого в точке приема была создана измерительная установка, структурная схема которой приведена на рисунке 5.4. На вход эфирного приемника DRM кроме полезного сигнала, поступающего с антенны, подавались различные виды мешающих сигналов, полученные с помощью имитаторов сигналов и высокочастотного переносчика. Принимая в качестве исходного допущения равные вклады помехи и шума в точке приема, была сформирована расширенная таблица величин относительных защитных отношений (таблица 5.1). Аналогично документам МСЭ для получения абсолютных величин защитных отношений в случае мешающего сигнала DRM необходимо к значениям таблицы 5.1 прибавить 16 дБ, а в случае мешающего сигнала АМ прибавить 7 дБ.

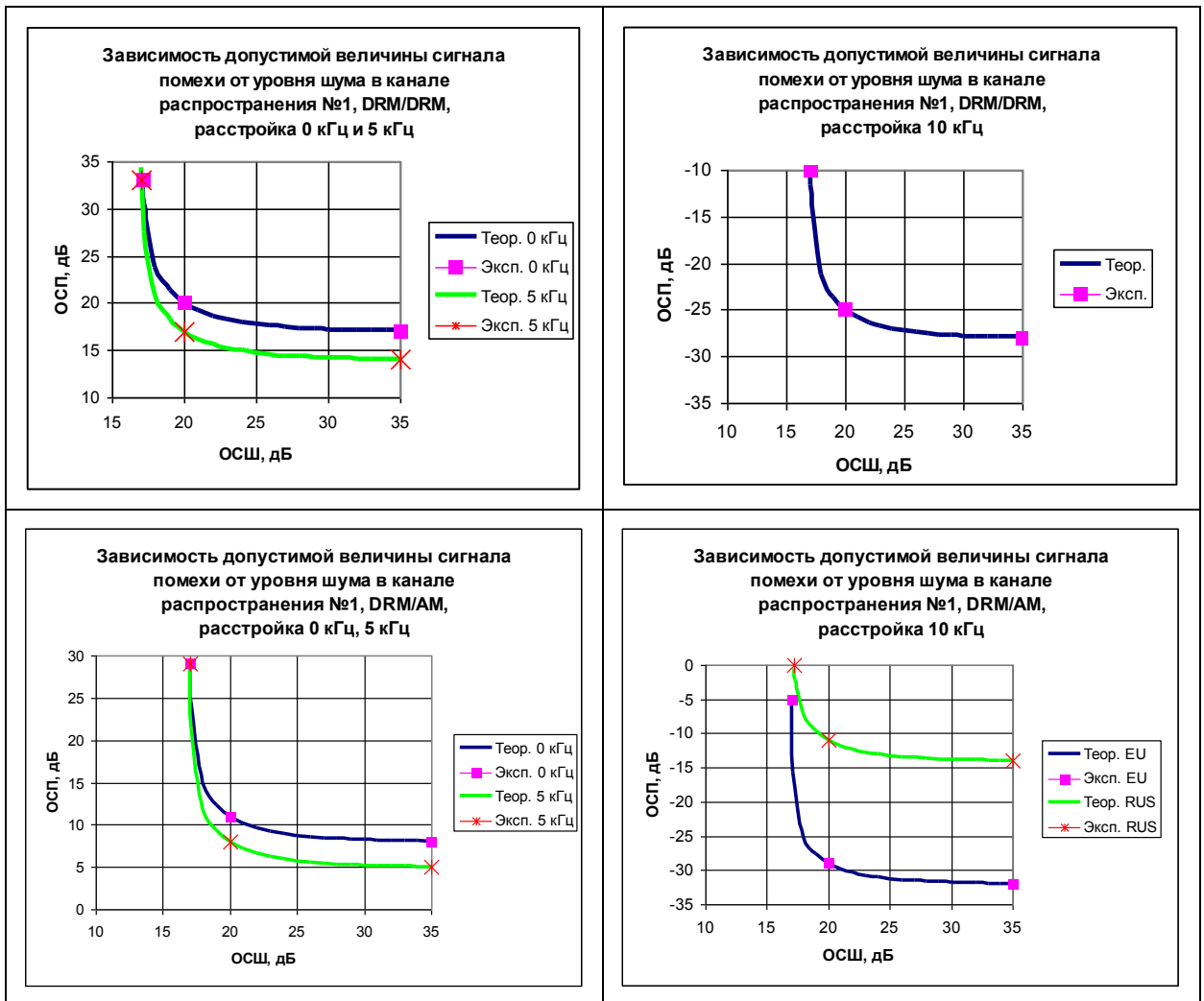


Рисунок 5.3 – Зависимости допустимых величин сигнала помехи для сигнала ЦРВ от уровня шума в канале распространения №1 (АБГШ) при различных видах мешающих сигналов и различных частотных расстройках

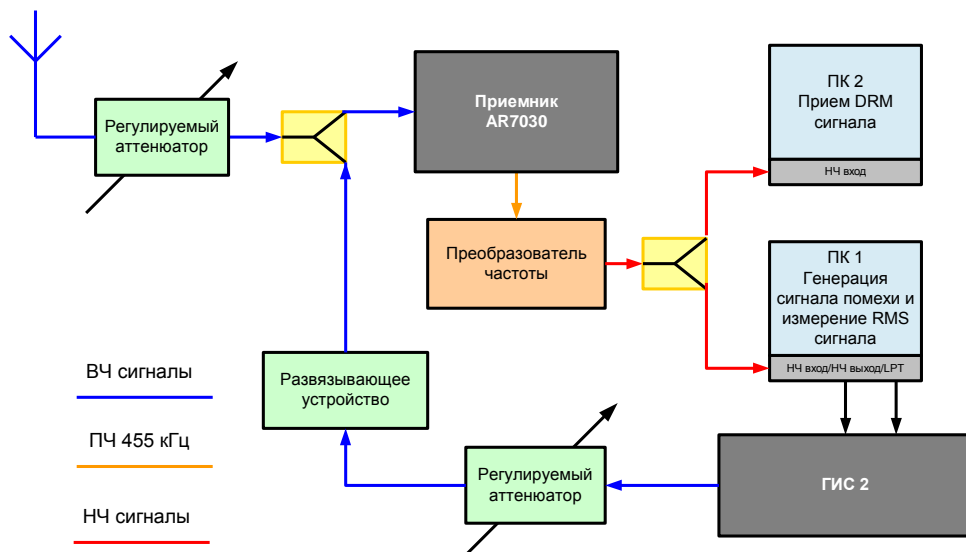


Рисунок 5.4 – Структурная схема эфирной измерительной установки

Таблица 5.1 – Требуемые величины относительных защитных отношений для трех видов каналов распространения

Полезный сигнал	Мешающий сигнал	Расстройка по частоте																	
		$f_{\text{высокочастотный}} - f_{\text{полосный}}, \text{кГц}$																	
		0						5						10					
		Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 1		Канал 2		Канал 3		Канал 1		Канал 2		Канал 3	
Б/Ш	Ш	Б/Ш	Ш	Б/Ш	Ш	Б/Ш	Ш	Б/Ш	Ш	Б/Ш	Ш	Б/Ш	Ш	Б/Ш	Ш	Б/Ш	Ш		
DRM	AM-E	0	3	1	4	8,5	11,5	-3	0	-2	1	5,5	8,5	-40	-37	-39	-36	-31,5	-28,5
DRM	AM-P	0	3	1	4	8,5	11,5	-3	0	-2	1	5,5	8,5	-22	-19	-21	-18	-13,5	-10,5
DRM	DRM	0	3	1	4	8,5	11,5	-3	0	-2	1	5,5	8,5	-38	-35	-37	-34	-29,5	-26,5

В таблице 5.1 использованы следующие обозначения: канал 1 – однолучевый канал; канал 2 – двухлучевый канал; канал 3 – четырехлучевый канал (номера и параметры каналов распространения соответствуют [123]); Б/Ш – значения защитных отношений без учета шумов канала; Ш – значения защитных отношений с учетом шумов канала. Красным цветом помечены значения защитных отношений, совпадающие с результатами МСЭ. Для остальных вариантов проведенных измерений исследования МСЭ не проводились.

Как видно из представленных результатов, для дальнейшего уточнения величин защитных отношений необходимо учитывать параметры каналов распространения радиоволн. Кроме того, как отмечалось выше, измерения подтвердили существенную разницу при помехах от АМ передатчиков с полосами модулирующих частот 4,5 и 10 кГц при частотной отстройке 10 кГц.

Данные результаты докладывались автором на заседании ГКРЧ в 2006 году и опубликованы в [10]. В решении ГКРЧ № 06 – 13 – 03 – 001 от 24.04.2006 г. была отмечена целесообразность продолжения создания опытных зон ЦРВ стандарта DRM в России для отработки способов модернизации существующего парка передатчиков в ВЧ и СЧ диапазонах и уточнения величин защитных отношений для различных типов каналов распространения радиоволн.

В соответствии с этим решением Федеральное агентство по печати и массовым коммуникациям и ФГУП «РТРС» в течение 2007 – 2008 годов

организовали исследования возможности применения технологий ЦРВ стандарта DRM в диапазоне радиочастот 526,5 – 1606,5 кГц и 3,95 – 26,1 МГц на территории Российской Федерации. В частности, были проведены НИР «Волна-ВЧ» и «Волна-СЧ», одним из исполнителей которых был МТУСИ. В рамках этих работ автором были проведены теоретические и экспериментальные исследования защитных отношений при одновременном воздействии нескольких различных мешающих сигналов, которые рассматриваются далее.

5.3 Защитные отношения для сигнала ЦРВ при одновременном воздействии произвольного количества мешающих сигналов

Как уже отмечалось во введении к настоящей главе, стандарт DRM [123] и рекомендации МСЭ [91] 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 мешающих сигналов и связанных с ними величинами защитных отношений. Кроме этого, необходимо учитывать параметры применяемого приемного и передающего оборудования.

Исчерпывающий перечень факторов, влияющих на качество приема сигнала ЦРВ, включает в себя:

- промышленные или атмосферные (что больше) шумы в точке приема;
- нелинейные искажения передатчика;
- собственные шумы приемника;
- помехи от других станций, находящихся в том же частотном канале, что и принимаемый полезный сигнал;

– помехи от других станций, находящихся в соседних каналах, спектр основного сигнала которых частично попадает в полосу частот принимаемого сигнала;

– помехи от других станций, находящихся через канал, и спектр основного сигнала которых не перекрывается со спектром полезного сигнала. Однако продукты нелинейных искажений, возникающие в их передатчиках, попадают в полосу частот принимаемого сигнала.

Рассмотрим перечисленные виды помех более подробно.

Промышленные шумы в точке приема [162, 170] имеют достаточно высокий уровень в диапазонах НЧ и СЧ, и сильно различаются в зависимости от типа местности, в которой располагается точка приема (индустриальная, жилая или сельская).

Нелинейные искажения выходного сигнала передатчика при работе в режиме ЦРВ стандарта DRM определяются величиной коэффициента ошибок модуляции MER (практически равным величине ОСШ в выходном сигнале передатчика), значение которого должно быть не хуже 30 дБ [122]. Именно это значение необходимо учитывать как мешающий фактор при приеме сигнала ЦРВ, поскольку попытка увеличения MER (т.е. улучшения линейности передатчика), как правило, приводит к ухудшению его энергетических характеристик.

Собственные шумы приемника ЦРВ складываются из двух составляющих. Первая – это тепловой шум входных радиочастотных каскадов, значение которого будем считать равным тепловому шуму современных бытовых приемников. При увеличении уровня полезного сигнала его вклад в результирующее значение ОСШ уменьшается. Вторая составляющая – фазовый шум гетеродина приемника (при приеме сигналов с АМ он, в первом приближении, не имеет значения и сказывается только на параметрах многосигнальной избирательности у профессиональных приемников очень высокого класса). Фазовый шум гетеродина ограничивает максимальное значение ОСШ, которое может быть получено в приемнике ЦРВ независимо от отношения сигнал-шум на его входе и независимо от уровня входного сигнала. Как показали проведенные измерения (см. Главу 4), в

бытовых и полупрофессиональных приемниках значение ОСШ, ограниченное фазовыми шумами гетеродина, обычно не превышает величины 35...36 дБ.

Теперь рассмотрим помехи от радиостанций. Прежде всего, это помехи от станций, находящихся в том же частотном канале, что и принимаемый полезный сигнал, а также помехи от станций, находящихся в соседних каналах, спектр основного сигнала которых частично попадает в полосу частот принимаемого сигнала. Эти помехи необходимо учитывать пропорционально отношению их уровня к уровню полезного сигнала с некоторым коэффициентом пересчета, который будет определен далее.

К следующим помехам относятся помехи от передатчиков, работающих на частотах через канал и спектр основного сигнала которых не попадает в полосу частот принимаемого сигнала. Однако, продукты нелинейных искажений, возникающих в этих передатчиках, попадают в полосу частот принимаемого сигнала. В диапазонах НЧ и СЧ эти помехи можно не учитывать, поскольку их уровень в большей части зоны обслуживания будет существенно меньше уровня промышленных шумов. Проявляться такие помехи будут только в локальных областях вблизи мощных передатчиков. В диапазоне ВЧ такие помехи необходимо учитывать аналогично помехам в рабочем канале с соответствующими коэффициентами.

Далее необходимо решить задачу по определению требуемого для уверенного декодирования уровня полезного сигнала при одновременном воздействии промышленных шумов, собственных шумов радиоприемника, нелинейных искажений передатчика полезного сигнала и помех от других радиостанций.

Для решения поставленной задачи предлагается определить эквивалентную мощность помехи от мешающего воздействия каждого типа. Поскольку все перечисленные помехи в полосе полезного сигнала являются некоррелированными, их эквивалентные мощности можно складывать. Данную суммарную мощность помех можно рассматривать как эквивалентный уровень шума в канале распространения:

$$P_{\text{ш}_{\text{ЭКВ}}} = \Sigma (P_{\text{ш}1_{\text{ЭКВ}}} + P_{\text{ш}2_{\text{ЭКВ}}} + P_{\text{ш}3_{\text{ЭКВ}}} + \dots + P_{\text{ш}n_{\text{ЭКВ}}}).$$

Требуемый минимальный уровень полезного сигнала будет определяться эквивалентным уровнем шума в канале распространения и величиной отношения сигнал-шум, необходимой для декодирования в канале заданного типа (земная или пространственная волна).

Далее конкретизируются определения уровней источников помех, способ их вычисления и проводится вывод аналитического выражения для расчета требуемой напряженности поля полезного сигнала.

Эквивалентная мощность промышленных шумов в точке приема определяется исходя из используемой ширины полосы частот полезного сигнала.

Значение эквивалентной мощности шумов, обусловленных нелинейными искажениями передатчика, определяется исходя из нормируемого значения отношения сигнал-шум (ОСШ, MER) на выходе передатчика.

Эквивалентная мощность собственных шумов приемника зависит от отношения уровня полезного входного сигнала к уровню собственных тепловых шумов приемника, но обычно не может быть менее 35 дБ из-за вклада фазовых шумов гетеродина. Удобным для использования представляется выражение теплового шума приемника относительно напряженности поля, аналогично процедуре, описанной в [91]. При этом используется значение чувствительности приемника по полю с заданным отношением сигнал-шум. Например, для АМ приемника диапазона СЧ с чувствительностью 60 дБмкВ/м при отношении сигнал/шум на звуковой частоте 26 дБ при 30% модуляции (-10,5 дБ) внутренний шум приемника относительно напряженности поля составит: $E_{\text{ш}_{\text{пр}}} = 60 - (26 + 10,5) = 23,5$ дБмкВ/м. Для приемников ЦРВ, предполагая использование аналогичных радиотрактов и учитывая разницу в ширине полосы частот, в [91] предлагаются к использованию в анализе следующие значения внутреннего шума приемника: 30,5 дБмкВ/м для диапазона НЧ; 24,5 дБмкВ/м для диапазона СЧ; и 4,5 дБмкВ/м для диапазона ВЧ.

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, примеры которых для диапазонов НЧ и СЧ приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Коэффициенты пересчета для определения эквивалентной мощности помех от станций, расположенных в рабочем и соседних каналах

Полезный сигнал	Мешающий сигнал	Коэффициенты пересчета при расстройке по частоте $f_{\text{мешающий}} - f_{\text{полезный}}$, кГц	
		0	± 9
DRM A1, 9 кГц	АМ – Россия	-15,3+6,7=-8,6	-15,3+6,7-13,5=-22,1
DRM B1, 9 кГц	АМ – Россия	-15,9+7,3=-8,6	-15,9+7,3-9,5=-18,2
DRM A1, 10 кГц	АМ – Россия	-15,3+6,7=-8,6	-15,3+6,7-11,9=-20,5
DRM B1, 10 кГц	АМ – Россия	-15,9+7,3=-8,6	-15,9+7,3-10,8=-19,4
DRM A1, 9 кГц	DRM A1, 9 кГц	0	-38,3
DRM B1, 9 кГц	DRM B1, 9 кГц	0	-38,1
DRM A1, 10 кГц	DRM A1, 10 кГц	0	-12,1
DRM B1, 10 кГц	DRM B1, 10 кГц	0	-11,1

Запишем выражение для эквивалентной мощности шумов в общем виде:

$$P_{\text{ш экв}} = \frac{P_c}{10^{\text{SNRT}/10}} + \frac{P_c}{10^{\text{SNRR}/10}} + P_{\text{ш пр}} + P_{\text{ш пром}} + P_{\text{ш1 экв}} + P_{\text{ш2 экв}} + \dots + P_{\text{шп экв}},$$

где: $\frac{P_c}{10^{\text{SNRT}/10}}$ – эквивалентная мощность шумов, обусловленных

нелинейными искажениями передатчика;

P_c – мощность полезного сигнала в точке приема;

SNRT – значение ОСШ на выходе передатчика;

$\frac{P_c}{10^{\text{SNRR}/10}}$ – эквивалентная мощность шумов, обусловленных вкладом

фазовых шумов гетеродина приемника;

SNRR – максимальное значение собственного ОСШ приемника;

$P_{\text{ш пр}}$ – эквивалентная мощность тепловых шумов приемника, пересчитанная относительно напряженности поля;

$P_{ш\text{пром}}$ – мощность промышленных шумов;

$P_{ш1\text{экв}}, P_{ш2\text{экв}}, \dots, P_{шn\text{экв}}$ – эквивалентные мощности шумов, обусловленных помехами от станций.

Требуемая для декодирования мощность полезного сигнала ЦРВ:

$$P_c = 10^{OSШ_{дек}/10} * P_{ш\text{экв}},$$

где $OSШ_{дек}$ – 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:

$$P_c = 10^{OSШ_{дек}/10} * \left(\frac{P_c}{10^{SNRT/10}} + \frac{P_c}{10^{SNRR/10}} + P_{ш\text{пр}} + P_{ш\text{пром}} + P_{ш1\text{экв}} + P_{ш2\text{экв}} + \dots + P_{шn\text{экв}} \right)$$

откуда:

$$P_c = \frac{P_{ш\text{пр}} + P_{ш\text{пром}} + P_{ш1\text{экв}} + P_{ш2\text{экв}} + \dots + P_{шn\text{экв}}}{10^{-OSШ_{дек}/10} - (10^{-SNRT/10} + 10^{-SNRR/10})}$$

Поскольку уровень сигналов мешающих станций и уровень промышленных помех обычно выражается через напряженность поля в дБмкВ/м, мощность помех от i -того источника можно определить как:

$$P_i = U_i^2 / R,$$

где: $U_i = 10^{E_i * Hd / 20}$; R – условное единичное сопротивление нагрузки; Hd – условная единичная действующая высота приемной антенны; E_i – напряженность поля помехи от i -того источника. Таким образом,

$$P_i = 10^{E_i/10} / R, \text{ и, соответственно,}$$

$$P_c = \frac{(10^{E_{ш\text{пр}}/10} + 10^{E_{ш\text{пром}}/10} + 10^{E_{ш1\text{экв}}/10} + 10^{E_{ш2\text{экв}}/10} + \dots + 10^{E_{шn\text{экв}}/10}) / R}{10^{-OSШ_{дек}/10} - (10^{-SNRT/10} + 10^{-SNRR/10})}.$$

Требуемый уровень полезного сигнала также удобнее выразить в общепринятых единицах напряженности поля в дБмкВ/м:

$$E_c = 20 * \text{Log}(\sqrt{P_c * R} / Hd), \text{ или:}$$

$$E_c = 10 * \text{Log}(P_c * R)$$

откуда, подставляя требуемую мощность сигнала P_c , получим:

$$E_c = 10 * \lg \frac{(10^{E_{u_{np}}/10} + 10^{E_{u_{пром}}/10} + 10^{E_{u1_{экв}}/10} + 10^{E_{u2_{экв}}/10} + \dots + 10^{E_{u_{n_{экв}}}/10})}{10^{-OCШ_{дек}/10} - (10^{-SNRT/10} + 10^{-SNRR/10})},$$

или, в более наглядном виде:

$$E_c = OCШ_{дек} + 10 * \lg \frac{(10^{E_{u_{np}}/10} + 10^{E_{u_{пром}}/10} + 10^{E_{u1_{экв}}/10} + 10^{E_{u2_{экв}}/10} + \dots + 10^{E_{u_{n_{экв}}}/10})}{1 - (10^{-SNRT/10} + 10^{-SNRR/10}) / 10^{-OCШ_{дек}/10}}.$$

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 аналитическое выражение для расчета требуемой напряженности поля полезного сигнала опубликовано автором в [34] и 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).

Сводные результаты сравнения экспериментальных измерений с расчетными значениями приведены в таблице 5.3. Спектры сигналов на входе приемника, иллюстрирующие некоторые граничные ситуации при

одновременном воздействии двух помех в соседних каналах, приведены на рисунках 5.5, 5.6. Как видно из таблицы 5.3, эфирные испытания подтвердили теоретические расчеты с точностью $-0,7...+0,5$ дБ.

С использованием данной методики и программного модуля ITU «GRWAVE» разработана программа «DRM Trace» для определения требуемого уровня полезного сигнала в диапазонах НЧ и СЧ в произвольной помеховой обстановке. Интерфейс программы приведен на рисунке 5.7.

Таблица 5.3 – Результаты сравнения экспериментальных измерений защитных отношений с расчетными значениями

Полезный сигнал	Мешающие сигналы				Δ расчет / измерения, дБ
	Δ F1, кГц	Вид 1	Δ F2, кГц	Вид 2	
DRM, А, 9 кГц	-9	АМ	–	–	-0,6
DRM, А, 9 кГц	-9	АМ	0	АМ	-0,7
DRM, А, 9 кГц	-9	АМ	+9	АМ	-0,5
DRM, А, 9 кГц	-9	АМ	0	DRM, А, 9 кГц	+0,5
DRM, А, 9 кГц	-9	АМ	+9	DRM, В, 10 кГц	-0,3
DRM, А, 9 кГц	-9	АМ	+9	DRM, А, 9 кГц	-0,1

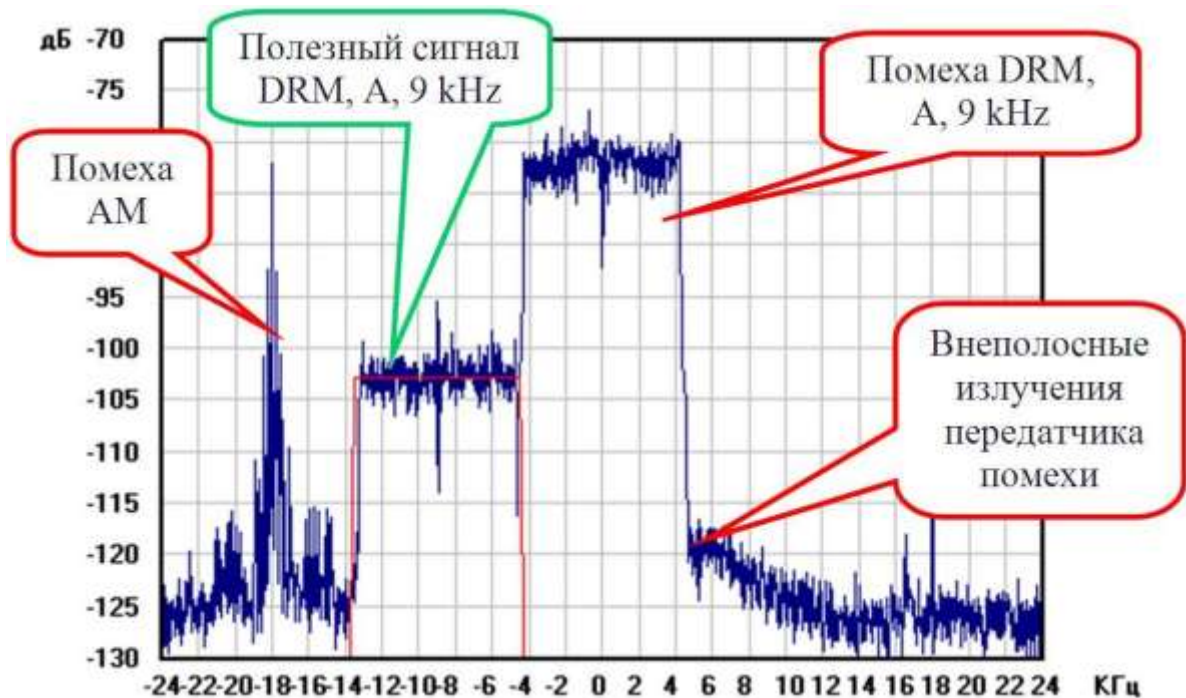


Рисунок 5.5 – Спектры сигналов на входе приемника при одновременном воздействии АМ и DRM помех в соседних каналах

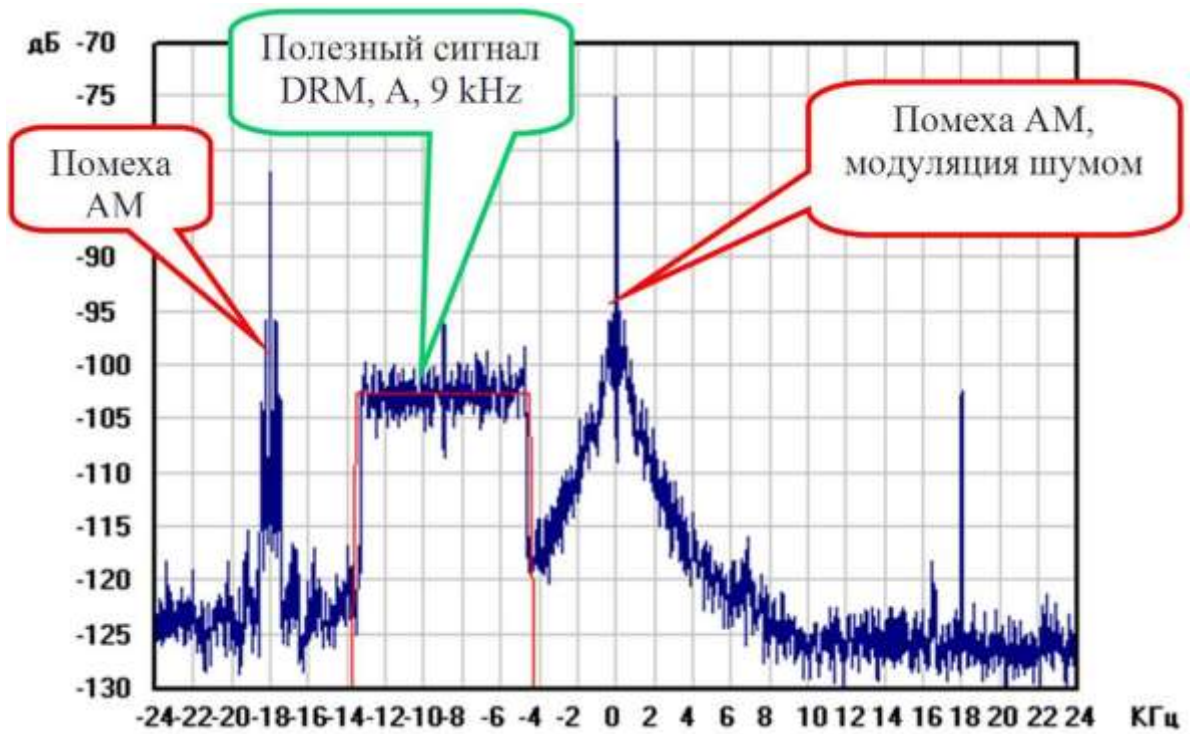


Рисунок 5.6 – Спектры сигналов на входе приемника при одновременном воздействии двух АМ помех в соседних каналах

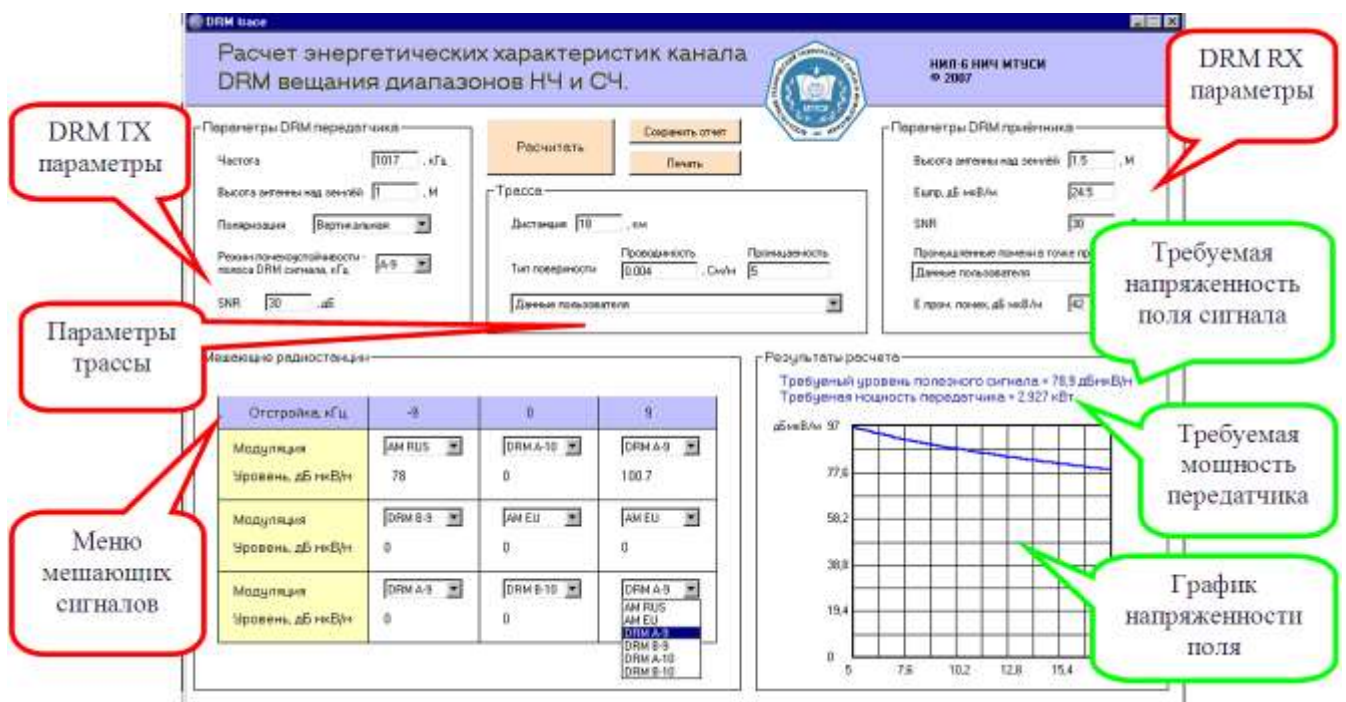


Рисунок 5.7 – Интерфейс программы «DRM Trase» для определения требуемого уровня полезного сигнала в диапазонах НЧ и СЧ в произвольной помеховой обстановке

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 МТУСИ 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) организовал опытную зону 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.

5.4 Исследование условий использования цифрового радиовещания стандарта DRM при работе в совмещенном режиме (Simulcast) с учетом параметров существующей бытовой радиоприемной аппаратуры

Работа в режиме Simulcast, т.е. одновременная передача аналогового АМ и цифрового DRM сигналов с помощью одного передатчика в общем виде предусматривается в стандарте DRM [123] как средство обеспечения совместимости на переходный период – до насыщения аудитории слушателей цифровыми приемниками. В данном параграфе проводится анализ различных вариантов режима Simulcast независимо от диапазона частот. Все рассмотренные примеры международного опыта относятся к диапазону СЧ.

5.4.1 Анализ международного опыта вещания в стандарте DRM в НЧ, СЧ диапазонах при работе в совмещенном режиме (Simulcast)

С целью обеспечения одновременного аналогового и цифрового вещания в стандартном (совмещенном) канале с общей шириной полосы частот 9/10 кГц в стандарте DRM [123] были предусмотрены варианты передачи DRM сигнала с

«половинной» полосой частот 4,5/5 кГц (рисунок 5.8). Для этого предполагалось использование низкоскоростного кодера аудиосигнала (CELP, 8 кбит/с).

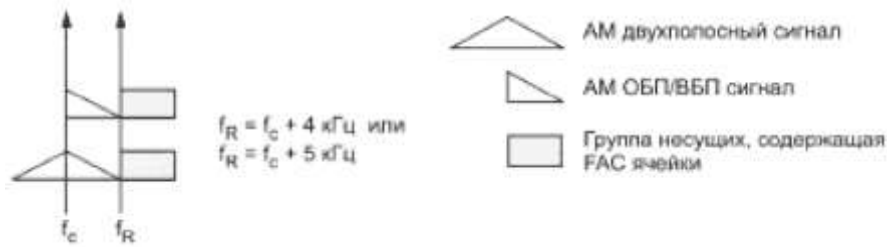


Рисунок 5.8 – Примеры расположения спектров сигналов AM и DRM с «половинной» полосой частот [49]

Однако качество принимаемых аудиосигналов, как в AM, так и в DRM, в таком режиме оказалось настолько низким, что после опытных трансляций все международные вещатели отказались от использования «половинных» полос частот. Очевидно, что для сети государственного вещания РФ такие режимы также неприменимы.

Предложенная фирмой Sony система передачи аналогового и цифрового сигналов в совмещенном канале [52] использует всю ширину полосы частот для передачи сигнала AM и «половинную» полосу для сигнала DRM (рисунок 5.9). При этом для корректной работы детектора AM приемника формируется комплементарный сигнал, компенсирующий шумы от сигнала DRM и не несущий в себе цифровой информации.

Теоретически, при уровне сигнала DRM на 18 дБ меньше, чем уровень сигнала AM, качество приема сигнала AM разработчиками этого метода оценивалось как достаточно хорошее. Однако из-за часто встречающейся асимметрии АЧХ полосовых фильтров приемников, а также из-за частотно-селективного фединга, был отмечен уровень шумов в AM приемниках выше допустимого. Качество сигнала DRM «половинной» полосы частот, такое же низкое, как и в предыдущем случае.

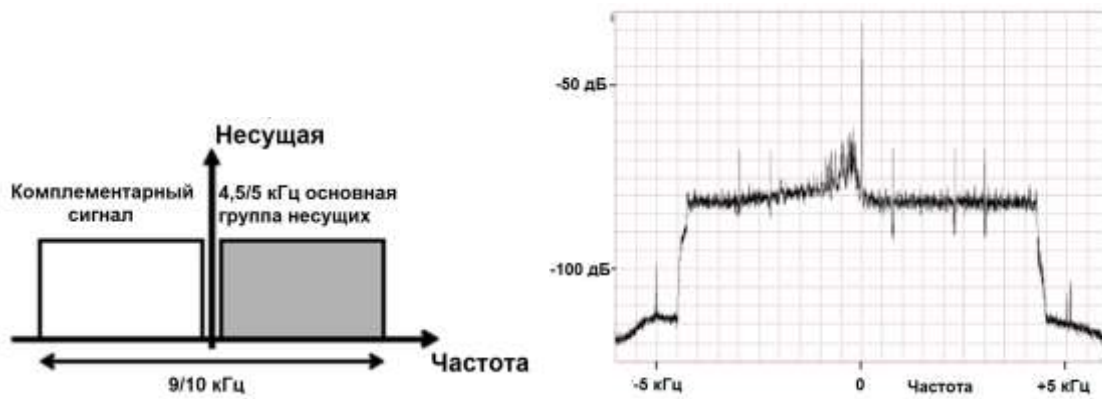


Рисунок 5.9 – Расположение спектров сигналов АМ, DRM и комплементарного сигнала при использовании совмещенного канала, и пример выходного спектра передатчика при уровне сигнала DRM на 18 дБ ниже сигнала АМ [52]

Более того, неточная настройка на частоту сигнала (а большинство парка старых аналоговых приемников не имеет цифровой настройки), эквивалентна асимметрии АЧХ полосовых фильтров приемников и также приводит к повышению уровня шумов в АМ приемниках выше допустимого. Рассмотренный режим работы использовался, в частности, при вещании программ радиостанции «Голос России» в диапазоне СЧ в Германии и не получил положительной оценки.

Таким образом, одновременное вещание аналогового и цифрового сигналов в стандартном (совмещенном) канале с общей шириной полосы частот 9/10 кГц не обеспечивает хорошего качества обоих сигналов, поэтому является неприемлемым для сети государственного вещания РФ и далее не рассматривается.

Кроме «половинных» полос частот стандарт DRM предусматривает режим Simulcast со «стандартными» (9/10 кГц) и «удвоенными» (18/20 кГц) полосами сигнала DRM (рисунок 5.10), при этом занимаемая комплексным сигналом полоса частот составляет 18/20 кГц и 27/30 кГц, соответственно.

Поскольку работающие в настоящее время на сети государственного вещания РФ передатчики имеют полосу модулирующих частот 10 кГц (занимаемая полоса частот 20 кГц), именно режимы с полосами частот 18/20 кГц и следует рассматривать в качестве предмета исследования. В дальнейшем, по

мере отказа от АМ, всю эту полосу частот можно будет использовать для передачи сигнала DRM с повышенным качеством и/или расширенным количеством сервисов.

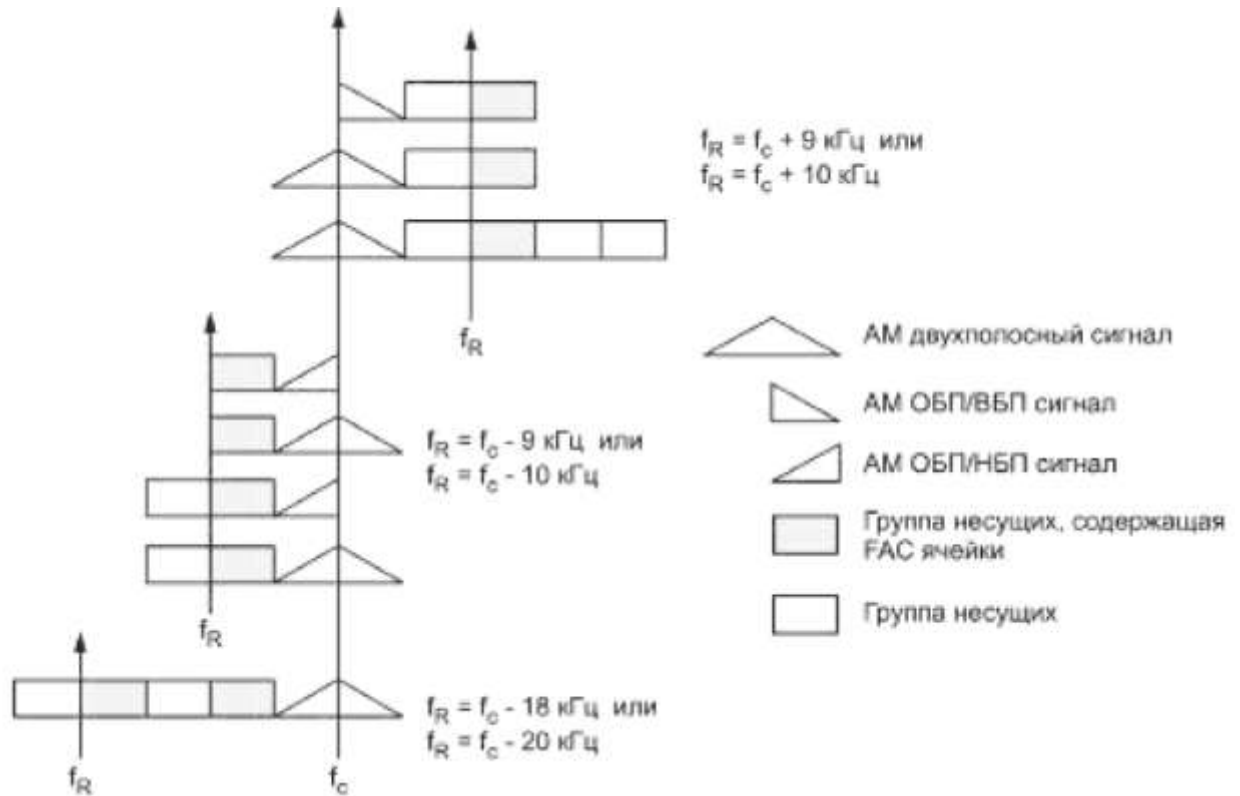


Рисунок 5.10 – Примеры расположения спектров сигналов АМ и DRM с произвольной полосой частот [49]

В данном режиме (как и в других режимах Simulcast) большую роль играет выбор соотношения мощностей аналогового и цифрового сигналов. С одной стороны, мощность сигнала DRM должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить требуемую зону обслуживания. С другой стороны, часть сигнала DRM может попадать в полосу пропускания полосового фильтра АМ приемника и ухудшать отношение сигнал-шум при приеме АМ, что требует снижения мощности сигнала DRM.

Проведенные в [139] исследования требуемых соотношений мощностей аналогового и цифрового сигналов показали, что они существенно зависят от «качества АМ приемников». Так, для «дешевых» приемников уровень сигнала

DRM должен быть ниже уровня несущей сигнала АМ на 16 дБ, а для приемников «хорошего качества» – на 6 дБ. Данные результаты упомянуты в [52], и на них также ссылаются в [131, 138, 140].

Экспериментальные исследования режима Simulcast были проведены в Мехико (2006 г. [140]), Дели (2007 г. [138]) и Мадриде (2008 г. [131]). К сожалению, все эти экспериментальные исследования (или опубликованные результаты), несмотря на огромный объем проведенных экспериментов, не позволяют ответить на вопросы системного характера по критериям использования мощности передатчиков, результирующих зон покрытия и качества принимаемых сигналов в обоих режимах.

Действительно, понятие «дешевого» приемника и приемника «хорошего качества» абсолютно не конкретизировано и различно для разных стран в соответствии с уровнем жизни населения. Между тем в опубликованных результатах эксперимента в Мадриде [131] фигурируют приемники «А, В, С, D, E и F», среди которых «high-end», «upper mid-range» и «mid-range», без указания полос пропускания тракта ПЧ и значений избирательности по соседнему каналу. Приведенные данные по качеству приема АМ сигнала при различных соотношениях мощностей АМ и DRM (см. таблицу 5.4) не позволяют сделать однозначных выводов.

Таблица 5.4 – Качество приема сигнала АМ в режиме Simulcast на различные приемники при различных отношениях мощностей аналогового и цифрового сигналов [131]

Отношение мощностей АМ/DRM, дБ	16	11,8	7,2	1,5
Приемник	качество приема, %	качество приема, %	качество приема, %	качество приема, %
A High-end)	100	100	60	100
B (High-end Mid-range)	100	50	0	0
C (Mid-range)	100	50	20	20
D (Mid-range)	100	50	0	0
E (Mid-range)	0	0	0	0
F (Mid-range)	20	0	0	0

Приведенный список приемников, использовавшихся в экспериментах в Дели [138] (Philips RL384, Sangean ATS818 CS, Sony ICF SW100, Proxy, Grundig, Kchibo) не позволяет сделать никаких выводов, поскольку модели трех последних приемников не указаны.

В экспериментах в Мехико [140] использовались приемники Sony ICF SW10, Sony CFDS400, Grundig MiniWorld PE и Panasonic RQ-CR07V. Однако результаты приведены только для Sony ICF SW10, а про остальные приемники сказано, что результаты для них «очень похожи», хотя они относятся к разным ценовым категориям.

Все проведенные эксперименты в общем случае подтверждают рекомендуемое в [131, 138-140] соотношение мощностей аналогового и цифрового сигналов в 16 дБ. При этом допускаются и другие значения, поскольку не у всех приемников будет достаточное качество приема АМ. В тоже время указывается, что качество приема АМ зависит не только от соотношения мощностей, но и от конкретных условий в точке приема.

Таким образом, анализ международного опыта по использованию режима Simulcast с полосой частот 18/20 кГц не дает однозначного ответа на величину требуемого соотношения мощностей аналогового и цифрового сигналов в данном режиме. Строгие исследования по формальным критериям будут проведены в следующем параграфе.

5.4.2 Исследование качественных показателей приема АМ в режиме Simulcast

Как отмечалось выше, в проведенных международных исследованиях отсутствуют объективные критерии качества приема сигнала АМ при различных отношениях мощности в режиме Simulcast. Для более корректного решения данной задачи необходимо проведение не субъективных, а инструментальных измерений по формальным критериям качества (отношению сигнал-шум и его зависимости от отношения мощностей аналоговой и цифровой компоненты в

режиме Simulcast). При этом надо понимать, что учесть параметры всего парка АМ приемников, находящегося у населения РФ, не представляется возможным. Для формализации задачи целесообразно использовать разделение приемников по электрическим и электроакустическим параметрам на три группы сложности: высшую (0), первую (1) и вторую (2) в соответствии с [45], или различных классов в соответствии с более старыми ГОСТ-ами СССР.

Такой подход позволяет четко определить: приемники с какими параметрами будут обеспечивать заданное качество приема АМ компоненты в режиме Simulcast, а с какими нет, и выбрать требуемое отношение мощностей с учетом зон покрытия в обоих режимах.

Для решения данной задачи в работе были проведены необходимые исследования и измерения, подробно описанные в Приложении В. Полученные результаты могут быть использованы при определении качественных показателей режима Simulcast во всех диапазонах частот.

Основные выводы из проведенных исследований заключаются в следующем:

1. Зависимость отношения сигнал-шум на выходе приёмника от соотношения уровней аналоговой и цифровой составляющих сигнала Simulcast является линейной и обусловлена прямым прохождением части сигнала DRM в тракт АМ радиоприёмника.
2. Прослеживается зависимость уровня помехи, вызванной прямым прохождением сигнала DRM, от класса применяемой приёмной аппаратуры.

Наихудшим случаем для приёма АМ составляющей сигнала Simulcast оказывается использование аппаратуры высшего и первого класса вследствие широкой полосы пропускания фильтра ПЧ.

Наилучшие результаты приёма сигнала Simulcast получаются при использовании аппаратуры второго класса. В этом случае минимальные требования на отношение сигнал-шум при уровне DRM составляющей минус 10 дБ обеспечиваются для всех рассмотренных значений полосы цифрового сигнала. Радиоприёмники третьего класса показывают существенно худшие

результаты. При этом в отличие от аппаратуры высшего класса, основной причиной прохождения сигнала помехи оказывается недостаточная избирательность по соседнему каналу.

3. Результаты для DRM составляющих с полосами 9 и 10 кГц оказываются сопоставимыми, с некоторым преимуществом девяти-килогерцового варианта цифрового радиосигнала, обеспечивающего небольшой защитный интервал между спектрами. В тоже время, использование цифрового сигнала с узкой полосой 4,5 кГц, приводит к существенному росту уровня помехи. Данный эффект связан с тем, что энергия сигнала DRM оказывается сосредоточена ближе к верхней границе спектра АМ составляющей. Таким образом, варианты сигнала Simulcast с примыкающим к АМ сигналу узкополосным цифровым сигналом, не могут быть рекомендованы для практического использования, тем более с учетом того, что качество звука в узкополосных DRM каналах неудовлетворительно.

Анализ практической применимости полученных результатов ввиду отсутствия информации о распределении парка используемых радиоприёмных устройств может носить только оценочный характер. При этом можно руководствоваться следующими соображениями.

Радиоприёмники высшего класса выпускались весьма ограниченным тиражом. Кроме того, в течение последних пятнадцати лет аппаратура высшего класса, как, впрочем, и всех других классов, в России массово не производится. В современных импортных приёмниках АМ диапазон является вспомогательным, рассчитанным на использование вне зоны действия ЧМ радиостанций. Соответственно, приоритетным при проектировании АМ тракта является не наилучшее качество звука, обеспечиваемое широкой полосой пропускания, а максимальная помехоустойчивость, требующая ограничения полосы пропускания по критерию максимальной разборчивости речевого сигнала. Появление современной аппаратуры, соответствующей по избирательности третьему классу сложности, также маловероятно. Это связано с тем, что пьезокерамический фильтр промежуточной частоты является самым дешёвым и универсальным решением, независимо от конечной цены радиоприёмного устройства. Типовая

избирательность современных фильтров составляет 40 дБ при отстройке 9 кГц, независимо от их полосы пропускания. Таким образом, можно принять, что наиболее массовый радиоприёмный тракт аппаратуры, импортированной в последнее десятилетие, по избирательности соответствует первому классу сложности, а по полосе пропускания близок ко второму классу по отечественной классификации.

В результате можно сделать вывод о возможности одновременной передачи цифрового и аналогового сигнала с относительными уровнями, обеспечивающими примерное равенство зон покрытия, ценой незначительного ухудшения качества приёма аналогового сигнала.

5.5 Разработка рекомендаций по соотношению мощностей аналогового и цифрового сигналов на переходный период

В данном параграфе проводится разработка рекомендаций по соотношению мощностей аналогового и цифрового сигналов при сохранении качества приема аналогового сигнала на переходный период для двух сценариев – замещение аналогового сигнала цифровым и использование различных вариантов одновременной передачи аналогового и цифрового сигналов с помощью одного передатчика (Simulcast), рассмотренных автором в [171].

5.5.1 Соотношение мощностей при замещении аналогового сигнала цифровым

В [91] определены величины защитных отношений для случая полезного сигнала, соответствующего АМ станции, и соканального мешающего сигнала DRM как:

- 6,0...6,6 дБ +S/I, где S/I = 17 дБ для диапазона ВЧ;
- 6,0...6,6 дБ +S/I, где S/I = 30 дБ для диапазонов НЧ и СЧ.

Эти соотношения легли в основу определения мощности DRM станции при сценарии замещения аналогового сигнала цифровым. В этом случае мощность DRM передатчика устанавливается на 7 дБ меньше мощности заменяемого АМ передатчика, и вся проведенная ранее координация частот остается в силе [120].

5.5.2. Энергетические характеристики и зоны покрытия в режиме Simulcast

Для определения зон покрытия необходимо знать конкретные величины мощностей DRM и АМ сигналов. Следует отметить, что одновременная передача АМ и DRM сигналов с использованием одного передатчика должна осуществляться строго в пределах линейного участка его амплитудной характеристики во избежание появления нелинейных искажений и нарушения требований ЭМС. С учетом величины пик-фактора DRM сигнала (10 дБ) и допустимой глубины модуляции АМ сигнала (100%) в настоящей работе были произведены вычисления получаемых значений мощностей АМ и DRM при заданном их соотношении и при условии полного использования передатчика по мощности и отсутствии нелинейных искажений. Результаты расчетов приведены на рисунке 5.11.

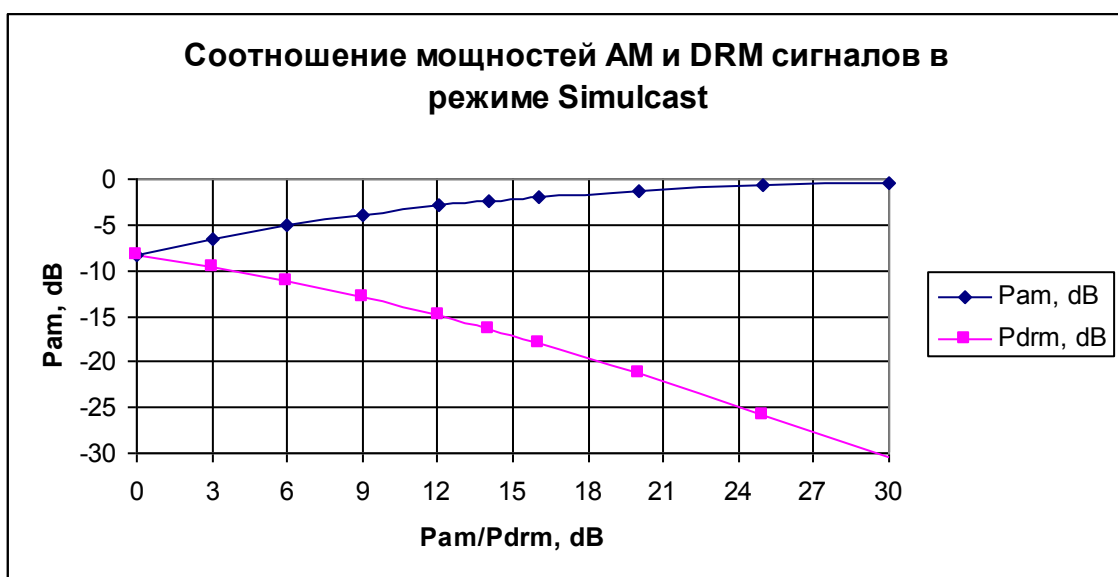


Рисунок 5.11 – Соотношение мощностей АМ и DRM сигналов в режиме Simulcast.

«0 дБ» – номинальная мощность передатчика

Приведенные на рисунке графики позволяют определить конкретные величины мощностей АМ и DRM сигналов при известной номинальной мощности передатчика, что позволяет произвести расчет зон обслуживания.

Проведем расчеты зон покрытия (в качестве примера на частоте 200 кГц (середина диапазона НЧ), для передатчика мощностью 100 кВт в режиме АМ, проводимость почвы 0,0017, проницаемость 13) для различных отношений мощности аналогового и цифрового сигналов с учетом полученных выше энергетических соотношений. В качестве границы зоны обслуживания для АМ принимается стандартная напряженность поля 73 дБмкВ/м. Для DRM, поскольку точные критерии зависят от уровня шумов в зоне обслуживания (см. Главу 6), в качестве примеров, расчет проводится для двух значений напряженности поля – 66 дБмкВ/м и 60 дБмкВ/м. Результаты расчетов представлены на рисунке 5.12.

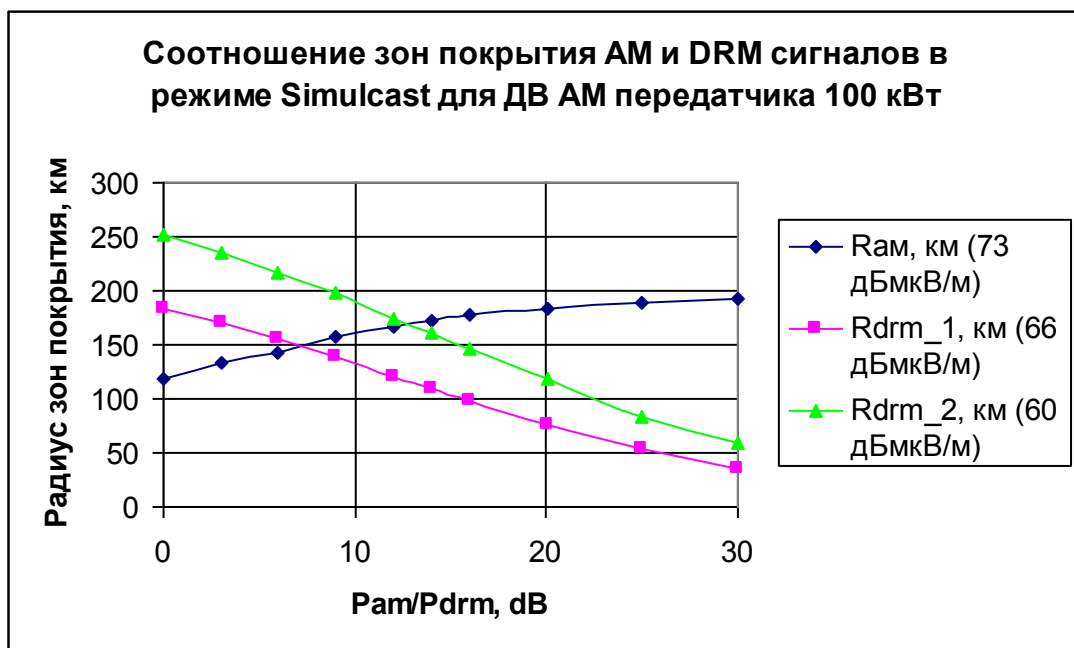


Рисунок 5.12 – Радиус зон покрытия при различных отношениях мощности АМ и DRM сигналов в диапазоне НЧ в режиме Simulcast

Как видно из рисунка 5.12, равенство зон обслуживания достигается при соотношении мощностей 7...12 дБ, в среднем около 10 дБ. При этом зона обслуживания передатчика АМ с заданным отношением сигнал-шум уменьшится

со 190 до 160 км, а на расстоянии 190 км отношение сигнал-шум уменьшится всего на 3,6 дБ. Зона обслуживания DRM передатчика составит не менее 160 км.

Аналогичные расчеты зон покрытия проведены для диапазона СЧ (в качестве примера на частоте 800 кГц, для передатчика мощностью 50 кВт в режиме АМ, проводимость почвы 0,0017, проницаемость 13) для различных отношений мощности аналогового и цифрового сигналов с учетом полученных выше энергетических соотношений. В качестве границы зоны обслуживания для АМ принимается стандартная напряженность поля 63 дБмкВ/м. Для DRM, поскольку точные критерии зависят от уровня шумов в зоне обслуживания (см. Главу 6), в качестве примеров, расчет проводится для двух значений напряженности поля – 56 дБмкВ/м и 50 дБмкВ/м. Результаты расчетов представлены на рисунке 5.13.

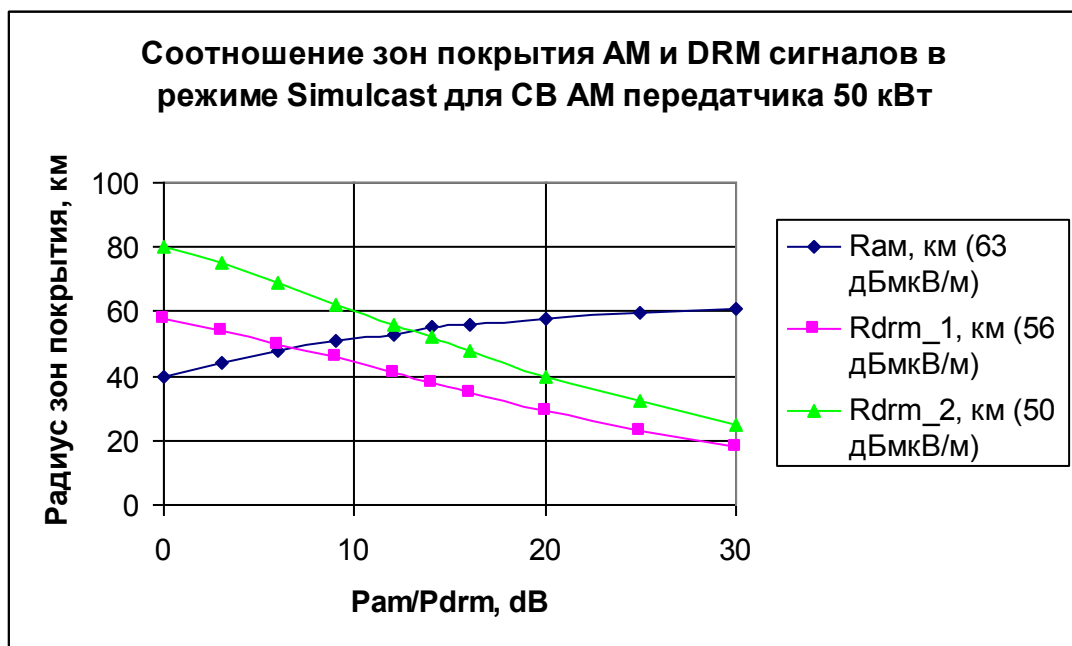


Рисунок 5.13 – Радиус зон покрытия при различных отношениях мощности АМ и DRM сигналов в диапазоне СЧ в режиме Simulcast

Как видно из рисунка 5.13, равенство зон обслуживания достигается при соотношении мощностей 6...12 дБ, в среднем около 9 дБ. При этом зона обслуживания передатчика АМ с заданным отношением сигнал-шум уменьшится

с 62 до 51 км, а на расстоянии 62 км отношение сигнал-шум уменьшится всего на 4 дБ. Зона обслуживания DRM передатчика составит не менее 51 км.

Таким образом, учитывая, что прием сигналов АМ в условиях импульсных индустриальных и атмосферных помех становится «некомфортным», но продолжается, а прием сигналов DRM прерывается на 1...2 секунды, целесообразно повышать (по сравнению с данными [120], составляющими величину -16 дБ) мощность DRM компоненты в сигнале Simulcast для сохранения равенства зон обслуживания.

5.6 Выводы

1. Разработана и создана лабораторная измерительная установка для исследования величин защитных отношений, содержащая программный имитатор каналов распространения.

2. 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 следующее:

- 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-АМ-Россия при расстройке 10 кГц существенно (на 18 дБ) больше, чем для случая DRM-АМ-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 случая однолучевого канала распространения. При многолучевом

распространении величины защитных отношений должны уточняться в соответствии с характеристиками канала.

3. Проведен анализ защитных отношений для сигнала ЦРВ при одновременном воздействии произвольного количества мешающих сигналов:

- Определен круг возможных помех в канале распространения, подлежащих учету при рассмотрении совместного воздействия нескольких мешающих сигналов на качество приема сигнала ЦРВ;
- Вычислены коэффициенты пересчета напряженности поля мешающих сигналов различного типа при различной расстройке по частоте;
- Выведено аналитическое выражение для расчета требуемой напряженности поля полезного сигнала, которая определяется необходимым для декодирования ОСШ уровнями комплекса учитываемых радиочастотных помех, искажениями передатчика и фазовыми шумами приемника;
- 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;
- Разработана программа «DRM Trase» для определения требуемого уровня полезного сигнала в диапазонах НЧ и СЧ в произвольной помеховой обстановке.

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

5. Разработаны рекомендации по соотношению мощностей аналогового и цифрового сигналов при сохранении качества приема аналогового сигнала на переходный период:

– при замещении аналогового сигнала цифровым мощность DRM передатчика устанавливается на 7 дБ меньше мощности заменяемого АМ передатчика;

– определены энергетические характеристики и зоны покрытия в режиме Simulcast;

– показано, что равенство зон обслуживания достигается при соотношении мощностей АМ и DRM сигналов от 7 до 12 дБ, в среднем около 10 дБ;

6. Рассмотрены качественные показатели приема АМ в режиме Simulcast.

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

6 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ ОСНОВ МЕТОДИКИ ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ РАДИОВЕЩАНИЯ DRM ДИАПАЗОНОВ НЧ И СЧ

6.1 Введение

В настоящее время данные ряда экспериментальных исследований цифрового радиовещания в диапазонах длинных и средних волн, приводимые в зарубежных публикациях, не соответствуют результатам расчетов зон обслуживания по существующим методикам. Естественно, что переход на цифровое вещание никоим образом не затрагивает физические процессы, происходящие при распространении радиоволн, и не отменяет существующих методов расчета напряженности поля. Особенностью цифрового радиовещания в диапазонах длинных и средних волн, как и любых других цифровых систем, является резко выраженный пороговый характер приема. При уменьшении отношения сигнал-шум, либо сигнал-помеха (от другой станции) всего на 1 дБ ниже требуемого для декодирования порога прием практически прекращается (рисунок 6.1).

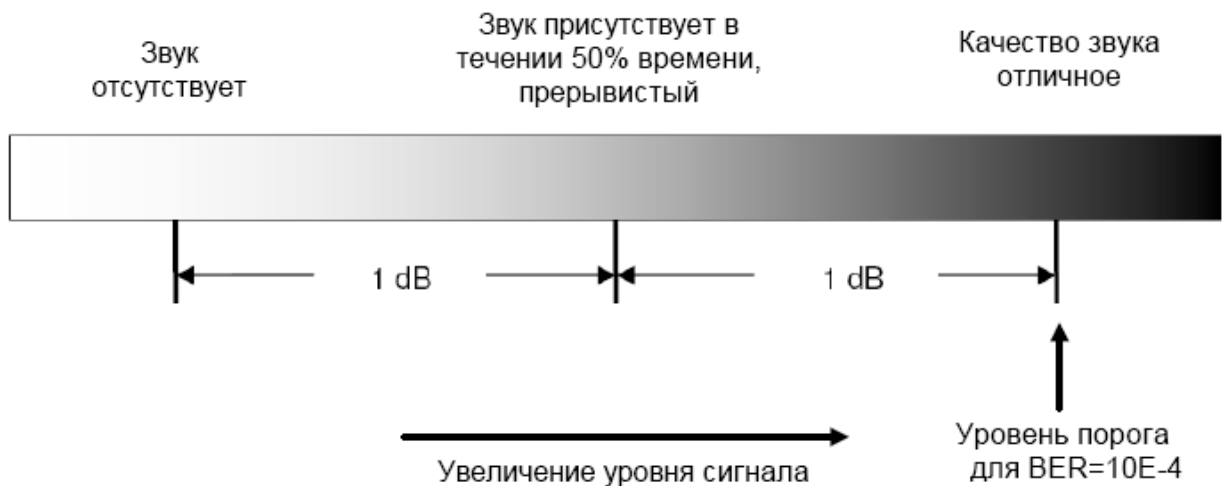


Рисунок 6.1 – Иллюстрация порогового характера приема DRM [118]

Обеспечить 100% декодирование звука в цифровой системе в течение 100% времени невозможно ни при каких, сколь угодно больших, мощностях

передатчиков. Действительно, разряд молнии в непосредственной близости от приемника при вещании с АМ будет слышен как щелчок или треск, а в цифровой системе может привести к кратковременному пропаданию звука.

На основании многочисленных оценок вещателей и слушателей системы ЦРВ стандарта DRM выведен эмпирический «критерий качества», соответствующий нормальному декодированию сигнала в течение не менее 98% времени [131]. При этом возникающие время от времени пропадания звука не раздражают слушателя. Использование данного «критерия качества» совместно с учетом статистических свойств распространения радиоволн и статистики распределения шумов и помех позволяет осуществлять расчеты ЭМС РЭС цифрового радиовещания стандарта DRM с высокой достоверностью. Ряд НИР, связанных с экспериментальными (эфирными) исследованиями системы DRM в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ, выполненных МТУСИ под руководством автора, подтвердили данную возможность.

Если же ориентироваться на часовые медианные значения напряженности поля полезного сигнала и часовые средние значения напряженности поля помех, а тем более принимать в качестве напряженности поля полезного сигнала «минимально используемую напряженность поля в системе DRM» (по зарубежным рекомендациям), то прием будет возможен только в отдельные промежутки времени в местах «с особо низким уровнем помех». Все остальное время будет отмечаться несоответствие данных экспериментальных исследований цифрового радиовещания результатам расчета напряженности поля по существующим методикам.

Таким образом, вследствие порогового характера приема система цифрового радиовещания требует очень качественного планирования.

Кроме того, стандарт DRM предусматривает достаточно большое количество комбинаций видов модуляции и степеней помехозащищенности, в результате чего требуемое для декодирования отношение сигнал-шум может изменяться до 10 дБ – естественно, с разменом на качество декодированного аудиосигнала.

В соответствии с вышесказанным, в данной главе работы проводится разработка технических основ методики частотно-территориального планирования сетей радиовещания DRM диапазонов НЧ и СЧ с учетом результатов проведенных экспериментальных исследований и существующих материалов МСЭ-Р.

6.2 Анализ и систематизация имеющихся публикаций и международного опыта по теме работы

Спецификация стандарта DRM с базовыми параметрами, которые необходимо учитывать при планировании, приведена в [123]. В [159] приводятся дополнительные данные, касающиеся требуемых для декодирования ОСШ и защитных отношений для различных комбинаций параметров системы и помех.

В период с 2005 по 2008 годы специалистами МТУСИ под руководством автора по заказу ФГУП «РТРС», ГРЦЧ и ФАПМК был проведен ряд научно-исследовательских работ, включающих теоретические и экспериментальные исследования по оценке качества приема сигнала DRM в диапазонах СЧ и ВЧ в различной помеховой обстановке:

1. НИР «Проведение экспериментального цифрового звукового радиовещания стандарта DRM с целью исследования прохождения сигнала на однокачковой трассе с использованием типового передатчика и уточнения величин защитных отношений, требуемых для защиты цифровых станций ВЧ радиовещательной службы (в соответствии с Резолюцией 543 ВКР-2003 «Временные величины защитных отношений по РЧ для излучений, модулированных аналоговым и цифровым сигналами в ВЧ радиовещательной службе)», шифр «Луч-2», договор между ОАО «НТЦ-РС» и ФГУП «РТРС» № 011005НТЦ от 01.10.05, соисполнитель МТУСИ.

2. НИР «Проведение экспериментального цифрового звукового радиовещания в СЧ диапазоне с целью уточнения защитных отношений при совместной работе с аналоговыми сетями на переходный период в соответствии с

решением ГКРЧ № 06-13-03-001 от 24.04.06», шифр «Волна-СЧ», договор между ОАО «НТЦ-РС» и ФГУП «РТРС» № 020906/НТЦ/ДТР-177-06 от 02.09.06, соисполнитель МТУСИ.

3. НИР «Организация экспериментального цифрового радиовещания в ВЧ диапазоне в целях уточнения защитных отношений при совместной работе с аналоговыми сетями», Государственный контракт между ОАО «НТЦ-РС» и Федеральным агентством по печати и массовым коммуникациям №19/62-07 от 10 декабря 2007 г., соисполнитель МТУСИ, шифр «Волна-ВЧ».

4. НИР «Исследование цифрового радиовещания (DRM) в ВЧ диапазоне с антеннами зенитного излучения, определение зон покрытия, защитных отношений сигналов с аналоговыми передатчиками и выработка практических рекомендаций для внедрения на территории России в филиалах «РТРС»», Государственный контракт между ЗАО «Радиокомпания-Мегаком» и Федеральным агентством по печати и массовым коммуникациям № 19/43-08 от 14 ноября 2008 г., соисполнитель МТУСИ, шифр «Зона-АЗИ» [12, 13].

Проведенные работы подтвердили величины защитных отношений, приводившиеся в [159], и расширили их перечень для случая помех сигналу ЦРВ от передатчиков с амплитудной модуляцией с полосой модулирующих частот 10 кГц, соответствующих стандартам РФ [48]. Впервые в мировой практике разработана методика расчета защитных отношений для сигнала ЦРВ при произвольном количестве одновременно действующих помех (Глава 5 настоящей работы).

На основании проведенных работ приняты решение ГКРЧ № 09-01-05 от 20.01.2009 (о возможности использования полос радиочастот 526,5-1606,5 кГц, 3,95-4,0 МГц, 5,9-6,2 МГц, 7,1-7,45 МГц, 9,4-9,9 МГц, 11,6-12,1 МГц, 13,57-13,87 МГц, 15,1-15,8 МГц, 17,78-17,9 МГц, 18,9-19,02 МГц, 21,45-21,85 МГц и 25,67-26,1 МГц), и решение ГКРЧ №12-14-06 от 16.03.2012 (о выделении полосы частот 148,5-283,5 кГц) для создания на территории Российской Федерации сетей цифрового звукового радиовещания стандарта DRM.

6.2.1 Анализ международных документов (Резолюций, Рекомендаций), относящихся к цифровому радиовещанию

Кроме упоминавшейся выше Рекомендации МСЭ BS.1615 («Параметры планирования») для цифрового звукового радиовещания на частотах ниже 30 МГц [159], при планировании сетей ЦЗРВ в диапазонах НЧ и СЧ необходимо принимать во внимание рекомендацию Р.1321-3 (Факторы распространения, влияющие на системы, использующие технику цифровой модуляции на НЧ и СЧ) [161].

Также необходимо использовать и традиционно применяющиеся в планировании радиовещания с АМ рекомендации МСЭ:

Рек. Р.368-9. Кривые распространения земных волн для частот 10 кГц...30 МГц [164];

Рек. Р.372-11. Радишумы [162];

Рек. Р. 1147-4. Прогнозирование силы поля пространственных волн на частотах между около 150 и 1700 кГц [163];

Рек. Р.527-3. Электрические характеристики поверхности Земли [93].

Более подробное рассмотрение этих документов и методика их использования применительно к планированию сетей ЦЗРВ будет проводиться ниже в соответствующих параграфах.

6.2.2 Анализ результатов экспериментальных исследований вещания в стандарте DRM в НЧ, СЧ диапазонах

Аналоговое радиовещание с амплитудной модуляцией в диапазоне НЧ активно использовалось в странах 1 региона ИТУ (Африка, Европа и территория бывшего СССР). Для покрытия больших территорий в сельской местности диапазон НЧ является уникальным природным ресурсом.

Регулярное вещание в стандарте DRM в диапазоне НЧ осуществлялось с 2005 по 2012 год на частоте 177 кГц (Германия, Oranienburg, передатчик 150 кВт).

Проведенный анализ отзывов о приеме его сигналов, размещенных на сайте www.drmrx.org/forum, показывает, что DRM сигнал уверенно (с вероятностью декодирования до 100%) принимается не только в Германии на расстояниях до 440 км, но и в Швейцарии (708 км), Швеции (806 км) и Франции (Париж, 887 км).

Более того, даже в Московской области РФ (17 км от МКАД, в сельской местности с низким уровнем промышленных помех) автором осуществлялся прием сигналов DRM этого передатчика в диапазоне НЧ с декодированием до 95% звука в течение всего сеанса передачи (см. рисунки 6.2, 6.3). При расстоянии до передатчика 1630 км, измеренная напряженность поля составляла 57...58 дБмкВ/м, что соответствует расчетным значениям (см. рисунок 6.4). Прием осуществлялся без применения длинных проволочных антенн, на ферритовую антенну, спроектированную и изготовленную в соответствии с рекомендациями Главы 4 настоящей работы.

Радио Дании (Danmarks Radio) осуществляло в 2008 – 2009 годах вещание в стандарте DRM на частоте 243 kHz из города Kalundborg с мощностью передатчика 35 Вт (200 Вт с 2009 года). Присутствие сигнала (прием служебных каналов и опознавание наименования станции) без декодирования звука отмечалось на расстоянии 163 км (www.drmrx.org/forum). Опытные сеансы вещания проводились также в 2008 г. на частоте 153 кГц с мощностью передатчика 240 кВт (Донебах, Германия).

Результаты экспериментального вещания, проводившегося в РФ, будут подробно описаны далее в параграфе 6.4 настоящей работы.

Регулярное вещание в стандарте DRM в диапазоне СЧ на протяжении последних 10 лет было представлено более широко. В этот период вещание осуществлялось девятью станциями на частотах: 693 кГц (Италия); 855 кГц и 909 кГц (Германия); 999 кГц (Франция); 1296 кГц (Англия); 1359 кГц (Испания); 1485 кГц и 1593 кГц (Германия); 1611 кГц (Италия) с мощностями от 0,1 кВт до 100 кВт. Ознакомиться с большим количеством отзывов о приеме сигналов этих станций можно на сайте www.drmrx.org/forum.

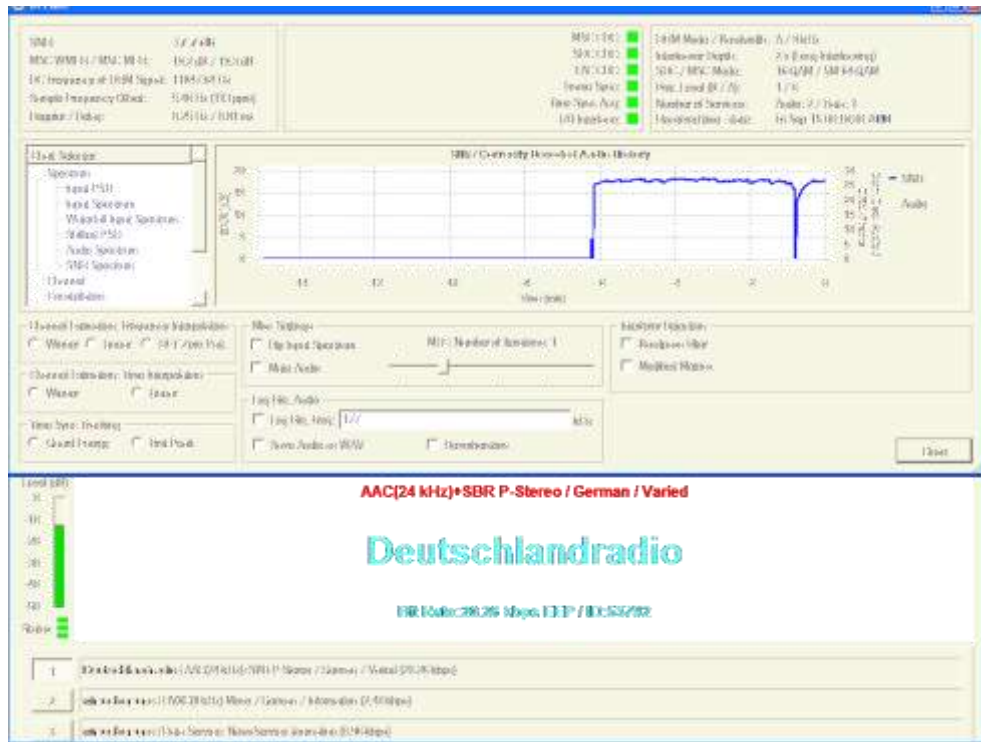


Рисунок 6.2 – Результаты приема DRM передатчика (частота 177 кГц) на расстоянии 1630 км

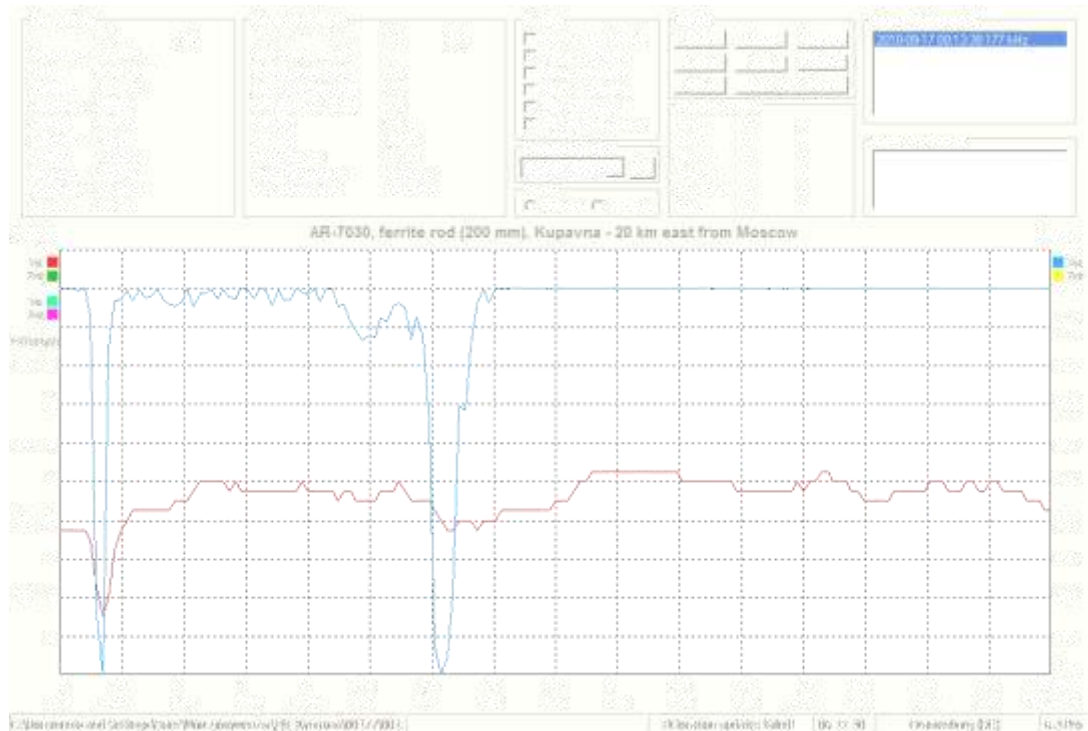


Рисунок 6.3 – Результаты приема DRM передатчика (частота 177 кГц) на расстоянии 1630 км

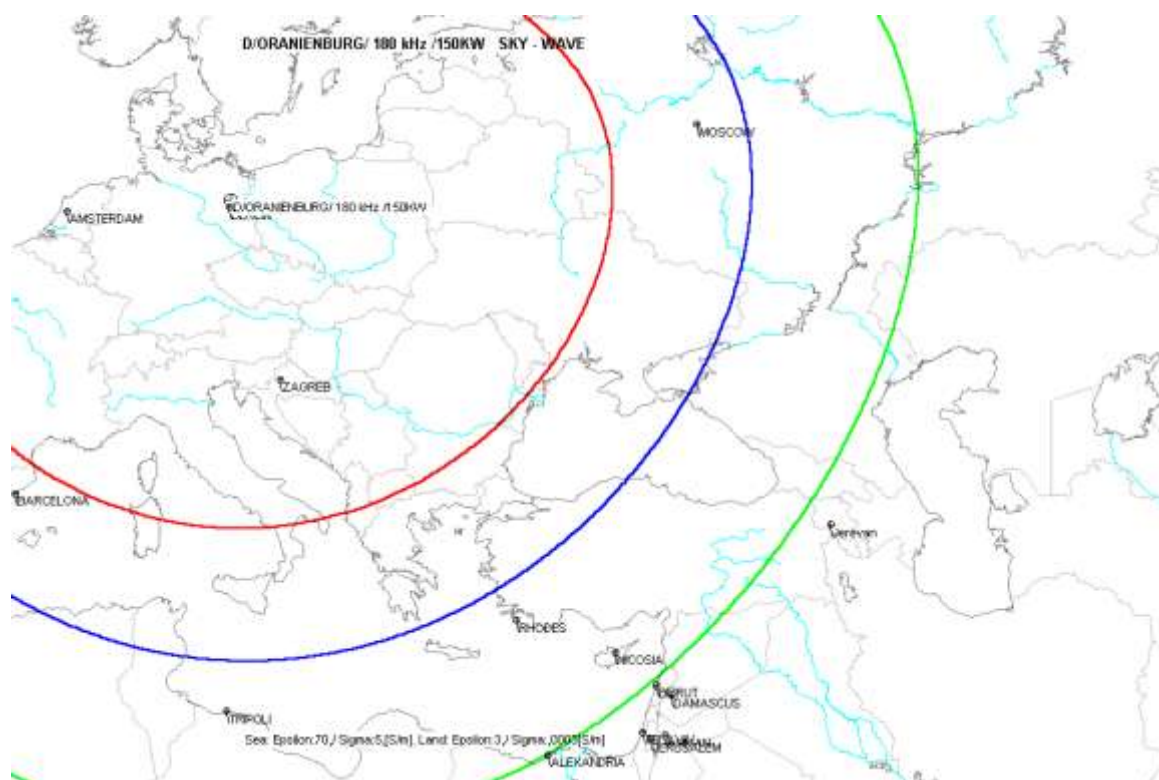


Рисунок 6.4 – Расчет напряженности поля на частоте 180 кГц, ночное время, передатчик мощностью 150 кВт, г. Ораниенбург (Германия). Зеленая кривая соответствует напряженности поля 50 дБмкВ/м, синяя – 55 дБмкВ/м, Красная – 60 дБмкВ/м

Кроме того, в различных странах проводились экспериментальные исследования в этом диапазоне. Так, проведенные в 2004 году тесты в Испании (МСЭ-Р, Док. 6E/175, 2005 г., Испания) с передатчиком мощностью 4 кВт в дневное время показали, что в сельской местности в радиусе 100 км обеспечивается декодирование сигнала DRM в течение не менее 98% времени в 83...100% точек измерений в зависимости от режима помехоустойчивости. В городских условиях (Мадрид) определяющим фактором являлся уровень промышленных радиопомех, который необходимо измерять и учитывать для правильного планирования. Также подчеркивается необходимость правильного определения кажущейся проводимости почвы, которое может быть выполнено посредством тестовых измерений напряженности поля в предполагаемых зонах обслуживания. В целом подтверждены необходимые для декодирования

величины ОСШ. Определен критерий комфортного прослушивания, равный не менее 98% декодированных аудио блоков.

Проведенные в 2004 году тесты в Мексике [140] (МСЭ-Р, Док. 6E/403, 2006 г., Мексика) с передатчиком мощностью 1,25 кВт показали, что для «нормального» приема без прерывания звука требуется ОСШ более 17 дБ. Измеренные уровни промышленных радиопомех в Мехико на 40 дБ превышали данные МСЭ.

Проведенные в 2007 году тесты в Италии (МСЭ-Р, Док. 6/353, 2007 г., Италия) показали, что в ряде населенных пунктов наблюдается больший уровень промышленных радиопомех, чем по данным МСЭ. Для планирования предлагается использовать значения напряженности поля, равные 45 дБмкВ/м для поселений с числом жителей менее 1000 человек, и 53 дБмкВ/м для поселений с числом жителей более 1000 человек.

Результаты исследований, проведенных в РФ, будут рассмотрены более подробно ниже в данной главе.

6.3 Параметры и критерии, используемые при расчете ЭМС РЭС цифрового радиовещания стандарта DRM

Как отмечалось выше, сети цифрового радиовещания DRM диапазонов НЧ и СЧ, как и другие цифровые системы, отличаются от аналоговых пороговым характером приема. Данная особенность требует тщательного планирования для обеспечения устойчивости работы сети. На основании многочисленных оценок вещателей и слушателей зарубежными исследователями определен критерий комфортного прослушивания, равный не менее 98% декодированных аудио блоков. Данный критерий необходимо использовать совместно со статистическими свойствами распространения радиоволн и распределения шумов и помех.

Требуемые для декодирования значения ОСШ при различных параметрах сигнала DRM и для различных условий распространения определены в [159]:

– для модели канала распространения №1, соответствующего земной волне в дневное время в диапазонах НЧ и СЧ – таблица 1.5;

– для модели канала распространения №2, соответствующего комбинации земной и ионосферной волн в диапазоне СЧ в темное время суток – таблица 1.6.

Напряженность поля полезного сигнала рассчитывается любыми традиционными методами [163, 164], но с учетом критерия комфортного прослушивания, равного не менее 98% декодированных аудио блоков, а именно:

– для земной волны необходимо учитывать сезонные и территориальные вариации напряженности поля [161];

– для ионосферной волны необходимо учитывать запас на изменения ото дня ко дню и кратковременные изменения уровней напряженности поля [163], а также коэффициент потерь, учитывающий влияние солнечной активности [163].

Напряженность поля атмосферных шумов необходимо учитывать по уровню, превышаемому в течение 2% времени в час.

Уровень промышленных помех в крупных городах следует принимать равным 70 дБмкВ/м в диапазоне НЧ и 60 дБмкВ/м в диапазоне СЧ (без учета локальных помех). Эти данные получены:

– по результатам измерений в диапазоне СЧ в Мехико [140], уровень промышленных помех на 40 дБ выше референсного уровня МСЭ (20 дБмкВ/м), т.е. составляет 60 дБмкВ/м;

– по результатам измерений автора в Москве, уровень промышленных помех в диапазоне НЧ достигает до 70 дБмкВ/м, а в диапазоне СЧ – до 60 дБмкВ/м.

Перечисленные факторы рассматриваются далее более подробно.

6.3.1 Вариации напряженности поля земной волны

Напряженность поля земной волны зависит от времени года (зимой – выше, летом – ниже) и климатических условий. Численные значения вариаций для частот от 500 кГц до 1000 кГц в Северном полушарии приведены в таблице 6.1 [161].

Таблица 6.1 – Сезонные вариации напряженности поля в диапазоне СЧ [161]

Средняя температура Января, °С	4	0	-10	-16
Изменение напряженности поля зима-лето u , дБ	4	8	13	15

В диапазоне НЧ [161] в средних широтах с континентальным климатом (континентальная Европа и Сибирь) сезонные вариации напряженности поля можно рассчитать по формулам:

– для трасс с небольшой составляющей лесистой местности:

$$K_s = 3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot q^2 + 0.005 \cdot q \quad [\text{дБ}];$$

– для трасс с большой составляющей лесистой местности:

$$K_s = 6.409 \cdot \ln(q) - 21.124 \quad [\text{дБ}],$$

$$q = d \cdot \sqrt{f},$$

где d – расстояние в км; f – частота в МГц.

Рассчитанные в соответствии с [161] вариации для крайних частот диапазона НЧ (справедливы для континентальной Европы и Сибири) приведены на рисунке 6.5.

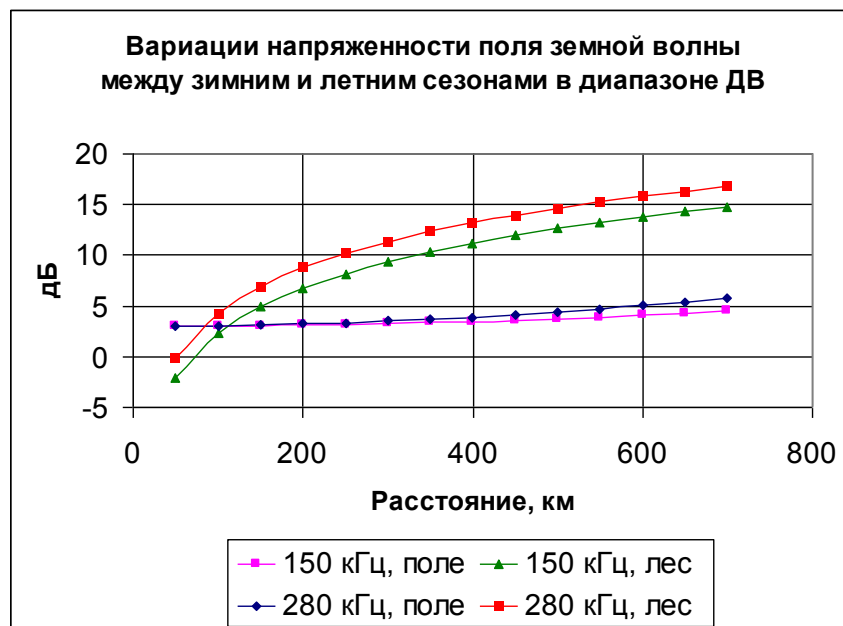


Рисунок 6.5 – Сезонные вариации напряженности поля земной волны в диапазоне НЧ

Напряженность поля земной волны в диапазоне СЧ различается также от места к месту в пределах 1 км. Закон распределения отклонений приведен на рисунке 6.6 [161], и по критерию превышения в течение 98% времени (вероятность 0,02) напряженность поля может уменьшаться на величину до 10 дБ.

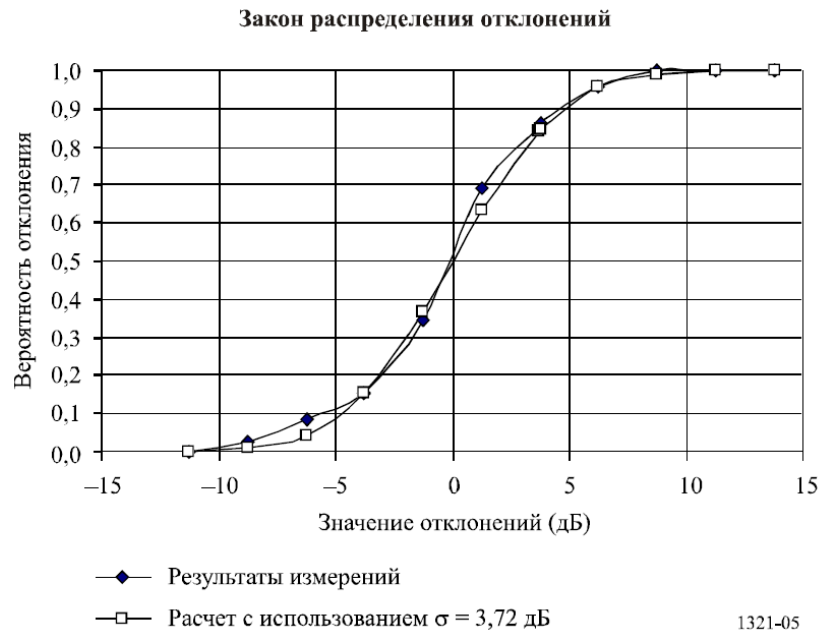


Рисунок 6.6 – Закон распределения отклонений напряженности поля земной волны от места к месту в диапазоне СЧ [161]

Необходимо отметить, что при планировании АМ вещания на границе зоны обслуживания передатчика (проходящей обычно в сельской местности) допускался прием с заданным качеством в течение 90% времени в 50% приемных пунктов. В течение 10% времени допускалось наличие заметных помех. В такой ситуации вариации от места к месту можно было не учитывать. Задача обеспечения качественным вещанием (ЧМ либо DRM) 100% населения (следовательно, 100% территории) требует учета рассматриваемого фактора.

Вместе с тем, при учете атмосферных шумов, превышаемых в течение 2% времени, представляется достаточным (принимая во внимание совместную вероятность независимых процессов) учитывать вариации напряженности поля земной волны по критерию превышения требуемого уровня в течение 90% времени. В этом случае будет достаточным принять запас на вариации

напряженности поля земной волны в 5 дБ.

В крупных городах на широких улицах (более 4 полос движения) в диапазоне СЧ дополнительного ослабления напряженности поля не наблюдалось [165]. На улицах средней ширины (3...4 полосы движения) оно составляло от 4 до 9 дБ. На узких улицах (1...2 полосы движения) дополнительное ослабление достигало 13,8 дБ. Необходимо также учитывать дополнительное ослабление сигнала внутри зданий, которое в редких случаях может достигать 20 дБ.

6.3.2 Референсная точка вариаций напряженности поля земной волны

Рассмотренные выше сезонные вариации напряженности поля земной волны в диапазонах НЧ и СЧ описаны в рекомендации МСЭ [161]. При этом указывается «средний годовой разброс (разность между месячными медианными значениями напряженности поля в зимние и летние месяцы)», который на территории РФ может достигать 13-16 дБ. Однако рекомендация [161] не содержит никаких сведений о том, относительно какой референсной точки следует применять данные вариации.

Экспериментальные результаты, полученные автором в ходе множества натуральных испытаний системы DRM в диапазонах НЧ и СЧ в Московском регионе в летние периоды 2003 – 2012 гг., дали существенно более высокие значения напряженности поля, чем это следует из рекомендации [161]. Измеренная напряженность поля на 9-11 дБ превышала прогнозируемое значение (для принятой при планировании проводимости почвы 3 мСм/м) [164], из которого в соответствии с [161] для летнего сезона вычиталось значение сезонных вариаций, равное 13-15 дБ. Значение кажущейся проводимости почвы, определенное по результатам измерений для летнего сезона, составило 1,7 мСм/м.

Анализ причин несоответствия прогнозируемых значений напряженности поля результатам измерений говорит о следующем. В одной из первых работ на эту тему [102] описываются результаты многолетних измерений сезонных вариаций напряженности поля и методика их интерпретации. Она основана на

принятии для расчетов значения проводимости почвы 10 мСм/м, которое соответствует практически максимальному значению кажущейся проводимости почвы, зафиксированной для самого холодного месяца года. Автором работы проведены перерасчеты для указанных в [102] радиотрасс с использованием общепринятого значения проводимости почвы, равного 3 мСм/м. Результаты расчетов показали, что напряженность поля в летний период будет меньше прогнозируемого значения на 4-5 дБ и примерно на 10 дБ больше в зимний период – естественно, при сохранении годового размаха вариаций.

По каким причинам в [102] в качестве референсной точки было использовано значение проводимости почвы 10 мСм/м (вместо принятых 3 мСм/м) в настоящее время не имеет существенного значения. Делать расчеты можно относительно любого значения проводимости почвы – если оно определено и записано в методику расчетов. Отсутствие определения референсной точки в [161] приводило к неоправданно завышенным требованиям к мощности DRM-передатчика, необходимой для обслуживания территории с заданной надежностью.

На основе проведенного анализа в работе [16] автором предлагается определять референсную точку для принятого при планировании в Московском регионе значения 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. Данное определение справедливо для рассмотренных в [102] радиотрасс. В остальных случаях желательно провести дополнительные перерасчеты или измерения, но очевидно, что указанные тенденции поведения сезонных вариаций напряженности поля сохранятся.

В зимний сезон напряженность поля возрастает, что не приводит к ухудшению ОСШ, но может ухудшить ОСП при наличии соканальных станций. Данный фактор следует учитывать при планировании сетей ЦРВ, в том числе и одночастотных синхронных. В последнем случае может потребоваться

использование режима помехоустойчивости DRM с большей длительностью защитного интервала – как для ночного времени.

6.3.3 Вариации напряженности поля ионосферной волны

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 в соответствии с [163] учитываются статистически. Разность $\Delta(w)$ (где w равно, как правило, 10 или 1) в конкретное время относительно захода или восхода Солнца между значением напряженности поля, превышенным в течение $w\%$ времени, и годовым медианным значением, определяется как:

в диапазоне НЧ:

$$\Delta(10) = 6,5 \text{ дБ};$$

$$\Delta(1) = 11,5 \text{ дБ};$$

в диапазоне СЧ:

$$\Delta(10) = 0,2 | \Phi | - 2 \text{ (дБ)}, 6\text{дБ} \leq \Delta(10) \leq 10 \text{ дБ};$$

$$\Delta(1) = 0,2 | \Phi | + 3 \text{ (дБ)}, 11\text{дБ} \leq \Delta(10) \leq 15 \text{ дБ},$$

где Φ – геомагнитная широта средней точки трассы.

Несколько большие значения вариаций напряженности поля ионосферной волны приводятся в работе [104], откуда следует, что для достижения надежности приема 98%, необходимо принимать запас на вариации, равный 16 дБ.

Очевидно, что при использовании пространственной волны для покрытия какой-либо территории DRM вещанием с критерием «98%» эти вариации необходимо учитывать. В данном случае для полезного сигнала – со знаком «минус».

Использование этих вариаций также необходимо при учете воздействия помех в темное время суток, для мешающих станций – со знаком «плюс», что будет соответствовать «худшему случаю».

При учете помех коэффициент потерь, учитывающий влияние солнечной

активности (для диапазона НЧ он равен 0) в диапазоне СЧ, также следует принимать равным нулю, что соответствует «худшему случаю».

6.3.4 Напряженность поля атмосферных шумов и промышленных помех

6.3.4.1 Напряженность поля промышленных помех

Напряженность поля промышленных помех можно рассчитать в соответствии с рекомендациями МСЭ [162]. Так, для короткой ($h \ll \lambda$) вертикальной штыревой антенны, расположенной над хорошо проводящей поверхностью (типичный случай автомобильной антенны), вертикальная компонента среднеквадратической напряженности поля определяется формулой:

$$E_n \text{ (dB}\mu\text{V/m)} = F_a + 20 \log f_{\text{MHz}} + B - 95,5,$$

где: $B = 10 \log b$; b – шумовая полоса приемника в Гц; E_n – напряженность поля в полосе частот b ; F_a – шум-фактор внешних шумов в dB; f_{MHz} – центральная частота в МГц.

Средний уровень промышленных помех для ряда типичных случаев описывается формулой [162]:

$$F_{\text{am}} = c - d \log f_{\text{MHz}},$$

где: F_{am} – средний уровень мощности шумов, f_{MHz} – частота в МГц,

c и d – константы, определенные в Рекомендации МСЭ [162] (см. таблицу 6.2).

Таблица 6.2 – Значения коэффициентов c и d из рекомендации МСЭ [162]

Тип местности	c	d
Индустриальная	76.8	27.7
Жилая	72.5	27.7
Сельская	67.2	27.7

Используя приведенные выше выражения, при $F_a = F_{am}$ можно рассчитать напряженность поля промышленных помех в полосе частот ЦРВ $b = 10$ кГц для различных частот диапазонов СЧ и ВЧ (см. таблицу 6.3, и рисунок 6.7).

Таблица 6.3 – Напряженность поля промышленных помех

F, МГц	0,15*	0,2*	0,30	0,60	1,20	1,60	4,20	8,40	16,80
Еш Индустр., дБмкВ/м	29,50	28,14	25,83	23,51	21,19	20,23	17,00	14,68	12,37
Еш Жил., дБмкВ/м	25,20	23,84	21,53	19,21	16,89	15,93	12,70	10,38	8,07
Еш Сельск., дБмкВ/м	19,90	18,54	16,23	13,91	11,59	10,63	7,40	5,08	2,77

* – эти данные МСЭ применимы только для частот выше 300 кГц.

Для расчета шумов на частотах ниже 300 кГц можно использовать данные из [162, рисунок 2], приведенные на рисунке 6.8. Величины F_a для минимальных значений промышленных шумов в тихом месте определяются по кривой «С».

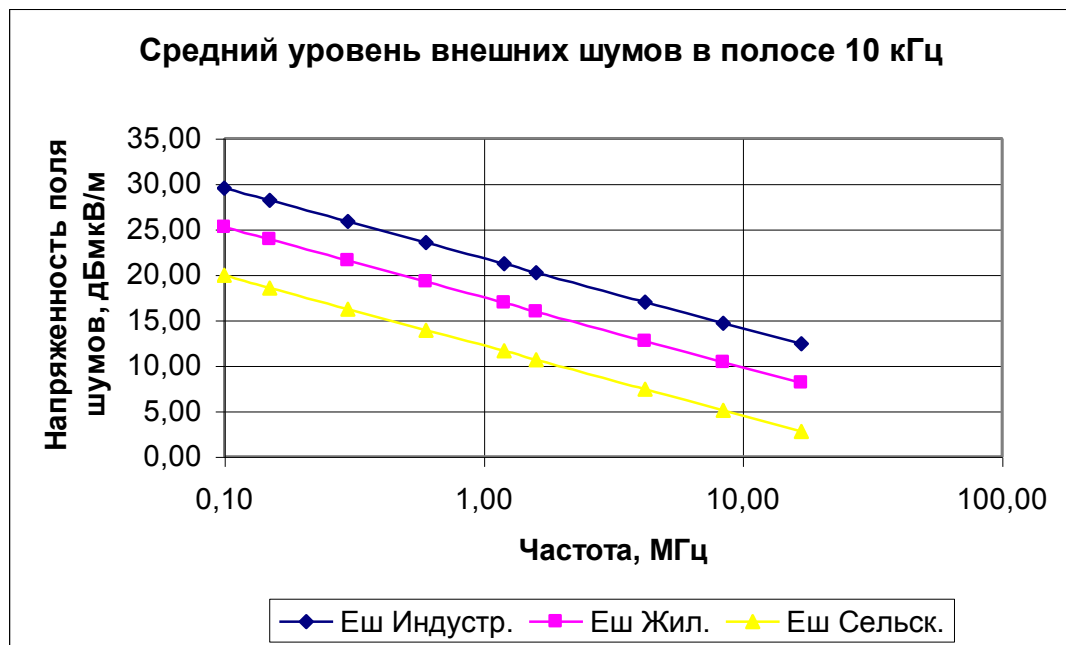


Рисунок 6.7 – Напряженность поля промышленных помех для различных типов местности

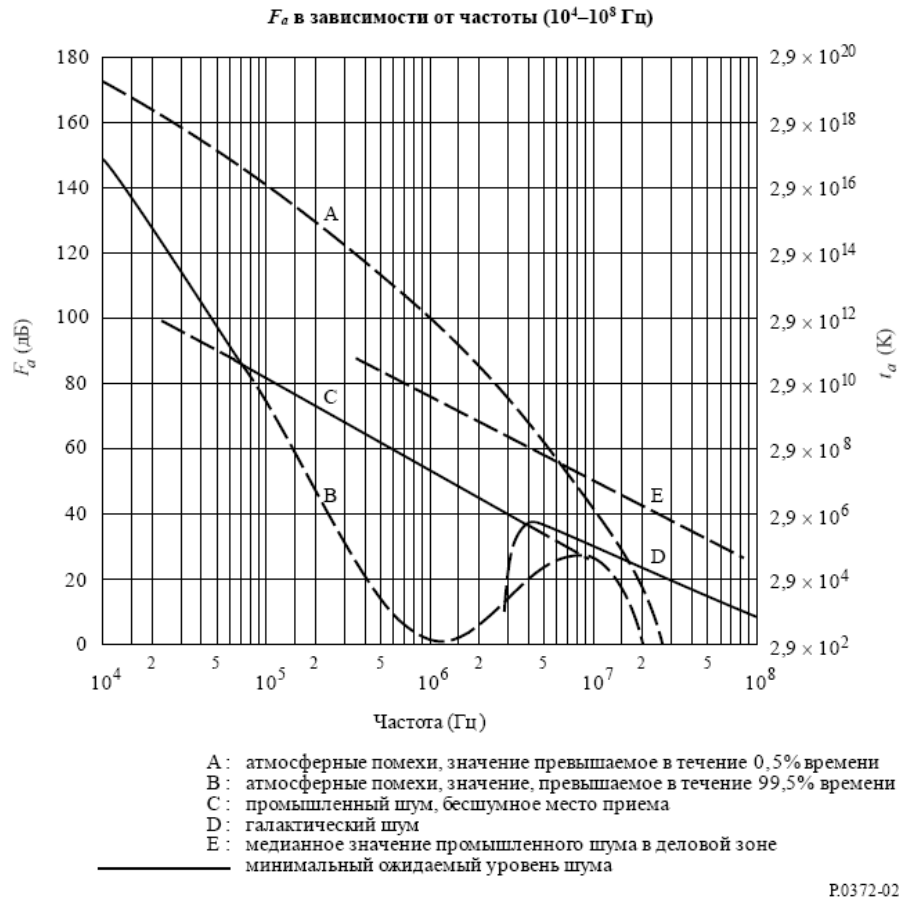


Рисунок 6.8 – Зависимость шум-фактора внешних шумов F_a от частоты [162]

6.3.4.2 Оценка максимальной напряженности поля атмосферных шумов

Величины F_a для максимальных значений атмосферных шумов, превышаемых в течение 0,5% времени в час, по всей территории Земли, определяется в соответствии с рисунком 6.8 по кривой «А». Следует отметить, что использование этих значений (превышаемых в течение 0,5% времени в час) приведет к требованию неоправданно высокого уровня напряженности поля полезного сигнала, поскольку для качественного приема DRM достаточно декодирования аудиосигнала в течение 98% времени на границе зоны обслуживания. Кроме того, некоторую часть «коротких» импульсных помех большой амплитуды DRM приемник может «не замечать» из-за применения помехоустойчивого кодирования. Проведенный пересчет с превышения заданных уровней в течение 0,5% времени на 2% времени для полосы пропускания 10 кГц в первом приближении дает уменьшение F_a на 6 дБ. Результаты пересчета и

рассчитанные по этим данным значения максимальной напряженности поля атмосферных шумов приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Рассчитанные значения максимальной напряженности поля атмосферных шумов в полосе 10 кГц

F, МГц	0,15	0,2	0,30	0,5	1,0	1,5
F _a , атмосферн., превышение 0,5% времени, дБ	134	129	123	112	100	92
F _a , атмосферн., превышение 2% времени, оценка, дБ	128	123	117	106	94	86
Eш, атмосферн., превышение 2% времени, оценка, дБмкВ/м	56	53,5	51	44,5	38,5	34

Рассчитанные максимальные уровни шумов из таблицы 6.4 могут использоваться в качестве «оценки сверху» для атмосферных шумов.

6.3.4.3 Распределение атмосферных шумов по территории Земли

Более подробная детализация уровней атмосферных шумов по временам суток, сезонам, и географическому положению также приводится в [162] в виде семейств графиков. Однако эти данные приведены для полосы 200 Гц, и их пересчет в иную полосу пропускания приемника справедлив только для диапазонов СЧ и ВЧ, а применение для диапазона НЧ «допускается с осторожностью», т.е. может быть использовано только в качестве предварительной оценки. Окончательные данные могут быть получены только в результате длительных наблюдений.

Распределение атмосферных шумов по территории планеты весьма неравномерно. На рисунке 6.9 показан пример ожидаемых значений атмосферного радишума $F_{ам}$ (в децибелах выше kT_0b на частоте 1 МГц [162]) в Северном полушарии для летнего сезона и временного блока 16-20 ч местного времени [162]. Как следует из рисунка 6.9, максимальные значения $F_{ам}$

составляют 85-90 дБ (в тропических широтах), а минимальные – 25-30 дБ (Гренландия и Восточная Сибирь).

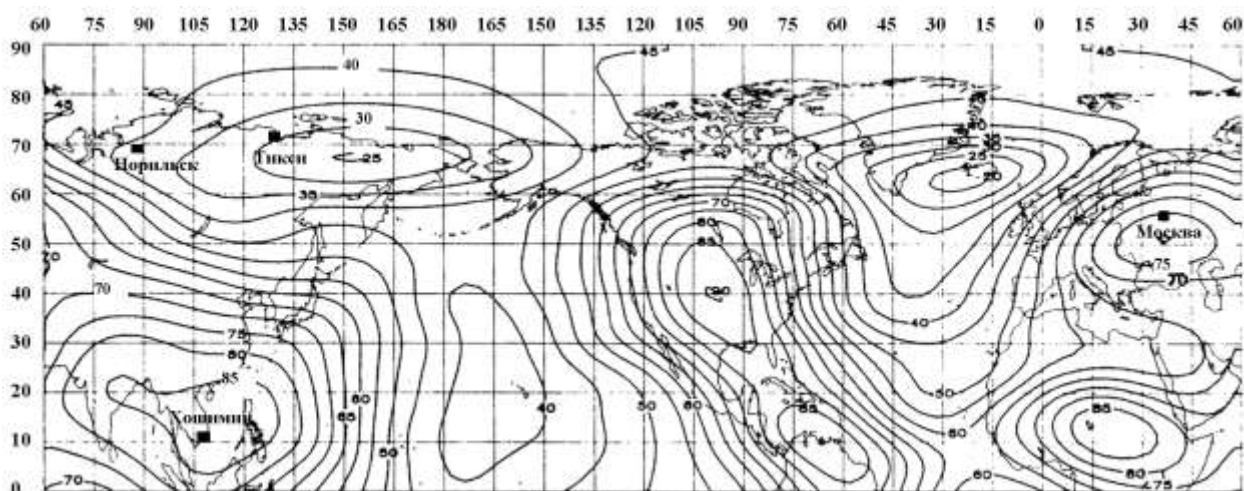


Рисунок 6.9 – Ожидаемые значения атмосферного радишума (лето, 16-20 ч местного времени, Северное полушарие) [162]

Для определения напряженности поля атмосферных шумов в заданной географической точке необходимо найти соответствующее значение F_{am} на частоте 1 МГц и пересчитать его на рабочую частоту по приведенным в [162] графикам. Далее вычисляем ожидаемое значение медианы отклонения среднего напряжения (для полосы 200 Гц), пересчитываем его в необходимую полосу частот и оцениваем вероятностные распределения амплитуд для заданного процента времени. Все это необходимо провести для 4 сезонов с 6 временными блоками (по 4 ч) в каждом и выбрать максимум. Затем в соответствии с [162] может быть определена максимальная ожидаемая напряженность поля атмосферного шума в заданной географической точке. Данная процедура, предполагающая использование 5 графиков для каждого из 24 сезонно-временных блоков, довольно громоздка. Облегчить ее в какой-то степени может свободно распространяемая МСЭ программа NOISBW.

В качестве примера на рисунке 6.10 представлены результаты расчетов (проведенных в соответствии с описанной выше процедурой) значений максимальных ожидаемых напряженностей поля атмосферных шумов,

превышаемых в течение 2% времени, для различных частот диапазонов НЧ и СЧ (в полосе частот 10 кГц) в нескольких географических точках (Тикси, Норильск, окрестности Москвы, Хошимин). Там же для сравнения показаны значения напряженности поля промышленных шумов в сельской местности [162] и значения собственного шума приемника, приведенные к напряженности поля.

Как видно из рисунка 6.10, напряженность поля атмосферных шумов в районах Тикси и Норильска существенно ниже шумов приемника и промышленных шумов в сельской местности. В районе Хошимина (тропики) напряженность поля атмосферных шумов близка к максимальной и в диапазоне СЧ превышает собственный шум DRM-приемника на 14-23 дБ. На территории РФ максимальная напряженность поля атмосферных шумов прогнозируется несколько южнее Москвы.

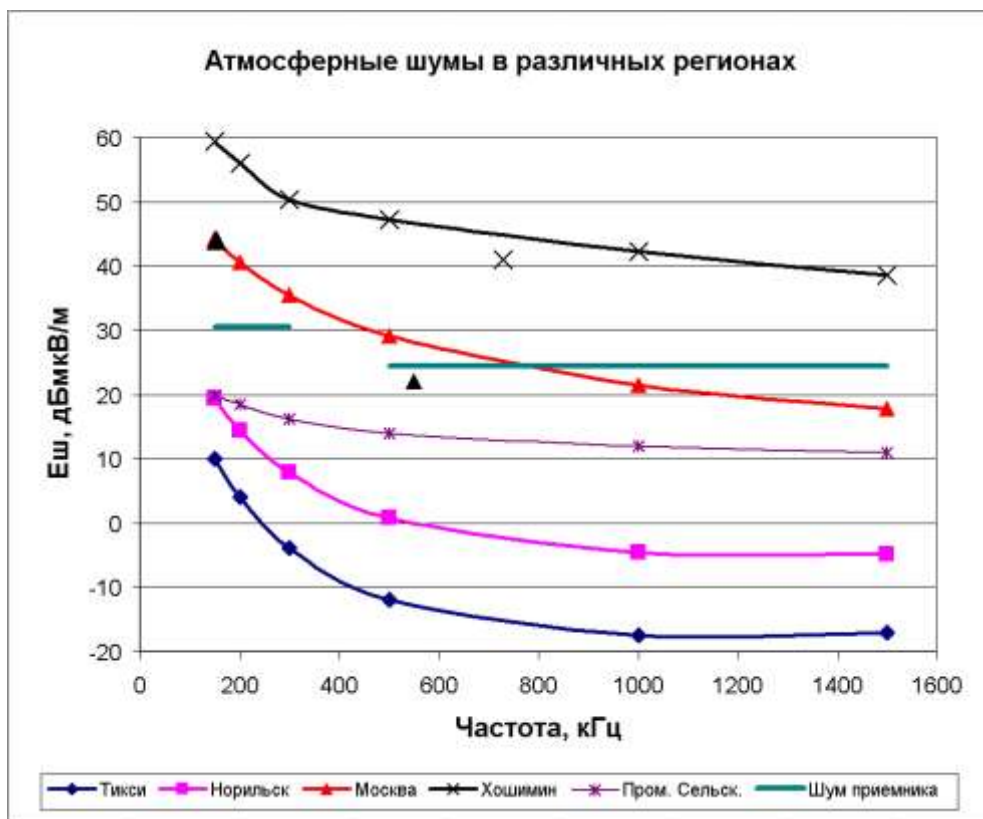


Рисунок 6.10 – Максимальная ожидаемая напряженность поля атмосферных шумов, превышаемая в течение 2% времени

Для Московского региона (если не учитывать повышенный уровень промышленных шумов собственно в мегаполисе) 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.

6.3.4.4 Процедура учета атмосферных шумов

Во многих публикациях и выступлениях на конференциях, зачастую носящих рекламный характер (например, [129]), зона обслуживания системы ЦРВ стандарта DRM земной волной вычисляется исходя из минимально используемой напряженности поля, определенной в [159, табл. 3, 4] как 46 (40) дБмкВ/м для диапазонов НЧ (СЧ) в режиме А, 9 (10) кГц, 64QAM со средней скоростью кодирования 0,6. Вместо строгого учета сезонных изменений напряженности поля и вариаций напряженности поля от места к месту, который должен проводиться в соответствии с [161], добавляется эмпирический «запас» на 10 дБ (7 дБ на «статистические вариации напряженности поля» и 3 дБ – «запас»).

При этом в Примечании 1 к указанным таблицам записано [159]: «При расчете значений в таблицах 3-6 учитывался уровень собственного шума цифрового приемника, указанный в последнем ряду таблицы в Дополнении 1 к настоящему Приложению. Однако в случаях превалирующего влияния внешних помех соответствующее значение собственного шума приемника в Дополнении 1 к данному Приложению следует заменить уровнем внешних помех».

Эта вполне очевидная процедура по каким-то причинам не принимается во внимание при расчетах минимально используемой напряженности поля для конкретных географических зон обслуживания. Можно предположить, что среди этих причин первоочередной является сложность определения уровня внешних помех. Впервые подход к учету напряженности поля атмосферных шумов был описан автором в [19], где на основании рекомендации [162] проведена оценка верхней границы напряженности поля атмосферных шумов, превышаемых в

течение 2% времени (для обеспечения 98% декодирования) по всей территории Земли в целом. Полученные результаты (53,5 дБмкВ/м для частоты 200 кГц и 38,5 дБмкВ/м для частоты 1 МГц) существенно превышают значения собственного шума приемника, приведенные к напряженности поля и составляющие 30,5 (24,5) дБмкВ/м для диапазонов НЧ (СЧ) [159]. Еще раз подчеркнем, что приведенные значения атмосферных шумов – это оценка максимального значения уровня шумов по всей Земле в целом. Дальнейшее развитие процедуры учета атмосферных шумов проведено автором в [16].

Как видно из рисунка 6.10, напряженность поля атмосферных шумов в районах Тикси и Норильска 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 [159].

В районе Хошимина (тропики) 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. В противном случае эмпирический «запас» на 10 дБ [129] окажется явно недостаточным и зона обслуживания будет существенно меньше прогнозируемой.

Действительно, проведенные Азиатско-Тихоокеанским радиовещательным союзом во Вьетнаме тесты DRM на частоте 729 кГц [142] показали, что декодирование было возможно при напряженности поля на границе зоны обслуживания 57 дБмкВ/м. Измеренному пороговому значению напряженности поля сигнала соответствует напряженность поля атмосферных шумов: $57 - 16 = 41$ дБмкВ/м. Это на 16,5 дБ больше собственного шума приемника и несколько меньше максимального значения атмосферных шумов для данного региона на этой частоте (44 дБмкВ/м – см. рисунок 6.10).

Повышенный уровень атмосферных шумов в данном регионе учитывается (менее подробно) и при планировании АМ-вещания. В частности, минимально

используемая напряженность поля в зоне «В», к которой относится Вьетнам, на 10 дБ больше, чем в средних широтах [61].

Как видно из рисунка 6.9, на территории РФ максимальная напряженность поля атмосферных шумов прогнозируется несколько южнее Москвы. Для Московского региона (если не учитывать повышенный уровень промышленных шумов собственно в мегаполисе) 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. Таким образом, при определении радиуса зоны обслуживания в этом регионе учет атмосферных шумов также необходим.

Приведенные примеры говорят об актуальности расчетов напряженности поля атмосферных шумов при определении зоны обслуживания передатчика в каждом географическом регионе. Вместе с тем можно полагать, что на большей части территории РФ (в северной и азиатской частях, см. рисунок 6.9) напряженность поля атмосферных шумов будет ниже собственных шумов приемника.

При проведении относительно краткосрочных эфирных измерений могут наблюдаться и меньшие значения напряженности поля атмосферных шумов. В этом случае 100%-ное декодирование сигнала DRM возможно при меньшей напряженности поля, чем определенное в соответствии с данной методикой. Тем не менее, рассмотренные факторы необходимо учитывать при планировании зоны обслуживания для обеспечения круглосуточного и круглогодичного приема с заданным качеством.

Как отмечалось выше, уровни индустриальных помех в промышленных районах и городах, особенно в диапазоне НЧ, превышают указанные значения, но это не является критичным для расчета зон обслуживания при постулате прохождения границы зоны обслуживания в сельской местности.

6.4 Экспериментальные исследования зон обслуживания сетей радиовещания DRM диапазонов НЧ и СЧ

Экспериментальные исследования и измерения в пороговой системе необходимо выполнять не менее тщательно, чем ее планирование. В противном случае результаты получатся некорректными. Следует отметить, что в большинстве опубликованных результатов международных тестов, в которых фигурирует понятие «профессиональный приемник DRM», измерения проведены достаточно корректно. Пример грамотного построения измерительного комплекса описан в [152] и других работах тех же авторов.

Однако к результатам «измерений», в которых фигурирует «бытовой приемник», подход должен быть более критичным. Автору не удалось найти в литературе значения чувствительности по напряженности электромагнитного поля ни для одной из моделей бытовых приемников DRM, существующих в настоящее время. Измерения параметров одного из типичных образцов (Глава 4 настоящей работы) показали, что его чувствительность составляет 73-88 дБмкВ/м в диапазоне НЧ и 53-62 дБмкВ/м в диапазоне СЧ, что на 13-42 дБ хуже «Минимальных требований к приемнику», предъявляемых консорциумом DRM [118]. Таким образом, данные приемники следует считать «сувенирными», т.е. они демонстрируют возможность приема сигнала DRM, но не гарантируют соответствие их технических характеристик каким-либо нормативным параметрам. Отметим, что различие между «бытовым» и «профессиональным» приемником заключается в наличии у последнего широких возможностей для анализа принимаемого сигнала: наблюдения спектра, импульсного отклика канала, точной калибровки измерения уровня принимаемого сигнала, записи параметров приема и т.д. А требования к чувствительности для них практически одинаковые.

Неудивительно, что в описанных в [136] тестах DRM в Италии на частоте 693 кГц прием на бытовой приемник был возможен при напряженности поля не менее 58 дБмкВ/м. Именно такую чувствительность по напряженности

электромагнитного поля на этой частоте имел измеренный автором образец бытового DRM-приемника. При этом профессиональный приемник работал при напряженности поля 43 дБмкВ/м, что свидетельствует о несоответствии использованного бытового приемника предъявляемым к нему требованиям.

К сожалению, данные результаты, не будучи проверены на корректность измерений, в ряде отечественных публикаций приводились как аргумент для критики системы DRM. Напомним также о рекомендации МСЭ [92], требующей, «чтобы общие помехи в приемнике от излучений и передач, осуществляемых в отсутствие соответствующего распределения частот в Регламенте радиосвязи, не превышали 1% общей мощности шума приемной системы».

В 2001 – 2013 гг. МТУСИ, под руководством автора и при его непосредственном участии, выполнил более 10 НИР, связанных с экспериментальными исследованиями системы DRM в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ. Для этого было разработано измерительное оборудование, включающее профессиональные приемники DRM и калиброванные антенны диапазонов НЧ и СЧ с коэффициентом преобразования, обеспечивающим выполнение «Минимальных требований к приемнику» по чувствительности, предъявляемых консорциумом DRM. Собственные шумы приемников, приведенные ко входу антенны, не превышали шумов эфира «в особо тихих местах» [162], что позволяло проводить корректные измерения зон обслуживания.

Далее приводятся результаты экспериментальных исследований зон обслуживания сетей радиовещания DRM диапазонов НЧ и СЧ.

6.4.1 Экспериментальные исследования зоны обслуживания DRM передатчика в диапазоне НЧ

Экспериментальные исследования зоны обслуживания DRM передатчика в диапазоне НЧ проводились под руководством и с участием автора в 2011 году в рамках НИР «Исследование возможности и условий использования цифрового радиовещания стандарта DRM в Российской Федерации в полосе частот

0,1485-0,2835 МГц (длинные волны)» (договор между ФГОБУ ВПО МТУСИ и ФГУП «РTRC» № ДТР-440-11/0602/11 от 10.10.2011).

6.4.1.1 Подготовка необходимого оборудования для организации опытного радиовещания в диапазоне НЧ

Для организации опытной зоны цифрового вещания использовался радиоцентр №3 МРЦ РTRC, расположенный в поселке Северный Талдомского района Московской области. Цифровой передатчик подключался взамен передатчика РВ-359 на его антенну («Зонт») с использованием рабочей частоты 153 кГц.

Как показали проведенные расчеты напряженности поля земной волны, для построения опытной зоны цифрового радиовещания радиусом 50...100 км в диапазоне НЧ достаточно средней мощности передатчика 32 Вт (пиковая мощность 320 Вт). В связи с этим, был разработан и создан широкополосный линейный усилитель (далее ШПУ DRM НЧ 300), обеспечивающий выходную мощность не менее 300 Вт в классе АВ при высокой линейности ($MER > 30$ дБ) и надежности работы.

Особенностью используемой антенны являлось то, что на эту же антенну через диплексер работает передатчик службы точного времени на частоте 66,6 кГц. Кроме того, на территории РЦ №3 на частоте 261 кГц работал вещательный АМ передатчик РВ-99 с выходной мощностью 500 кВт на антенну типа мачта. Наведённый сигнал от передатчика РВ-99 на входе диплексера (в нагрузке ШПУ) составляет в несущей 120 В (в пике ≈ 240 В при 100% АМ). Этот сигнал необходимо было подавить до уровня не более 1 В для обеспечения надежной работы усилителя без нежелательных интермодуляционных искажений. В связи с этим было разработано и изготовлено дополнительное режектирующее и трансформирующее устройство, которое обеспечивало номинальную нагрузку 50 Ом для ШПУ DRM НЧ 300 и подавление мешающих сигналов до приемлемого уровня.

С целью выяснения возможности приема сигнала DRM и оценки требуемой напряженности поля в диапазоне НЧ в крупном мегаполисе с очень высоким уровнем промышленных радиопомех (г. Москва) были также проведены экспериментальные исследования цифрового радиовещания стандарта DRM в диапазоне НЧ с передатчиком повышенной мощности. Для этого описанный выше усилитель мощности через трансформирующую цепь был подключен к сеточной цепи лампового каскада на ГУ-94Б, включенного по схеме с общим катодом в режиме линейного усиления в классе АВ. При средней мощности возбуждения 6...10 Вт (пиковая мощность 60...100 Вт), напряжении смещения на первой сетке -195 В и напряжении анодного питания 12 кВ (ток потребления анодной цепи 4 А) выходная мощность, измеренная калориметрическим способом на эквиваленте нагрузки, составила 16 кВт (КПД анодной цепи 33%). Качественные показатели передатчика соответствовали [90] – запас до маски допустимых внеполосных колебаний составлял 2...3 дБ, а MER в выходном сигнале был равен 33 дБ как на эквивалент, так и на антенну. Величину излучаемой мощности с учетом потерь в диплексере, КПД АФУ и пр. можно оценить, как равную 8 кВт.

6.4.1.2 Расчет зоны покрытия

Для проведения расчетов зоны покрытия необходимо оценить помеховую обстановку на рабочей частоте. По данным сайта www.fmscan.org, в окрестностях Москвы на частоте 153 кГц во время проведения измерений можно было принимать вещательные станции из Румынии, Германии и Норвегии (рисунок 6.11). Их суммарная напряженность поля в дневные часы не превышала 25 дБмкВ/м, что меньше уровня собственного шума приемника, а в ночные часы доходила до 50 дБмкВ/м.

Таким образом, исходные данные для расчета следующие:

– рабочая частота 153 кГц, мощность передатчика 32 Вт;

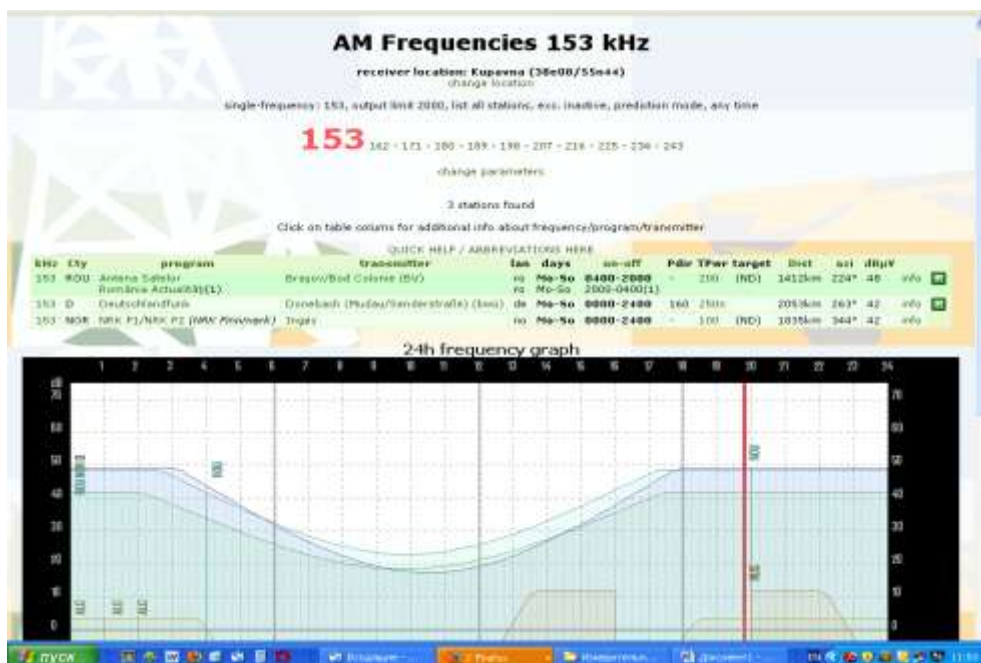


Рисунок 6.11 – Помеховая обстановка от других станций на частоте 153 кГц (данные сайта www.fmscan.org)

- измеренная на расстоянии 120 км от передатчика в сельской местности напряженность поля эфирных шумов и промышленных помех 30 дБмкВ/м;
- максимально ожидаемая напряженность поля атмосферных шумов, превышаемая в течение 2% времени 44 дБмкВ/м;
- приведенное к напряженности поля значение собственных шумов приемника 30 дБмкВ/м (соответствует чувствительности приемника 46 дБмкВ/м, рекомендованной в [118]);
- проводимость почвы 0,0017 См/м; проницаемость 13. Данные значения получены во время выполнения предыдущих работ [76] и подтверждены проведенными измерениями напряженности поля передатчика РВ-99 (500 кВт, 261 кГц) на расстоянии 120 км. Так, рассчитанная напряженность поля для этого случая составила 83,9 дБмкВ/м, а измеренная напряженность поля была равна 83,3 дБмкВ/м, что полностью совпало с расчетом;
- напряженность поля соканальной помехи с АМ Европейского стандарта для светлого времени суток равна 25 дБмкВ/м, для темного времени суток 50 дБмкВ/м, помехи в соседних каналах отсутствуют.

В соответствии с Главой 4 и параграфом 6.3.4, требуемые для декодирования сигнала DRM напряженности поля для светлого времени суток составляют от 48,6 дБмкВ/м (в особо тихих местах) до 59,3 дБмкВ/м. Данные значения напряженности поля обеспечиваются передатчиком на расстояниях 120 км и 47 км соответственно.

Требуемая для декодирования DRM сигнала напряженность поля в темное время суток составляет от 57,5 дБмкВ/м (по критерию соканальных помех) до 59,3 дБмкВ/м (по критерию максимально ожидаемой напряженности поля атмосферных шумов) и обеспечивается передатчиком на расстояниях 56 км и 47 км соответственно.

Проведенные расчеты показывают, что построенная опытная зона цифрового радиовещания стандарта DRM в диапазоне длинных волн с передатчиком средней мощностью 32 Вт в реальных условиях электромагнитной обстановки имеет радиус зоны обслуживания 47 км. Схема организации опытной зоны вещания в диапазоне НЧ для исследования зон покрытия передатчика в реальных условиях эксплуатации приведена на рисунке 6.12.

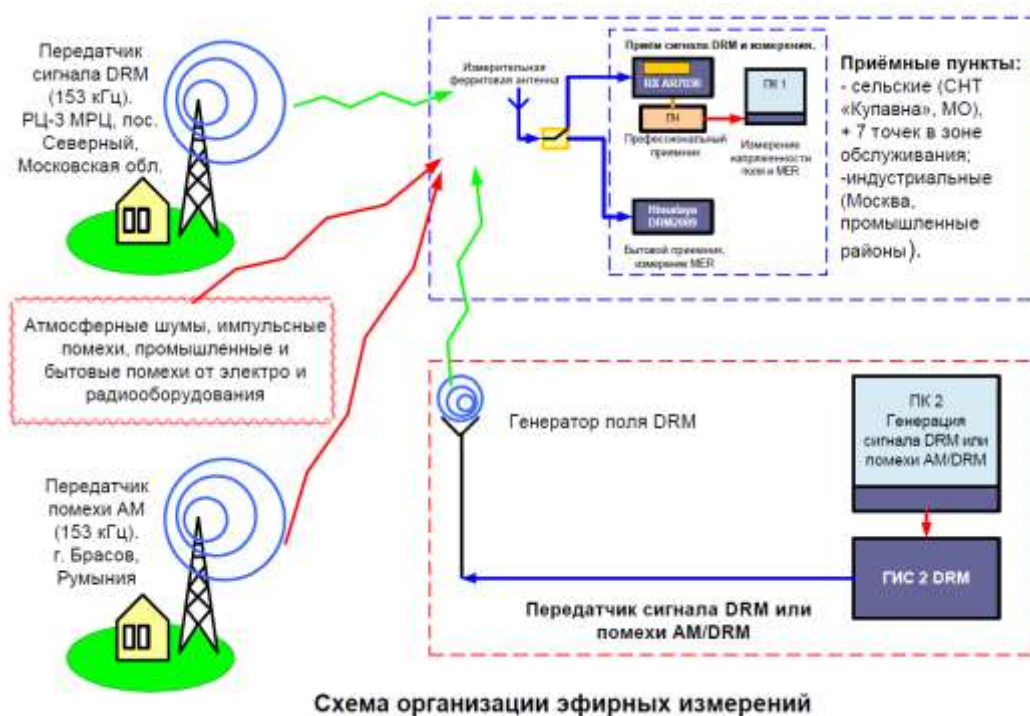


Рисунок 6.12 – Схема организации опытной зоны вещания в диапазоне НЧ для экспериментального исследования зон покрытия передатчика в реальных условиях эксплуатации

6.4.1.3 Разработка методики измерений и выбор точек на местности

Методика определения зон покрытия аналогична применявшейся в работе [76] и заключается в контроле помеховой обстановки (по критерию непопадания в спектр полезного сигнала местных дискретных помех), измерении напряженности поля полезного сигнала, измерении величины MER в декодированном сигнале DRM и определении возможности декодирования аудиосигнала на различных расстояниях от передатчика.

Измерения проводились с помощью мобильного измерительного комплекса, разработанного ранее [76] в МТУСИ (см. рисунок 6.13). В него входит изготовленная в соответствии с рекомендациями [24] измерительная ферритовая антенна (ИФА) диапазона НЧ с коэффициентом пересчета 49 дБ на частоте 153 кГц, а также измерительный приемник AR-7030 с подключенным к нему персональным компьютером. Для декодирования сигнала DRM используется программа «Dream» [143], а для записи и обработки результатов измерений используется программа «RX TEST» [169]. Для проведения измерений антенна устанавливалась на крыше автомобиля и ориентировалась в направлении на передатчик. Питание измерительного комплекса осуществлялось от бортовой сети автомобиля. Во время проведения измерений двигатель автомобиля выключался для устранения возможных помех от системы зажигания по цепям питания, а персональный компьютер переводился в режим батарейного питания.

Дополнительно проверялась возможность приема и декодирования сигнала DRM на бытовой приемник «Himalaya DRM2009». Необходимо отметить, что из-за наводок от процессорной части на расположенную в корпусе ферритовую антенну этот приемник выполнен с очень низкой чувствительностью по полю в диапазоне НЧ (88 дБмкВ/м [24] вместо требуемых 46 дБмкВ/м [118]). В связи с этим он использовался в режиме работы с внешней антенной, в качестве которой применялась ИФА. Поскольку время работы от штатного автономного источника питания этого приемника очень малое, его питание осуществлялось от бортовой сети автомобиля через аналоговый стабилизатор напряжения с 12 В на 7 В.



Рисунок 6.13 – Мобильный измерительный комплекс в процессе проведения измерений

Точки для измерений выбраны на местности с достаточно ровным рельефом, на некотором удалении от населенных пунктов в сельской местности, при отсутствии близкорасположенных мощных ЛЭП. Общая схема измерений на местности приведена на рисунке 6.14. Выбранные точки измерений позволяют получить достаточно полную картину распределения напряженности поля сигнала DRM по предполагаемой зоне обслуживания радиусом до 47 км.

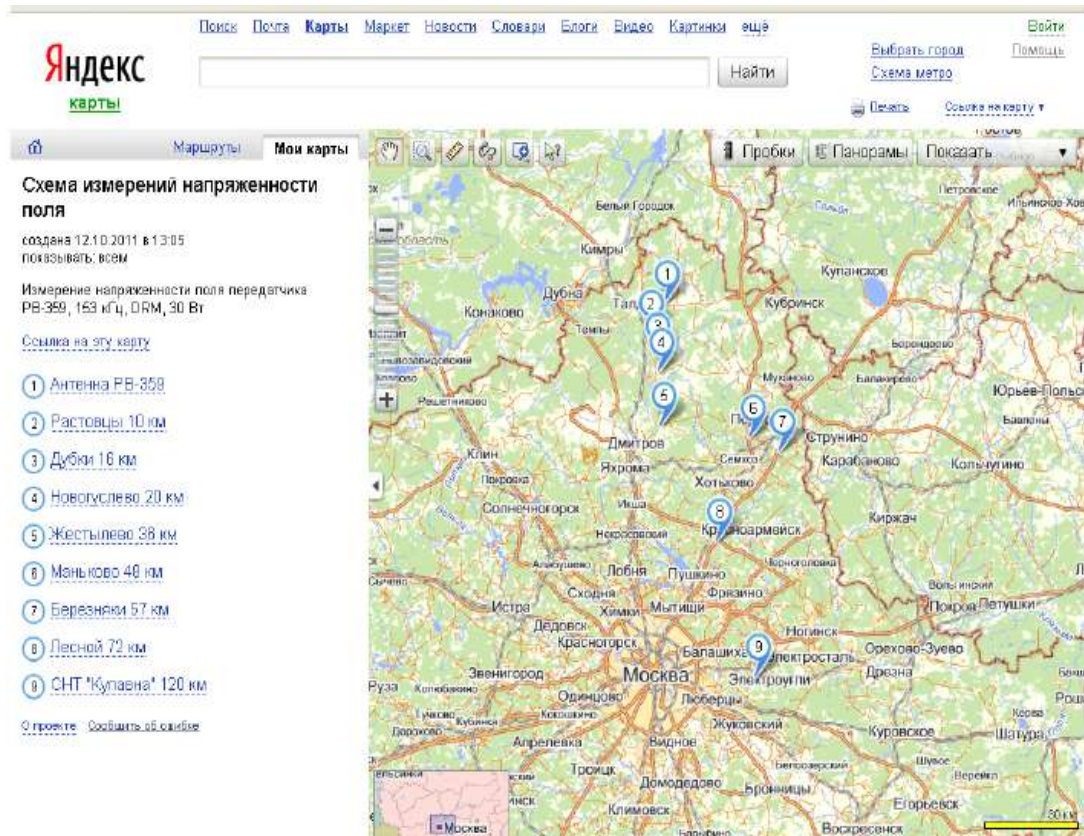


Рисунок 6.14 – Общая схема проведения измерений на местности

6.4.1.4 Проведение измерений зон покрытия

Результаты измерений параметров принимаемого DRM сигнала на частоте 153 кГц при средней выходной мощности передатчика 30 Вт в дневное время в различных точках зоны обслуживания приведены в таблице 6.5 и в графическом виде на рисунке 6.15.

Напряженность поля шумов в точках измерений может быть определена посредством вычитания значения MER из напряженности поля сигнала.

Анализ результатов измерений позволяет сделать следующие выводы:

- опытная зона DRM вещания в диапазоне НЧ радиусом 50...100 км успешно построена и может использоваться для проведения необходимых измерений;
- рассчитанные значения напряженности поля с достаточной точностью совпадают с результатами измерений;

Таблица 6.5 – Результаты измерений в зоне обслуживания

№	R, км	Населенный пункт	Рассчит. Напряж. Поля, дБмкВ/м (0,0017, 13)	Рассчит. Напряж. Поля, дБмкВ/м (0,005; 4)	Измер. Уровень сигнала, дБмкВ	Измер. Напряж. Поля, дБмкВ/м Ка=49 дБ	Измер. MER, дБ АОР	Измер. MER, дБ Гималайя	Декодирование аудиосигнала, АОР / Гималайя, (Примечание) %,
1	3	Северный	80	80	29	78	24...25	24	100 / 100
2	10	Растовцы	73,5	73,5	22	71	20	19	100 / 100
3	16	Дубки	69,5	69,5	17	66	15	13	20 / 0 (Помеха в спектре от ЛЭП)
4	20	Новогуслево	67,5	67,5	15	64	19,5	17	100 / 100
5	36	Жестылево	61,5	62,5	12	61	17,5	15,5	100 / 50
6	48	Маньково	58,6	60,0	11 16*	60 65*	16 17,9*	13 16	0 / 0 100 / 100
7	57	Березняки	56,6	58,1	9 13*	58 62*	14 17,9*	11 15	0 / 0 100 / 50
8	72	Лесной	54,2	56,1	6	55	9	6	0 / 0
9	120	СНТ «Купавна»	48,2	51,0	1	50	16,5**	-	100**

Примечания:

* – мощность передатчика увеличена на 4 дБ;

** – в отдельные моменты времени (при полном отсутствии местных помех) и при ориентации приемной антенны минимумом на мешающую станцию.

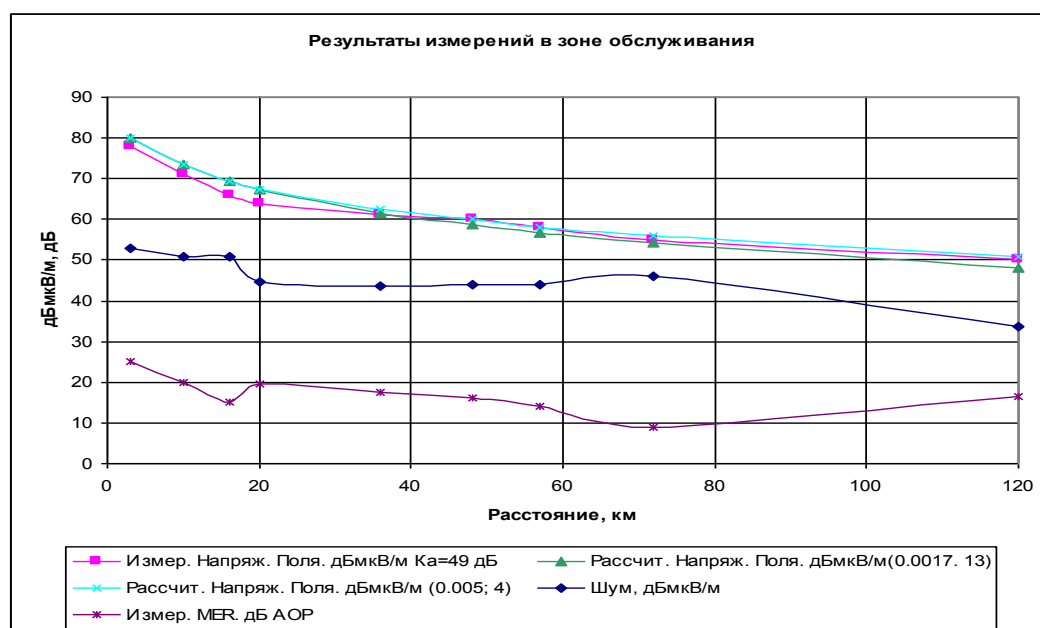


Рисунок 6.15 – Результаты измерений в зоне обслуживания

– уровень шумов в зоне обслуживания во время измерений составлял от 33 дБмкВ/м (в «особо тихом месте») до 44 дБмкВ/м, что соответствует полученным выше результатам (минимальный уровень шумов 30 дБмкВ/м, а уровень 44 дБмкВ/м превышает в течение 2% времени). Повышенный уровень шумов на расстоянии до 16 км от передатчика обусловлен импульсной работой передатчика «точного времени», работающего на ту же антенну.

6.4.1.5 Проведение экспериментальных исследований цифрового радиовещания стандарта DRM в диапазоне НЧ с передатчиком повышенной мощности

Для оценки возможности приема сигнала DRM в диапазоне НЧ в крупном мегаполисе с очень высоким уровнем промышленных радиопомех (г. Москва), были проведены экспериментальные исследования цифрового радиовещания стандарта DRM в диапазоне длинных волн с передатчиком повышенной мощности (см. параграф 6.4.1.1). Поскольку граница зоны обслуживания мощного передатчика может находиться на расстоянии до 300 км (по напряженности поля 59,3 дБмкВ/м для сельской местности), определять эту границу в рамках данной работы нецелесообразно, поскольку это уже было сделано с использованием передатчика малой мощности. Поэтому были произведены контрольные измерения напряженности поля в отдельных, совпадающих с предыдущими, точках зоны обслуживания, а далее проводились измерения в городских условиях (см. таблицу 6.6). Расчет напряженности поля для точек 3 и 4 проводился для излучаемой мощности 8 кВт в соответствии с [164] для двух участков трассы с различными значениями кажущейся проводимости почвы – для сельской местности с $\sigma=10^{-3}$ См/м и для городской с $\sigma=10^{-4}$ См/м.

Таблица 6.6 – Результаты измерений в зоне обслуживания передатчика повышенной мощности

№	R, км, (сельск. +город.)	Населенный пункт	Расчит. Напряж. Поля, дБмкВ/м	Измер. Уровень сигнала, дБмкВ	Измер. Напряж. Поля, дБмкВ/м Ka=49 дБ	Измер. MER, дБ АОР	Измер. MER, дБ Гималайя	Декодирование аудиосигнала, %, АОР / Гималайя, (Примечание)
1	3	Северный	103	52,5	101,5	31	30	100 / 100
2	36	Жестылево	84,5	30	79	28	28	100 / 100
3	100 (90+10)	Москва, ул. Дубовая Роща, в здании РТРС	69,0	15...17	64...66	16	Н.и.	100
4	100 (90+10)	Москва, ул. Дубовая Роща, парк «Дубки»	69,0	16	65	21	Н.и.	100 (ориентация антенны на максимум MER)
5	110 (90+20)	Москва, ул. Авиамоторная, МТУСИ	65,5	15	64	18	17	100 / 100 (при отсутствии местных помех)

Анализ результатов измерений позволяет сделать следующие выводы:

- рассчитанные значения напряженности поля с достаточной точностью совпадают с результатами измерений;
- прием сигнала DRM в крупном мегаполисе с очень высоким уровнем промышленных радиопомех (г. Москва) в диапазоне НЧ возможен;
- предварительная оценка требуемой напряженности поля составляет величину не менее 80 дБмкВ/м, которая может быть обеспечена передатчиком мощностью 100 кВт, находящимся на удалении до 100 км.

6.4.2 Измерение уровня шумов в населенных пунктах и помех от различного электрического и радиооборудования в диапазоне НЧ

6.4.2.1 Измерение уровня атмосферных шумов и импульсных помех в различных типах населенных пунктов

Измерение уровня атмосферных шумов и импульсных помех в различных типах населенных пунктов проводилось с использованием изготовленной в соответствии с рекомендациями [24] измерительной ферритовой антенны (ИФА) диапазона НЧ, измерительного приемника AR-7030 и подключенного к нему персонального компьютера для записи и обработки результатов измерений с использованием программы «RX TEST» [169]. Собственные шумы измерительной установки, приведенные к входу антенны в полосе 9 кГц, составляли 30 дБмкВ/м (при питании ПК от его собственных аккумуляторов).

Измерения уровня атмосферных шумов и импульсных помех **в сельской местности** (СНТ «Купавна» Ногинского района Московской области, октябрь 2011 г., 1-й этаж деревянного дома с шиферной крышей) показали, что на частотах диапазона НЧ, свободных от радиовещательных станций (240 кГц) в рабочие дни (как в течение дня, так и в течение ночи) уровень помех не превышал величины 30...31 дБмкВ/м, т.е. был соизмерим с собственными шумами измерительной установки.

В выходные дни наблюдались индустриальные помехи с уровнем до 53 дБмкВ/м на различных частотах НЧ диапазона, обусловленные работой бытового оборудования, помехи от которого будут рассмотрены ниже.

Измерения уровня атмосферных шумов и импульсных помех в городской местности проводилось в МГУСИ (г. Москва, Авиамоторная ул., д. 8, 7-й этаж кирпичного здания с железной крышей) в рабочий день.

Суточный график хода напряжения на входе приемника на частоте 153 кГц с поминутным усреднением приведен на рисунке 6.16. Для пересчета его в напряженность поля необходимо прибавить коэффициент пересчета ИФА, равный 48 дБ.

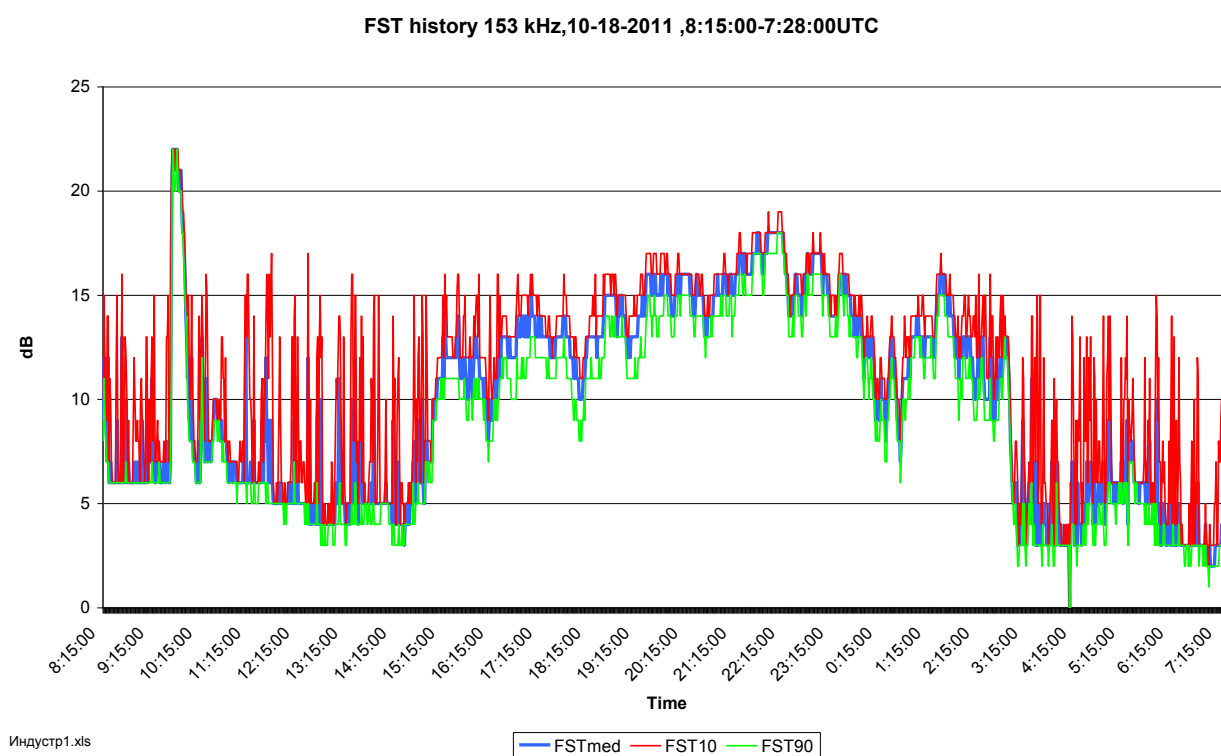


Рисунок 6.16 – Суточный график хода напряжения на входе приемника на частоте 153 кГц в городских условиях. Для пересчета в напряженность поля необходимо прибавить 48 дБ

Как видно из рисунка 6.16, напряженность поля помех большую часть суток не превышает 66 дБмкВ/м с кратковременным подъемом до 70 дБмкВ/м.

Аналогичные результаты (57...65 дБмкВ/м) были получены в жилом секторе г. Москвы (ул. 2-я Владимирская).

Таким образом, результаты проведенных измерений подтвердили возможность наблюдения минимальных значений уровней шумов и помех, определенных для сельской местности (30...31 дБмкВ/м). В городской местности в условиях мегаполиса уровень индустриальных помех существенно (на 22...26 дБ) превышает определенное выше максимальное значение уровня атмосферных помех.

6.4.2.2 Измерение уровней бытовых помех от различного электрического и радиооборудования

Исследование уровней помех от бытовых электро- и радиоприборов проводилось в сельской местности (СНТ «Купавна») с низким уровнем эфирных помех. Конкретные измерения проводились в будние дни при отсутствии в радиусе 100 метров посторонних источников бытовых электромагнитных помех на свободной от радиосигналов частоте 240 кГц в полосе ± 5 кГц.

Суммарная эквивалентная напряженность поля шумов измерительной установки составляла 33 дБмкВ/м (напряжение на входе приемника - 5 дБмкВ) и обуславливалась напряженностью поля шума эфира (29 дБмкВ/м) и собственного шума приемника, приведенного к напряженности поля входного сигнала (31 дБмкВ/м).

Достигнутая эквивалентная напряженность поля шумов измерительной установки является достаточной для регистрации напряженности поля внешних помех от значения 30 дБмкВ/м (и более). Это значение является пороговым для декодирования при выполнении DRM приемника в соответствии с минимальными требованиями по чувствительности в диапазоне НЧ, которые составляют 46 дБмкВ/м [118] (требуемое ОСШ для декодирования 16 дБ).

Напряженность поля помех рассчитывается с учетом шумов измерительной установки в предположении их некоррелированности на основании измеренного

напряжения на входе приемника, коэффициента передачи измерительной магнитной антенны (48 дБ) и коэффициента передачи предварительного усилителя приемника (10 дБ).

При всех измерениях проводился контроль спектра принимаемого сигнала, который показал, что сосредоточенные спектральные компоненты в полосе приема отсутствуют и помехи носят шумовой характер.

Помехи от энергосберегающих осветительных ламп. Осветительная энергосберегающая лампа ERA F-SP 20 W мощностью 20 Вт, расположенная на расстоянии 2 м от измерительной антенны, при включении создает помеху на частоте 240 кГц с напряженностью поля 51 дБмкВ/м в течение 10 секунд (см. рисунок 6.17). Затем напряженность поля помех снижается и в установившемся режиме составляет 36 дБмкВ/м. На расстоянии 4 м от измерительной антенны помехи от данной лампы измерительной установкой не фиксируются. На частоте 153 кГц напряженность поля помехи от данной лампы постоянна и составляет 63 дБмкВ/м на расстоянии 2 м от измерительной антенны.

Три осветительных энергосберегающих лампы ERA F-SP 13 W мощностью 13 Вт, расположенные на расстоянии 4 м от измерительной антенны, создают помеху на частоте 153 кГц (занимающую половину контролируемого спектра) с напряженностью поля 41 дБмкВ/м.

Таким образом, энергосберегающие осветительные лампы могут создавать помехи приему сигнала DRM на границе зоны обслуживания при расположении антенны приемника на расстоянии 4 и менее метров.

Помехи от телевизионных приемников. Измерения проводились на частоте 237 кГц для того, чтобы сосредоточенные помехи, кратные частоте строчной развертки, не попадали в полосу пропускания приемника. Результаты измерений уровней помех от все еще широко распространенного в сельской местности телевизора 3-УСЦТ «Рекорд ВЦ 381Д» на различных расстояниях от кинескопа при различной ориентации измерительной антенны (параллельно « \Rightarrow » и перпендикулярно « \perp » экрану) приведены на рисунке 6.17 и в таблице 6.7. Графические зависимости напряженности поля помех, создаваемых

телевизионным приемником, от расстояния до измерительной антенны и ее ориентации, приведены на рисунке 6.18.

Таблица 6.7 – Напряженность поля помех от телевизора 3-УСЦТ "Рекорд ВЦ 381Д"

Расстояние до измерительной антенны, м	1		2		3		4	
	=	⊥	=	⊥	=	⊥	=	⊥
Измеренное напряжение на входе приемника, дБмкВ	30	24	21	14	16	-2	0	-4
Рассчитанное напряжение помех, дБмкВ	30	24	21	14	16	-5	-1,6	-11
Рассчитанная напряженность поля помех, дБмкВ/м	68	62	59	52	54	33	36,4	27

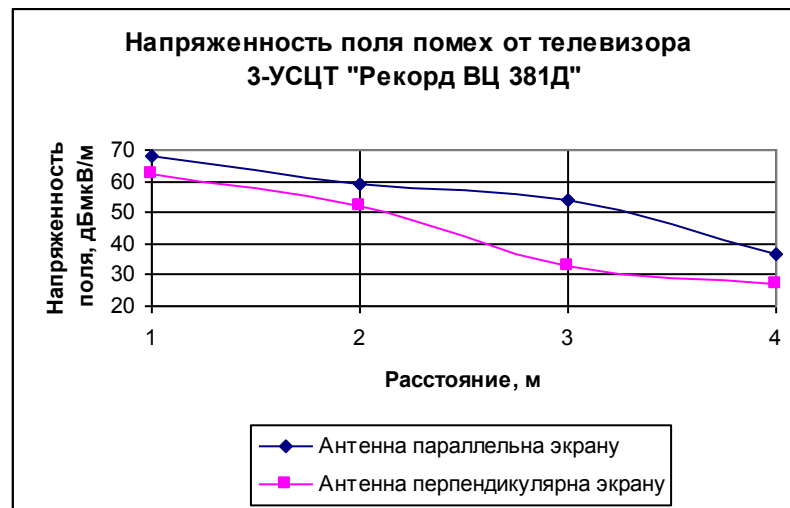


Рисунок 6.18 – Зависимость напряженности поля помех от телевизионного приемника от расстояния до измерительной антенны и ее ориентации

Как видно из таблицы 6.7, бытовые телевизионные приемники могут создавать помехи приему сигнала DRM на границе зоны обслуживания при расположении антенны приемника на расстоянии 4 и менее метров. При большем расстоянии помехи от них не превышают шумов эфира в «тихом месте» и не создают помех приему сигнала ЦРВ.

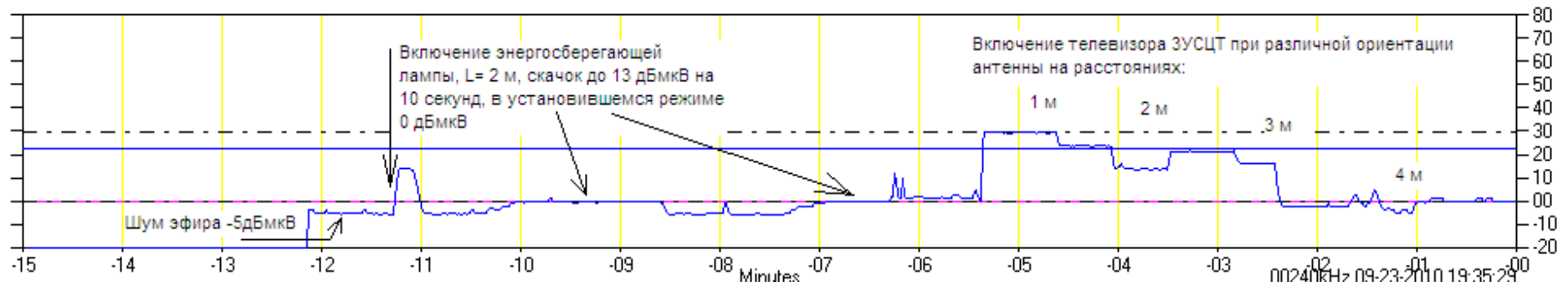


Рисунок 6.17 – Напряжение на входе измерительного приемника при включении бытовых электро и радио приборов: энергосберегающая лампа и телевизор ЗУСЦТ

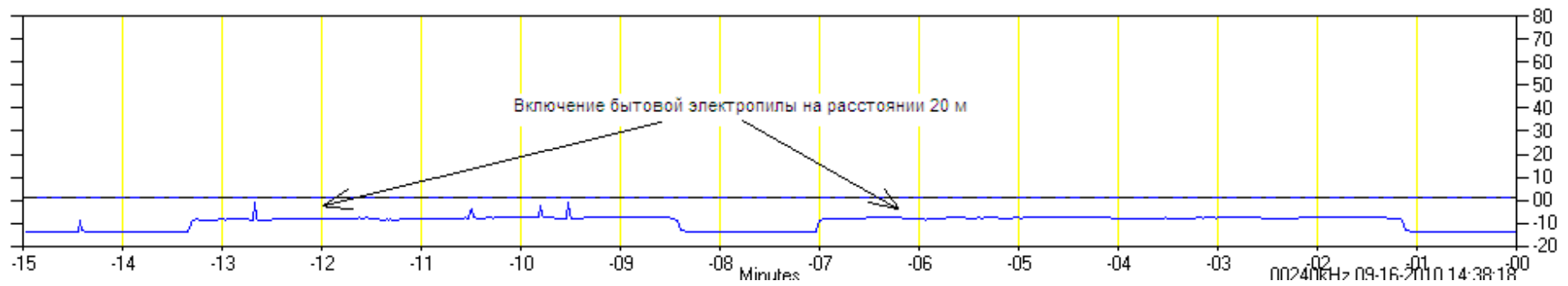


Рисунок 6.19 – Напряжение на входе измерит. приемника при включении бытовой электропилы на расстоянии 20 м

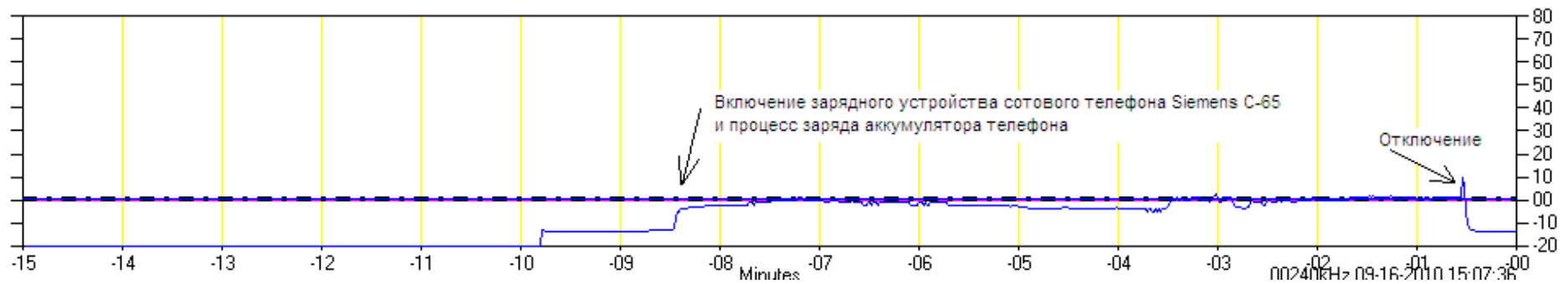


Рисунок 6.20 – Напряжение на входе измерительного приемника при включении зарядного устройства сотового телефона Siemens C-65 на расстоянии 5 м

Помехи от бытовых электроинструментов. Результаты измерений уровней помех от бытовой электропилы типа «Парма» мощностью 1,6 кВт, расположенной на расстоянии 20 м от измерительной антенны приведены на рисунке 6.19. Как видно из рисунка, при включении электропилы напряженность поля помех возрастает до 41 дБмкВ/м (данные измерения проводились с отключенным предварительным усилителем приемника).

Таким образом, бытовые электроинструменты с коллекторным двигателем могут создавать помехи приему сигнала DRM на границе зоны обслуживания при расположении антенны приемника на расстоянии 20 и более метров.

Помехи от зарядных устройств сотовых телефонов. Результаты измерений уровней помех от зарядного устройства сотового телефона Siemens C-65, расположенного на расстоянии 5 м от измерительной антенны приведены на рисунке 6.20. Как видно из рисунка, при включении зарядного устройства и в процессе заряда аккумулятора напряженность поля помех возрастает до 46...48 дБмкВ/м (данные измерения также проводились с отключенным предварительным усилителем приемника).

Таким образом, зарядные устройства сотовых телефонов могут создавать помехи приему сигнала DRM на границе зоны обслуживания при расположении антенны приемника на расстоянии 5 и более метров.

Помехи от систем зажигания автомобильных двигателей. Увеличения уровня помех от работающего на расстоянии 7 м от измерительной антенны двигателя автомобиля «Ока» не наблюдалось.

Также не наблюдалось срывов декодирования сигнала DRM от многочисленных, проезжающих мимо автомобилей различных марок при проведении эфирных измерений в одной из точек близко к границе зоны обслуживания.

Помехи от системы зажигания на расположенный в салоне легкового автомобиля приемник, подключенный к внутренней бортсети (питание от аккумулятора автомобиля) могут и должны устраняться соответствующей

фильтрацией цепей питания, экранировкой, выносом антенны за пределы салона и т.п.

Общий вывод по проведенным измерениям уровней бытовых помех от различного электрического и радиооборудования заключается в том, что даже в пределах жилого помещения (на расстояниях более 4 метров от источника) они не влияют на возможность приема сигнала ЦРВ на границе зоны обслуживания. При условии выполнения производителями бытовой техники положений рекомендации МСЭ [92], требующей, «чтобы общие помехи в приемнике от излучений и передач, осуществляемых в отсутствие соответствующего распределения частот в Регламенте радиосвязи, не превышали 1% общей мощности шума приемной системы», данный вид помех можно будет не учитывать.

6.4.3 Экспериментальные исследования зоны обслуживания DRM передатчика в диапазоне СЧ

Проводившиеся ранее в диапазоне СЧ исследования на передатчиках малой мощности (НИР «Проведение экспериментального цифрового звукового радиовещания в СЧ диапазоне с целью уточнения защитных отношений при совместной работе с аналоговыми сетями на переходный период в соответствии с решением ГКРЧ № 06-13-03-001 от 24.04.06», шифр «Волна-СЧ», договор между ОАО «НТЦ-РС» и ФГУП «РТРС» № 020906/НТЦ/ДТР-177-06 от 02.09.06, соисполнитель МТУСИ) имели целью уточнение величин защитных отношений, и не предполагали широкомасштабного исследования зоны покрытия в различных режимах работы.

Наиболее масштабные измерения в диапазоне СЧ в Московском регионе проведены под руководством и с участием автора в 2012 году в рамках НИР «Проведение тестовых испытаний и разработка рекомендаций по применению иерархической модуляции на сетях DRM радиовещания» (договор между ФГОБУ ВПО МТУСИ и ФГУП «РТРС» № ДТР-384-12/0602/12 от 21.09.12).

Их результаты отражены во вкладе РФ в МСЭ [137]. В частности, впервые в отечественной практике проведено широкомасштабное (более 80 точек измерений на расстояниях от 10 до 260 км от передатчика) 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.

6.4.3.1 Состав оборудования для проведения измерений в диапазоне СЧ

Для организации опытной зоны цифрового вещания использовался радиоцентр №9 МРЦ РТРС, расположенный в поселке Псарьки Ногинского района Московской области, на расстоянии 40 км от центра Москвы.

Радиопередающий тракт, используемый при измерении зон покрытия (рисунок 6.21) включает в себя:

- передатчик «Даймонд ПСЧ-100/50-02», $P_{\text{вых}}(AM) - 100$ кВт, $P_{\text{вых}}(DRM) - 40$ кВт, рабочая частота 549 кГц (рисунок 6.22а);
- кодер-модулятор фирмы TRANSRADIO типа DRM DMOD3;
- согласующее устройство (50/150 Ом);
- устройство сложения;
- антенну-мачту (рисунок 6.22б) с регулируемым распределением тока (АРРТ) высотой 217 метров (используется на частотах 549 кГц и 846 кГц через систему сложения передатчиков).

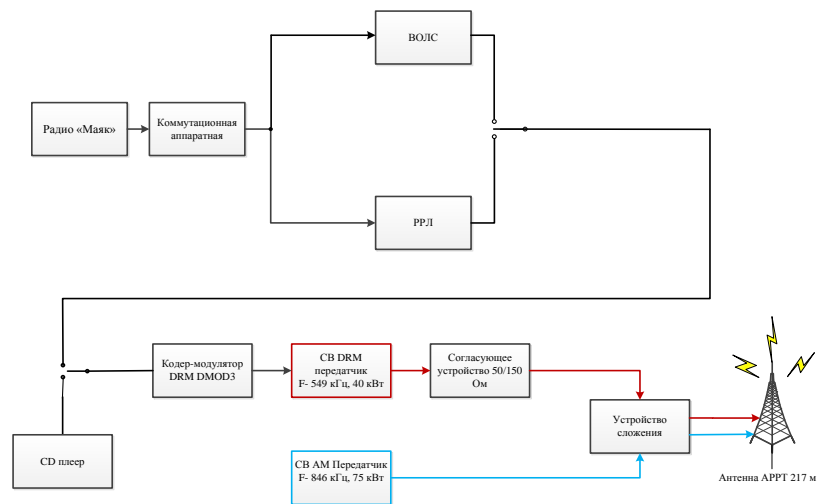
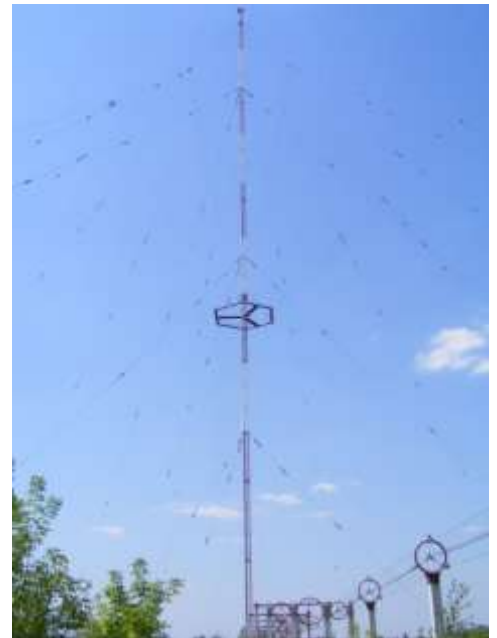


Рисунок 6.21 – Состав передающего тракта



а) Передатчик «Даймонд ПСЧ-100/50-02



б) Антенна АРРТ, h=217 м

Рисунок 6.22 – Элементы радиопередающего тракта

6.4.3.2 Расчет зоны покрытия

Расчет ожидаемой напряженности поля в светлое время суток на различных расстояниях от передатчика (рисунок 6.23), необходимый для предварительного определения границ исследуемой зоны обслуживания, проводился в программе «LFMFLOT», (программное обеспечение компании MICRODATA). Проводимость почвы была условно задана равной 3 мСм/м, проницаемость 10.

Как видно из рисунка 6.23, прогнозируемая напряженность поля земной волны в светлое время суток составляет: 80 дБмкВ/м на расстоянии 60 км (возможен прием в городе); 70 дБмкВ/м на расстоянии 100 км (зона гарантированного приема в сельской местности); 60 дБмкВ/м на расстоянии 150 км (зона уверенного приема с высокой скоростью передачи данных); 50 дБмкВ/м на расстоянии 240 км (зона возможного приема в отдельно взятых местах и без гарантии 98% декодирования в течении года). В северо-западном направлении на границе зоны обслуживания возможны помехи от соканального передатчика, работавшего из Санкт-Петербурга (Красный Бор).

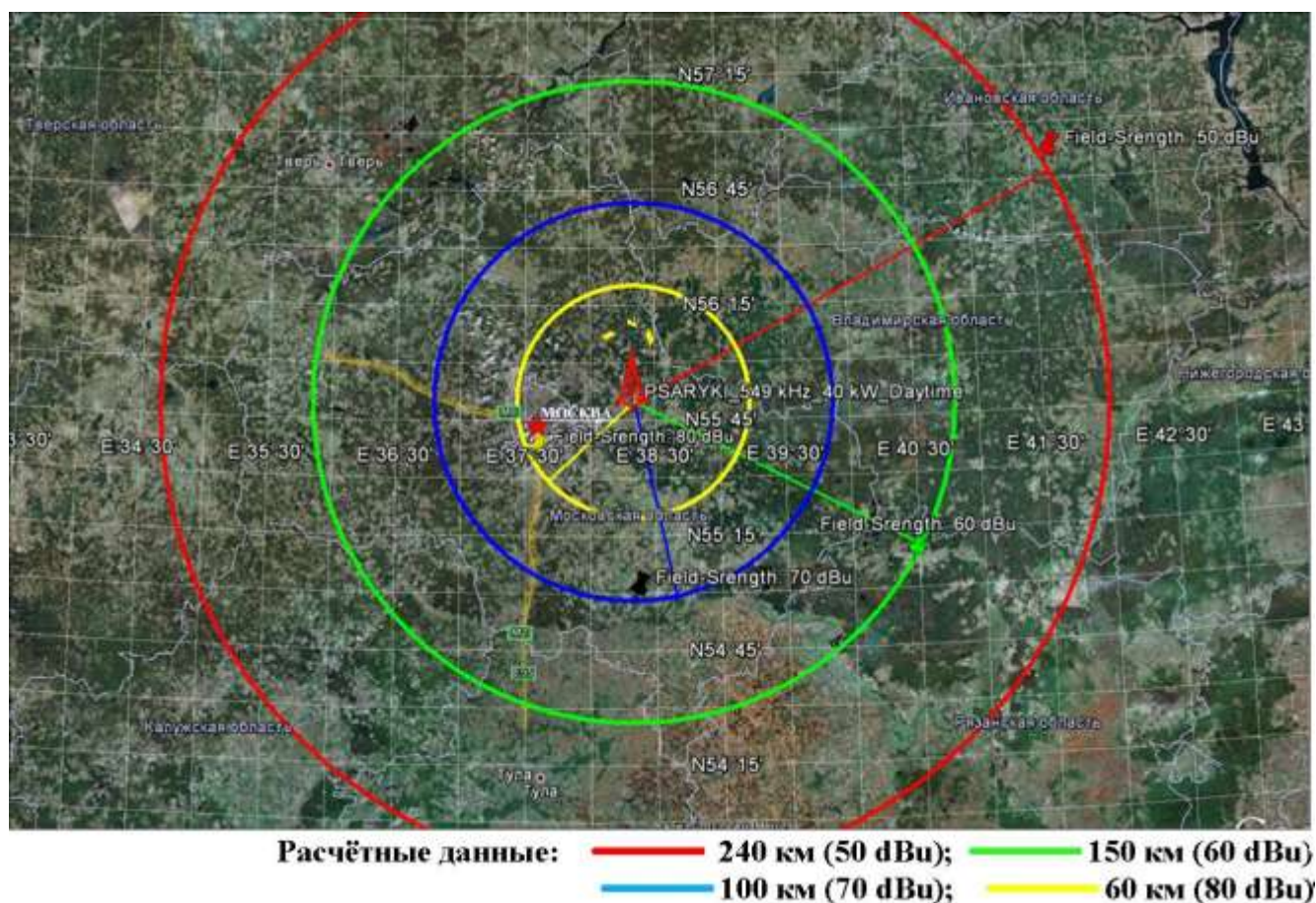


Рисунок 6.23 – Расчетные контуры напряженности поля земной волны

В соответствии с проведенными расчетами были выбраны радиальные направления измерений на восток, запад, север, юг и юго-восток от передатчика. Для уточнения вариаций напряженности поля от места к месту дополнительно проводились измерения по дугам в юго-восточном направлении на расстояниях от

передатчика 110 км, 150 км и 220 км. В качестве стационарных точек приема были оборудованы приемные пункты в МТУСИ («Мегаполис»), Мытищах (ЗАО «ВАТСОН», «Пригород») и на приемном центре РЦ-6 МРЦ РТРС («Сельская местность»).

Расположение на карте точек приемных позиций, в которых проводились измерения, показано на рисунке 6.24. Измерения проводились в дневное (красные метки) и ночное (синие метки) время по радиальным направлениям от передатчика (восток, запад, север, юг, юго-восток), и по дугам в юго-восточном направлении на расстояниях от передатчика 110 км, 150 км и 220 км, а также в стационарных точках приема (зеленые метки). Некоторые метки от ночных и дневных измерений, проводившихся в одном месте, накрывают друг друга.

Методика проведения измерений и выбора точек на местности аналогична описанной выше для диапазона НЧ. Дополнительно использовался измерительный приёмник DRM Fraunhofer DT-700 с калиброванной антенной.

После проведения измерений проводилась обработка записанных файлов с целью вычисления процента декодированных аудиоблоков. Далее приводятся результаты проведенных измерений.

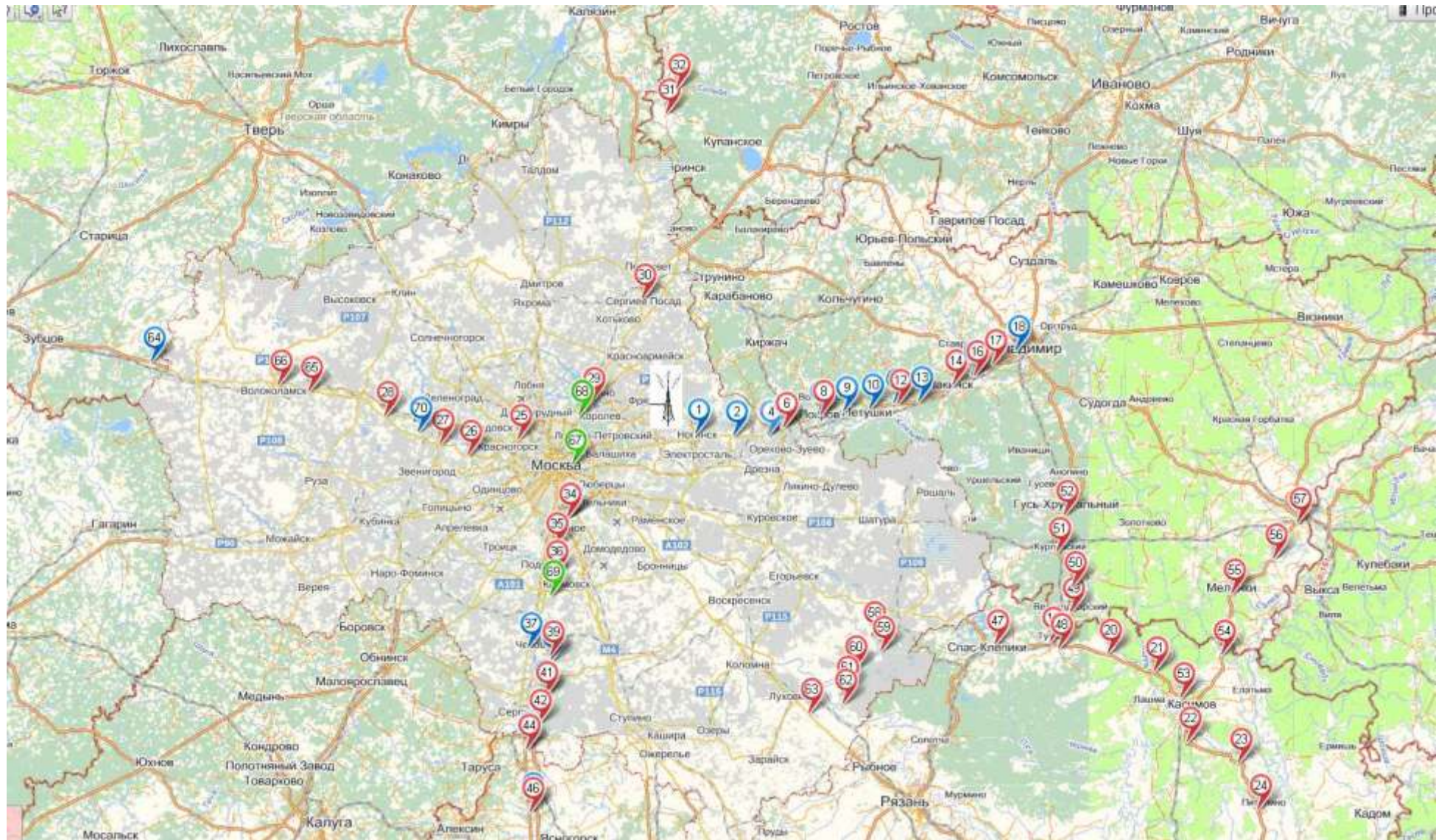


Рисунок 6.24 – Расположение на карте точек приемных позиций, в которых проводились измерения

6.4.3.3 Проведение измерений зон покрытия в светлое время суток

Для исследований стационарного приема в сельской местности выбрана полоса частот сигнала DRM 10 кГц, поскольку в этом режиме обеспечивается более высокое качество звукового контента (по сравнению с полосой 9 кГц скорость передачи данных на 10% выше), при практически равном, требуемом для декодирования ОСШ. Шаг сетки частот в диапазоне СЧ составляет 9 кГц, однако, в соответствии с [48], полоса модулирующих частот отечественных передатчиков в режиме АМ составляет 10 кГц, и занимаемая ими в эфире полоса частот равна 20 кГц. Таким образом, с формальной точки зрения принципы частотного планирования не нарушаются. Уровень помех сигналу DRM от АМ станций в соседних каналах практически не увеличивается ввиду малого содержания высоких частот в спектре вещательного сигнала. При переходе на повсеместное использование режима DRM в ряде случаев придется переходить на полосу частот 9 кГц, при этом все полученные результаты останутся действительными.

Результаты измерений напряженности поля и ОСШ в светлое время суток в режиме DRM приведены на рисунке 6.25. Обозначения на рисунке: В – Восток, С – Север, Ю – Юг, З – Запад, ЮВ – Юго-восток. Также приведены пороговые значения для 100% декодирования для поверхностной волны в режимах 64QAM(3), 64QAM(0) и 16QAM(0). По результатам измерений напряженности поля можно подобрать наиболее соответствующие значения действующей проводимости и проницаемости земной поверхности, которые для данного сезона составляют 1,5 мСм/м; 20 (красная кривая на рисунке 6.25).

Результаты измерений при мощности передатчика в режиме DRM 40 кВт (АМ – 75 кВт) в светлое время суток показали следующее:

– в режиме АМ 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 АМ был равен 13,4 дБ;

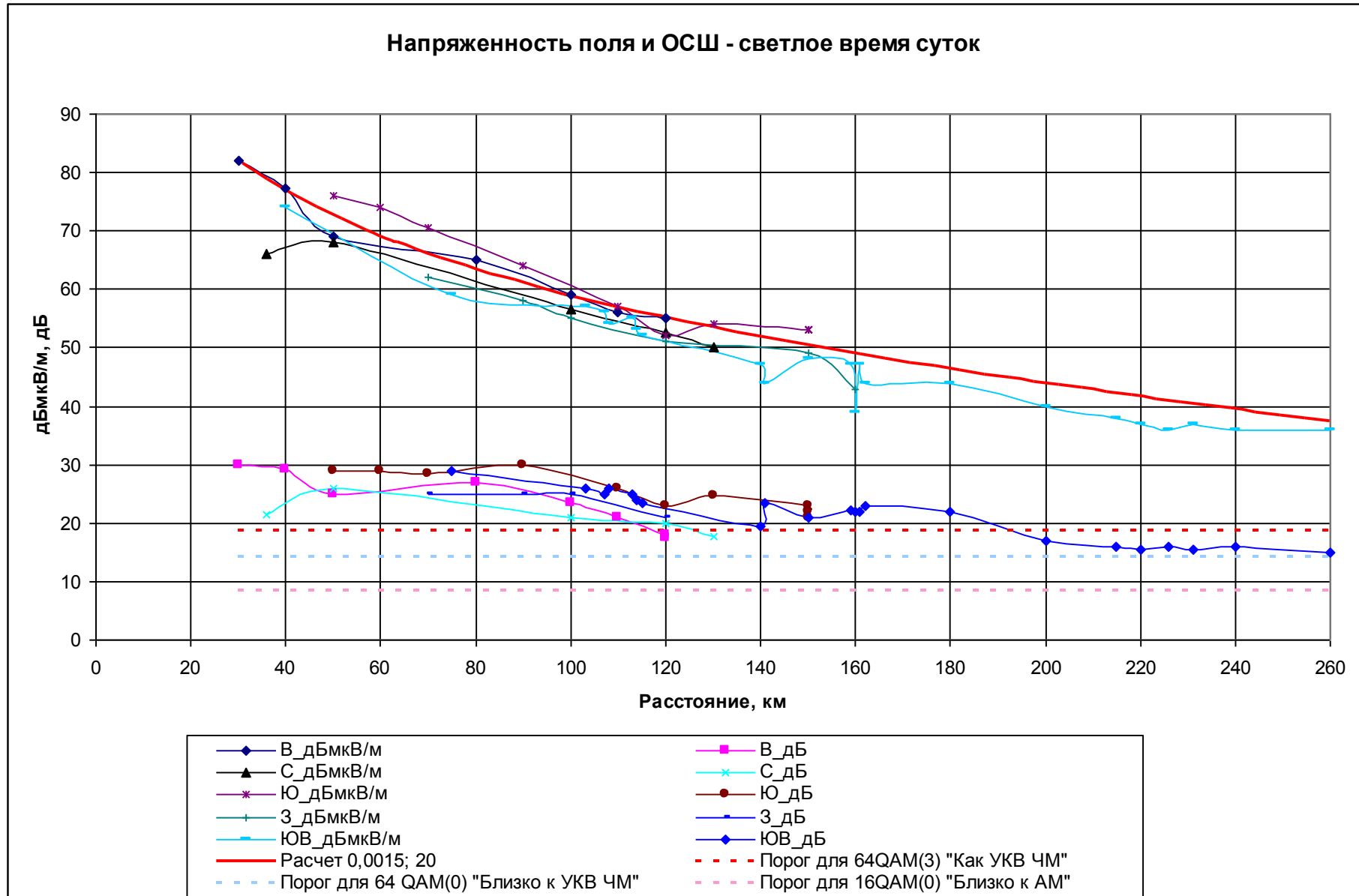


Рисунок 6.25 – Напряженности поля и ОСШ в светлое время суток

– 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 четыре раза больше, чем в режиме АМ, при мощности DRM-передатчика в два раза меньше;

– 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 девять раз больше, чем в режиме АМ, при мощности DRM-передатчика в два раза меньше;

– напряженность поля атмосферных шумов составляла в среднем 22 дБмкВ/м, что не превышает приведенного на рисунке 6.10 максимального значения.

Сравнение результатов измерений в режиме 64QAM(0) (260 км с требуемым для декодирования ОСШ 14,1 дБ) с рассчитанным по предлагаемой выше методике радиусом зоны обслуживания для режима 16QAM(1) (203 км, требуемое ОСШ 10,7 дБ) доказывает, что имеется достаточный «запас» на возможный рост напряженности поля атмосферных шумов и вариации напряженности поля от места к месту.

Таким образом, разработанные технические основы методики частотно-территориального планирования сетей радиовещания DRM диапазона СЧ подтверждены экспериментальными исследованиями.

6.4.3.4 Проведение измерений зон покрытия в темное время суток

Результаты измерений напряженности поля и ОСШ в режиме DRM в темное время суток приведены на рисунке 6.26. Обозначения на рисунке: В – Восток, Ю – Юг, З – Запад. Также приведены пороговые значения для 100% декодирования для комбинации земной и ионосферной волн в режимах 64QAM(3), 64QAM(0) и 16QAM(0), и расчетные кривые напряженности поля поверхностной (красным цветом) и ионосферной (зеленым цветом) волн. Напряженность поля ионосферной волны рассчитана в соответствии с [163].

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 АМ на расстоянии 150 км от передатчика ОСШ составлял 8...12 дБ с заметным на слух федингом.

На расстояниях от 80 до 120 км для данного передатчика с данной антенной на частоте 549 кГц располагается зона фединга, особенности приема в которой исследовались более подробно и изложены ниже.

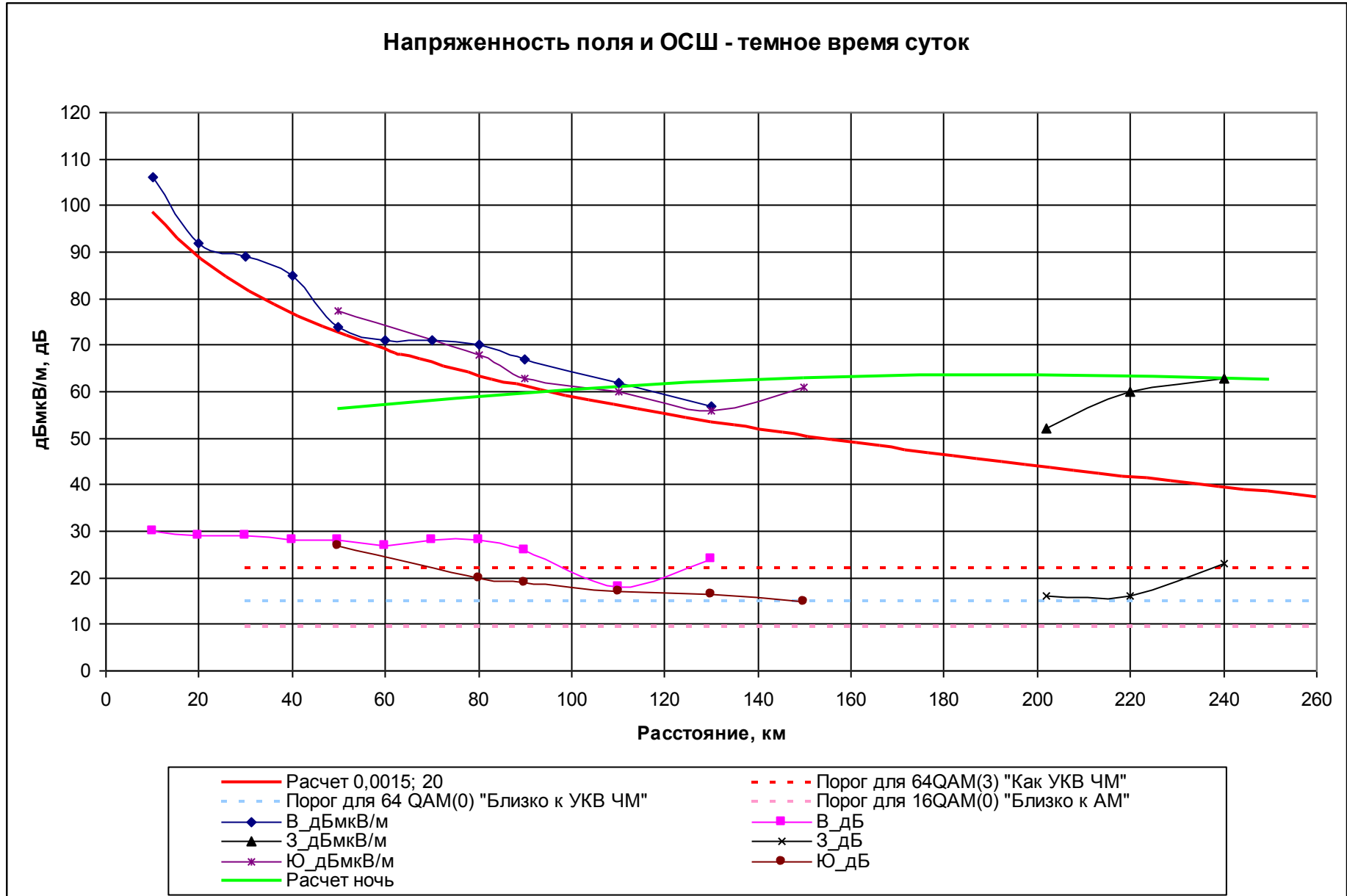


Рисунок 6.26 – Напряженности поля и ОСШ в темное время суток

6.4.4 Исследование цифрового радиовещания DRM в диапазоне СЧ в зоне фединга

Одной из известных проблем при организации аналогового радиовещания в диапазоне средних волн (СЧ) является существенное ухудшение качества приема в темное время суток в зоне ближнего фединга, которая может начинаться на расстояниях менее 100 км от передатчика. Данный эффект обусловлен сложением поверхностной и пространственной волн и может существенно сокращать зону обслуживания передатчика.

В цифровом радиовещании стандарта DRM используется OFDM сигнал, который достаточно эффективно декодируется в условиях многолучевого приема. Спецификация стандарта DRM [123] рекомендует для использования в диапазоне СЧ в темное время суток режим помехоустойчивости «В» с длительностью защитного интервала 5,33 мс. При этом модель канала распространения для этого случая (канал № 2, комбинация земной и ионосферной волн) содержит два луча с задержкой распространения 1 мс. В соответствии с [161], на частотах ниже 700 кГц на расстояниях 100-200 км от передатчика приход пространственных волн, задержанных более, чем на 2 мс относительно земной волны, с существенной для декодирования интенсивностью не прогнозируется.

В связи с этим используемый в светлое время суток режим помехоустойчивости «А», имеющий длительность защитного интервала 2,66 мс, потенциально также может быть использован и в темное время суток. Требуемое для декодирования отношение сигнал-шум (ОСШ) в модели канала распространения № 2 в режиме «А» в среднем на 0,5 дБ ниже, чем в режиме «В» [159]. Доступные скорости цифрового потока в режиме «А» существенно выше, чем в режиме «В» (см. таблицы 1.1, 1.2 [165]). Это позволяет при использовании полосы частот 10 кГц и модуляции 64 QAM получать качество звукового контента, «близкое к УКВ ЧМ» (22,1 кбит/с) или «как УКВ ЧМ» (26,5 кбит/с) при скоростях помехоустойчивого кодирования 0,5 и 0,6. Для этого в точке приема требуется обеспечение ОСШ 14,9 дБ и 16,3 дБ, соответственно.

В режиме «В» для получения сопоставимого качества звукового контента придется использовать скорости помехоустойчивого кодирования 0,6 (20,1 кбит/с) и 0,71 (24,7 кбит/с), что потребует в точке приема обеспечения величины ОСШ 16,9 дБ и 19,7 дБ, т.е. на 2-3 дБ выше, чем в режиме «А». Напомним, что для повышения ОСШ на 3 дБ мощность передатчика необходимо увеличить в два раза.

Кроме того, прием в диапазоне СЧ в ночное время, как правило, осложняется наличием помех в совмещенном канале от удаленных станций. При наличии помехи в совмещенном канале величина абсолютного защитного отношения для режима «А», 10 кГц, 64QAM(1) составляет 6,7 дБ, а для режима «В» с аналогичными параметрами 7,3 дБ [159]. Это легко пояснить тем, что в режиме «А» не используются три центральные поднесущие, а в режиме «В» не используется всего одна.

На основании вышеизложенного можно предположить, что использование в данных условиях режима помехоустойчивости «А» при сопоставимом качестве звукового контента будет более энергетически выгодным, чем использование режима «В».

Для практической проверки данного предположения в рамках проводившихся в 2012 году широкомасштабных исследований приема сигнала DRM в диапазоне СЧ в Московской области под руководством и с участием автора были проведены экспериментальные исследования с целью определения режимов помехоустойчивости, более предпочтительных для использования в зоне фединга в темное время суток.

При проведении исследований использовался установленный в Ногинском районе Московской области DRM передатчик с выходной мощностью 40 кВт, работающий на антенну-мачту с регулируемым распределением тока (АРРТ) высотой 217 метров на частоте 549 кГц. В качестве приемного оборудования использовался контрольно-измерительный приемник DT-700 фирмы «Fraunhofer» с калиброванной антенной.

Описанные выше измерения, проведенные в темное время суток, показали, что для данного передатчика с данной антенной на частоте 549 кГц зона фединга

располагается на расстояниях от 80 до 120 км. Точка измерений была выбрана на расстоянии 97 км от передатчика, где напряженность поля поверхностной и ионосферной волн была примерно одинакова. Данное обстоятельство подтверждается тем фактом, что измеренная на АМ сигнале глубина фединга в этой точке была достаточно большой и достигала 14 дБ (таблица 6.8).

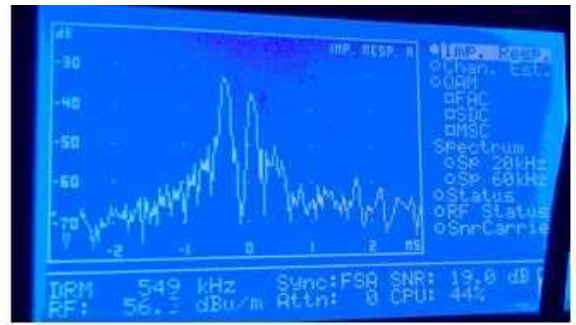
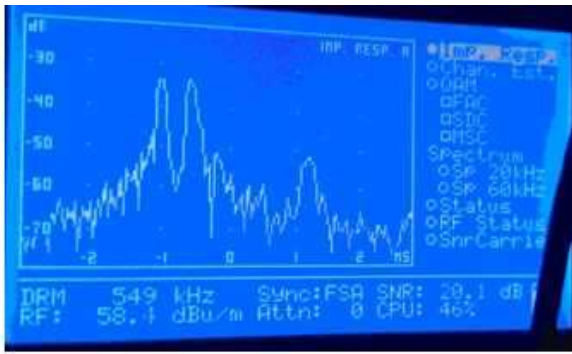
Иллюстрации к приему сигнала DRM в зоне фединга приведены на рисунке 6.27. На примере импульсного отклика канала можно увидеть равенство поверхностной и ионосферной волн с задержкой между ними около 0,4 мс. Ионосферная волна непостоянна во времени. Другие лучи, задержанные на большее время, имеют существенно меньшую интенсивность. Передаточная функция канала имеет вид, характерный для частотно-селективного фединга.

На центральной частоте спектра полезного сигнала наблюдается помеха от несущей частоты по совмещенному каналу (549 кГц) от АМ станции (Германия) с напряженностью поля (измеренной в отсутствии полезного сигнала) 40...44...47 дБмкВ/м. Напряженность поля полезного сигнала составляла 54...58 дБмкВ/м, и требуемые защитные отношения выполнялись для уровня защиты (1), а для уровней защиты (2) и (3) могли нарушаться при росте интенсивности помехи и ослаблении полезного сигнала.

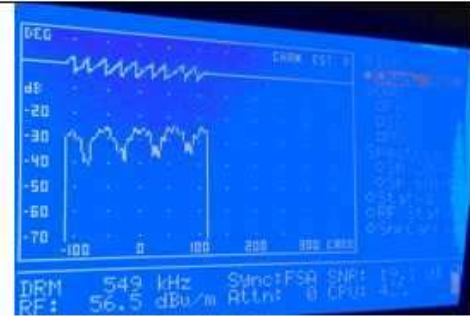
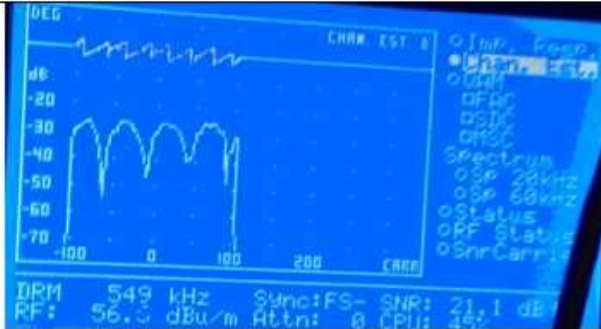
Таким образом, проводимые измерения соответствуют реальной помеховой обстановке «на границе возможного приема» и позволяют сравнить помехоустойчивость режимов «А» и «В».

Таблица 6.8 – Иллюстрация глубины фединга в режиме АМ

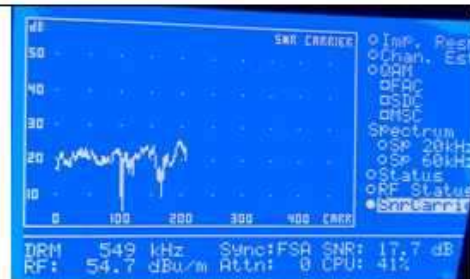
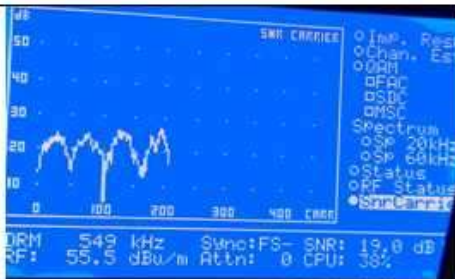
Время UTC	Минимальное напряжение на входе приемника [дБмкВ]	Среднее напряжение на входе приемника [дБмкВ]	Максимальное напряжение на входе приемника [дБмкВ]
23:36	13,2	20,4	23,4
23:37	9,4	18,7	23,6



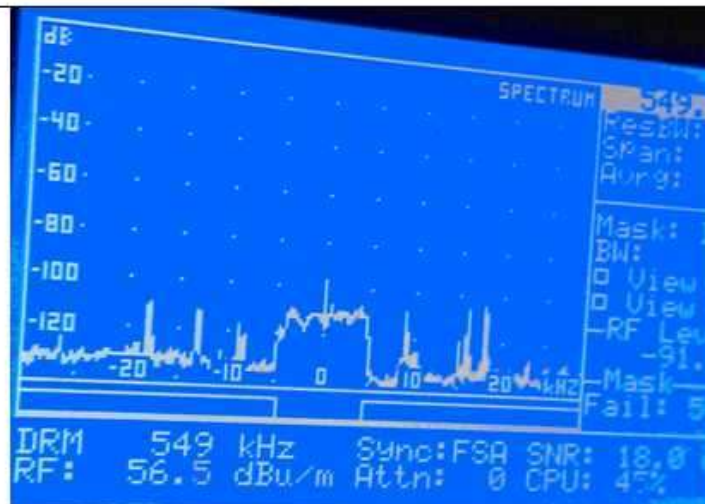
Примеры импульсных откликов канала в режиме DRM



Примеры передаточных функций канала в режиме DRM



Примеры «SNR спектров» - значений ОСШ по отдельным поднесущим



Спектр входного сигнала в полосе частот 60 кГц

Рисунок 6.27 – Иллюстрации к приему сигнала DRM в зоне фединга

Для выполнения этого сравнения проводилось поочередное измерение в режимах помехоустойчивости «А» и «В» с различными скоростями кодирования. Запись файлов RSCI (Receiver Status and Control Interface [124]) осуществлялась для каждого фрагмента с последующим вычислением процента корректно декодированных аудиоблоков. Напомним, что по принятым в международной практике критериям, «работоспособность» ЦРВ стандарта DRM определяется по параметру декодирования 98% аудиоблоков [131]. Результаты измерений приведены в таблице 6.9 и иллюстрированы на рисунке 6.28.

Таблица 6.9 – Процент корректно декодированных аудиоблоков в различных режимах помехоустойчивости

Режимы помехоустойчивости/ Кодовая скорость	«А»	«В»
64QAM(0)	100%	100%
64QAM(1)	100%	100%
64QAM(2)	99,93%	97,68%
64QAM(3)	97,49%	63,27% 90,21%

Как видно из таблицы 6.9, в режимах 10 кГц, 64QAM(0) и 64QAM(1) в обоих режимах помехоустойчивости («А» и «В») наблюдалось 100% декодирование.

В режимах 64QAM(2) и 64QAM(3) при практически равной напряженности поля полезного сигнала больший процент декодированных аудиоблоков обеспечивался в режиме «А».

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования 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. Данное решение позволит расширить зону обслуживания поверхностной волной, которая в темное время суток в режиме АМ сокращается на величину зоны фединга. Результаты проведенных исследований опубликованы автором в [14], а также вошли во вклад в МСЭ, подготовленный администрацией связи РФ [137].


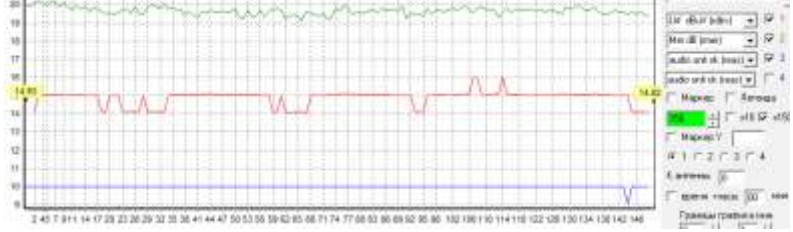
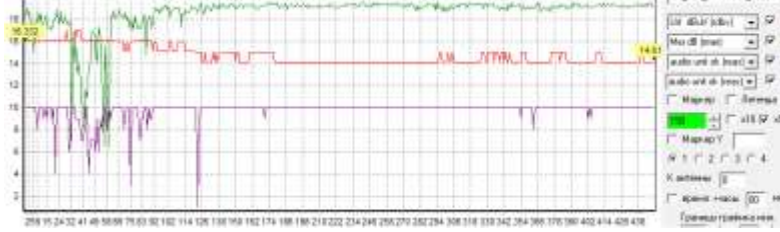
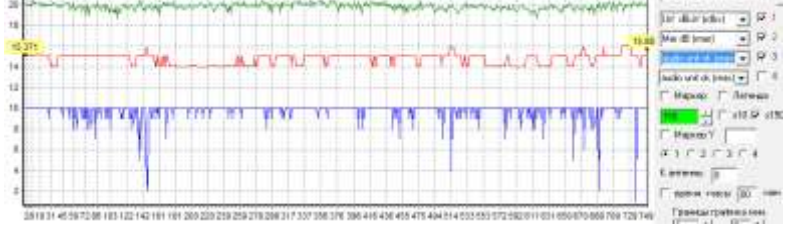
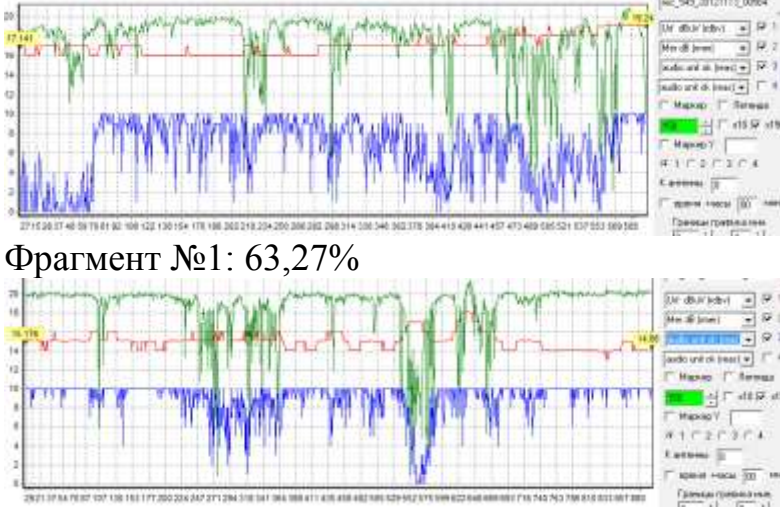
Режимы помехоустойчивости	«А»	«В»
64QAM(1) Декодирование:	 <p>100%</p>	<p>Изображение отсутствует из-за повреждения файла с записью данных. По результатам слухового контроля во время измерений декодирование 100%.</p> <p>100%</p>
64QAM(2) Декодирование:	 <p>99,93%</p>	 <p>97,68%</p>
64QAM(3) Декодирование:	 <p>97,49%</p>	 <p>Фрагмент №1: 63,27%</p> <p>Фрагмент №2: 90,21%</p>

Рисунок 6.28 – Сравнение режимов помехоустойчивости «А» и «В» (коэффициент пересчета антенны $K=41$ дБ)

6.4.5 Мобильный приём в различных ландшафтных условиях – низины, ЛЭП, тоннели

Измерения в условиях движения на автомобиле проводились с использованием а/м «Газель», оборудованного преобразователем напряжения 12В/220В для питания измерительного приёмника Fraunhofer DT-700, и штывревой антенной высотой 1,4 метра на магнитном основании, установленной на крыше автомобиля. Использовалась ширина полосы радиочастот 10 кГц, режим помехоустойчивости «А», модуляция 64QAM, уровень помехозащиты «3».

Следует отметить, что при использовании штывревой антенны уровень помех на входе приемника существенно выше, чем при использовании магнитной антенны. В связи с этим, на больших расстояниях от передатчика при малой напряженности поля полезного сигнала можно было не ожидать декодирования сигнала DRM, в том числе из-за помех от системы зажигания автомобиля и от преобразователя напряжения питания измерительного приемника. По этой причине исследование влияния различных ландшафтных условий (низин, мостов, ЛЭП и т.д.) проводилось на сравнительно небольшом удалении от передатчика. В дальнейшем следует предусмотреть разработку магнитной антенны диапазонов НЧ и СЧ для использования в автомобилях.

Результаты приема в движении представлены на рисунках 6.29, 6.30. Для получения значений напряженности поля к приведенному на графиках входному напряжению приемника (U , дБмкВ) необходимо прибавить коэффициент пересчета для штывревой антенны K , который по результатам калибровки составлял на данной частоте 47,5 дБ.

Как показали проведенные измерения, плавные изменения ландшафта не оказывают существенного влияния на параметры приема. При проезде под мостами автодорожных развязок и под высоковольтными ЛЭП наблюдаются кратковременные (на единицы секунд) срывы декодирования. При этом при проезде под мостами напряженность поля снижается на величину от 10...15 дБ до 30 дБ в зависимости от протяженности перекрытой части дороги. Более подробно

этот эффект проиллюстрирован на рисунке 6.31, где показаны результаты приема при проезде под мостами в укрупненном масштабе. Как видно из рисунка, зона снижения напряженности поля имеет несколько большую протяженность, чем габариты пересекающего дорогу моста. Соответственно уменьшается ОСШ, и с задержкой на время перемерения наблюдается срыв декодирования аудио.

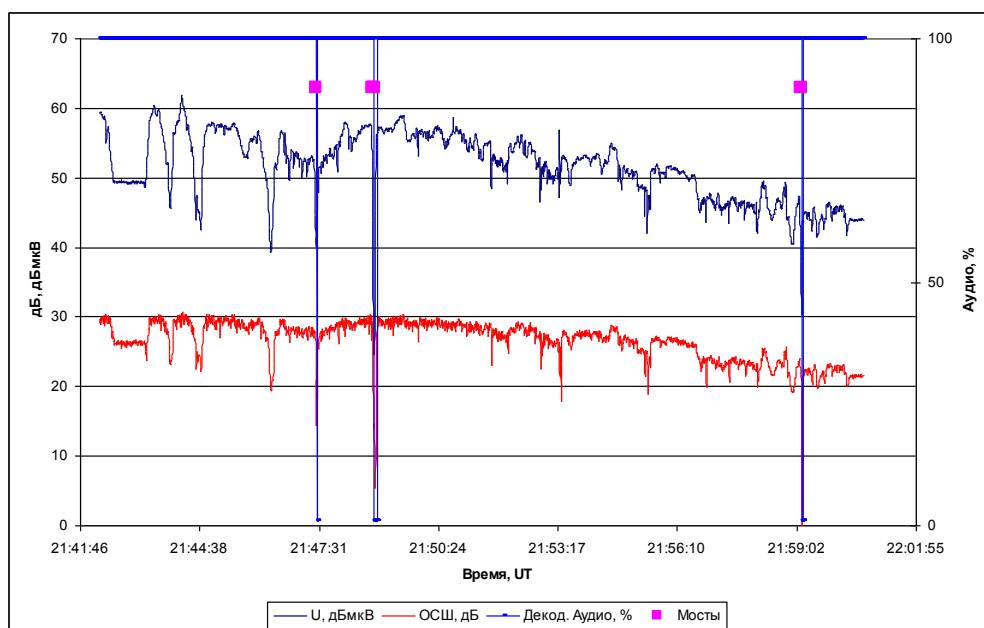


Рисунок 6.29 – Результаты приема в движении на расстояниях от 10 до 20 км от передатчика

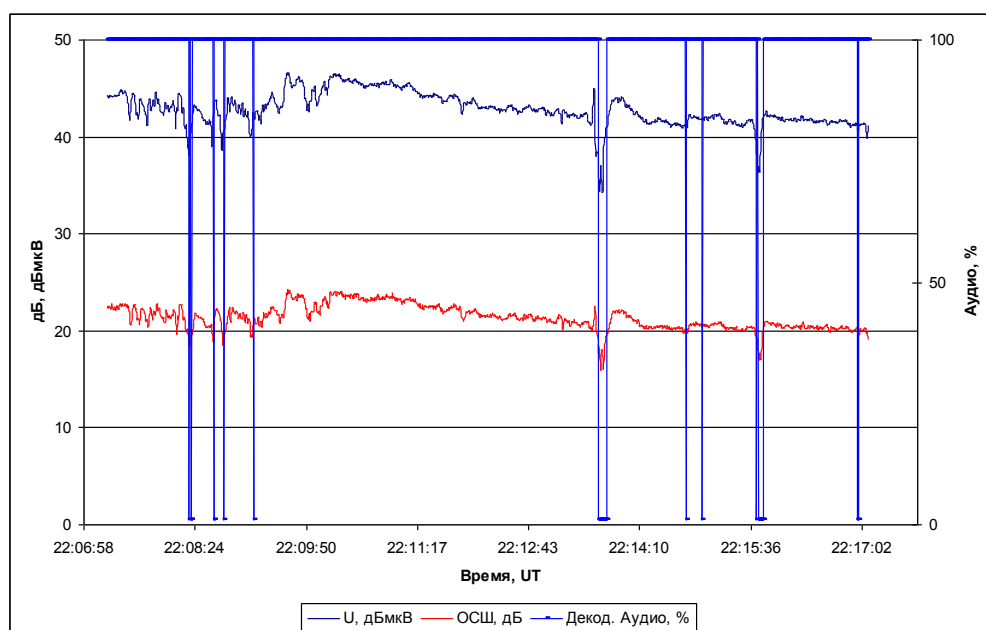


Рисунок 6.30 – Результаты приема в движении на расстояниях от 20 до 30 км от передатчика

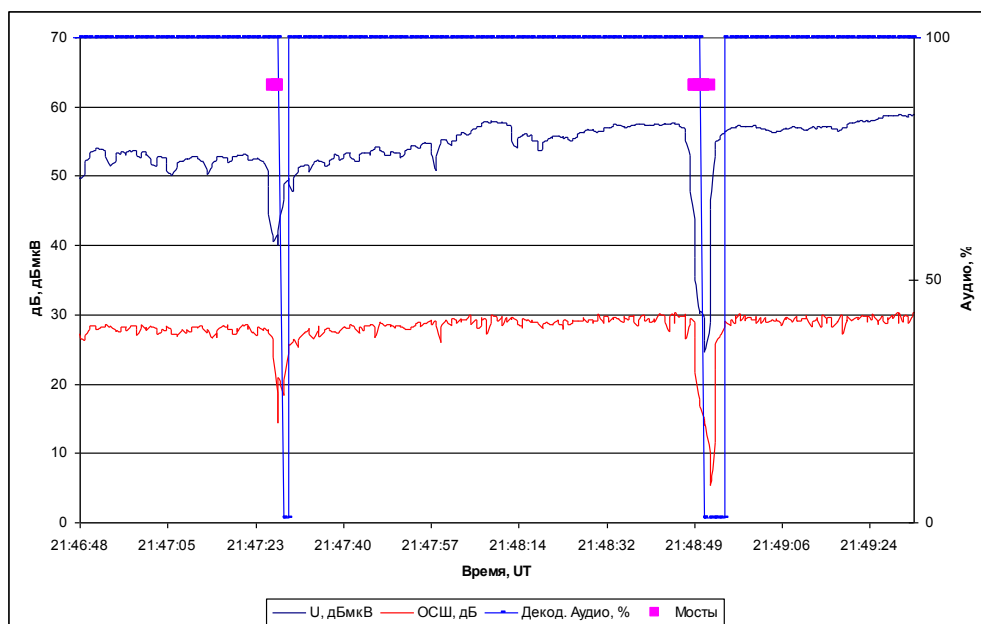


Рисунок 6.31 – Результаты приема в движении при проезде под мостами в укрупненном масштабе

6.5 Выводы

1. Определены факторы, которые необходимо учитывать при частотно-территориальном планировании сетей цифрового радиовещания стандарта DRM диапазонов НЧ и СЧ. 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.

2. На основании проведенных экспериментальных исследований определена референсная точка вариаций напряженности поля земной волны для ЦФО РФ. Предлагается определять референсную точку для принятого при планировании в Московском регионе значения 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.

3. Проведен анализ напряженности поля промышленных помех и атмосферных шумов. Рассмотрено распределение атмосферных шумов по территории Земли. Рассчитаны максимальные ожидаемые напряженности поля атмосферных шумов, превышаемые 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). Результаты расчетов показали:

- напряженность поля атмосферных шумов в северных широтах (Тикси, Норильск) существенно ниже шумов приемника и промышленных шумов в сельской местности;

- в тропических широтах (Хошимин) напряженность поля атмосферных шумов близка к максимальной и в диапазоне СЧ превышает собственный шум DRM-приемника на 14-23 дБ;

- 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.

4. Проведенные экспериментальные исследования зон обслуживания сетей радиовещания DRM диапазонов НЧ и СЧ показали:

- измеренный уровень шумов в сельской местности определяется атмосферными шумами и не превышает рассчитанных максимальных значений;

- проведенные измерения уровней бытовых помех от различного электрического и радиооборудования показали, что различные виды оборудования могут создавать помехи, но большинство из них на расстоянии более четырех метров от источника не влияют на возможность приема сигнала ЦРВ на границе зоны обслуживания;

– разработанные технические основы методики частотно-территориального планирования сетей цифрового радиовещания стандарта DRM диапазонов НЧ и СЧ подтверждены экспериментальными исследованиями и могут служить основой для разработки методики расчета ЭМС РЭС.

5. Результаты измерений зоны обслуживания в диапазоне СЧ при мощности передатчика в режиме DRM 40 кВт (АМ – 75 кВт) в светлое время суток показали следующее:

– в режиме АМ 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 АМ 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 четыре раза больше, чем в режиме АМ, при мощности DRM-передатчика в два раза меньше;

– 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 девять раз больше, чем в режиме АМ, при мощности DRM-передатчика в два раза меньше.

6. 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 АМ на расстоянии 150 км от передатчика ОСШ составлял 8...12 дБ с заметным на слух федингом.

7. 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.

8. Проведенные экспериментальные исследования мобильного приема в различных ландшафтных условиях показали, что плавные изменения ландшафта не оказывают существенного влияния на параметры приема. При проезде под мостами автодорожных развязок и под высоковольтными ЛЭП наблюдаются кратковременные (на единицы секунд) срывы декодирования. При этом при проезде под мостами напряженность поля снижается на величину от 10...15 дБ до 30 дБ в зависимости от протяженности перекрытой части дороги.

9. В целом, проведенные исследования и измерения показали, что цифровое радиовещание стандарта DRM обеспечивает большую зону покрытия с лучшим качеством аудиоконтента при меньшей мощности передатчика, чем традиционное радиовещание с АМ.

7 РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ СЕТИ ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ РФ

7.1 Введение

Задача обеспечения информационной безопасности населения является одной из приоритетных для каждого государства. Для РФ эти задачи отражены в «Доктрине информационной безопасности Российской Федерации», утвержденной Президентом РФ в 2000 году. Одним из инструментов обеспечения информационной безопасности является государственное телерадиовещание.

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 «с охватом до 98,3 процента населения в местах постоянного проживания» [89].

Тем не менее, остающиеся без возможности приема общедоступных телевизионных каналов 1,7% – это более 2,4 миллиона человек, что превышает численность населения таких стран как Словения, Латвия или Эстония. Более того, уточнение в тексте ФЦП про «места постоянного проживания» далеко не случайно. Действительно, строить объекты телевещания (при радиусе их действия от 5 до 50 км) в ненаселенной местности экономически неоправданно. 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. На этих территориях могут располагаться дачные и садовые участки (не относящиеся к местам постоянного проживания), на которых в летнее время проживают миллионы граждан РФ. По этим территориям проходят автодороги, по которым проезжают часть водителей из более 50 миллионов транспортных средств, зарегистрированных в РФ. На этих территориях работают

геологи, охотники, лесозаготовители, старатели, моряки и т.д. Очевидно, что отсутствие объектов вещания РТРС на этих территориях приводит не только к отсутствию телевещания, но и к отсутствию радиовещания в диапазоне ОВЧ, имеющего в силу схожести законов распространения радиоволн аналогичные радиусы зон покрытия. Очевидно, что при отсутствии инфраструктуры, на этих территориях также нет и мобильной связи, и тем более нет источников доступа к сети интернет. Следует также напомнить, что 20% территории РФ находится за полярным кругом, где прием сигналов телерадиовещания с геостационарных спутников затруднен или невозможен.

Таким образом, более половины территории РФ оказывается неохваченной телерадиовещанием и передачей сигналов массового оповещения, что делает еще более актуальным сказанное в 2001 году в [62]: «Отсутствие доступа к общероссийскому радиовещанию лишает людей оперативной национально-значимой информации, жители окраинных регионов вынуждены порой слушать чужие радиостанции: китайские – на Дальнем Востоке, украинские – на юго-западе России и так далее».

Более того, гарантированная подача сигналов оповещения в зону чрезвычайной ситуации возможна только с соседних (непострадавших) территорий, поскольку инфраструктура цифрового телевещания в зоне ЧС может быть нарушена. Сделать это можно только с использованием мощного радиовещания в диапазонах НЧ, СЧ или ВЧ.

Именно средствами мощного радиовещания решалась задача информирования населения страны в предыдущие годы. Существовавшая (в настоящее время отключенная) аналоговая сеть внутреннего мощного вещания в 2005 году насчитывала 30 передатчиков диапазона НЧ с суммарной мощностью более 14 МВт и 224 передатчика диапазона СЧ с суммарной мощностью более 28 МВт. В том числе 23 передатчика имели мощность 1 МВт и более. 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. Даже при использовании сетей

синхронного радиовещания, применявшихся на ряде частот, большего результата в аналоговом режиме достичь было практически невозможно.

Переход на цифровое радиовещание стандарта DRM, предусмотренный изначальной редакцией ФЦП [89], теоретически позволял улучшить качество покрытия при одновременном существенном снижении мощностей передатчиков. В частности, планировалось использование 17 передатчиков в диапазоне НЧ, 79 – в СЧ и 30 – в ВЧ. По мере накопления практического опыта использования ЦРВ в различных диапазонах частот, полученного в ряде НИР, проведенных с участием и под руководством автора МГУСИ по заказу РТРС, идеология построения сети мощного радиовещания изменялась. Так, в Системном проекте РТРС «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации» (2011 год) в качестве основного принципиального подхода к построению сети вещания было предложено развитие сети длинноволновых передатчиков: 27 – НЧ, 6 – СЧ, 17 – ВЧ. При этом вещание на удаленные и малонаселенные территории планировалось осуществлять в диапазоне ВЧ, что не могло гарантировать возможность приема в периоды нередких в северных широтах ионосферных возмущений. Также не были в достаточной степени проработаны вопросы одновременной работы 27 передатчиков диапазона НЧ при наличии всего 15 номиналов радиочастот в этом диапазоне в темное время суток, что не позволяло обеспечить круглосуточное покрытие территории.

В результате нехватки средств на ЦТВ из ФЦП был исключен раздел радиовещания, однако возвращение к этой теме не теряет актуальности, а с учетом излагаемого далее позволяет существенно более рационально организовать сеть мощного вещания.

В данной главе работы проводится анализ предпочтительных для использования в различных географических регионах радиочастот, предлагаются основные принципы построения топологии сети цифрового радиовещания РФ и приводится пример ее расчета.

7.2 Предпочтительные для использования частоты и радиусы зон обслуживания в различных регионах

Напряженность поля земной волны с увеличением расстояния от передатчика уменьшается [164] 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 в предыдущей главе, также увеличивается с понижением частоты. Скорости изменения обоих процессов могут быть различны. Поэтому необходим анализ «предпочтительности» использования радиочастот для ЦРВ. Для этого преобразуем кривые распространения земной волны, рассчитанные в соответствии с [164], с помощью свободно распространяемой МСЭ программы GRWAVE, в кривые ОСШ, учитывающие частотную зависимость напряженности поля атмосферных шумов. Данное преобразование более удобно при рассмотрении цифрового вещания в целом, поскольку для декодирования сигнала DRM требуется не только определенное значение напряженности поля, но и требуемое для используемого режима помехоустойчивости значение ОСШ.

Для географических регионов, в которых напряженность поля атмосферных шумов ниже собственных шумов приемника, такое преобразование будет представлять собой прибавление константы (определяемой шумами приемника) и результат ожидается достаточно очевидный: чем ниже частота, тем больше радиус зоны обслуживания.

Проведем данную процедуру на примере Московского региона ($\delta = 0,003$ См/м, $\varepsilon = 4$). Пересчитанные в ОСШ кривые распространения земной волны для различных частот диапазонов НЧ и СЧ, с учетом полученного выше распределения атмосферных шумов по частоте для излучаемой мощности 1 кВт, приведены на рисунке 7.1, из которого следует, что на расстояниях до 15 км наибольшее значение ОСШ обеспечивается на частоте 1 МГц, а 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.

Практическое использование данных кривых аналогично использованию кривых МСЭ: из необходимого для декодирования в заданном режиме помехоустойчивости значения ОСШ (например, 16 дБ) вычитается мощность передатчика (в децибелах относительно 1 кВт). Полученное значение откладывается на оси ординат и проводится горизонтальная линия до пересечения с кривой соответствующей частоты, тем самым определяется радиус зоны обслуживания. Так, для передатчика мощностью 40 кВт (16 дБкВт, горизонтальная линия по уровню «0 дБ») радиус зоны обслуживания на частоте 1 МГц составит 200 км, а на частоте 150 кГц – 490 км, что увеличивает площадь зоны обслуживания в шесть раз.

Следует отметить, что помимо вышеизложенного необходимо учитывать и рассмотренные выше сезонные изменения напряженности поля полезного сигнала для заданных климатических условий и характера растительного покрова, а также вариации напряженности поля от места к месту (в диапазоне СЧ) [161]. Однако эта процедура может проводиться уже более строго, без добавления эмпирических «запасов».

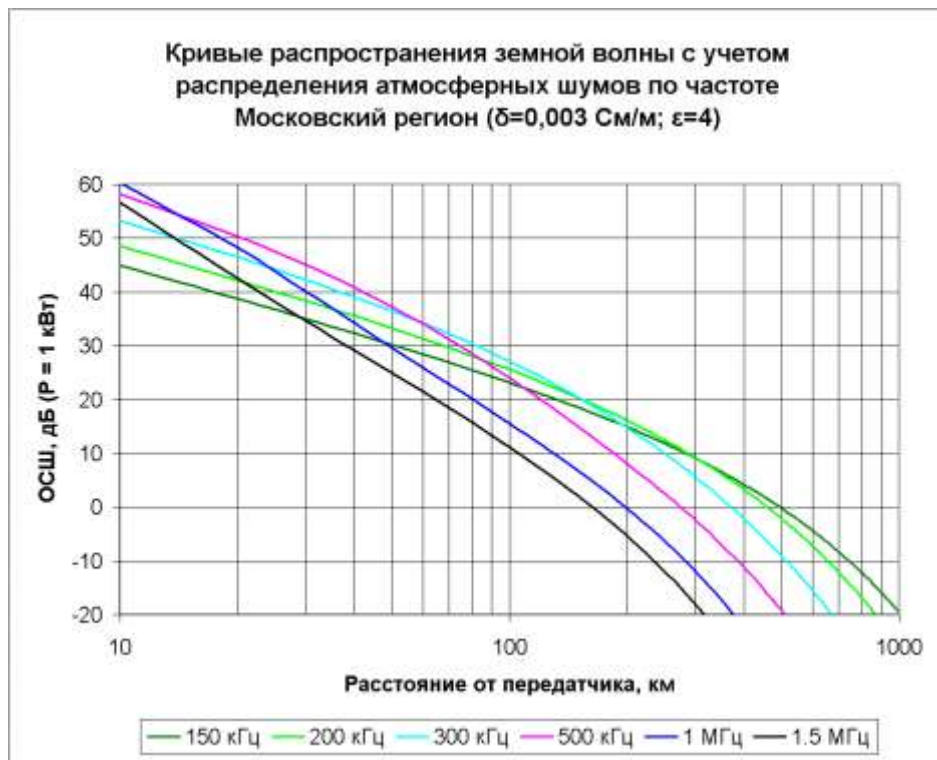


Рисунок 7.1 – Пересчитанные в ОСШ кривые распространения земной волны с учетом распределения атмосферных шумов по частоте для излучаемой мощности 1 кВт для Московского региона

Рассмотренные в предыдущей главе примеры распределения напряженности поля атмосферных шумов по географическим регионам дают основания полагать, что на большей части территории РФ они будут меньше собственных шумов приемника. Однако речь идет о северных широтах и азиатской части страны, преимущественно районах вечной мерзлоты, занимающих более 11 млн км², а это около 65% территории России [72]. Распространение земной волны в диапазонах НЧ и СЧ в этих условиях имеет свои особенности [71]. Так, в диапазоне СЧ сезонные вариации напряженности поля полезного сигнала носят обратный характер по сравнению со средними широтами РФ: напряженность поля уменьшается в зимнее время. «Затухание радиоволн с расстоянием для частоты 171 кГц на 10-15 дБ больше, чем в средней полосе России» [71].

В терминах расчетов напряженности поля земной волны все эти эффекты могут быть интегрально учтены изменением кажущейся проводимости почвы.

Например, в диапазоне НЧ при значении $\delta = 0,001$ См/м, указанная разница в затухании обеспечивается в интересующем вещателей интервале расстояний от 300 до 600 км. На рисунке 7.2 приведены пересчитанные в ОСШ кривые распространения земной волны для северных широт, а также для сравнения пунктиром даны аналогичные кривые для Московского региона.

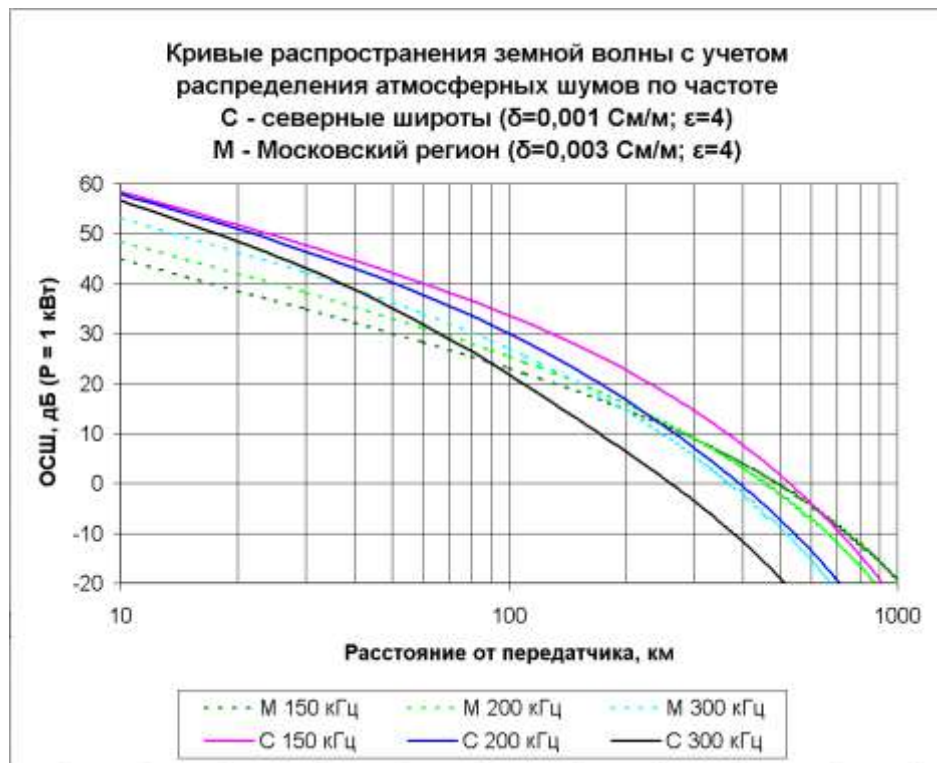


Рисунок 7.2 – Пересчитанные в ОСШ кривые распространения земной волны с учетом распределения атмосферных шумов по частоте для излучаемой мощности 1 кВт для северных широт РФ и Московского региона

Из рисунка 7.2 явственно следует, что в северных широтах в нижней части диапазона НЧ, несмотря на большее затухание распространяющегося поверхностной волной полезного сигнала, из-за малой напряженности поля атмосферных шумов на расстояниях до 600 км значение ОСШ больше, чем в Московском регионе. Равенство радиусов зон обслуживания наступает на расстоянии 600 км. Для обеспечения такого радиуса зоны в обоих случаях потребуется передатчик мощностью 100 кВт (20 дБкВт). Наглядно видно и то, что использовать верхнюю половину диапазона НЧ для обеспечения больших

радиусов зон обслуживания (более 250 км) в северных широтах будет энергетически менее выгодно, чем в Московском регионе.

Приведенные примеры, с одной стороны, доказывают необходимость проведения строгих расчетов для каждого региона, в котором планируется внедрение DRM-вещания, с другой – раскрывают потенциал использования DRM в диапазоне НЧ для обеспечения качественным радиовещанием и передачи сигналов оповещения малонаселенных и удаленных территорий, в том числе на Крайнем Севере.

Примеры проведенных расчетов радиусов зон обслуживания, учитывающих атмосферные радишумы, в зависимости от частоты для различных географических регионов приведены на рисунке 7.3. Расчеты проведены для мощности передатчика 40 кВт и требуемого для декодирования ОСШ = 16 дБ. Примеры приводятся для следующих географических условий:

- точка в северных широтах (Тикси, с низким уровнем шумов и низкой проводимостью почвы $\delta = 1$ мСм/м);
- точка в средних широтах (Московский регион, средний уровень шумов, проводимость почвы $\delta = 3$ мСм/м);
- две точки в тропическом регионе с высоким уровнем шумов и проводимостью почвы $\delta = 10$ мСм/м (Хошимин и Йола (Нигерия)).

Как видно из рисунка 7.3, в регионах с низкими и средними шумами, несмотря на увеличение напряженности поля атмосферных радишумов с уменьшением частоты, использование низких частот обеспечивает существенно большие радиусы зон обслуживания. В тропических регионах с высоким уровнем атмосферных радишумов, кривые имеют экстремум в верхней части диапазона НЧ.

Таким образом, 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.

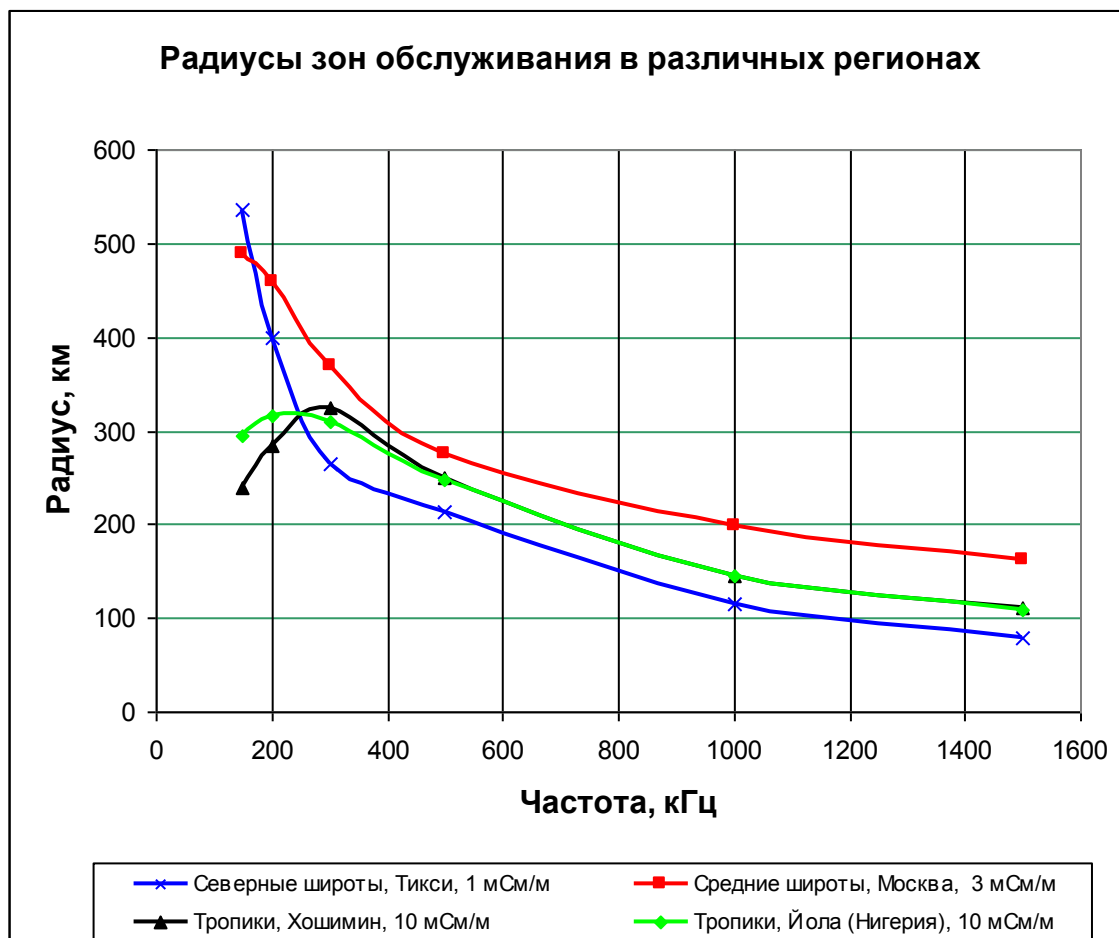


Рисунок 7.3 – Радиусы зон обслуживания, учитывающие атмосферные радишумы, для различных географических регионов. Мощность передатчика 40 кВт, требуемое для декодирования ОСШ = 16 dB

Проведенный анализ показывает, что диапазон НЧ, выделенный МСЭ для радиовещания в Регионе 1 (Европа, Африка, Россия, страны СНГ и Монголия) может быть успешно использован для организации DRM радиовещания на большие территории. Особенно актуально его применение в регионах с низкой плотностью населения и отсутствующей телекоммуникационной инфраструктурой. Результаты данных исследований опубликованы автором в работах [16, 170].

7.3 Преимущества использования диапазона НЧ для ЦРВ в высоких широтах

Разработанные в последние годы автором основы корректного планирования сетей DRM вещания в диапазонах НЧ и СЧ в светлое время суток (глава 6 настоящей работы, [16, 19]) позволили по-новому взглянуть на проблему покрытия северных территорий. В частности, показано, что на территории РФ применение стандарта DRM энергетически более выгодно, чем традиционного АМ вещания. Также стандарт DRM предусматривает возможность передачи помимо аудио сервиса еще и дополнительной цифровой мультимедийной информации. Такая информация может иметь не только развлекательное значение – передача изображений певцов, но и прикладное – передача карт погоды, ледовой обстановки на Северном морском пути и т.д. Несмотря на рост напряженности поля атмосферных шумов с понижением частоты, наибольшие радиусы зон обслуживания достигаются в диапазоне НЧ, в котором земная волна может распространяться независимо от солнечной активности на расстояния более 600 км над сушей и более 1200 км над морем.

Данные особенности распространения длинных волн позволяют наиболее экономично и надежно обеспечить покрытие больших малонаселенных территорий и морских акваторий, в том числе Северного морского пути. Действительно, в диапазоне ОВЧ радиус зон покрытия не превышает 50-70 км, и строительство передатчиков в малонаселенных районах оказывается нерентабельным, а в акваториях – невозможным. В диапазоне ВЧ в северных широтах наблюдаются регулярные нарушения распространения радиоволн, обусловленные солнечной активностью, что не позволяет обеспечить гарантированную надежность. Геостационарные спутники не видны в высоких широтах (от 81° до полюсов), а на широтах выше 75° наблюдаются очень низко над горизонтом, скрываясь за выступающими объектами и рельефом местности. Спутниковые системы на высокоэллиптических орбитах требуют применения нескольких космических аппаратов для обеспечения круглосуточного вещания, что не позволяет окупить систему при малой плотности населения, а также

зачастую требуют применения приемной антенны с функцией слежения, что на порядок удорожает абонентский приемник [67].

Таким образом, затраты на систему ЦРВ стандарта DRM в диапазоне НЧ в этом случае оказываются минимальными из всех возможных вариантов и могут быть еще более уменьшены при совместном использовании существующих радиомачт объектов навигационной системы «Чайка» и передатчиков дифференциальной поправки GPS/ГЛОНАСС.

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.

7.4 Решение проблемы темного времени суток

В темное время суток 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 [163] следующим образом:

$$E = V + E_0 - Lt = V + G_s - L_p + A - 20 \log(p) - L_a - L_t - L_r ,$$

где E – годовая медиана получасовых медианных значений напряженности поля (дБ(мкВ/м)) для данной симомотивной силы передатчика, V , в данное время t относительно захода или восхода Солнца, в зависимости от ситуации. В диапазоне НЧ коэффициент потерь, учитывающий влияние солнечной активности, $L_r = 0$. Для трасс, проходящих по территории России, поправка на усиление за счет влияния моря не учитывается ($G_s = 0$), так же как и потери за

счет деполяризации ($L_p = 0$). Интересующие нас максимальные значения медианной напряженности поля мешающего сигнала достигаются при часовом коэффициенте потерь $L_t = 0$ и для передатчика с нормированной излучаемой мощностью 1 кВт (0 дБ кВт) могут быть выражены следующим образом:

$$E = A - 20 \log(p) - L_a,$$

где A – константа (на НЧ $A = 110,2$);

p – дальность наклонного распространения, км;

L_a – коэффициент потерь, отражающий влияние ионосферного поглощения и связанных с ним факторов:

$$L_a = k (p / 1000)^{1/2},$$

где коэффициент основных потерь k определяется выражением:

$$k = (2\pi + 4,95 \tan^2 \Phi),$$

Φ – геомагнитная широта (диполя) средней точки исследуемой трассы. Если Φ больше $+60^\circ$, k вычисляется для $\Phi = +60^\circ$.

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 7.4. Как видно из рисунка 7.4, 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 в [163] для диапазона НЧ следующим образом:

$$\Delta(10) = 6,5 \text{ дБ};$$

$$\Delta(1) = 11,5 \text{ дБ}.$$

Большее значение вариаций приводится в [104], откуда следует, что для достижения надежности приема 98%, необходимо принимать запас на вариации, равный 16 дБ.

Как видно из рисунка 7.4, 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.

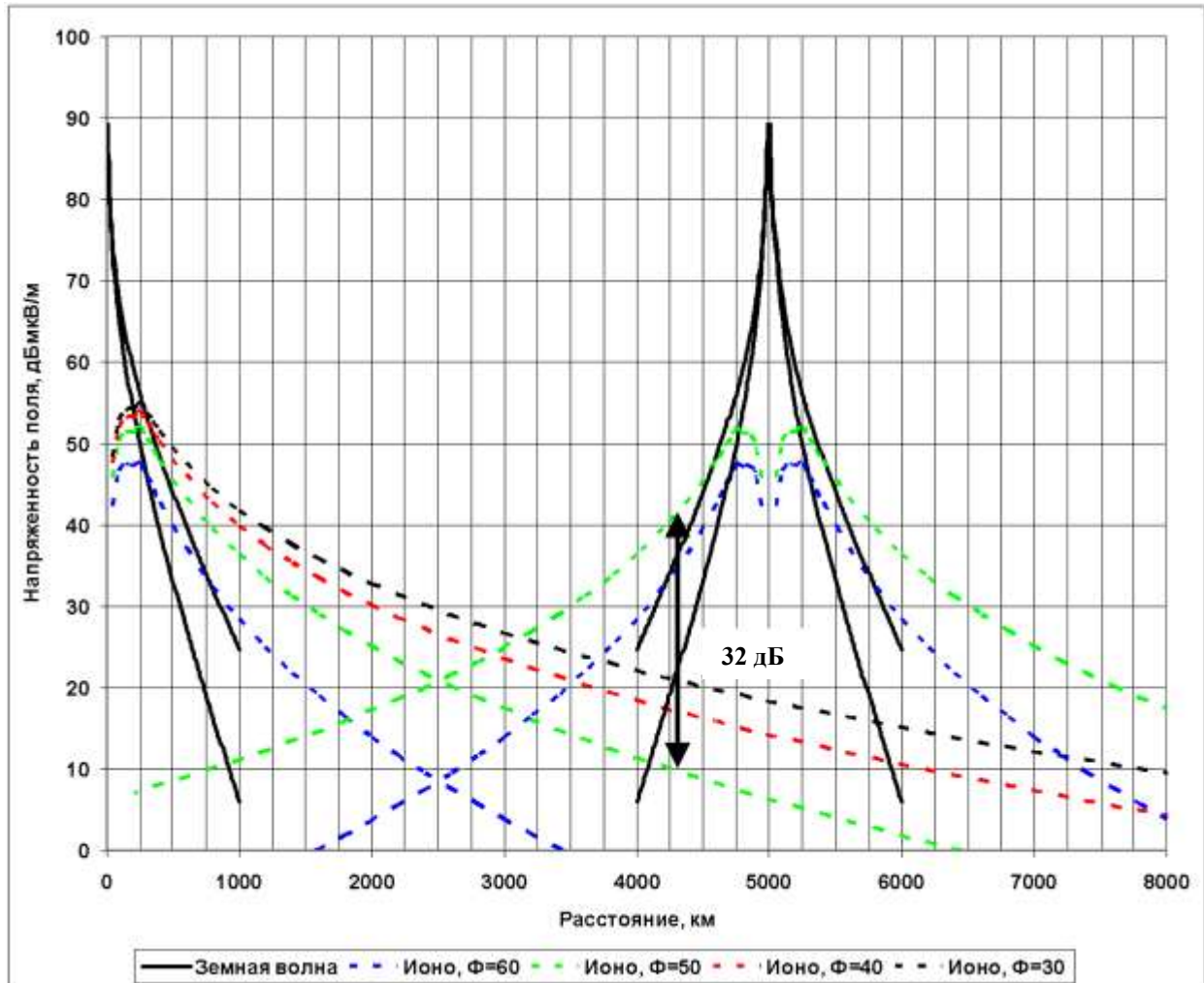


Рисунок 7.4 – Ход напряженности поля земной и ионосферной волн (для передатчика 1 кВт). Для напряженности поля земной волны показаны два варианта – для разных частот или для разных проводимостей почвы

В этой ситуации при традиционном построении сети вещания частотно-территориальное планирование не может быть осуществлено на больших территориях, так как имеющихся в НЧ диапазоне 15 номиналов радиочастот оказывается недостаточно (рисунок 7.5). По этой причине не всем странам в 1 Регионе МСЭ было «разрешено» иметь НЧ передатчики, а для некоторых предписывалось снижение мощности в темное время суток. 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.

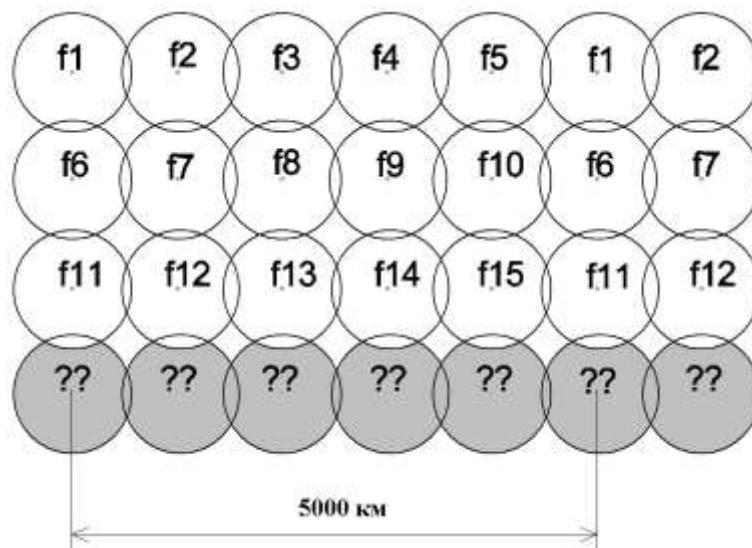


Рисунок 7.5 – Иллюстрация невозможности осуществления частотно-территориального планирования на больших территориях при традиционном построении сети вещания. Имеющихся в диапазоне НЧ 15 частот недостаточно

Для решения данной задачи предлагается 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 7.6.

Из таких крупно-кластерных синхронных зон можно построить глобальную сеть вещания РФ, используя всего восемь радиочастот (рисунок 7.7). Остающиеся частоты можно использовать для организации второго мультиплекса

радиовещания – там, где территория суши имеет вытянутый характер по одной из осей (восточная часть РФ), или там, где нет покрытия ЦТВ.

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. Внедрение может быть начато с восточных территорий в рамках имеющихся частотных присвоений.

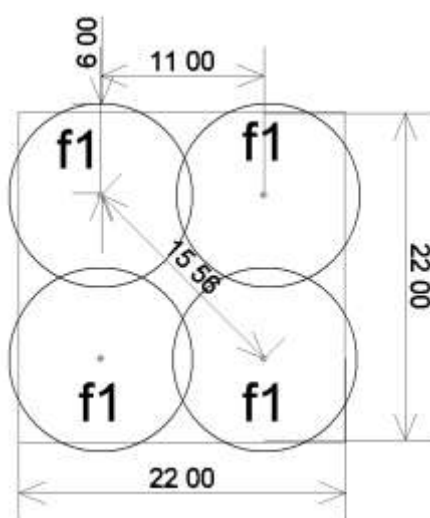


Рисунок 7.6 – Пример зоны с синхронным вещанием для диапазона НЧ

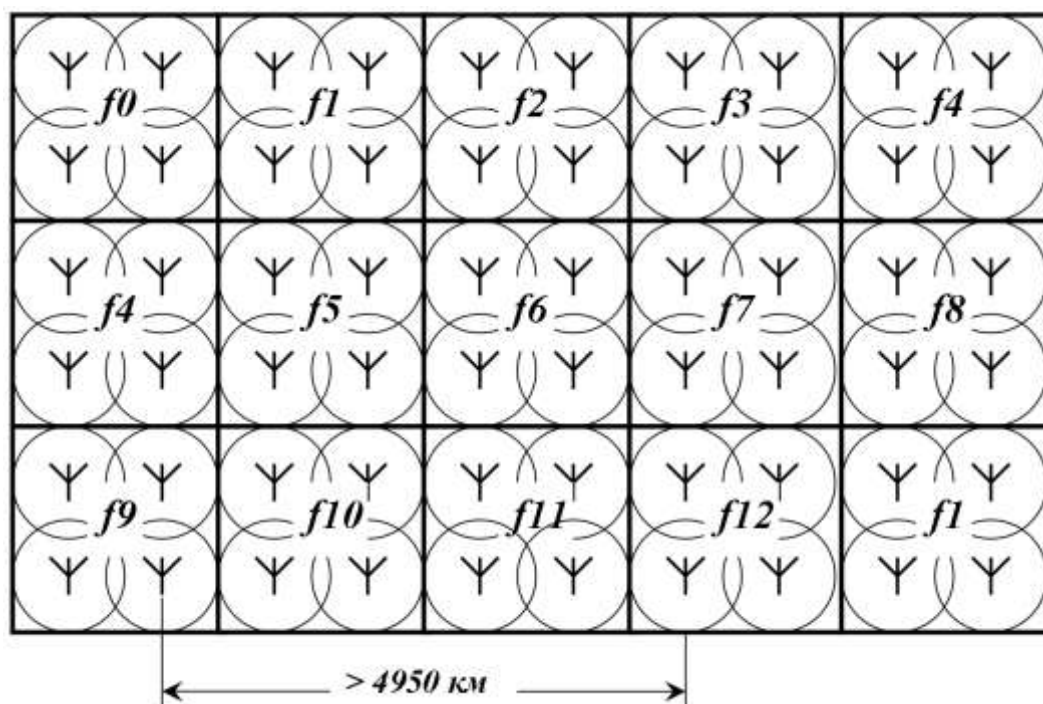


Рисунок 7.7 – Глобальная сеть вещания из крупно-кластерных синхронных зон.

Для РФ используются частоты f1 – f8

Обобщенный пример глобального покрытия территории РФ цифровым радиовещанием стандарта DRM в диапазоне НЧ с использованием крупно-кластерных зон с одночастотным синхронным вещанием (без детализации зон обслуживания отдельных передатчиков) приведен на рисунке 7.8. Как видно из рисунка 7.8, для покрытия территории РФ может быть достаточно девять зон, в которых используется восемь номиналов радиочастот. Количество передатчиков в каждой зоне, с учетом реальной конфигурации территории, может составлять от 2 до 5, с расположением как в треугольной, так и в квадратной сетке.

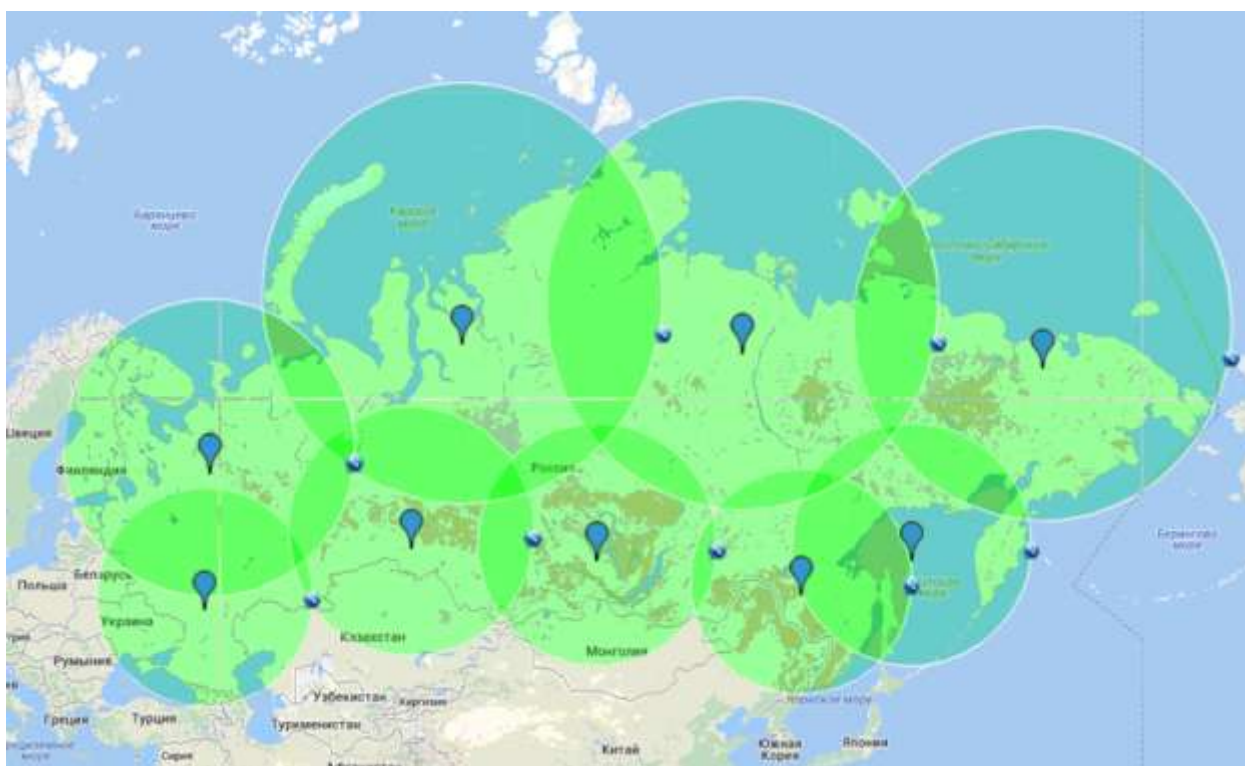


Рисунок 7.8 – Пример покрытия территории РФ с использованием крупно-кластерных зон с синхронным вещанием в диапазоне НЧ

Данное предложение, опубликованное автором в [18, 26], 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 [20].

Особенности построения одночастотных синхронных сетей цифрового радиовещания стандарта DRM, которые необходимо учитывать при разработке сетей вещания, реализующих данное предложение, далее рассматриваются более подробно.

7.5 Особенности построения одночастотных сетей ЦРВ стандарта DRM

Построение одночастотных синхронных сетей цифрового радиовещания стандарта DRM в общем случае отличается от построения синхронных сетей цифрового телевидения DVB-T или ОБЧ цифрового радиовещания DAB [9]. Данные отличия проявляются при наличии ионосферного распространения радиоволн, а именно скачка вверх (до высоты отражающего слоя) и обратно, со свойственными ионосферному распространению радиоволн эффектами многолучевости, фединга и т.д. Рассмотрим результаты проведенных исследований одночастотных синхронных сетей стандарта DRM при отсутствии и наличии этого фактора.

Так, построенная в рамках выполнения НИР «Создание опытной зоны и разработка рекомендаций по организации систем DRM радиовещания в полосе частот 25.67 – 26.10 МГц» (договор между ФГОБУ ВПО МТУСИ и ФГУП «РТРС» № ДТР-385-12/0603/12 от 08.10.12) опытная зона синхронного DRM радиовещания в диапазоне 26 МГц в городских условиях, была основана на распространении земной (поверхностной) волны. Проведенные в данной опытной зоне экспериментальные исследования показали следующее:

– Оценка интегрального сетевого усиления показала его наличие с величиной 1...2 дБ, что, однако, нивелируется удвоением суммарной мощности передатчиков (3 дБ), требующихся для обеспечения синхронного режима. Для проведения расчетов зон обслуживания синхронных сетей в диапазоне 26 МГц выигрыш от сетевого усиления следует принимать равным нулю дБ, поскольку для декодирования в синхронном режиме требуется ОСШ примерно на 1 дБ выше, чем в случае одного передатчика. В тоже время синхронный режим

позволяет улучшить «качество» покрытия, т.е. может обеспечить меньшее количество точек с отсутствующим приемом внутри зоны обслуживания;

– Преимущества синхронных сетей вещания в диапазоне 26 МГц, использующих одну частоту, и экономящих таким образом частотный ресурс, ярко проявляются при необходимости покрытия сильно вытянутых вдоль одной оси мегаполисов, таких как Волгоград или Сочи.

С другой стороны, построенная (в рамках выполнения НИР «Разработка рекомендаций по организации одночастотных синхронных DRM радиовещательных сетей на базе опытной зоны», договор между ФГОБУ ВПО МТУСИ и ФГУП «РТПС» № ДТР-554-12/0601/13 от 29.12.12) опытная зона синхронного DRM радиовещания в диапазоне ВЧ была основана на распространении пространственной (ионосферной) волны. Проведенные в данной опытной зоне экспериментальные исследования показали возможность получение сетевого выигрыша до 6 дБ в «хороших» условиях приема и до 11 дБ в «ухудшенных» условиях приема. Данные результаты объясняются следующими факторами. OFDM сигнал, используемый в ЦПВ стандарта DRM, достаточно устойчив к «быстрым» замираниям (частотно-селективному федингу), обусловленным изменением условий отражения для различных лучей, приходящих к приемнику через ионосферный канал. «Медленные» замирания, обусловленные поглощением в ионосфере (в движущихся локальных областях повышенной ионизации), не могут быть «исправлены», поскольку приводят к уменьшению ОСШ ниже порога декодирования. В этой ситуации синхронная сеть, в которой передатчики вещают на зону обслуживания с различных направлений, оказывается значительно более устойчивой, так как вероятность одновременного поглощения на разнесенных на достаточно большое расстояние трассах существенно уменьшается.

Для построения одночастотных сетей под зоной синхронного вещания следует понимать такую зону, в которой средние напряженности поля как минимум от двух передатчиков с точностью до 6...10 дБ равны друг другу. Если разница в напряженности поля различных передатчиков более 10...15 дБ, то

характеристики приема определяются практически только одним передатчиком, создающим в данной области приема большую напряженность поля. При этом в зоне обслуживания временные задержки между сигналами от различных передатчиков не должны выходить за границы защитного интервала. В противном случае передатчики будут создавать помехи друг другу.

7.5.1 Методика расчета зоны синхронизма

Как уже отмечалось выше, определение зоны синхронизма в диапазоне ВЧ (в общем случае в темное время суток и в диапазонах НЧ и СЧ) имеет особенности, связанные с наличием ионосферного распространения радиоволн, а именно скачка вверх (до высоты, как правило, примерно 350 км в диапазоне ВЧ) и обратно. Как будет показано далее, использование этой особенности позволяет в ряде случаев существенно расширить зону синхронного приема.

Для определенности рассмотрим методику расчета зоны синхронизма на конкретных примерах, которые могут быть адаптированы и для решения других задач с иными исходными данными.

Зона покрытия синхронной сети ЦЗРВ стандарта DRM ограничивается величиной защитного интервала, которая в режиме помехоустойчивости «В» составляет 5,3 мс. Использование режима помехоустойчивости «D» с большим значением величины защитного интервала ведет к существенному снижению скорости передаваемой информации (и, соответственно, к снижению качества аудиоконтента), поэтому не может быть рекомендовано для широкого использования на практике. Разброс задержки распространения сигналов от передатчиков (типичный в диапазоне ВЧ по результатам проводившихся экспериментальных исследований), можно принять равным 2,3 мс, поэтому величина 3 мс может использоваться для определения границы зоны обслуживания синхронной сети.

Будем считать трассу односкачковой с отражением от слоя F2, находящегося на высоте $h = 350$ км.

При расположении передатчиков на одной линии с зоной обслуживания между ними обозначим через R расстояние от каждого из передатчиков до центра зоны обслуживания, которому назначим координаты $x=0, y=0$.

В этом случае длина пути, проходимого волной от первого передатчика с координатами $x=-R, y=0$, до любой точки на координатной плоскости составит:

$$L_1 = \sqrt{(R+x)^2 + y^2 + 4h^2};$$

а от второго передатчика с координатами $x=R, y=0$, соответственно:

$$L_2 = \sqrt{(R-x)^2 + y^2 + 4h^2}.$$

Для выполнения условия синхронизма модуль разности длин путей от передатчиков не должен превышать расстояния, которое волна пройдет за 3 мс:

$$L_3 = 0.003 \cdot c = 900 \text{ км, где } c \text{ – скорость света.}$$

Решая уравнение:

$$\left| \sqrt{(R+x)^2 + y^2 + 4h^2} - \sqrt{(R-x)^2 + y^2 + 4h^2} \right| - 0.003c = 0,$$

найдем границы зоны синхронизма на координатной плоскости.

Для других вариантов расположения передатчиков на координатной плоскости длины пути, проходимого волной, определяются аналогичным образом 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 двухскачковым ионосферным лучами на расстоянии 1000 км составляет 0,2 мс, уменьшаясь с увеличением длины трассы, и ее влиянием можно пренебречь.

7.5.2 Рассмотрение возможных сценариев расположения передатчиков

Для определения наиболее «выгодных» случаев расположения ВЧ передатчиков относительно друг друга и относительно зоны обслуживания – по критерию ее максимизации – рассмотрим возможные сценарии расположения передатчиков. Расстояние далее везде указано от передатчиков до точки начала координат, являющейся центром зоны синхронизма.

Границы зоны синхронизма для рассмотренного выше примера расположения передатчиков на одной линии (т.е., под углом 180 градусов) для различных расстояний от передатчиков до центра зоны обслуживания показаны на рисунке 7.9. Точками показано расположение передатчиков на координатной плоскости, линиями – границы зоны обслуживания, которая располагается между линий соответствующего цвета.

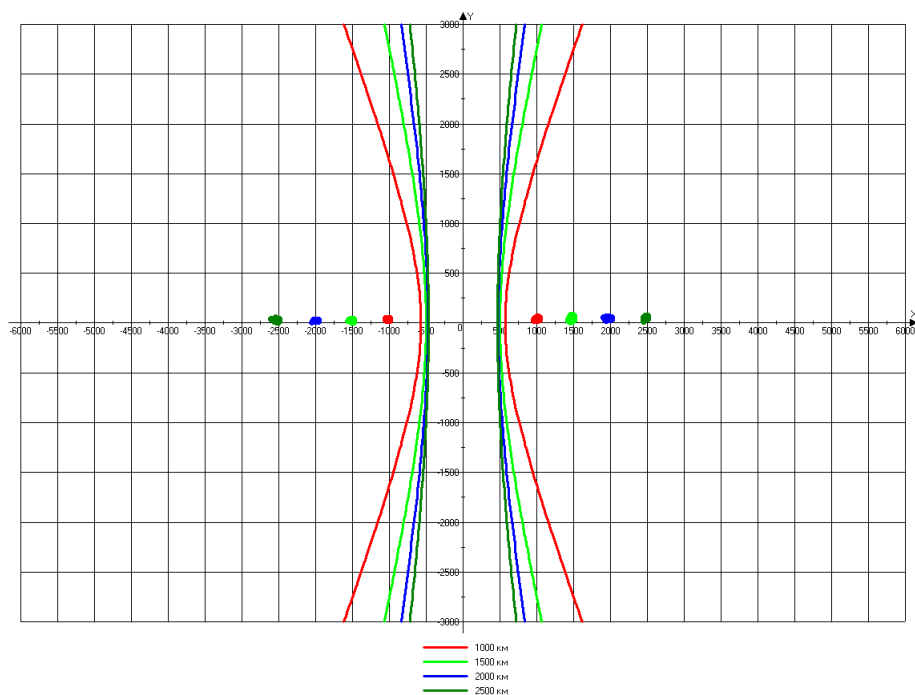


Рисунок 7.9 – Границы зоны синхронизма при расположении передатчиков под углом 180 градусов

Как видно из рисунка 7.9, данный сценарий расположения передатчиков является очень невыгодным, поскольку ширина зоны синхронизма составляет всего около 1000 км, а за ней передатчики будут мешать друг другу. Потенциальная площадь зоны обслуживания может составлять от 1 до 2 млн. квадратных километров в зависимости от диаграмм направленности передающих антенн.

Несколько большая величина зоны синхронизма обеспечивается при расположении передатчиков под углом 135 градусов друг к другу (рисунок 7.10).

При расположении передатчиков под углом 90 градусов друг к другу (рисунок 7.11) величина зоны синхронизма достигает 2000 и более километров и

становится сопоставимой с типичным пятном покрытия в диапазоне ВЧ. Потенциальная площадь зоны обслуживания (без учета ДН передающих антенн) превышает 2 млн. квадратных километров.

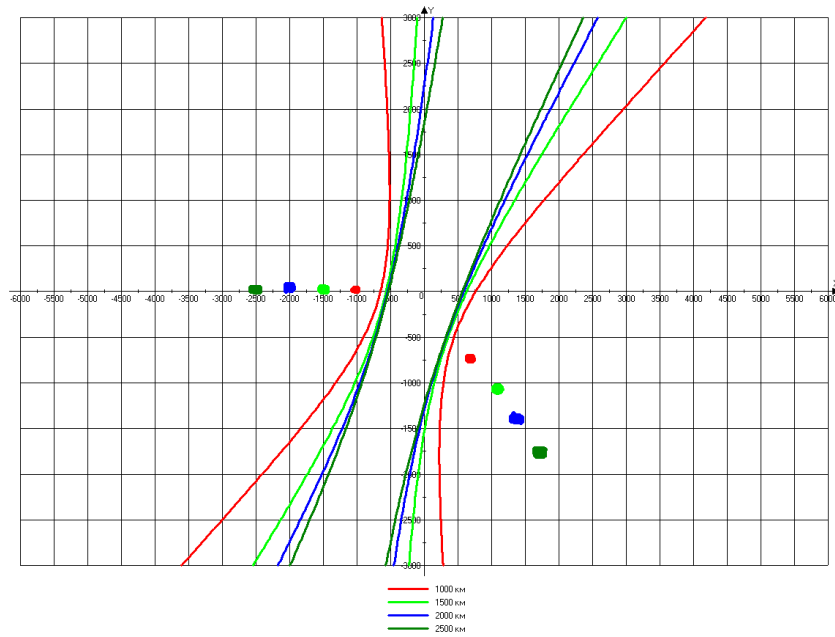


Рисунок 7.10 – Границы зоны синхронизма при расположении передатчиков под углом 135 градусов

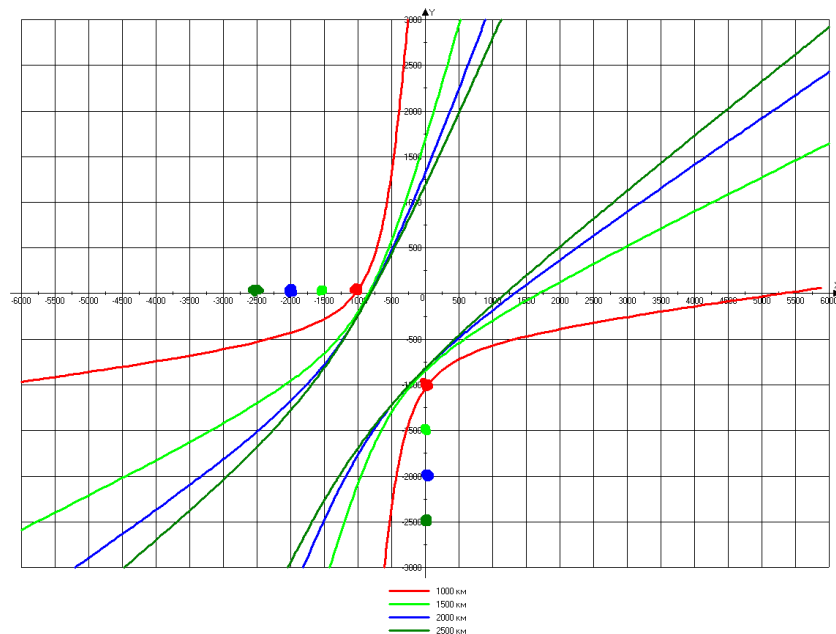


Рисунок 7.11 – Границы зоны синхронизма при расположении передатчиков под углом 90 градусов

При расположении передатчиков под углом 45 градусов друг к другу (рисунок 7.12) величина зоны синхронизма увеличивается еще больше, однако в этом случае возникает опасение о реализуемости преимуществ синхронной сети. Действительно, пути распространения волн от обоих передатчиков и точки отражения могут оказаться в одинаковых ионосферных условиях, что может привести, например, к одновременному затуханию обоих сигналов. Рекомендовать такой сценарий для практического использования можно только после проведения его всесторонних дополнительных исследований.

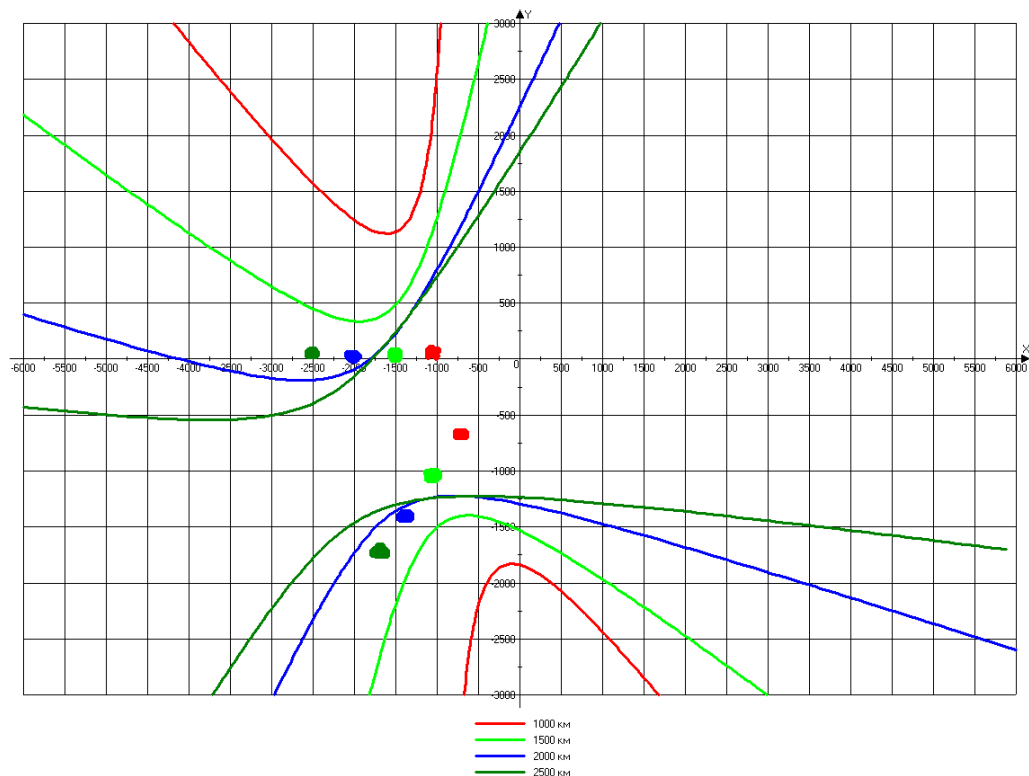


Рисунок 7.12 – Границы зоны синхронизма при расположении передатчиков под углом 45 градусов

Также значительный интерес может представлять сценарий параллельного расположения передатчиков на некотором удалении от зоны обслуживания (рисунок 7.13). Такой сценарий может найти применение, в частности, для обслуживания удаленных северных территорий с применением технических средств, имеющихся на действующих радиопередатчиках РТРС. Пример зон синхронизма для такого решения приведен на рисунке 7.14. Как видно из рисунка 7.14, создание

одночастотной сети вещания на северные территории вполне возможно, поскольку зоны синхронизма, в которых могут пересекаться «пятна» покрытия от отдельных передатчиков, достаточно широки. В тех зонах обслуживания, где «пятна» покрытия от отдельных передатчиков не пересекаются, будет присутствовать несинхронный режим работы. При их пересечении в зонах синхронизма передатчики не будут создавать помехи друг другу, а наоборот, будут улучшать качество покрытия. Площадь зоны синхронизма при использовании этого сценария превышает 4 млн. квадратных километров.

Вводя дополнительную задержку в сигнал одного из передатчиков, можно компенсировать разницу в расстоянии, на котором расположены передатчики от зоны обслуживания, или изменять местоположение зоны синхронизма. Для проведения расчетов в этом случае к длине пути, проходимого волной от соответствующего передатчика, добавляется величина $L' = \tau c$, где τ – величина времени задержки, c – скорость света.

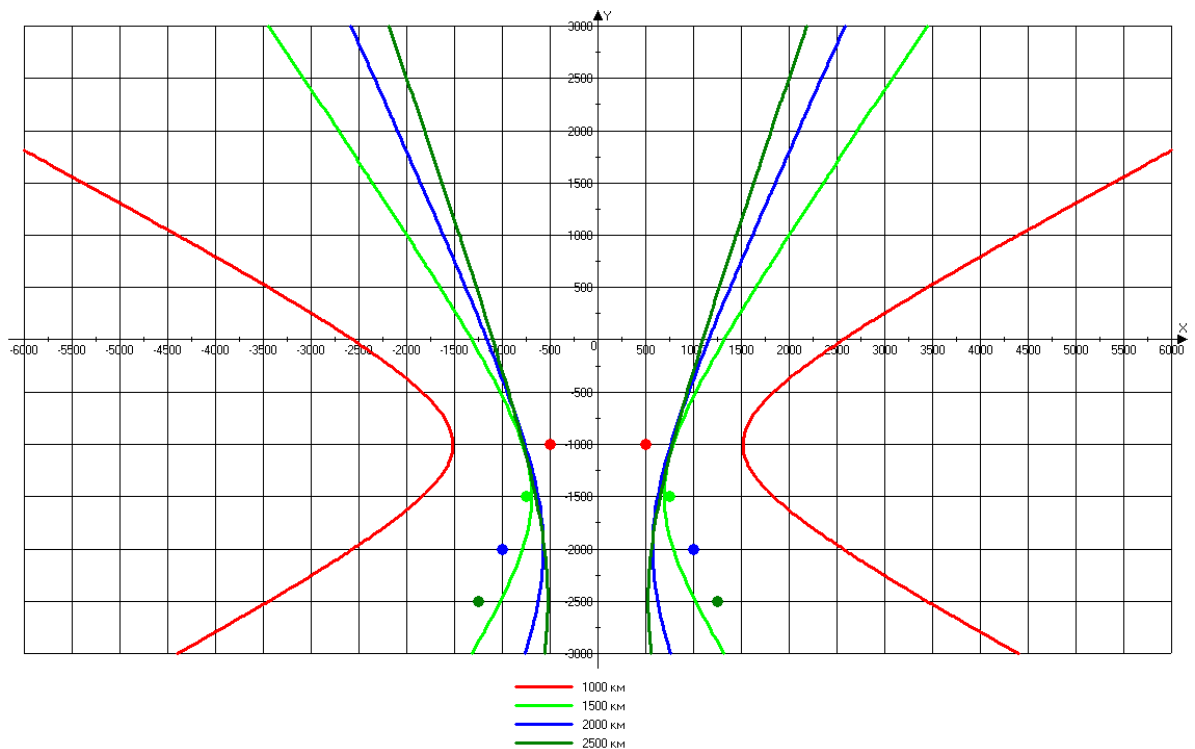


Рисунок 7.13 – Границы зоны синхронизма при расположении передатчиков параллельно друг другу

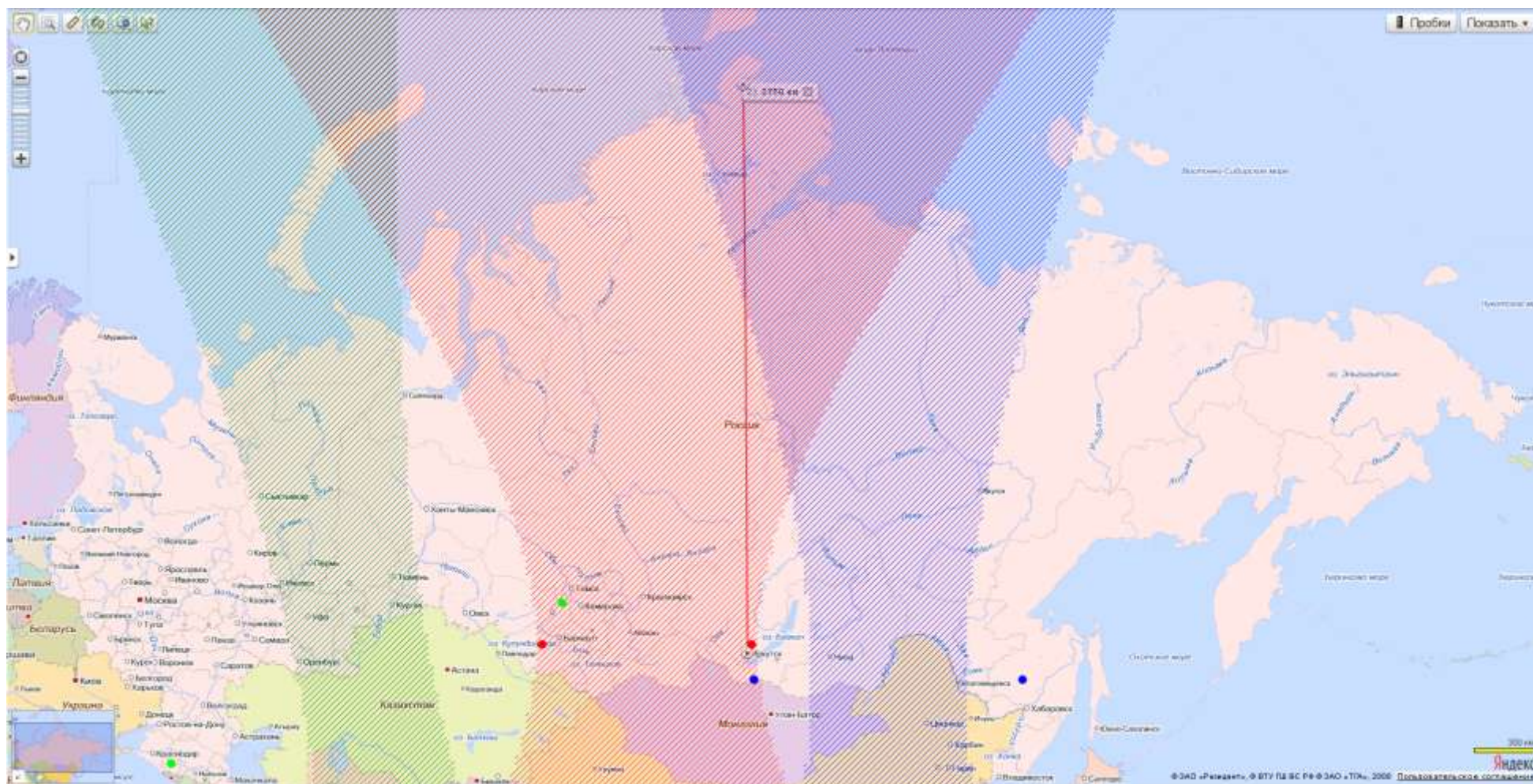


Рисунок 7.14 – Пример зон синхронизма при обслуживании удаленных северных территорий с применением технических средств, имеющихся на действующих радиостанциях РТРС. Синяя штриховка – Хабаровск и Иркутск, красная штриховка – Иркутск и Новосибирск, зеленая штриховка – Новосибирск и Краснодар

Пример изменения местоположения зоны синхронизма посредством введения задержки в сигнал одного из передатчиков для сценария «расположение передатчиков параллельно друг другу» показан на рисунке 7.15. Как видно из рисунка, при величине задержки 5 мс границы зоны синхронизма могут быть смещены вправо или влево на величину до 600...800 км.

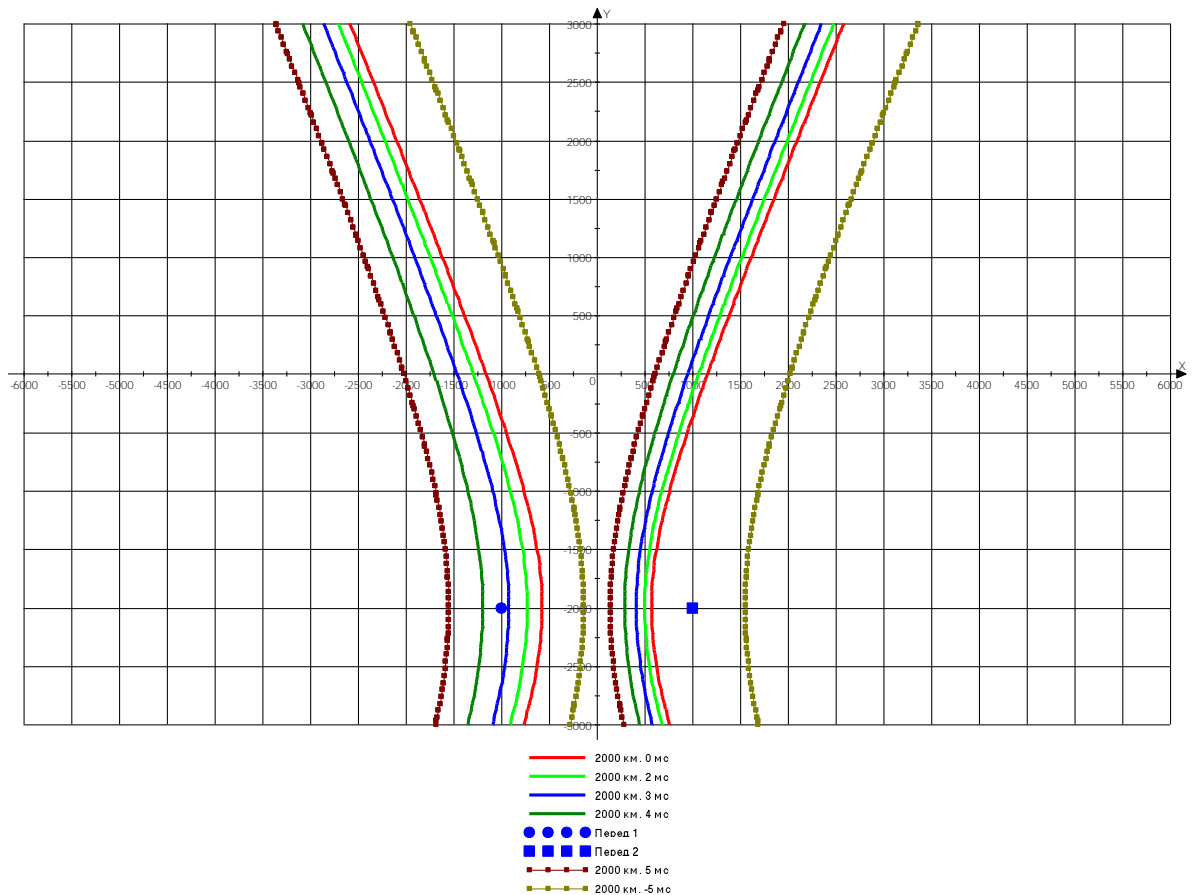


Рисунок 7.15 – Смещение зоны синхронизма на координатной плоскости при введении задержки в сигнал одного из передатчиков на примере расположения передатчиков параллельно друг другу

Пользуясь предложенным подходом, можно рассмотреть и другие возможные конкретные сценарии взаимного расположения передатчиков и зоны покрытия.

Для диапазона НЧ при реализации крупно-кластерной синхронной сети и расположении передатчиков в соответствии с рисунком 7.6, весь кластер будет

находиться в зоне синхронизма. 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 (рисунок 7.16). При меньшем расстоянии между передатчиками зона синхронизма потенциально бесконечна.

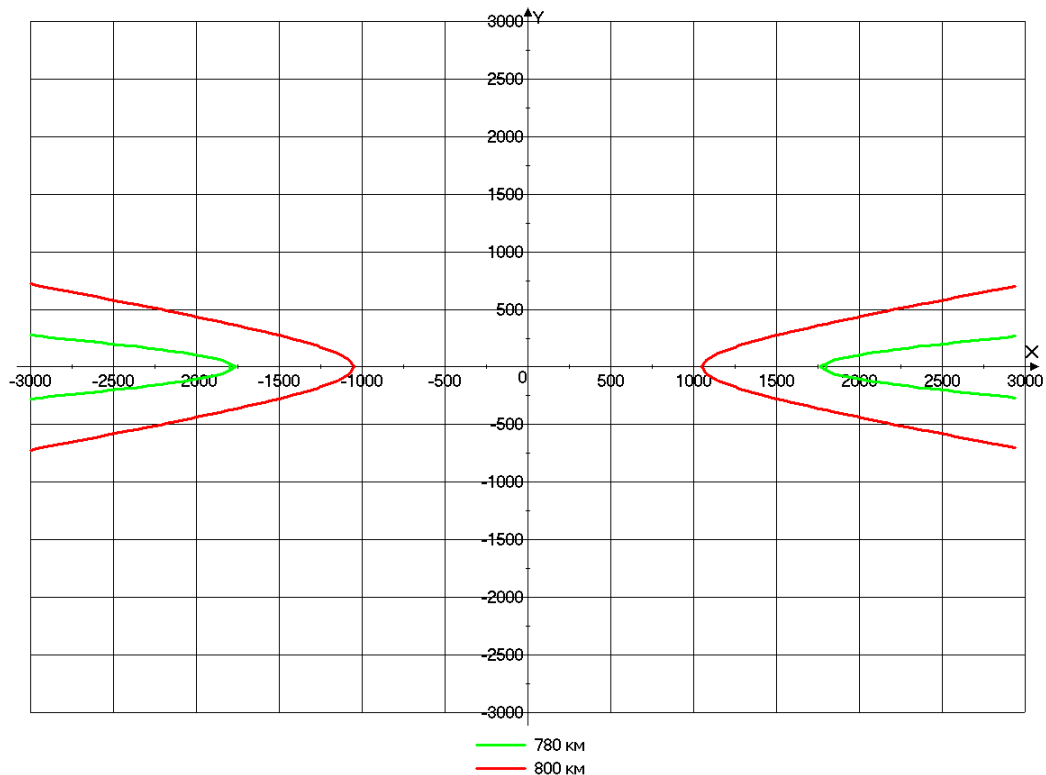


Рисунок 7.16 – Границы зоны синхронизма в диапазоне НЧ при расстоянии между передатчиками 780 км и 800 км

7.6 Пример разработки архитектуры сети государственного радиовещания РФ

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.

Расчеты зон покрытия проводились с помощью предоставленной разработчиком программы «MWCONT32» версии 9.0.4. [148] с последующим переносом данных в программу Google Earth для возможности корректного отображения на поверхности земного шара в различных проекциях. В регионах, имеющих инфраструктуру НЧ радиовещания, использовались территориальные позиции существующих радиочастот (использовано две трети радиочастот, предусматривавшихся в Системном проекте). При этом разработанные в третьей главе настоящей 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 зоне только один передатчик) при сохранении 8 номиналов радиочастот (рисунок 7.17). Разработанный пример архитектуры сети государственного вещания РФ содержит 29 передатчиков общей мощностью 1940 кВт (таблица 7.1). Передатчики, работающие в кластерах синхронной сети, на рисунке 7.9 соединены линиями.

Количество передатчиков, используемых в разработанном примере топологии сети мощного радиовещания, существенно меньше, чем в рассматривавшихся ранее вариантах (рисунок 7.18), а их суммарная мощность по сравнению с сетью вещания 2005 года уменьшается практически в 22 раза и становится вдвое меньше потребляемой мощности объектов ЦТВ (рисунок 7.19). 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.

Таблица 7.1 – Перечень передатчиков разработанного примера архитектуры сети государственного вещания РФ и параметры их зон обслуживания

№	Наименование радиопередатчика	Мощность передатчика, кВт	Радиус зоны обслуживания, км	Напряженность поля, дБмкВ/м	Проводимость почвы, См
1	Мурманск	60	550	50	0,001
2	Архангельск**	10	440	60	0,003
3	Воркута	60	540	50	0,001
4	Норильск	60	540	50	0,001
5	Хатанга	60	540	50	0,001
6	Тикси	60	540	50	0,001
7	Крест-Майор	60	540	50	0,001
8	Черский	60	530	50	0,001
9	Анадырь	60	530	50	0,001
10	Санкт-Петербург	60	540	50	0,001
11	Москва	60	620	60	0,003
12	Сыктывкар	60	540	50	0,001
13	Сургут	100	570	50	0,001
14	Байкит	100	570	50	0,001
15	Мирный	200	640	50	0,001
16	Якутск	100	580	50	0,001
17	Армань	60	530	50	0,001
18	Каменское	60	530	50	0,001
19	Тбилисская	60	730	60	0,005
20	Оренбург	60	610	60	0,003
21	Екатеринбург	60	610	60	0,003
22	Новосибирск	100	790	60	0,005
23	Ангарск	60	730	60	0,005
24	Чита	60	530	50	0,001
25	Тында	60	530	50	0,001
26	Комсомольск	60	740	55	0,003
27	Южно-Сахалинск	60	530	50	0,001
28	Елизово	60	530	50	0,001
29	Владивосток	10	440	60	0,003



Рисунок 7.17 – Пример архитектуры сети государственного цифрового радиовещания РФ в диапазоне НЧ

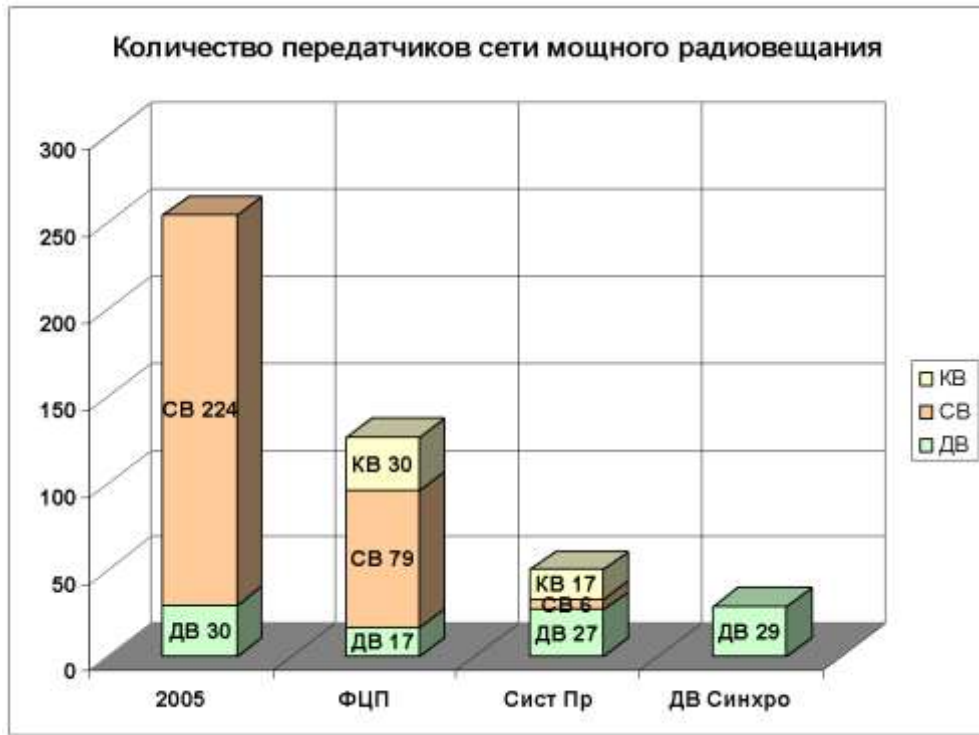


Рисунок 7.18 – Количество передатчиков в различных топологиях сетей мощного радиовещания



Рисунок 7.19 – Суммарные мощности передатчиков в различных топологиях сетей мощного радиовещания

7.7 Выводы

1. Для планирования сетей ЦРВ в диапазонах НЧ и СЧ предложен метод преобразования кривых распространения земной волны МСЭ в кривые ОСШ, учитывающие частотную зависимость напряженности поля атмосферных шумов в зоне обслуживания. С использованием данного метода проведены примеры расчетов для ряда географических регионов, показавшие, 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.

2. Показано преимущество применения диапазона НЧ для обслуживания территорий цифровым радиовещанием в высоких широтах.

3. Определены расстояния между передатчиками, на которых возможно повторное использование частот в сети вещания диапазона НЧ при круглосуточной работе (5000 км между передатчиками для 50° геомагнитной широты).

4. Предложен метод использования крупно-кластерных зон одночастотного синхронного вещания в диапазоне НЧ для построения глобальных сетей цифрового радиовещания и разработаны параметры кластера (максимальное расстояние между передатчиками, размер, режимы помехоустойчивости).

5. Рассмотрены особенности построения одночастотных сетей ЦРВ стандарта DRM в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ:

- разработана методика расчета зоны синхронизма;
- проведен анализ различных сценариев расположения передатчиков в диапазоне ВЧ.

6. На основе предложенного метода использования крупно-кластерных зон одночастотного синхронного вещания разработана топология сети государственного наземного цифрового радиовещания стандарта DRM для РФ:

– разработанная топология сети позволяет обеспечить круглосуточное покрытие цифровым радиовещанием всей территории РФ при достаточно малой суммарной мощности передатчиков (29 передатчиков с суммарной мощностью 1940 кВт, расположенных в 10 зонах синхронного вещания и использующих восемь номиналов радиочастот);

– данное предложение также позволяет решить проблемы внутри Регионального содружества в области связи (РСС) с распределением оставшихся от СССР синхронных частот между государствами СНГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью диссертационной работы являлось разработка технологии создания сети государственного 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.

Основные результаты работы 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.

Новая топология позволяет покрыть не только всю территорию РФ, оставляя свободные частоты для стран РСС, а также и потенциально для большинства территориально крупных стран 1-го региона МСЭ. Разработка подобного проекта для 1-го региона МСЭ может являться одним из направлений дальнейшей разработки темы исследований.

Проведенные исследования также могут быть продолжены в области применения в перспективной радиосистеме диапазона СЧ под названием «Навигационные данные» (НАВДАТ), которая предназначена для использования в морской подвижной службе для цифрового радиовещания информации, касающейся защиты и обеспечения безопасности на море в направлении берег-судно, на частоте 500 кГц. Параметры этой радиосистемы определяются Рекомендацией МСЭ-R М.2010 (03/2012) «Характеристики цифровой системы под названием «Навигационные данные», которая предназначена для радиовещания информации, касающейся защиты и обеспечения безопасности на море в направлении берег-судно в диапазоне 500 кГц», и предполагают использование сигналов, совместимых со стандартом DRM. Применение в данной

системе предложенного в работе метода крупно-кластерных зон одночастотного синхронного вещания может позволить существенно увеличить объемы передаваемой информации.

Также в качестве перспектив дальнейшей разработки темы можно рассматривать развитие метода одновременной передачи AM и DRM с равными зонами покрытия на переходный период с использованием динамической амплитудной модуляции в аналоговом канале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А/С СССР № 1532995, H03F3/20. Усилитель мощности. Варламов О.В., Гончаров И.А., Лаврушенков В.Г., Дегтев В.И. 30 декабря 1989.
2. А/С СССР № 1573535, H03K17/60. Транзисторный ключ. Варламов О.В., Гончаров И.А., Дегтев В.И., Лаврушенков В.Г. 23 июня 1990.
3. 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.
4. А/С СССР № 1771064, H03F3/20. Усилитель мощности. Варламов О.В., Гончаров И.А., Лаврушенков В.Г., Царев А.Ю. 23 октября 1992.
5. Акустика: Справочник / А.П.Ефимов, А.В.Никонов, М.А.Сапожков, В.И.Шоров; под ред. М.А.Сапожкова. – М.: Радио и связь, 1989. – 336 с.
6. Алексеев О.В., и др. Широкополосные радиопередающие устройства; под ред. О.В. Алексеева. – М.: Связь, 1978. – 304 с.
7. Алипов, А.С. Исследование и разработка ключевых усилителей мощности для высокоэффективного СЧ передатчика цифрового радиовещания: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Алипов Антон Сергеевич. – М., 2006. – 203 с.
8. Белоусов, С.П. и др. Антенны для радиосвязи радиовещания. Часть 2 Средневолновые и длинноволновые антенны / С.П.Белоусов, Р.В.Гуревич, Г.А.Клигер, В.Д.Кузнецов. – М.: Связь. – 1980. – 120 с.
9. Быховский, М.А. Повышение эффективности использования РЧС при применении в телерадиовещании синхронных сетей / М.А.Быховский // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. Т. 7. – № 9. – С. 34-38.
10. 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.

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

12. 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.

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

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

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

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

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

18. 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.

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

20. 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.

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

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

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

24. 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.

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

26. 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.

27. Варламов, О.В. Мощный ВЧ цифроаналоговый преобразователь для усилителя мощности ОМ сигналов / О.В.Варламов, И.А.Гончаров, В.Г.Лаврушенко // Электросвязь. – 1989. – № 8. – С. 54-57.

28. Варламов, О.В. Расширение полосы согласования передающих вещательных антенных систем диапазона ДВ для работы в режиме DRM /

О.В.Варламов, В.Д.Горегляд // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – №1. – С. 18-22.

29. 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.

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

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

32. 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-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – № 9. – С. 47-49.

33. Варламов О.В., Громорушкин В.Н., Лаврушенко 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.

34. Варламов О.В., Лаврушенко 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.

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

36. 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.

37. Варламов О.В., Петяшин Н.Б., Царев А.Ю. Энергетические характеристики усилителя с цифровым преобразованием огибающей с компенсацией ошибок квантования методом дефазирования // VI Всероссийская научно-техническая конференция "Радиоприем и обработка сигналов". Тезисы докладов. – Нижний Новгород, 1993. – С. 73.

38. 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.

39. 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).

40. Варламов, О.В. Исследование и разработка цифрового усилителя мощности ОМ сигналов с компенсацией ошибок квантования: дис. ...канд. техн. наук: 05.12.17 / Варламов Олег Витальевич. – М., 1993. – 207 с.

41. Владыко, А.Г. Первые шаги стандарта DRM+ в Российской Федерации / А.Г.Владыко, Ю.А.Ковалгин, С.В.Мышьянов // Электросвязь. – 2016. – № 5. – С. 60-67.

42. Гайнутдинов, Т.А. Простые широкополосные согласующие устройства длинноволновых радиовещательных антенн / Т.А.Гайнутдинов, Н.И.Гаранкина, В.Г.Кочержевский, А.С.Гусева // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – № 11. – С. 33-39.

43. Горегляд, В.Д. О выборе системы цифрового радиовещания для России / В.Д.Горегляд, Ю.А.Ковалгин, С.В.Мышьянов, С.А.Соколов // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2015. – № 8. – С. 42-47.

44. Горегляд, В.Д. Рекомендации по внедрению в Российской Федерации стандарта радиовещания DRM+ / В.Д.Горегляд, Ю.А.Ковалгин, С.В.Мышьянов, С.А.Соколов // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2016. – № 2. – С. 28-32.

45. ГОСТ 5651-89. Аппаратура радиоприемная бытовая. Общие технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997.

46. ГОСТ 9783-88. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Методы электрических высокочастотных измерений. – М.: Издательство стандартов, 1991.

47. ГОСТ Р 51741-2001. Передатчики радиовещательные стационарные диапазона ОВЧ. Основные параметры, технические требования и методы измерений. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

48. ГОСТ Р 51742-2001. Передатчики радиовещательные стационарные с амплитудной модуляцией диапазонов низких, средних и высоких частот. Основные параметры, технические требования и методы измерений. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

49. ГОСТ Р 54462-2011. Система цифрового радиовещания DRM. Требования и параметры. – М.: Стандартинформ, 2013.

50. ГОСТ-Р 54718-2011. Система цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц. Цифровой кодер-модулятор. Основные параметры и технические требования. – М.: Стандартинформ, 2012.

51. ГОСТ Р 54706-2011. Система цифрового звукового радиовещания DRM. Интерфейс распределения мультимедиа (MDI). – М.: Стандартинформ, 2012.

52. ГОСТ Р 54707-2011. Система цифрового звукового радиовещания DRM. Одноканальная одновременная передача программ (SCS). – М.: Стандартинформ, 2012.

53. ГОСТ Р 54708-2011. Система цифрового звукового радиовещания DRM. Протокол распределения и коммуникации (DCP). – М.: Стандартинформ, 2012.

54. ГОСТ Р 54709-2011. Система цифрового звукового радиовещания DRM. Специфические ограничения по применению протокола распределения и коммуникации (DCP). – М.: Стандартинформ, 2012.

55. ГОСТ Р 54710-2011. Система цифрового звукового радиовещания DRM. Руководство по приложениям данных. – М.: Стандартинформ, 2012.

56. ГОСТ Р 54716. Система цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц. Контрольный радиоприемник. Основные параметры и технические требования. – М.: Стандартинформ, 2014.

57. ГОСТ Р 54717-2011. Система цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц. Технические основы. – М.: Стандартинформ, 2012.

58. ГОСТ Р 54997-2012. Система цифрового звукового радиовещания DRM. Цифровое звуковое радиовещание DAB. Требования транспортировки и бинарного кодирования для электронного справочника программ (EPG). – М.: Стандартинформ, 2013.

59. Дворкович, В.П. Российская система цифрового мультимедийного радиовещания / В.П.Дворкович, А.В.Дворкович // Электросвязь. – 2011. – № 6. – С. 18-24.

60. Дворкович, В.П. Внедрение отечественной системы РАВИС – основа повышения эффективности и качества радиовещания в ОВЧ диапазоне частот / В.П.Дворкович, А.В.Дворкович, В.А.Иртюга // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2013. – № 1. – С. 17-25.

61. Заключительные акты Региональной административной конференции по радиовещанию на средних и длинных волнах (Районы 1 и 3). – Женева, 1975.

62. Засурский, Я.Н. Информационная безопасность России и средства массовой информации / Я.Н.Засурский // Информационное общество. – 2001. – № 4. – С. 19-23.

63. Иванчин, А.Н. DRM – современный стандарт цифрового радиовещания / А.Н.Иванчин, С.Г.Рихтер // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2002. – № 7, 8. – 2003. – №1, 2.

64. Иванюшкин, Р.Ю. Исследование и разработка высокочастотного тракта радиовещательного СЧ передатчика, построенного по методу дефазирования: дис. ...канд. техн. наук: 05.12.13 / Иванюшкин Роман Юрьевич. – М., 2001. – 173 с.

65. 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.

66. Климов, В.С. Повышение эффективности транзисторных радиовещательных передатчиков, использующих широтно-импульсную модуляцию, формируемую методом дефазирования: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.12.17 / Климов Владимир Сергеевич. – Л., 1982. – 16 с.

67. Локшин, Б. Еще раз о спутниковом вещании с высокоэллиптических орбит / Б.Локшин, Ю.Орлов // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2013. № 4+5. – С. 48-49.

68. Международный патент (PCT) WO2004070877 A1, H01Q21/00. Radiation efficient antenna circuit. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 19.08.2004.

69. Международный патент (PCT) WO2004075395 A1, H03C3/40. Efficient modulation of RF signals. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 02.09.2004.

70. Международный патент (PCT) WO2004091097 A1, H03F1/02. Glitch-free controllable RF power amplifier. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 21.10.2004.

71. Мельчинов, В.П. Исследование электрических свойств многолетнемерзлой среды и их влияния на распространение радиоволн в ДВ-СВ диапазонах. Автореф. дис. ... канд. физ-мат. наук. – Якутск, 1999.

72. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Под ред. С.М. Семенова. – Гл. 8. Континентальная многолетняя мерзлота. – М.: Росгидромет, 2012. – С. 301.

73. Никитин, А.Ю. Метод модернизации глобальной сети распределения программ радиовещания на базе современных цифровых форматов: автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.12.04 / Никитин Андрей Юрьевич. – М., 2010. – 26 с.

74. Нормы 19-02 «Нормы на ширину полосы радиочастот и внеполосные излучения радиопередатчиков гражданского применения». Дополнение № 1. «Системы цифрового звукового и телевизионного вещания с использованием модуляции COFDM». – Государственная комиссия по радиочастотам, Москва. 2003.

75. Нормы 19-13 «Нормы на ширину полосы радиочастот и внеполосные излучения радиопередатчиков гражданского применения». – Государственная комиссия по радиочастотам. Москва. 2013.

76. Отчет по НИР «Волна-СЧ» по договору ОАО «НТЦ РС» с ФГУП «РТРС» № 020906/НТЦ/ДТР-177-06 от 02.09.06. «Проведение экспериментального цифрового звукового радиовещания в СЧ диапазоне с целью уточнения защитных отношений при совместной работе с аналоговыми сетями на переходный период в соответствии с решением ГКРЧ № 06-13-03-001 от 24.04.06». Соисполнитель МТУСИ.

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

78. Патент ЕС 1229642 В1, H03F1/02. Power amplifier circuit for amplifying RF-Signals. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, 17.12.2008.

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

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

81. Патент Кореи 101014065 В1, H03C3/40. Efficient modulation of RF signals. Filimonov Nikolai, Varlamov Oleg, Itkin Grigory, 14.02.2011.

82. Патент РФ № 2019206, А61N1/40. Устройство для УВЧ-терапии. Викторов К.А., Варламов О.В., Громорушкин В.Н. Б.и. № 17. 15 сентября 1994.

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

84. 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.

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

86. 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.

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

88. Покровский, Н.Б. Расчет и измерение разборчивости речи / Н.Б.Покровский. – М.: Связьиздат, 1962. – 391 с.

89. Постановление Правительства РФ от 3 декабря 2009 г. N 985 «О федеральной целевой программе "Развитие телерадиовещания в Российской Федерации на 2009-2015 годы» (с изменениями и дополнениями № 911 от 29.08.2015). – Москва. – 2015.

90. Правила 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. Утверждены приказом Министерства информационных технологий и связи РФ № 13 от 04.02.2008 г. (с изменениями Приказом №93 от 23.04.2013).

91. Рек. МСЭ-R BS.1615-1 (05/2011) «Параметры планирования» для цифрового звукового радиовещания на частотах ниже 30 МГц. Женева. – 2011.

92. Рек. МСЭ-R BS.1895. (05/2011). Критерии защиты систем наземного радиовещания. Женева. – 2011.

93. Рек. МСЭ-R P.527-3. (03/1992). Электрические характеристики поверхности Земли. Женева. – 1992.
94. Ставиская, Р.М. Разработка системы распределения программ радиовещания на территории Российской Федерации на новом технологическом уровне: автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.12.04 / Ставиская Рашель Моисеевна. – М., 2008. – 24 с.
95. Фано, Р.М. Теоретические ограничения полосы согласования произвольных импедансов / Р.М.Фано. – М.: Сов. радио, 1965. – 68 с.
96. Хомич, В.И. Приемные ферритовые антенны / В.И.Хомич. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 63 с.
97. Чернов, Ю.А. Быть ли свадьбе? Ионосфера и DRM / Ю.А.Чернов // Информкуррьер-связь. – 2011. – №10. – С. 53-56, Информкуррьер-связь. – 2011. – №11. – С. 65-68.
98. Чернов, Ю.А. Вариации уровня сигнала земной волны на средних и низких частотах в дневное время / Ю.А.Чернов // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2013. – № 4. – С. 91-106.
99. Чернов, Ю.А. Как внедрять DRM будем / Ю.А.Чернов // Информкуррьер-связь. – 2011. – №3. – С. 62.
100. Чернов, Ю.А. Луч света в царстве DRM / Ю.А.Чернов // Информкуррьер-связь. – 2013. – №6-7. – С. 61-65.
101. Чернов, Ю.А. Прием DRM-вещания на коротких волнах / Ю.А.Чернов // Электросвязь. – 2015. – №11. – С. 36-44.
102. Чернов, Ю.А. Сезонные изменения напряженности поля земной волны в дневное время в НЧ, СЧ диапазонах / Ю.А.Чернов // Труды НИИР. – 2005. – № 9.
103. Чернов, Ю.А. Цифровое радиовещание до 30 МГц: иллюзии и реальность, часть 1. Длинные и средние волны. Светлое время суток / Ю.А.Чернов // Электросвязь. – 2012. – №1. – С. 30-37.
104. 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.

105. Чернов, Ю.А. Цифровое радиовещание до 30 МГц: иллюзии и реальность, часть 3. Короткие волны / Ю.А.Чернов // Электросвязь. – 2012. – №3. – С. 16-19.
106. Шахгильдян, В.В. Проектирование радиопередающих устройств / В.В.Шахгильдян, М.С.Шумилин, И.А.Попов и др.; под ред. В.В.Шахгильдяна. – М.: Радио и связь. – 1984. – 424 с.
107. Шинаков, Ю.С. Вероятностный анализ помехи нелинейных искажений в устройствах с амплитудно-фазовой конверсией / Ю.С.Шинаков // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2015. – Т. 6. – № 4. – С. 200-202.
108. Шинаков, Ю.С. Спектральная плотность мощности помехи нелинейных искажений в устройствах с амплитудно-фазовой конверсией / Ю.С.Шинаков // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58. – № 10. – С. 1053.
109. Шумилин, М.С. Проектирование транзисторных каскадов передатчиков / М.С.Шумилин, В.Б.Козырев, В.А.Власов. – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.
110. Яковенко, В.А. Аналитический расчет широкополосных согласующих цепей / В.А.Яковенко // Электронный научный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ», 2007, с. 1528- 1538. URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/140.pdf> (дата обращения: 30.10.12).
111. Buchholz T., Mlasko T., Hofmann F., Murphy A. Report on subjective listening tests of SBR-LC, an AAC-based audio bandwidth widening tool. DRM Source Coding Group. February 2001.
112. Chireix H. High-power Outphasing Modulation // Proc. IRE. – 1935. – Vol. 23. – №11. – С. 1370-1392.
113. Chris van den Bos, Michiel H. L. Kouwenhoven, Wouter A. Serdijn. Effect of Smooth Nonlinear Distortion on OFDM Symbol Error Rate // IEEE Transactions on communications. – 2001. – Vol. 49. – No. 9. – С. 1510-1514.
114. Cox D.C. Linear Amplification with Nonlinear Components // IEEE Trans. on Commun. – 1974. – Vol. COM-23. – №12. – С. 1942-1945.

115. Cripe D. W. Improving the efficiency and reliability of AM broadcast transmitters through class-E power / National Association of Broadcasters annual convention, May 1992, 7 p.

116. De la Vega D., Fernandez C., Grande O., Angulo I., Guerra D., Wu Y., Angueira P., Ordiales J.L. Software tool for the analysis of potential impact of wind farms on radiocommunication services // 2011 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). – 2011. – C. 1-5.

117. Dietmar R. Out-of-Band emission of digital transmissions using Kahn EER technique // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2002. – Vol. 50. – № 8. – C. 1979-1983.

118. Digital Radio Mondiale (DRM); Minimum Receiver Requirements. Version 1.0. http://www.drm.org/wp-content/uploads/2012/10/DRM_Minimum_Requirements1.pdf (дата обращения: 12.02.2013).

119. DReaM receiver download page on Sourceforge. URL: <http://sourceforge.net/projects/drm/>, date of access 28.08.2015.

120. EBU Tech Report 3330 “Technical Bases for DRM Services Coverage Planning”. Geneva, June 2008.

121. ETSI EN 302 245-1 V1.1.1 (2005-01) Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the Digital Radio Mondiale (DRM) broadcasting service; Part 1: Technical characteristics and test methods.

122. ETSI EN 302 245-2 V1.1.1 (2005-01) Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the Digital Radio Mondiale (DRM) broadcasting service; Part 2: Harmonized EN under article 3.2 of the R&TTE Directive.

123. ETSI ES 201 980 V4.1.1 (2014-01) Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification.

124. ETSI TS 102 349 – V4.2.1 (2016-03) Digital Radio Mondiale (DRM); Receiver Status and Control Interface (RSCI).

125. ETSI TS 102 668 V1.1.2 (2014-11) Digital Radio Mondiale (DRM); DRM-TMC (Traffic Message Channel).

126. ETSI TS 102 818 V3.1.1 (2015-01) Hybrid Digital Radio (DAB, DRM, RadioDNS); XML Specification for Service and Programme Information (SPI).

127. Fernandez I., Angueira P., De la Vega D., Peña I., Guerra D., Gil U. Carrier and noise measurements in the medium wave band for urban indoor reception of digital radio // *IEEE Transactions on Broadcasting*. – 2012. – Vol. 58. – № 1. – C. 98-105.

128. Fernandez I., Eizmendi I., Montalban J., Guerra D., Prieto G., Landa I., Gil U., Velez M. Field trials based validation of the suitable configuration parameters for mobile urban reception, using the new generation broadcasting systems // *2014 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*. – 2014. – C. 1-4.

129. Get the most with DRM! 11 September 2010, IBC, Amsterdam, Transradio Presentation on behalf of the DRM Consortium. Интернет-ресурс: http://www.drm.org/wp-content/uploads/2010/09/DRM_Transradio_for_IBC_final.pdf
Дата обращения 05.03.2014.

130. Gil U., Pena I., Guerra D., De La Vega D., Angueira P., Ordiales J.L. Statistical characterization of medium wave spatial variability due to urban factors // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2011. – Vol. 59. – Issue 9. – C. 3498-3500.

131. Gil U., Guerra D., del Amo L., Masdeu J. DRM field trials for urban coverage planning in Spain. / *EBU TECHNICAL REVIEW*. – 2008. – Q2. C. 1-16.

132. Guerra D., Coletto M., Melgar L., Gil U., Peña I., Prieto G., Angulo I. Measurement based near vertical incidence skywave channel model in the medium wave band // *7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE. – 2013. – C. 3403-3407.

133. Guerra D., Prieto G., Fernandez I., Matias J. M., and Angueira P. Medium wave DRM field test results in urban and rural environments // *IEEE Trans. Broadcast*. – 2005. – Vol. 51. – № 4. – C. 431-438.

134. Hetzel S.A., Bateman A., McGeehan J.P. A LINC transmitter // Electronics letters. 9th May 1991. – Vol.27. – № 10. – С. 133-137.

135. Huber J. DRM on MF and LF, coverage and technical requirements. EBU-DRM Conference. 26 Nov 2009 / Geneva (CH). URL: http://tech.ebu.ch/docs/events/drm09/presentations/ebu_drm09_huber.pdf (дата обращения: 12.12.2012).

136. ITU-R Contribution SG6/353 (2007-04). DRM test in the MF band in Italy.

137. ITU-R Doc. 6A/228-E. Measurements of DRM coverage area in the mediumfrequency band in the day-time, night-time and in the fading zone. Russian Federation, 2013.

138. ITU-R doc. 6D/10-E. Digital Radio Mondiale (DRM), Asia-Pacific Broadcasting Union (ABU): «Results Of DRM Trials In New Delhi: Simulcast Medium Wave, Tropical Band, Nvis And 26 Mhz Local Broadcasting». March 2008.

139. ITU-R doc. 6E/199-E. Digital Radio Mondiale (DRM): “DRM simulcast test report to ITU-R V1.0 – 20/02/02 (including simulcast test plan and available from laboratory test simulcast reference values)”. March 2002.

140. ITU-R doc. 6E/403-E. DIGITAL RADIO MONDIALE (DRM): “MW SIMULCAST TESTS IN MEXICO D.F.”, August 2006.

141. ITU-R Doc. WP6A/307. Tests of single frequency DRM radio networks in the SW range. Russian Federation, 2013.

142. ITU-R: Doc. WP6E: Contributions: 390. DRM medium wave reception tests in Vietnam. – ABU, 2006.

143. Kurpiers A., Fischer V. “DREAM” – Open-Source Software Implementation of a DRM Receiver. <http://drm.sourcefoge.net/>

144. M2W Transmitter Family 10 kW to 250 kW / Проспект фирмы Ampegon. URL: http://www.ampegon.com/files/leaflet_mediumwave_m2w_transmitterfamily_lo_2_.pdf, дата обращения 10.09.2016.

145. Maier F., Tissen A., Waal A. Evaluations and measurements of a transmitter delay diversity system for DRM+ // 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 1-4 April 2012. – 2012. – С. 1180-1184.

146. Maier F., Tissen A., Waal A. Evaluations and measurements of a single frequency network with DRM+ // European Wireless 2012. 18th European Wireless Conference. VDE Conference Publications. – 2012. – C. 1-5.

147. Murphy A. The Plymouth Digital Radio Mondiale (Drm) Trial: Long-term Reception Results // BBC Research White Paper WHP 174. February 2009.

148. MWCONT32 software, разработчик Norbert Schall, www.nschall.de

149. Pena I., Lauterbach T., Angueira P., Arrinda A., Matias J. M., De la Vega D., Velez M.M., Re C., Maier F. Planning factors for digital local broadcasting in the 26 MHz band//IEEE Transactions on Broadcasting. – 2011. – Vol. 57. – Issue 1. – C. 24-36.

150. Poole R. Digital Radio Mondiale: An E-Field Generator for Receiver Testing // BBC Research White Paper WHP 139. June 2006.

151. Poole R. Portable Receivers for Digital Radio Mondiale: A Look at Antennas and Sensitivities // BBC Research White Paper WHP 164. May 2008.

152. Prieto G., Guerra D., Matias J.M., et al. Digital Radio Mondiale (DRM) Measurement System Design and Measurement Methodology for Fixed and Mobile Reception // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. – Vol. 57. – No. 3. – P. 565-570, March 2008.

153. Prieto G., Vélez M., Arrinda A., Gil U., Guerra D., De la Vega D. External noise measurements in the medium wave band // IEEE Transactions on Broadcasting. – 2007. – Vol. 53. – №2. – C. 553-559.

154. Prieto G., Velez M.M., Angueira P., Guerra D., and De la Vega D. Minimum C/N requirements for DRM reception based on field trials // IEEE Commun. Lett. – 2005. – Vol. 9. – № 10. – C. 877-879.

155. Prieto G., Velez M.M., Angueira P., Guerra D., De la Vega D., and Arrinda A. Digital Radio Mondiale (DRM). Field trials for minimum C/N requirements // Proc. of the International Broadcasting Convention. IBC 2005. Amsterdam, The Netherlands. – 2005. – Vol. 1. – C. 43-48.

156. PSW Publishing Company 1996, SystemView by Elanix: the student edition: advanced dynamic system design and analysis, PSW Pub. Co, Boston, 196 p.

157. Rec. ITU-R BS.1114-9 (06/2015). Systems for terrestrial digital sound broadcasting to vehicular, portable and fixed receivers in the frequency range 30-3000 MHz. Geneva. – 2015.

158. Rec. ITU-R BS.1514-2 (03/2011). System for digital sound broadcasting in the broadcasting bands below 30 MHz. Geneva. – 2011.

159. Rec. ITU-R BS.1615-1 (05/2011). “Planning parameters” for digital sound broadcasting at frequencies below 30 MHz. Geneva. – 2011.

160. Rec. ITU-R BS.703 (06/1990). Characteristics of AM sound broadcasting reference receivers for planning purposes.

161. Rec. ITU-R P.1321-5 (07/2015). Propagation factors affecting systems using digital modulation techniques at LF and MF. Geneva. – 2015.

162. Rec. ITU-R P.372-13 (09/2016). Radio noise. Geneva. – 2016.

163. Rec. ITU-R P.1147-4 (08/2007). Prediction of sky-wave field strength at frequencies between about 150 and 1700 kHz. Geneva. – 2015.

164. Rec. ITU-R P.368-9 (02/2007). Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz. Geneva. – 2010.

165. Report ITU-R BS.2144 (05/2009). Planning parameters and coverage for Digital Radio Mondiale (DRM) broadcasting at frequencies below 30 MHz. Geneva. – 2009.

166. Report ITU-R BS.2384-0 (07/2015) Implementation considerations for the introduction and transition to digital terrestrial sound and multimedia broadcasting. Geneva. – 2015.

167. Report ITU-R BT.2049-7 (02/2016) Broadcasting of multimedia and data applications for mobile reception. Geneva. – 2016.

168. Richards N., Swanson H. Designing Efficient Medium - Wave Transmitters / - Broadcast Management of Engineering, March 1989.

169. RXTEST software, разработчик Norbert Schall, www.nschall.de

170. 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.

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

172. Waal A., Pagel D. Local radio in the 11 m band using DRM, results of the field strength measurements / Internal DRM-Consortium Document, DRM_TC-SE368. -2006.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального
директора ФГУП «РТРС»

_____ В. Д. Горегляд
«__» _____ 20__ г.

Приемник DRM-30

(для системы цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц)

Общие технические условия

(Базовые технические характеристики. Предоставляемые сервисы)

(вторая редакция)

Москва 2011

Настоящий стандарт распространяется на радиовещательные приемники и тюнеры, а также на все виды бытовых радиоэлектронных аппаратов (далее – аппараты), имеющих в своем составе радиоприемный тракт, предназначенный для приема сигналов цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц.

Стандарт не распространяется на приемники для специальных приложений, например, таких, которые обеспечивают декодирование сервисных данных без звукового декодирования.

1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

1.1. Аппараты в зависимости от условий эксплуатации, конструктивного исполнения и области применения разделяют на:

Общего применения (ОП)	Специального применения (СП)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Стационарный для домашнего применения; 2. Автомобильный; 3. Переносной; 4. Носимый (малогабаритный с батарейным питанием); 5. В составе комбинированного устройства, используемого населением при чрезвычайных ситуациях. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Приёмник – источник сигнала для объектов систем громкоговорящей связи и оповещения; 2. Приёмник – усилитель для автономных систем уличного звукового вещания; 3. Приёмник – исполнительное устройство систем оповещения.

1.2. Аппараты по электрическим и электроакустическим параметрам подразделяют на три группы сложности: высшую (0), первую (1) и вторую (2).

1.3. Требования к основным функциональным параметрам приведены в Таблице ПА.1.

1.4. Требования к основным радиочастотным параметрам приведены в Таблице ПА.2.

Таблица ПА.1 – Требования к основным функциональным параметрам

1. Требования к диапазону принимаемых частот	Аппараты должны обеспечивать прием сигналов радиовещательных станций в следующих (одном или нескольких) диапазонах частот со следующим шагом сетки частот:																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Наименование диапазона</th> <th>Диапазон частот</th> <th>Шаг сетки частот</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ДВ</td> <td>148,5-283,5 кГц</td> <td>3 кГц</td> </tr> <tr> <td>СВ</td> <td>526,5-1606,5 кГц</td> <td>1 кГц</td> </tr> <tr> <td>КВ1</td> <td>2,3-6,2 МГц</td> <td>5 кГц</td> </tr> <tr> <td>КВ2</td> <td>6,2-27 МГц</td> <td>5 кГц</td> </tr> </tbody> </table>	Наименование диапазона	Диапазон частот	Шаг сетки частот	ДВ	148,5-283,5 кГц	3 кГц	СВ	526,5-1606,5 кГц	1 кГц	КВ1	2,3-6,2 МГц	5 кГц	КВ2	6,2-27 МГц	5 кГц		
	Наименование диапазона	Диапазон частот	Шаг сетки частот															
	ДВ	148,5-283,5 кГц	3 кГц															
	СВ	526,5-1606,5 кГц	1 кГц															
КВ1	2,3-6,2 МГц	5 кГц																
КВ2	6,2-27 МГц	5 кГц																
Состав диапазонов частот устанавливают в технических условиях на аппарат конкретного типа (далее – ТУ). Рекомендуется поддержка всех диапазонов частот.																		
2. Требования к полосе захвата сигнала DRM	Полоса захвата сигнала DRM должна быть не менее +/- 600 Гц от номинальной сетки частот. Примечание. Работа передатчика в ряде режимов, особенно при использовании одновременного вещания DRM и AM (режим Simulcast) может сопровождаться отклонением от номинальной сетки частот																	
3. Требования к звуковой подсистеме	Аудио декодер должен поддерживать форматы кодирования HVXC, CELP, AAC и метод реконструкции высоких частот SBR. Для приемника, содержащего стереовыход, стерео декодирование (включая параметрическое стерео) обязательно.																	
	Поддерживаемые частоты дискретизации, кГц																	
	Для кодека HVXC: 8	Для CELP: 8, 16	Для AAC: 12, 24															
	Поддерживаемые скорости потока, бит в секунду																	
	Для кодека HVXC: от 2000 (без SBR) до 14360 (с SBR)	Для CELP: 3850 (без SBR) до 34300 (с SBR)	Для AAC: до 34760 (До 71960 для приемников с двойной полосой частот: 18кГц и 20 кГц)															
4. Требования к декодеру канала и демодулятору	Декодер канала и демодулятор должны поддерживать: <ul style="list-style-type: none"> - режимы помехоустойчивости A, B, C, D; - модуляцию 4-QAM и 16-QAM для канала SDC, и 16-QAM и 64-QAM для канала MSC; - уровни защиты: 0, 1, 2, 3 (64-QAM) и 0, 1 (16-QAM); - иерархическую модуляцию: SPP, VSPP (SP, HMsym, HMmix); - схемы защиты от ошибок EEP, UEP; - короткий и длинный интервалы интерливинга; - время задержки декодирования и демодуляции: 1,36...1,66 с (2,96...3,26 с) для короткого (длинного) интервалов интерливинга; - полосы частот сигнала DRM: 4,5 кГц, 5 кГц, 9 кГц, 10 кГц. Рекомендуется обеспечить возможность поддержки полос частот сигнала DRM 18 кГц и 20 кГц со скоростями потока данных до 71960 бит в секунду для AAC декодера при транспортной скорости в MSC до 91770 бит в секунду.																	

<p>5. Требования к приему DRM сигналов</p>	<p>DRM приемник должен обеспечивать: Возможность автоматического перехода на альтернативную частоту с той же DRM программой (переключение частот при изменении условий приёма, в движении и т.д.). Прием аналоговых станций с АМ и декодирование AMSS. Индикацию возможности приема на данной частоте во время настройки. Индикацию уровня сигнала или отношения сигнал-шум (для портативных приемников или приемников с внешними антеннами). Отображение доступных звуковых служб и служб данных, передаваемых внутри одного мультиплекса (до 4 служб), и возможность ручного переключения между ними. Автоматическое переключение между службами по сигналам оповещения. Автоматический поиск и приём в фоновом режиме службы, содержащей сигналы оповещения и оперативного информирования, автоматическое переключение приёмника и воспроизведение звуковой программы при получении сигнала оповещения.</p>
<p>6. Прием текстовой информации</p>	<p>Прием и декодирование символов алфавита русского языка в кодировке ISO/IEC 10646 (Unicode) в форме UTF-8. Индикация времени, транслируемого вещателем. Поддержка приема информации о чрезвычайных ситуациях. Отображение названия передающей станции.</p>
<p>7. Подключение внешних устройств</p>	<p>Наличие разъёма для внешней антенны, цифрового выхода SPDIF, выхода на головные телефоны, USB стыка.</p>
<p>8. Прочие требования</p>	<p>Автоматический поиск вещательных программ во всех диапазонах. Наличие цветного графического дисплея с разрешением не менее 320x240 точек. В приемниках низшего ценового диапазона возможно применение буквенно-символьного (2-х строкового, 16-ти символьного) дисплея. Специальные приемники (тюнеры), подключаемые к внешнему контроллеру, могут не иметь собственного дисплея. Русифицированный интерфейс управления. Рекомендуется расширить пользовательские характеристики приёмника родственными функциями (воспроизведение с внешнего носителя, запись радиопрограмм, ГЛОНАСС навигация и т.д.). При декодировании вещательных DRM-сигналов рекомендуется декодировать следующие протоколы дополнительной информации: EPG, MOT Slideshow, MOT Journaline, TPEG, TMC.</p>
<p>9. Электропитание</p>	<p>Питание от сухих элементов, внешнего сетевого источника питания, USB стыка. Если вместо сухих элементов используются аккумуляторные батареи, необходима индикация состояния заряда, возможность подзарядки от внешних источников питания.</p>

Таблица ПА.2 – Требования к основным радиочастотным параметрам

1. Чувствительность, не хуже, в диапазонах частот:	ДВ	СВ	КВ1 (2,3 – 6,2 МГц)	КВ2 (6,2 – 27 МГц)		
Измеренная по напряженности поля для носимых приемников со встроенными антеннами, дБмкВ/м	46	40	32	28		
Измеренная с эквивалентом антенны №1 для носимых приемников, дБмкВ	68	62	54	50		
Измеренная с эквивалентом антенны №2 для носимых приемников, дБмкВ	37	31	23	19		
Для автомобильных и стационарных приемников, дБмкВ	8	8	8	8		
2. Динамический диапазон, дБ	84	90	80	80		
3. Избирательность по соседнему каналу	Частотный интервал, кГц		Подавление для всех диапазонов частот, не менее, дБ			
1 канал	9/10		25			
2 канал	18/20		35			
3 канал	27/30		45			
4 и более	$\geq 36/40$ и < 400		50			
Удаленные каналы	≥ 400		≥ 60			
4. Динамический диапазон по блокированию	Более 60 дБ					
5. Подавление со-канального АМ сигнала	Более -5 дБ					
6. Интермодуляционные искажения	Не менее 40 дБ от уровня принимаемого сигнала (для частот, отстоящих на 200 и 400 кГц от принимаемого сигнала)					
7. Требуемое для декодирования отношение сигнал/шум в различных каналах распространения	Номер канала распространения и № тестового набора (см. [1])					
	1	2	3	4	5	6
Требуемое ОСШ, не более, дБ	21	22	31	26	20	25
8. Задержка начала декодирования сигнала в различных каналах распространения при заданном ОСШ, дБ:	26	27	39	31	25	30
Задержка начала декодирования, не более, мсек:	3200		4000			

1.5. Полосы звуковых частот, принимаемых в стандарте DRM в зависимости от ширины полосы передатчика и способа кодирования, и требования к диапазону воспроизводимых частот приведены в Таблице ПА.3.

Таблица ПА.3 – Полосы звуковых частот, принимаемых в стандарте DRM в зависимости от ширины полосы передатчика и способа кодирования, и требования к диапазону воспроизводимых частот

Ширина полосы радиочастот	Частота дискретизации	Полоса декодируемых звуковых частот с SBR** / без SBR	Стандарт кодирования и область применения	Диапазон воспроизводимых частот звукового давления всего тракта при неравномерности частотной характеристики звукового давления 14 дБ, Гц, не уже:		
				Норма для аппаратов групп сложности		
кГц	кГц	Гц		0	1	2
4,5	16 (8)	50 – 10000/ 50 – 7000 (50 – 7000/ 100 – 3800)	MPEG-4 CELP. Используется в каналах с большим уровнем помех, при одновременной передаче AM и DRM сигналов	80-12500	125-10000	200-10000 (стерео) 315-6300* (моно)
5						
9	24 (12)	20 – 15000/ 50 – 10000 (50 – 10000/ 100 – 6000)	MPEG-4 AAC. Перспективное звуковое кодирование, включающее средства повышения помехоустойчивости для универсального монофонического и стереофонического радиовещания;	80-12500	125-10000	200-10000 (стерео) 315-6300* (моно)
10						
18	Такие же, как при ширине полосы радиочастот 9 и 10 кГц		Используется для организации 2-х высококачественных радиоканалов, передачи стереосигнала, дополнительных сервисов	80-12500	125-10000	200-10000 (стерео) 315-6300* (моно)
20						

* Для аппаратов объемом менее 0,001 м³ диапазон воспроизводимых частот устанавливаются в ТУ.

** Для кодирования области верхних частот по технологии SBR используется удвоенная (относительно базовой) частота дискретизации.

1.6. Примеры организации мультиплекса в канале MSC приведены в Таблице ПА.4.

1.7. Перечень возможных сервисов аппаратов (информативный) приведен в Таблице ПА.5.

1.8. Примеры вариантов расположения спектра АМ относительно спектра DRM сигнала приведены в Таблице ПА.6.

Таблица ПА.4 – Примеры организации мультиплекса в канале MSC


Канал MSC (скорость в ДВ и СВ диапазонах от 20 до 31 кбит/сек, в КВ диапазоне от 11 до 24 кбит/сек) для ширины полосы частот 9/10 кГц			
1 канал аудио + текстовое сообщение			
1-й канал аудио + текстовое сообщение		2-й канал аудио + текстовое сообщение	
1 канал аудио + текстовое сообщение			Данные
1-й канал аудио + текстовое сообщение	2-й канал аудио + текстовое сообщение	3-й канал аудио + текстовое сообщение	Данные
Пример динамической реконфигурации передаваемых программ			
			

Таблица ПА.5 – Перечень возможных сервисов аппаратов (информативный)

№ п/п	Служба/сервис	Объем данных/скорость	Назначение
1	Канал FAC – служебный канал, предназначенный для передачи информации управления работой приемника.		
1.1	PIN – Идентификатор программы	24 бит	
1.2	CI – язык вещания	4 бит	
1.3	PT – тип программы (новости, музыка, спорт и т.д.)	5 бит	
2	Канал SDC - служебный канал, предназначенный для передачи информации о способах декодирования сервисов основного канала передачи информации (MSC), с общей скоростью от 13 до 207 бит/сек и следующих сервисов.		
2.1	PS – Название радиостанции/программы (тип 1)	До 16 символов	В формате UTF-8
2.2	AFS:		
2.2.1	Список альтернативных частот (тип 3)	До 16 частот	
2.2.2	Расписание переключения частот (тип 4)	До 15 расписаний	
2.2.3	Регионы альтернативных частот (тип 7)	До 16 регионов	
2.4	EW – Сигналы оповещения (тип 6)	До 10 сигналов	
2.5	CT – Время и дата (тип 8)		
2.6	CI – Язык вещания (расширенный) и страна (тип 12)		
3	Канал MSC - основной канал передачи информации для пользователя от 8 до 72 кбит/с.		
3.1	MPEG-4 AAC – усовершенствованное аудиокодирование	4,8-72 кбит/с	Прием звуковых радиопрограмм с высоким качеством
3.2	MPEG-4 CELP – низкоскоростное помехозащищённое кодирование речи	3,85-23,8 кбит/с	Прием речевых программ
3.3	MPEG-4 HVXC – кодирование речи для очень низких скоростей передачи	2-4 кбит/с	Прием речевых сообщений
3.4	RT – Радиотекст	80 бит/с	Сообщения типа «бегущая строка», передается внутри звуковой службы
3.5	МОЛНИЯ.ИНФО – протокол оперативного информирования населения о чрезвычайных, нештатных и аварийных ситуациях	0,5-10 кбит/с	VIM – Переключение приёмника на канал для прослушивания сообщений особой важности
3.6	EPG (Electronic Program Guide) – программа передач	0,5-10 кбит/с	

3.7	Journaline – протокол передачи коротких текстовых сообщений в иерархической форме	0,5-10 кбит/с	<p>WN – Трансляция прогнозов погоды</p> <p>EC – Информация об изменениях в работе транспорта</p> <p>CEI – Передача информации о курсах валют, котировках, другой оперативной информации по филиальной сети банков</p> <p>SC – Информирование о результатах спортивных соревнований</p> <p>VI – Информирование населения о текущих культурных мероприятиях в регионе, расписания работы, кинотеатров, театров, музеев и др.</p> <p>TIS – Передача корпоративной информации для службы автоперевозчиков</p>
3.8	MOT Slideshow – передача файлов	0,5-10 кбит/с	<p>SSW – Передача статических, сменяющихся изображений</p> <p>PMS – Передача ориентировок экипажам милиции</p> <p>PLP – Передача фотографий пропавших людей</p>
3.9	TPEG (Transport Protocol Experts Group) – передача информации о дорожно-транспортной обстановке	0,5-10 кбит/с	<p>ARS – Информирование участников дорожного движения о затруднениях на дорогах и рекомендуемых маршрутах движения, с отображением информации на дисплее приёмника или озвучивании с увеличением громкости с помощью голосового синтезатора речи на выбранном языке, а также выводе информации на принтер</p> <p>PP – Информация о наличии свободных мест на парковках</p>
3.10	TMC (Traffic Message Channel) – передача информации о дорожно-транспортной обстановке	0,5-10 кбит/с	
3.11	DIVEEMO – протокол передачи видео низкого разрешения	30-72 кбит/с	
3.12	TDC – транспортный канал данных (синхронная или асинхронная передача данных, IP tunneling;)	0,5-72 кбит/с	<p>CNS – Закрытая система оповещения для специальных служб (пожарные, скорая помощь, дорожники и др.)</p> <p>RGC – Передача сигналов дистанционного управления на раздельное включение ламп в сетях освещения, электромоторов, насосов, кондиционеров и другого технологического оборудования</p> <p>SLC – Передача сигналов управления и информации на световые дорожные знаки и указатели</p> <p>MIS – Передача метеорологической информации и управление движением авиационного, морского, железнодорожного, городского и речного транспорта</p>

Таблица ПА.6 – Примеры вариантов расположения спектра АМ относительно спектра сигнала DRM

Ширина полосы для Smailecast	Ширина полосы сигнала DRM	АМ сигнал относит. DRM	Расположение в спектре
20kHz	4,5kHz Половина канала	Правый	
20kHz	4,5kHz Половина канала	Левый	
20kHz	5kHz Половина канала	Правый	
20kHz	5kHz Половина канала	Левый	

Продолжение таблицы ПА.6			
18kHz	9kHz Полный канал	Правый	
18kHz	9kHz Полный канал	Левый	
18kHz	10kHz Полный канал	Правый	
18kHz	10kHz Полный канал	Левый	

18kHz	4,5kHz Половина канала	Правый	
18kHz	4,5kHz Половина канала	Левый	
18kHz	5kHz Половина канала	Правый	
18kHz	5kHz Половина канала	Левый	

20kHz	Полный канал	Правый	
20kHz	Полный канал	Левый	
20kHz	Полный канал	Правый	
20kHz	Полный канал	Левый	

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

2.1. Характеристики.

2.1.1. Аппараты должны быть рассчитаны на эксплуатацию в условиях по ГОСТ 15150 для исполнений УХЛ категории 4.2 или У категории 1.1.

2.1.2. Аппараты должны быть рассчитаны на питание от сети переменного тока с частотой $(50 \pm 0,5)$ Гц, напряжением (220 ± 22) В или (и) от автономных источников постоянного тока, номинальное напряжение которых с допускаемыми отклонениями от плюс 10 до минус 30% указывают в ТУ.

2.1.3. Функциональные узлы, органы управления и индикации аппаратов должны иметь надписи, поясняющие их назначение или (и) условные функциональные обозначения.

2.1.4. Уровень промышленных радиопомех, создаваемых аппаратами. Не должен превышать установленного ГОСТ 22505 и «Общесоюзными нормами допускаемых промышленных радиопомех. Радиовещательные приемники с амплитудной модуляцией. Допускаемые величины. Методы испытаний» (Нормы 12-76).

Внешняя помехозащищенность аппаратов от промышленных радиопомех должна соответствовать требованиям «Общесоюзных норм помехозащищенности приемных устройств радиовещания и телевидения от промышленных радиопомех. Допускаемые величины. Методы испытаний» и «Временных общесоюзных норм внешней помехозащищенности бытовой радиоэлектронной аппаратуры. Допустимые значения. Методы измерения» (Нормы 21-86).

2.1.5. Аппараты, имеющие вход для подключения внешней антенны, следует рассчитывать на подключение антенны с номинальным значением волнового сопротивления 50 Ом.

2.1.6. Аппараты должны выдерживать климатические и механические воздействия по ГОСТ 11478, установленные для групп:

I – для стационарной аппаратуры;

III – для переносной аппаратуры;

IV – для носимой аппаратуры.

Перечень и нормы на параметры, проверяемые после механических и климатических воздействий, устанавливается в ТУ в соответствии с требованиями ГОСТ 11478.

2.1.7. Аппараты должны соответствовать требованиям безопасности в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60065-2002.

2.2. Комплектность.

2.2.1. Комплектность аппаратов устанавливают в ТУ.

2.3. Маркировка.

2.3.1. На аппараты должна быть нанесена маркировка, содержащая:

- 1) полное торговое наименование;
- 2) товарный знак и (или) наименование предприятия-изготовителя;
- 3) отметку ОТК предприятия-изготовителя;
- 4) месяц и год выпуска.

Маркировку выполняют любым способом, обеспечивающим ее сохранность на протяжении всего срока эксплуатации аппарата.

2.3.2. Потребительская маркировка индивидуальной тары или наклеиваемая на нее этикетка должна содержать:

- 1) полное торговое наименование аппарата;
- 2) товарный знак и (или) наименование предприятия-изготовителя;
- 3) отметку ОТК предприятия-изготовителя;
- 4) месяц и год выпуска;
- 5) массу брутто аппарата;
- 6) гарантийный срок хранения.

2.3.3. На транспортную тару должны быть нанесены манипуляционные знаки, соответствующие надписям: «Осторожно, хрупкое!», «Боится сырости», «Соблюдение интервала температур» (при необходимости) и знак высоты штабелирования (кроме миниатюрных аппаратов).

2.4. Упаковка.

2.4.1. Аппараты должны быть упакованы в индивидуальную тару, изготовленную по ТУ или конструкторской документации на тару конкретного типа, обеспечивающую их сохранность при транспортировании и хранении.

2.4.2. В ТУ на аппарат должны быть указаны габаритные размеры индивидуальной тары, а также масса индивидуальной тары с аппаратами.

3. ПРИЕМКА.

3.1. Приемка аппаратов – по ГОСТ 21194.

4. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ.

4.1. Условия измерений:

– температура окружающей среды: от 15 до 35°C;

– относительная влажность: от 25% до 75%;

– атмосферное давление: от 86 кПа до 106 кПа.

4.2. Проведение испытаний и измерений.

4.2.1. Аппараты, содержащие вход для подключения внешней антенны, испытываются исключая антенну (с антенного входа), аппараты со встроенной антенной испытываются также и со встроенной антенной (по напряженности поля).

4.2.2. Испытания проводят во всех поддерживаемых диапазонах частот.

4.2.3. Соответствие аппарата требованиям п. 1.3 (пп. 1-9 Таблицы ПА.1) проверяют, устанавливая соответствующие режимы работы.

4.2.4. Измерения параметров по п. 1.4 (пп. 1-8 Таблицы ПА.2) проводят в соответствии с [ПА.1]. Эквиваленты антенны №1 для носимых приемников и эквивалент антенны №2 описаны в [ПА.1]. При измерении параметров носимых приемников со встроенными антеннами диапазонов НЧ и СЧ допускается использование однорамочного генератора электромагнитного поля в соответствии с [ПА.2].

4.2.5. Измерения параметров по п. 1.5. в части требований к диапазону воспроизводимых частот проводят в соответствии с ГОСТ 23850.

4.2.6. Соответствие аппарата требованиям пп. 2.1.2, 2.1.3, 2.2.-2.4. проверяют визуально, сличением с конструкторской документацией, измерением

размеров измерительным инструментом, обеспечивающим требуемую точность, а также методами, установленными в ТУ.

4.2.7. Уровень создаваемых радиопомех (п. 2.1.4.) измеряют по ГОСТ 22505 и Нормам 12-76.

Соответствие аппарата требованиям по помехозащищенности (п. 2.1.4.) проверяют по Нормам 21-86 и «Общесоюзным нормам помехозащищенности приемных устройств радиовещания и телевидения от промышленных радиопомех. Допускаемые величины. Методы испытаний».

4.2.8. Соответствие аппарата по устойчивости к климатическим и механическим воздействиям (п. 2.1.6.) проверяют по ГОСТ 11478.

4.2.9. Соответствие требованиям безопасности (п.2.1.7.) проверяют по ГОСТ Р МЭК 60065-2002.

5. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ.

5.1. Транспортирование.

5.1.1. Упакованные аппараты могут транспортироваться всеми видами транспорта (в соответствии с условиями группы 5 по ГОСТ 15150), кроме негерметизированных отсеков самолетов и открытых палуб кораблей и судов.

5.2. Хранение.

5.2.1. Аппараты на складах поставщика и потребителя должны храниться в условиях хранения 1 по ГОСТ 15150 при отсутствии в воздухе кислотных, щелочных и других агрессивных примесей.

6. УКАЗАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ.

6.1. Аппараты следует эксплуатировать в условиях, установленных ГОСТ 15150 для изделий климатического исполнения УХЛ категории 4.2. при температурах от 15 до 40°C (стационарные) и исполнения У категории 1.1 при температурах от 1 до 45°C (носимые).

Условия эксплуатации переносных аппаратов – по ТУ.

7. ГАРАНТИИ ИЗГОТОВИТЕЛЯ.

7.1. Изготовитель гарантирует соответствие аппаратов требованиям настоящего стандарта при соблюдении потребителем условий эксплуатации, транспортирования и хранения, установленных настоящим стандартом.

7.2. Гарантийный срок эксплуатации аппаратов – не менее года со дня продажи через розничную торговую сеть.

7.3. Гарантийный срок хранения аппаратов – 2,5 года со дня их изготовления.

Список литературы

ПА.1. Приложение Б.

ПА.2. ГОСТ 9783-88. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Методы электрических высокочастотных измерений. – М.: Издательство стандартов, 1991.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального
директора ФГУП «РТРС»

_____ В. Д. Горегляд
« ____ » _____ 20 ____ г.

Приемник DRM-30

(для системы цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц)

Методы электрических высокочастотных измерений

(первая редакция)

Москва 2011

Настоящий документ распространяется на радиовещательные приемники и тюнеры, а также на все виды бытовых радиоэлектронных аппаратов (далее – аппараты), имеющих в своем составе радиоприемный тракт, предназначенный для приема сигналов цифрового радиовещания DRM в диапазонах частот ниже 30 МГц.

Документ устанавливает методы измерения характеристик и параметров радиоприемников DRM с использованием высокочастотных сигналов, подаваемых на антенные входы радиоприемников или наводимых в магнитной антенне.

Методы измерений, установленные в настоящем документе, обязательны при всех видах испытаний, кроме приемо-сдаточных.

1. ОБЩИЕ УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Измерения проводят в нормальных климатических условиях:

- температура окружающей среды: от 15 до 35°C;
- относительная влажность: от 25% до 75%;
- атмосферное давление: от 86 кПа до 106 кПа.

1.2. Если до начала измерений радиоприемник находился в климатических условиях, отличных от нормальных, то перед измерениями его следует выдержать в нормальных климатических условиях не менее 12 часов.

1.3. Измерения должны проводиться в условиях, исключающих влияние помех на результаты измерений.

1.4. Измерения параметров радиоприемников, использующих источники питания более одного типа (сеть переменного тока и автономные источники постоянного тока), проводят с источником питания каждого типа.

1.5. Условия измерений аудио сигнала и коэффициента ошибки (BER).

Коэффициент ошибки (BER) должен измеряться на выходе многоуровневого декодера приемника. В течении измерений приемник должен находиться в состоянии синхронизации. Если не указано специально, измерения BER проводятся в MSC (основном канале передачи информации), используя равную защиту от ошибок (ECP), уровень защиты «1», режим MSC «0», глубину

интерливинга «1» и режим помехоустойчивости «В». Ширина занимаемой полосы частот должна быть 9 кГц для частот диапазонов НЧ и СЧ, и 10 кГц для частот диапазона ВЧ.

Тестовая последовательность должна занимать весь мультиплекс для уменьшения времени измерений. Число бит за время измерений должно быть не менее 10^6 , если не указано другого значения.

В качестве тестового сегмента может использоваться любая заранее известная цифровая последовательность длиной более 1 символа. Например, может использоваться тестовая последовательность «все нули».

В случае, если в приемнике недоступно (не предусмотрено) измерение BER, для измерения характеристик приемника может быть использован аудио сигнал. Процедура применения данного метода описана в Приложении Б.1.

1.6. Сигнал DRM.

Генерируемый сигнал DRM должен соответствовать ETSI ES 201 980 [ПБ.1].

1.7. Аналоговый АМ сигнал.

Аналоговый АМ сигнал необходим для измерения величины подавления со-канального АМ сигнала. АМ сигнал может генерироваться с модуляцией «вещательным» шумом ITU. При возникновении сложностей с формированием такого сигнала он может быть симитирован посредством стандартного измерительного оборудования в соответствии с рисунком ПБ.1. В качестве модулирующего сигнала используется синусоидальный генератор качающейся частоты в диапазоне от 100 Гц до 4,1 кГц со временем свипирования 20 мс. В генераторе АМ сигнала устанавливается глубина модуляции 30%. Для измерений в качестве мощности АМ сигнала учитывают только мощность несущей, пренебрегая мощностью боковых полос.

Показанный спектр соответствует одному полному циклу свипирования модулирующего сигнала (20 мс).



Рисунок ПБ.1 – Генерация АМ сигнала

2. ЭКВИВАЛЕНТЫ АНТЕННЫ

2.1. Общие замечания.

Для различных применений используются различные типы антенн. Так, портативные приемники обычно поставляются с высокоомными электрически короткими штыревыми антеннами. Чтобы не допустить больших потерь сигнала, приемник должен представлять собой соответствующую нагрузку для высокоомной антенны. Автомобильные приемники обычно также имеют высокоомный вход. Профессиональные приемники, как правило, имеют входное сопротивление 50 Ом.

При измерениях чувствительности портативных приемников рекомендуется проводить измерения в электромагнитной камере с использованием его штатной антенны. Допускается проведение измерений с эквивалентом антенной цепи, описанной в параграфе 2.3. Эквивалент антенной цепи для автомобильных приемников приведен в параграфе 2.5. Эквивалент антенной цепи должен быть присоединен непосредственно к высокочастотному входу приемника для исключения влияния соединительных кабелей.

2.2. Антенная система с входным сопротивлением 50 Ом.

DRM приемник, ВЧ вход которого имеет сопротивление 50 Ом, соединяется непосредственно с генератором сигнала. Требуемые уровни напряжения устанавливаются непосредственно на генераторе сигнала.

2.3. Эквивалент антенны №1 для носимых приемников.

Данный эквивалент наиболее точно описывает параметры короткой (0,7 м) штыревой антенны средним диаметром 5 мм, установленной на приемнике размером 250x150x100 мм, что достаточно типично для портативных приемников.

Принципиальная схема эквивалента антенны №1 для носимых приемников приведена на рисунке ПБ.2, где $R_1 = 180 \text{ Ом}$, $R_2 = 68 \text{ Ом}$, $R_3 = 5,1 \text{ Ом}$, $C_1 = 6,8 \text{ пФ}$, $C_2 = 3,9 \text{ пФ}$.

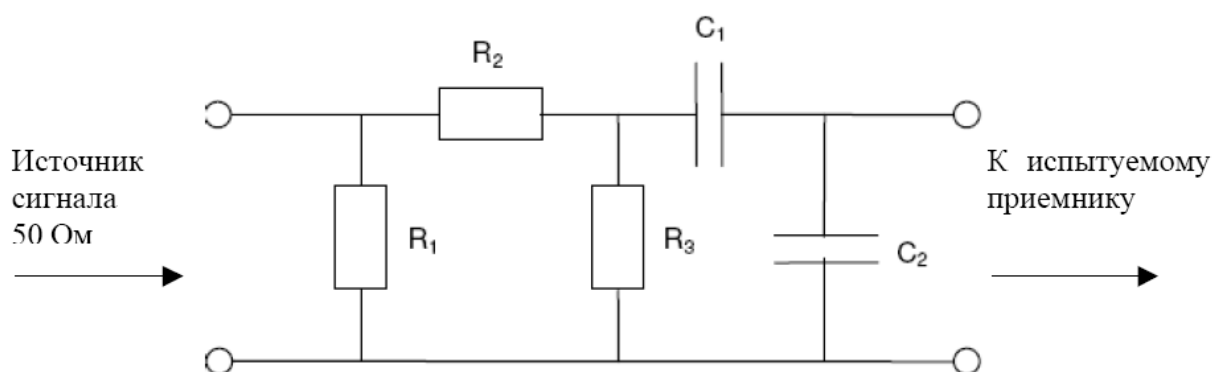


Рисунок ПБ.2 – Принципиальная схема эквивалента антенны №1 для носимых приемников

Входной уровень – 85 дБм (22дБмкВ) эквивалентен напряженности поля 0 дБмкВ/м.

2.4. Эквивалент антенны №2 для носимых приемников.

Описанный выше эквивалент антенны №1 для носимых приемников имеет большое затухание и не подходит для измерения динамического диапазона стандартными приборами. По этой причине для измерений высокого уровня используется эквивалент антенны №2 с меньшим затуханием, но меньшей точностью соответствия реальной антенне, что при данных измерениях не столь существенно.

Принципиальная схема эквивалента антенны №2 такая же, как и для №1 (рисунок ПБ.2), где R_1 – не устанавливается, $R_2 = 0 \text{ Ом}$, $R_3 = 50 \text{ Ом}$, $C_1 = 6,8 \text{ пФ}$, $C_2 = 3,9 \text{ пФ}$.

При длине антенны 0,7 м ее действующая высота составит 0,35 м. Соответственно, требуемый входной уровень равен требуемой напряженности поля, умноженной на 0,35.

Так, для имитации напряженности поля 10 В/м, на выходе генератора должно быть установлено напряжение 3,5 В (+24 дБм).

2.5. Эквивалент антенны для автомобильных приемников.

Эквивалент антенны для автомобильных приемников типичен для приемников с высокоомными входами, рассчитанными на работу с активными антеннами с выходным сопротивлением 50 Ом.

Принципиальная схема эквивалента антенны для автомобильных приемников приведена на рисунке ПБ.3, где $R_1 = 150$ Ом, $R_2 = 37,5$ Ом, $R_3 = 470$ Ом, $R_4 = 220$ Ом, $C_1 = 470$ нФ. Для этого эквивалента антенны $U_G = U_R$.

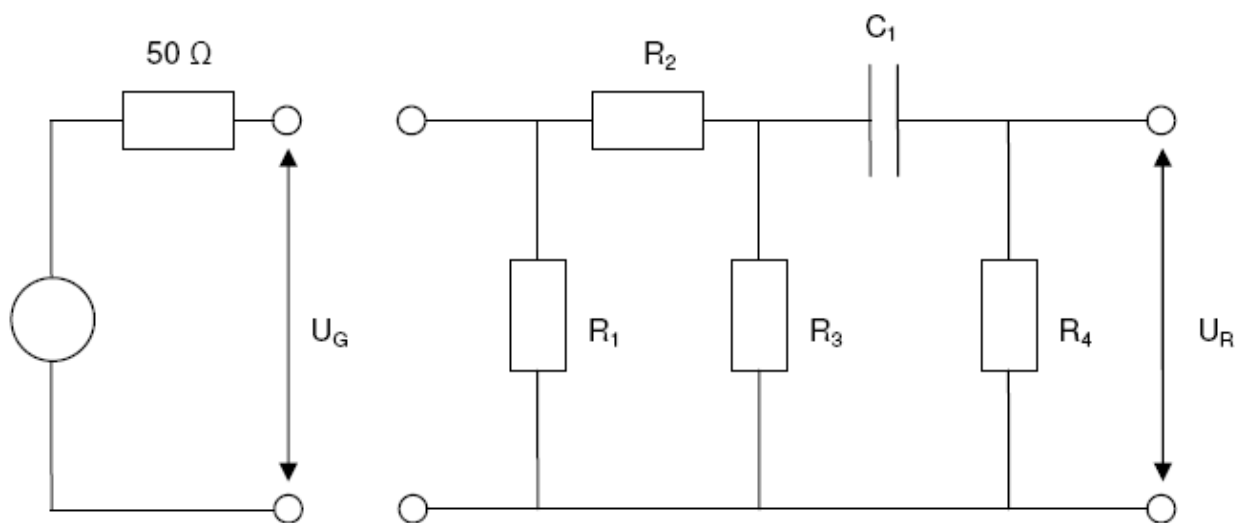


Рисунок ПБ.3 – Принципиальная схема эквивалента антенны для автомобильных приемников

Все указанные в последующих разделах уровни напряжения устанавливаются на выходе генератора сигналов при использовании соответствующих эквивалентов антенных цепей. Затухание эквивалентов не зависит от частоты и от входного сопротивления приемника, если оно выше 300 Ом.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

3.1. Измерение чувствительности с радиочастотного входа.

Схема измерительной установки для измерения чувствительности с радиочастотного входа приведена на рисунке ПБ.4. Входной уровень уменьшается до тех пор, пока коэффициент ошибки (BER) не достигнет величины 10^{-4} . Значения чувствительности фиксируются в дБмкВ.

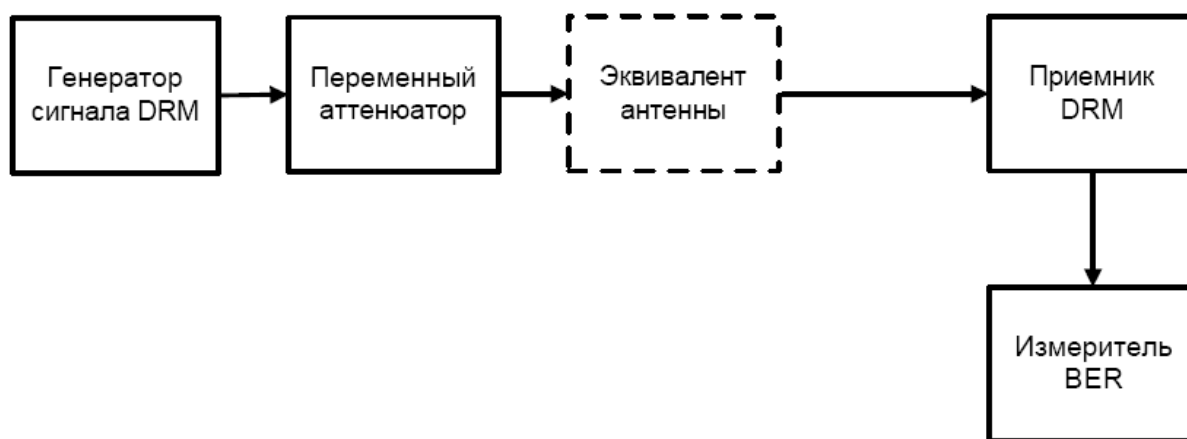


Рисунок ПБ.4 – Схема измерительной установки для измерения чувствительности с радиочастотного входа

3.2 Измерение чувствительности по напряженности электромагнитного поля.

Схема измерительной установки для измерения чувствительности по напряженности электромагнитного поля приведена на рисунке ПБ.5. Входной уровень уменьшается до тех пор, пока коэффициент ошибки (BER) не достигнет величины 10^{-4} . Значения чувствительности фиксируются в дБмкВ/м.

Описание генератора электромагнитного поля приведено в [ПБ.2]. Допускается использование однорамочного генератора электромагнитного поля в соответствии с [ПБ.3]. Неравномерность поля не должна превышать величины ± 3 дБ.



Рисунок ПБ.5 – Схема измерительной установки для измерения чувствительности по напряженности электромагнитного поля

4. ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

4.1. Динамический диапазон – разница между наиболее слабым и наиболее сильным сигналами, которые могут быть демодулированы.

4.2. Схема измерительной установки для измерения динамического диапазона такая же, как на рисунке ПБ.4. Входной уровень увеличивается до тех пор, пока коэффициент ошибки (BER) не достигнет величины 10^{-4} , или до потери синхронизации. Измерения проводят с эквивалентом антенны №2 - для носимых приемников, или с эквивалентом антенны для автомобильных приемников - для автомобильных приемников. Значения динамического диапазона выражаются в дБ относительно требуемой минимальной чувствительности.

5. ИЗМЕРЕНИЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ ПО СОСЕДНЕМУ КАНАЛУ

5.1. Схема измерительной установки для измерения избирательности по соседнему каналу приведена на рисунке ПБ.6. Как полезный, так и мешающий сигналы должны быть сигналами DRM. Измерения проводят для верхних и нижних соседних каналов. Полоса занимаемых частот для обоих сигналов должна быть 9 кГц для диапазонов НЧ и СЧ, и 10 кГц для диапазона ВЧ. Выходной спектр генератора DRM сигнала должен иметь уровень интермодуляционных искажений не более -45 дБ (при отстройке 4,5 кГц или 5 кГц от центральной частоты) и достаточно низкий для проведения измерений уровень шумов.

5.2. Уровень полезного сигнала $P_{\text{полезн}}$ на входе DRM приемника устанавливается аттенюатором 1 на 10 дБ выше требуемой минимальной чувствительности при выключенном генераторе 2. Затем уровень мешающего сигнала $P_{\text{меш}}$ увеличивают до тех пор, пока коэффициент ошибки (BER) не достигнет величины 10^{-4} .

Величину избирательности по соседнему каналу $A_{\text{ск}}$ DRM приемника вычисляют в дБ как: $A_{\text{ск}} = P_{\text{меш}} [\text{дБ}] - P_{\text{полезн}} [\text{дБ}]$.

Используется худшее значение из измерений для верхних и нижних соседних каналов.

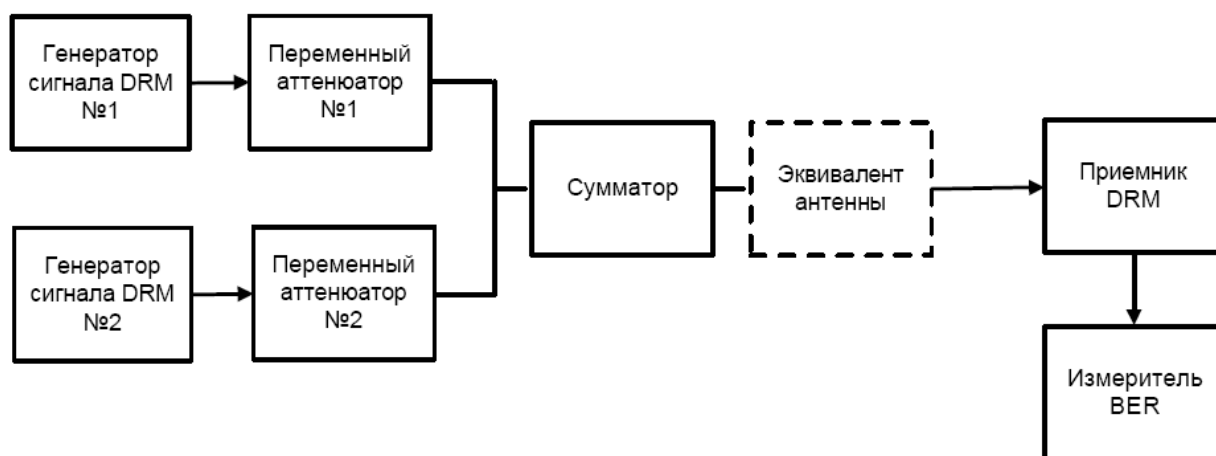


Рисунок ПБ.6 – Схема измерительной установки для измерения избирательности по соседнему каналу

6. ИЗМЕРЕНИЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ ПО УДАЛЕННЫМ КАНАЛАМ

6.1. Измерение избирательности по удаленным (более чем на 400 кГц) каналам проводят в соответствии с п. 5. Уровень полезного сигнала $P_{\text{полезн}}$ на входе DRM приемника устанавливается аттенюатором 1 на 20 дБ выше требуемой минимальной чувствительности при выключенном генераторе 2.

Допускается не более трех каналов приема, в которых норма на избирательность по удаленным каналам может быть снижена до величины 40 дБ. Эти каналы выбираются производителем приемников и указываются в протоколе измерений.

7. ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ПО БЛОКИРОВАНИЮ

7.1. Схема измерительной установки для измерения динамического диапазона по блокированию приведена на рисунке ПБ.6. Как полезный, так и мешающий сигналы должны быть сигналами DRM. Частота мешающего сигнала должна отстоять не менее, чем на ± 400 кГц от центральной частоты полезного сигнала. Измерения проводят при отстройках мешающего сигнала как вниз, так и вверх.

7.2. Уровень полезного сигнала $P_{\text{полезн}}$ на входе DRM приемника устанавливается аттенюатором 1 на 3 дБ выше требуемой минимальной чувствительности при выключенном генераторе 2. Затем уровень мешающего сигнала $P_{\text{меш}}$ увеличивают до тех пор, пока коэффициент ошибки (BER) не достигнет величины 10^{-4} .

Величину динамического диапазона по блокированию V_r DRM приемника вычисляют в дБ как: $V_r = P_{\text{меш}} [\text{дБ}] - P_{\text{полезн}} [\text{дБ}]$.

Используется худшее значение из измерений при отстройках мешающего сигнала как вниз, так и вверх.

Допускается не более трех каналов приема, в которых норма на величину динамического диапазона по блокированию может быть снижена до величины 40 дБ. Эти каналы выбираются производителем приемников и указываются в протоколе измерений.

8. ИЗМЕРЕНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ СО-КАНАЛЬНОГО АМ СИГНАЛА

8.1. Схема измерительной установки для измерения величины подавления со-канального АМ сигнала приведена на рисунке ПБ.7. Полезный сигнал должен быть сигналом DRM. Мешающий сигнал должен быть сигналом АМ в соответствии с п.1.7. Частота мешающего сигнала должна отстоять на 70 Гц от центральной частоты полезного сигнала.

8.2. Уровень полезного сигнала $P_{\text{полезн}}$ на входе DRM приемника устанавливается аттенюатором 1 на 20 дБ выше требуемой минимальной чувствительности при выключенном генераторе 2. Затем уровень мешающего

сигнала $P_{\text{меш}}$ увеличивают до тех пор, пока коэффициент ошибки (BER) не достигнет величины 10^{-4} .

Величину подавления со-канального АМ сигнала C_T DRM приемника вычисляют в дБ как: $C_T = P_{\text{меш}} [\text{дБ}] - P_{\text{полезн}} [\text{дБ}]$.

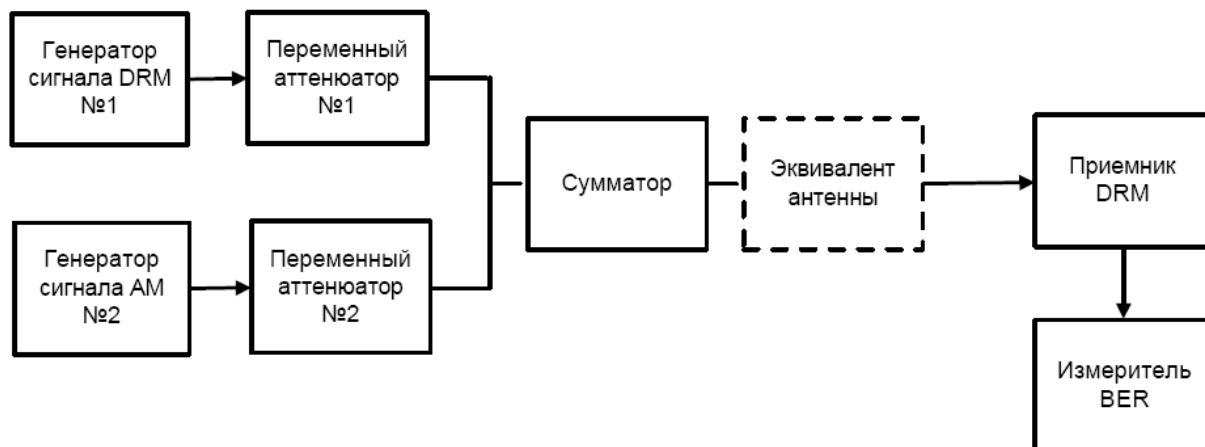


Рисунок ПБ.7 – Схема измерительной установки для измерения величины подавления со-канального АМ сигнала

9. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ

9.1. Схема измерительной установки для измерения уровня интермодуляционных искажений приведена на рисунке ПБ.8. Полезный и мешающий сигналы должен быть сигналами DRM. Частота мешающего сигнала DRM должна отстоять на 400 кГц от частоты полезного сигнала. Частота синусоидального сигнала должна отстоять на 200 кГц от частоты полезного сигнала, с той же стороны, что и частота мешающего DRM сигнала.

9.2. Уровень полезного сигнала $P_{\text{полезн}}$ на входе DRM приемника устанавливается аттенюатором 1 на 20 дБ выше требуемой минимальной чувствительности при выключенных генераторах 2 и 3. Затем уровень каждого из мешающих сигналов (оба с одинаковой мощностью) $P_{\text{меш}}$ одновременно

увеличивают до тех пор, пока коэффициент ошибки (BER) не достигнет величины 10^{-4} .

Величину уровня интермодуляционных искажений I_T DRM приемника вычисляют в дБ как: $I_T = P_{\text{меш}} [\text{дБ}] - P_{\text{полезн}} [\text{дБ}]$.



Рисунок ПБ.8 – Схема измерительной установки для измерения величины уровня интермодуляционных искажений

10. ИЗМЕРЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО ДЛЯ ДЕКОДИРОВАНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ В РАЗЛИЧНЫХ КАНАЛАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

10.1. Схема измерительной установки для измерения требуемого для декодирования отношения сигнал/шум в различных каналах распространения приведена на рисунке ПБ.9. Сигнал DRM устанавливается на одной из частот соответствующего диапазона с параметрами, приведенными в таблице ПБ.1. Имитатор канала распространения радиоволн и генератор шума подключаются между генератором сигнала DRM и входом приемника. Параметры имитатора канала распространения радиоволн устанавливаются в соответствии с заданной моделью канала. Генератор шума добавляет к выходному сигналу имитатора канала распространения радиоволн белый Гауссовский шум с регулируемым уровнем.

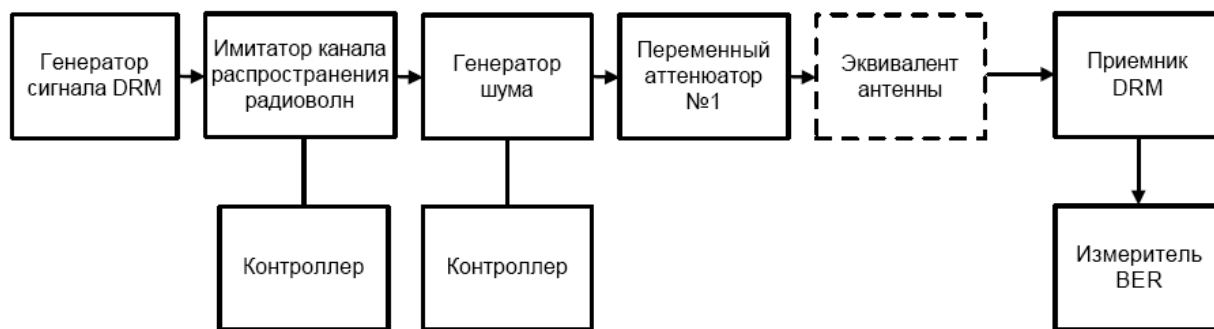


Рисунок ПБ.9 – Схема измерительной установки для измерения требуемого для декодирования отношения сигнал/шум в различных каналах распространения

Таблица ПБ.1 – Различные комбинации для измерений требуемого для декодирования отношения сигнал/шум в различных каналах распространения

Параметр	Комбинация					
Тест №	1	2	3	4	5	6
Модель канала	1	2	3	4	5	6
Диапазон частот	НЧ, СЧ			ВЧ		
Режим помехоустойчивости	А	А	В	В	С	Д
Полоса занимаемых частот	9 кГц	9 кГц	10 кГц	10 кГц	10 кГц	10 кГц
Тип модуляции в MSC	64 QAM	64 QAM	64 QAM	64 QAM	16 QAM	64 QAM
Уровень помехозащищенности (кодовая скорость)	3 (0,78)	2 (0,71)	2 (0,71)	1 (0,6)	1 (0,6)	0 (0,5)
Глубина интерливинга	0 (0,4 с)	0 (0,4 с)	1 (2,0 с)	1 (2,0 с)	1 (2,0 с)	1 (2,0 с)
Минимальное время измерений, сек.	200	2400	4000	4000	1200	1200

10.2. Уровень сигнала на входе DRM приемника устанавливается аттенюатором 1 на 40 дБ выше требуемой минимальной чувствительности.

Устанавливают требуемое для декодирования в соответствующем канале распространения отношение сигнал/шум и проверяют, что значение коэффициента ошибки (BER) не превышает величины 10^{-4} .

Затем отношение сигнал/шум уменьшают до тех пор, пока коэффициент ошибки (BER) не достигнет величины 10^{-4} .

В качестве альтернативного метода измерений (при невозможности измерения BER) могут использоваться измерения по вероятности ошибки принятых аудиофреймов (AFER, Audio Frame Error Ratio), описанные в Приложении Б.1.

11. ИЗМЕРЕНИЕ ЗАДЕРЖКИ НАЧАЛА ДЕКОДИРОВАНИЯ СИГНАЛА В РАЗЛИЧНЫХ КАНАЛАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИ ЗАДАННОМ ОСШ

11.1. Схема измерительной установки для измерения задержки начала декодирования сигнала в различных каналах распространения при заданном ОСШ приведена на рисунке ПБ.10. Сигнал DRM устанавливается с частотной расстройкой на 220 Гц относительно выбранной номинальной центральной частоты измерений. Для упрощения измерений рекомендуется в качестве модулирующего аудио сигнала использовать синусоидальный сигнал частотой 1 кГц. Параметры DRM сигнала и имитатора канала распространения радиоволн устанавливают в соответствии с п.10 (таблица ПБ.1). Параметры генератора шума устанавливают для обеспечения заданного ОСШ.

11.2 DRM приемник настраивают на номинальную частоту измерений. Осциллограф включают в однократный режим с внешним запуском по радиочастотному каналу. Замыкают ключ, подавая радиочастотный сигнал на приемник. Осциллографом измеряют время между включением радиочастотного сигнала и появлением непрерывного аудиосигнала на выходе приемника.

Измерения повторяют 5 раз для каждой комбинации параметров.

Время задержки начала декодирования сигнала в различных каналах распространения при заданном ОСШ определяется как среднее значение из пяти измерений, выраженное в миллисекундах (мсек).

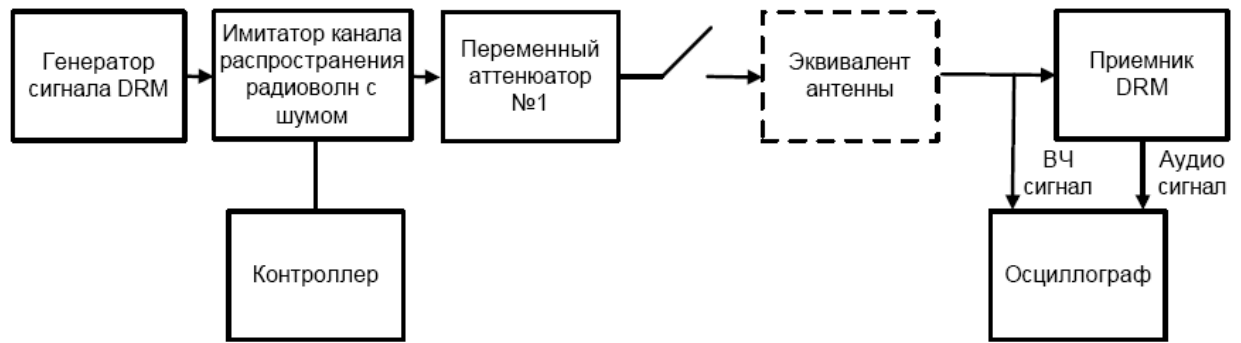


Рисунок ПБ.10 – Схема измерительной установки для измерения задержки начала декодирования сигнала в различных каналах распространения при заданном ОСШ

Список литературы

ПБ.1. ETSI ES 201 980 V4.1.1 (2014-01) Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification.

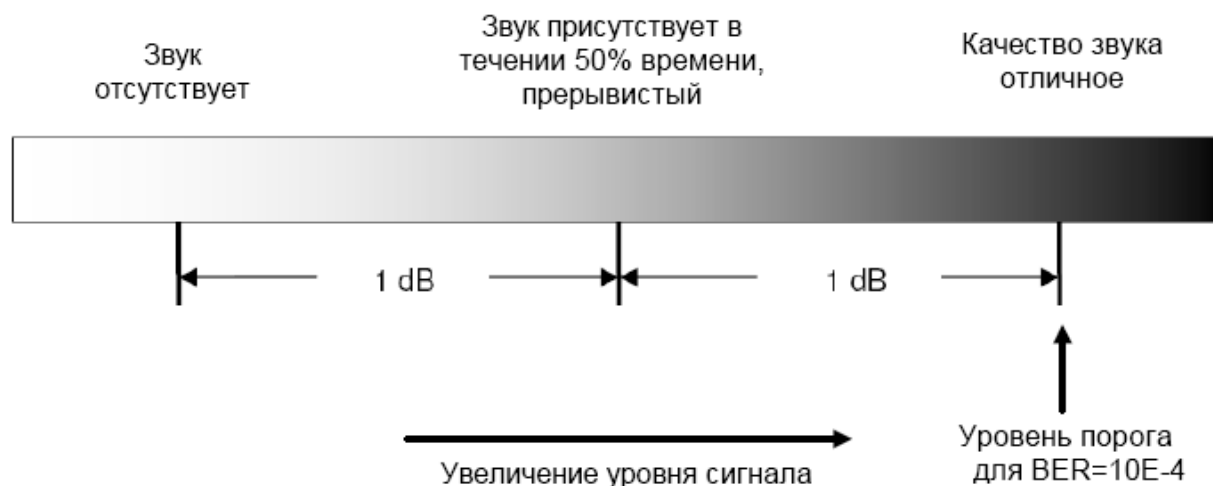
ПБ.2. Digital Radio Mondiale (DRM); Minimum Receiver Requirements. Version 1.0. http://www.drm.org/wp-content/uploads/2012/10/DRM_Minimum_Requirements1.pdf (дата обращения: 12.02.2013).

ПБ.3. ГОСТ 9783-88. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Методы электрических высокочастотных измерений. – М.: Издательство стандартов, 1991.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.1

В данном приложении описываются два альтернативных метода измерений характеристик приемника DRM, основанных на прослушивании (анализе) декодированного аудио сигнала, применяемых при невозможности измерения коэффициента ошибки (BER).

При проведении измерений по п.п. 3...9 простое прослушивание выходного аудио сигнала приемника позволяет определить порог, соответствующий коэффициенту ошибки $BER = 10^{-4}$. При наличии звука в течении 50% времени уровень сигнала на 1 дБ меньше, чем требуется для достижения $BER = 10^{-4}$. Аудио сигнал при $BER = 10^{-4}$ непрерывный и неискаженный [ПБ.2].



При проведении измерений по п.п. 10 используется метод измерений по вероятности ошибки принятых аудиофреймов (AFER, Audio Frame Error Ratio). Значения AFER, соответствующие $BER = 10^{-4}$ в различных каналах распространения радиоволн приведены в таблице ПБ.1.1.

Таблица ПБ.1.1 – Значения AFER, соответствующие $BER = 10^{-4}$ в различных каналах распространения радиоволн

Параметр	Комбинация					
	1	2	3	4	5	6
Требуемое ОСШ, дБ	21	22	31	26	20	25
AFER	10^{-2}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}

Некоторые модели DRM приемников могут отображать на дисплее величину AFER в принимаемом сигнале. Если эта функция недоступна, величина AFER может быть измерена на заранее известном аудио сигнале посредством автоматизированного сравнения исходного и декодированного сигнала корреляционными методами.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Моделирование влияния помехи от DRM составляющей приёму AM сигнала в системе Simulcast

Схема измерительной установки

Моделирование канала системы Simulcast осуществляется методом компьютерной симуляции. Структурная схема программного измерительного комплекса приведена на рисунке ПВ.1.

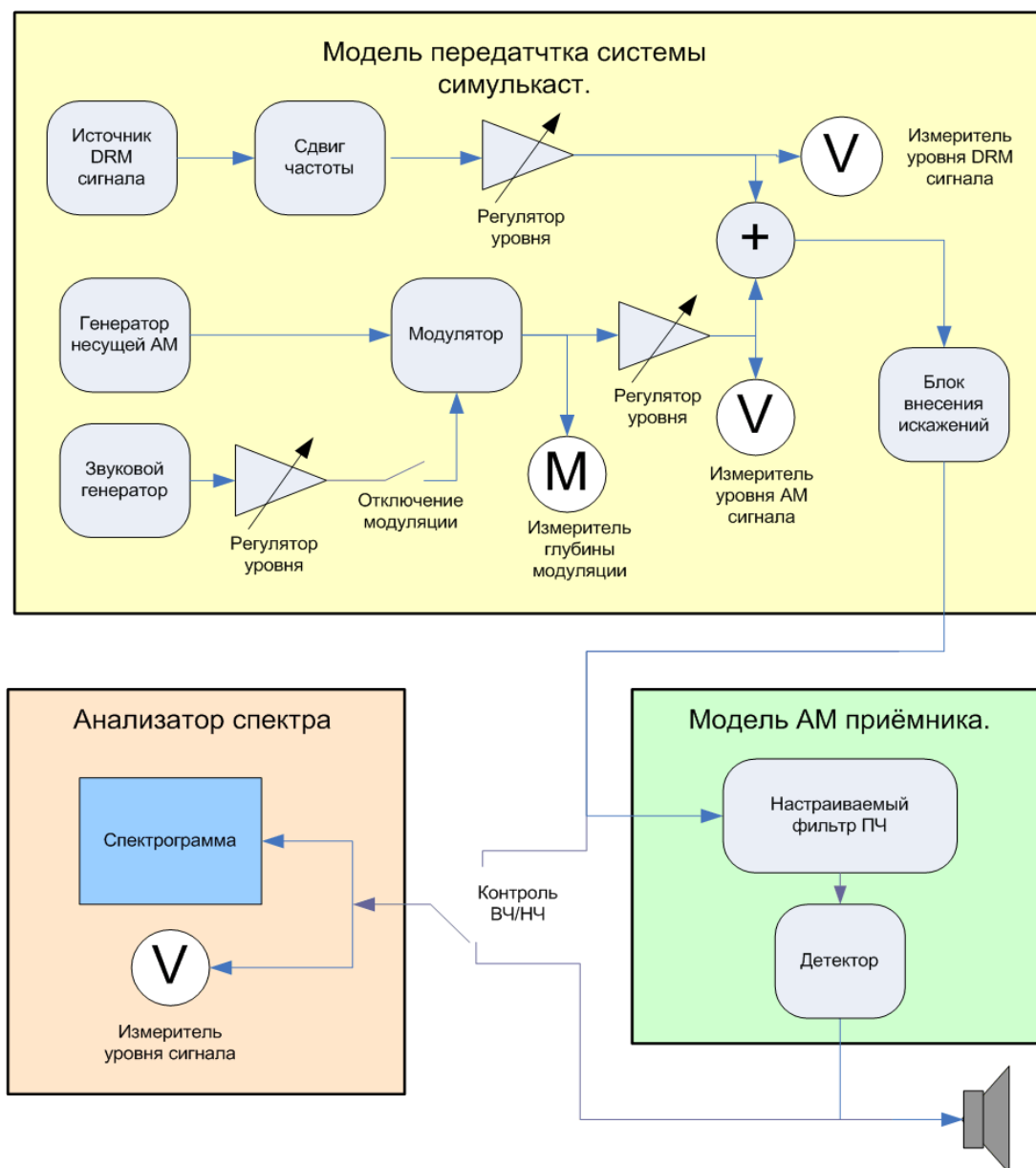


Рисунок ПВ.1 – Структурная схема программного измерительного комплекса

Пакет программ измерительного комплекса состоит из двух независимых приложений:

- объединённая модель передатчика системы Simulcast плюс вещательный АМ радиоприёмник (Simulcast_TX.exe);
- многофункциональный анализатор спектра (анализатор спектра.exe).

Приложение Simulcast_TX.exe предназначено для формирования тестового сигнала системы Simulcast и моделирования приёмных трактов различных классов качества. Как следует из рисунка ПВ.1, передающая часть состоит из генератора АМ сигнала, источника сигнала DRM, управляемого сумматора, блока имитации искажений передатчика и измерительных приборов. Источник сигнала DRM считывает из файла предварительно сформированный сигнал цифрового радиовещания, переносит его на требуемую несущую частоту и через регулятор уровня подаёт его на вход сумматора. Генератор АМ сигнала состоит из генератора несущей, отключаемого генератора модулирующего сигнала с регулятором уровня, амплитудного модулятора и регулятора уровня сформированного АМ сигнала. В качестве источника модулирующего сигнала также может быть использован файл с записью реальной вещательной программы. Выходной АМ сигнал подаётся на второй вход сумматора. Измерительные приборы представлены измерителем глубины модуляции (M) и двумя измерителями среднеквадратичного уровня сигнала (V), предназначенными для измерения относительных мощностей АМ и DRM компонент сигнала Simulcast (см. рисунок ПВ.1). Сформированный сигнал подаётся на блок моделирования приёмника. Модель вещательного приёмника разрабатывалась исходя из того, что единственным элементом, определяющим его АЧХ, является фильтр основной селекции тракта промежуточной частоты. Данное предположение полностью справедливо для бытовой аппаратуры, выпущенной за последние тридцать лет, где избирательность по соседнему каналу обеспечивается пьезокерамическим полосовым фильтром, а сигнал с амплитудного детектора непосредственно подаётся на транзисторный усилитель низкой частоты, полоса пропускания которого заведомо шире полосы пропускания фильтра ПЧ. Исходя

из данного утверждения, приёмная часть модели приёмника состоит из отключаемого фильтра ПЧ с произвольной амплитудно-частотной характеристикой и отключаемого амплитудного детектора. АЧХ фильтра задаётся таблично в виде импульсной характеристики, рассчитанной при помощи разработанной для этого программы FilterDesigner (рисунок ПВ.2).

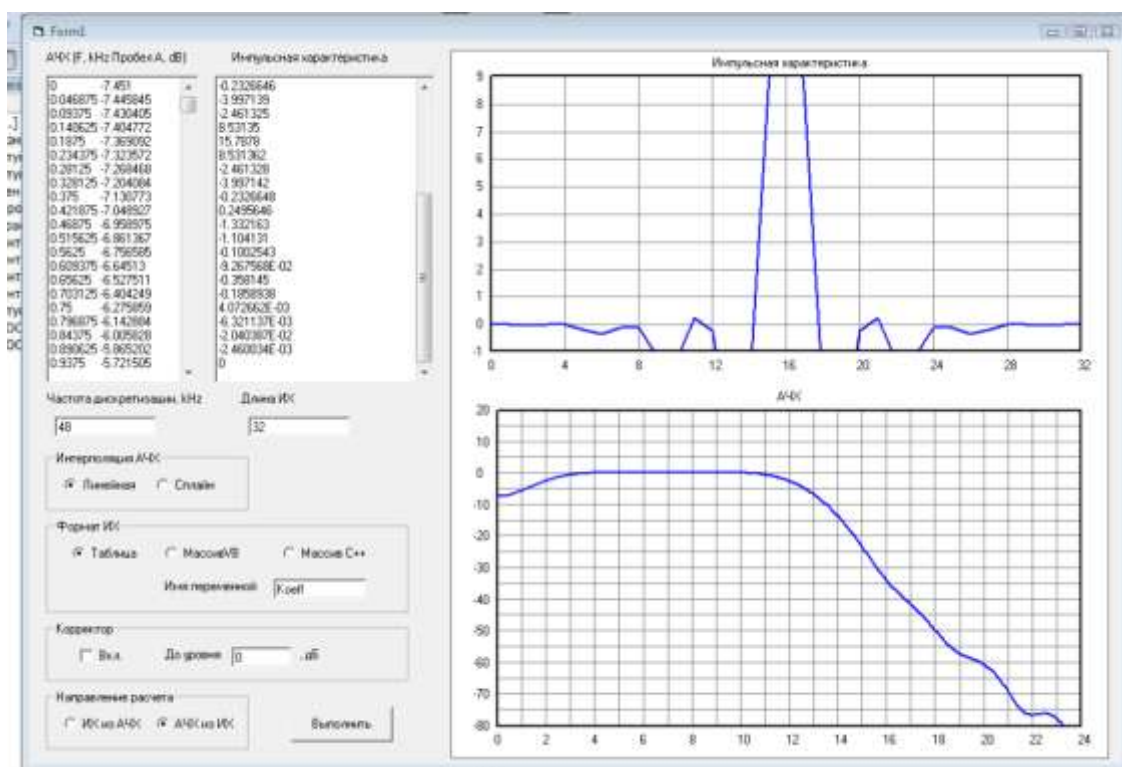


Рисунок ПВ.2 – Интерфейс программы расчета фильтров

Детектор модели приёмника выполнен по квадратурной схеме (идеальный детектор Гильберта). При отключении детектора возможен контроль выходного сигнала передатчика. Сигнал с выхода приёмника подаётся на звуковое устройство компьютера, соединённое цифровым интерфейсом с другими блоками измерительной установки. Моделирование при этом производится в режиме реального времени. Пользовательский интерфейс приложения Simulcast_TX.exe приведён на рисунке ПВ.3.

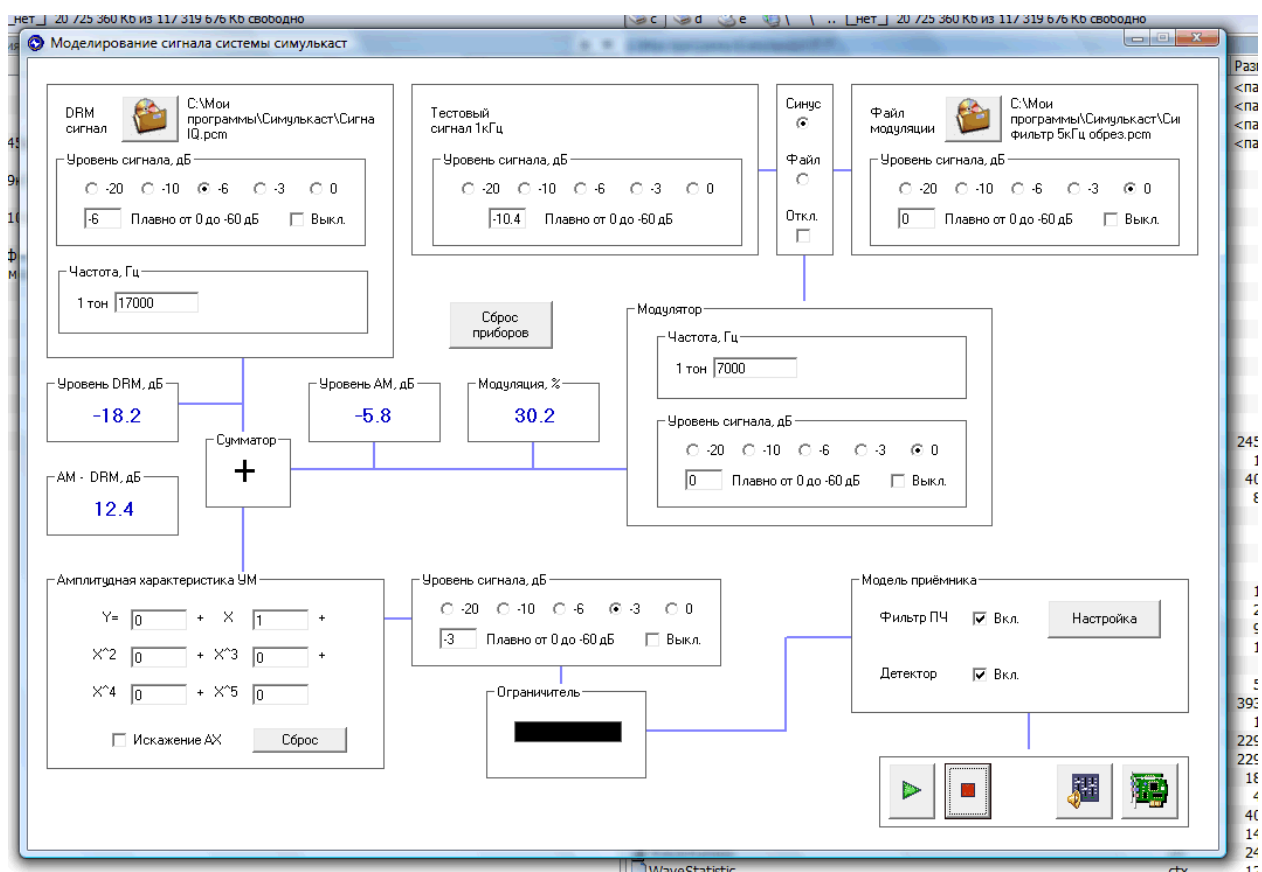


Рисунок ПВ.3 – Интерфейс приложения Simulcast_TX.exe

Анализатор спектра (Анализатор спектра.exe).

Это приложение содержит собственно анализатор спектра на базе БПФ и среднеквадратичный измеритель уровня сигнала. Вход анализатора переключается между выходом модели передатчика системы Simulcast и выходом амплитудного детектора программного приёмника (см. рисунок ПВ.1). В первом случае можно получить визуальное представление о расположении компонент сигнала Simulcast в выходном спектре передатчика. Подключение к выходу детектора используется для измерения уровня и оценки спектрального распределения сигнала помехи от DRM составляющей сигнала Simulcast. Интерфейс приложения «Анализатор спектра.exe» приведён на рисунке ПВ.4. В нижней части рисунка расположено окно измерителя уровня сигнала.

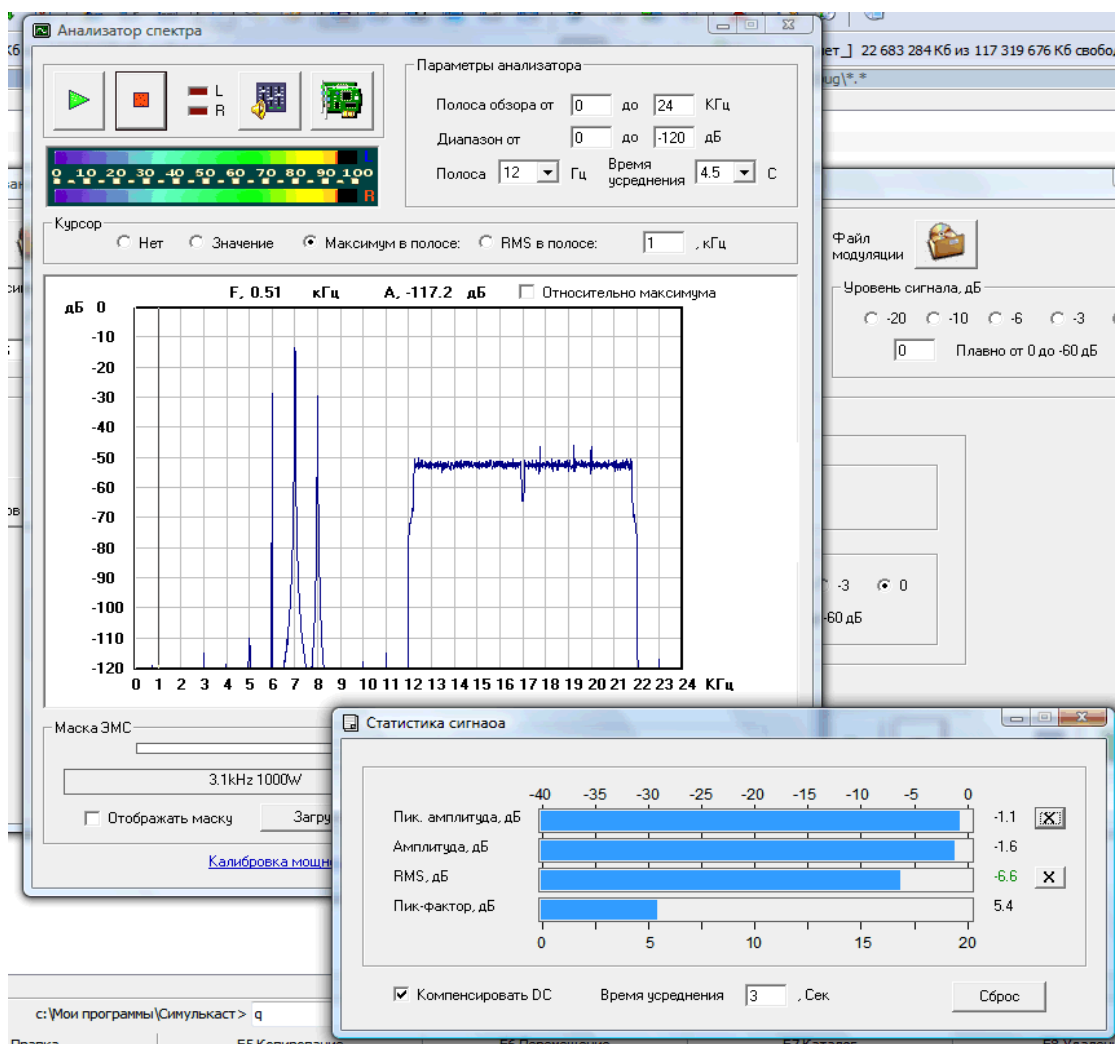


Рисунок ПВ.4 – Интерфейс программы анализатора спектра

Методика измерения.

Целью измерений является определение степени влияния цифровой составляющей сигнала Simulcast на качество АМ приёма при использовании радиоприёмников различных классов. Нелинейные искажения и шумы радиопередающего устройства при этом должны быть пренебрежимо малы, что обеспечивается использованием цифрового имитатора передатчика. Помехой в этом случае является часть сигнала DRM, попадающая в полосу пропускания фильтра основной селекции исследуемого радиоприёмника. Основным параметром, характеризующим влияние указанной помехи, будем считать отношение сигнал-шум на выходе амплитудного детектора, измеряемое по методике, используемой при определении чувствительности бытовых радиоприёмных устройств [П.В.1].

Порядок проведения измерений.

Аудиовыход программной модели приемника соединяется с входом анализатора спектра.

В модели передатчика выбирается файл с требуемым вариантом DRM сигнала. В результате предварительного анализа для моделирования были выбраны три варианта сигнала Simulcast. В серии измерений использованы цифровые сигналы с полосами 4,5, 9 и 10кГц.

Далее, в модели передатчика устанавливаются значения несущей частоты АМ и DRM составляющих сигнала. Значения несущих частот в зависимости от полосы частот сигнала Simulcast приведены в таблице П.В.1.

Таблица П.В.1 – Взаимное расположение составляющих сигнала Simulcast.

Полоса частот Simulcast	20кГц	20кГц	20кГц
Несущая DRM составляющей	12,5кГц	17кГц	17кГц
Тип DRM сигнала	A4,5	A9	B10
Несущая АМ составляющей	7кГц	7кГц	7кГц

В модели передатчика устанавливается уровень модулирующего сигнала с частотой 1 кГц, соответствующий глубине модуляции 30%. При этом сигнал DRM должен быть отключен.

В приёмнике задаётся характеристика фильтра ПЧ, соответствующая бытовой аппаратуре исследуемого класса. Импульсные характеристики фильтров предварительно рассчитываются при помощи отдельной программы. Величины полосы пропускания и селективности по соседнему каналу в зависимости от класса радиоприёмника приведены в таблице П.В.2 [П.В.2].

Таблица П.В.2 – Зависимость характеристик фильтра основной селекции от класса радиоприёмной аппаратуры

Группа сложности (класс)/полоса ПЧ по уровню -6дБ.	0	1	2	3
Стационарные	16 кГц	12,6 кГц	7,1 кГц	7,1 кГц
Носимые	11,2 кГц	11,2 кГц	6,3 кГц	6,3 кГц
Группа сложности (класс)/избирательность при отстройке 9кГц.	0	1	2	3
Стационарные	56 дБ	40 дБ	36 дБ	26 дБ
Носимые	56 дБ	40 дБ	36 дБ	20 дБ

При помощи анализатора спектра измеряется уровень выходного сигнала радиоприёмника. Встроенным в модель передатчика измерителем фиксируют уровень АМ составляющей сигнала Simulcast.

Отключается модуляция и включается источник DRM сигнала. Регулировкой уровня DRM составляющей добиваются уровня сигнала помехи на выходе АМ детектора на 26дБ ниже измеренного ранее уровня демодулированного АМ сигнала. Встроенным в модель передатчика измерителем фиксируют уровень DRM составляющей сигнала. Полученная точка характеризует наихудший случай, при котором чувствительность приёмника определяется исключительно помехой от DRM составляющей сигнала Simulcast.

Далее, плавно уменьшая уровень DRM сигнала, снимается зависимость отношения сигнал-шум на выходе приёмника от соотношения мощностей АМ и DRM составляющих выходного сигнала передатчика.

Согласно вышеописанной методике проводится серия измерений для моделей радиоприёмников различного класса.

Результаты моделирования.

Результаты измерений представлены на графиках двух типов. Первый тип графиков (см. рисунки П.В.5, П.В.7, П.В.9) представляет ряд зависимостей

отношения сигнал-шум на аудио выходе модели радиоприёмников различных классов от соотношения мощностей AM и DRM составляющих сигнала Simulcast. Второй тип графиков (см. рисунки ПВ.6, ПВ.8, ПВ.10) отображает в виде гистограммы зависимость отношения сигнал-шум от класса радиоприёмника при фиксированном отношении мощностей AM и DRM, равном 10дБ. Как показано в Главе 5, при таком соотношении мощностей обеспечивается примерное равенство зон обслуживания аналогового и цифрового радиовещания.

Simulcast 20кГц. (DRM 10кГц, ПЧ 17кГц, AM 10кГц, ПЧ 7кГц.)

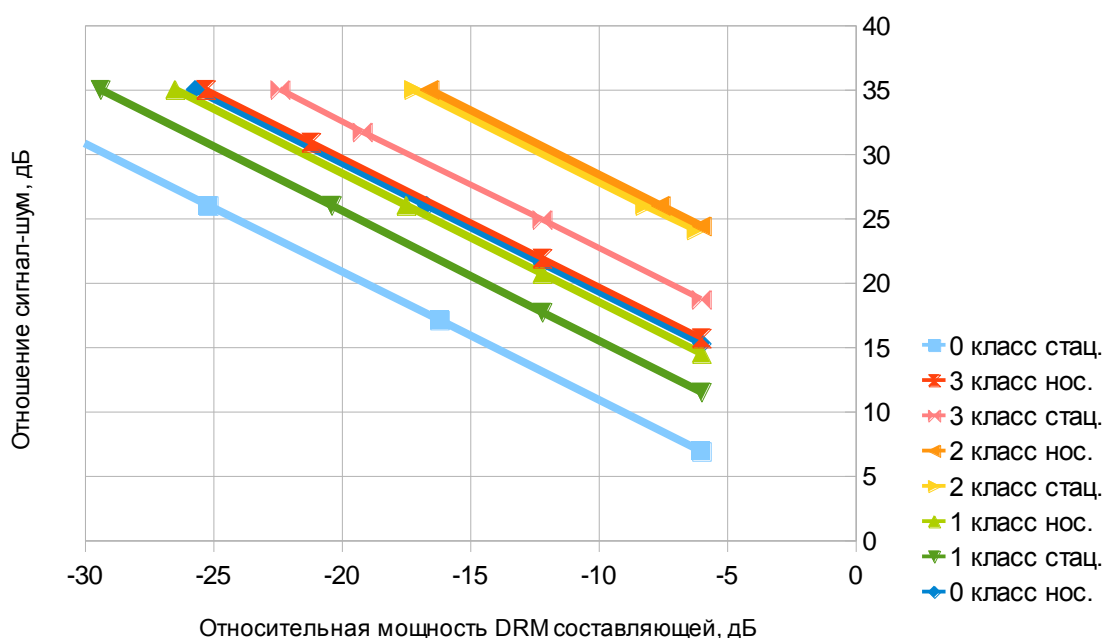


Рисунок ПВ.5 – Зависимость отношения сигнал-шум на выходе амплитудного детектора от относительной мощности DRM составляющей для различных значений полосы пропускания тракта ПЧ исследуемого приёмника.

Полоса DRM 10кГц

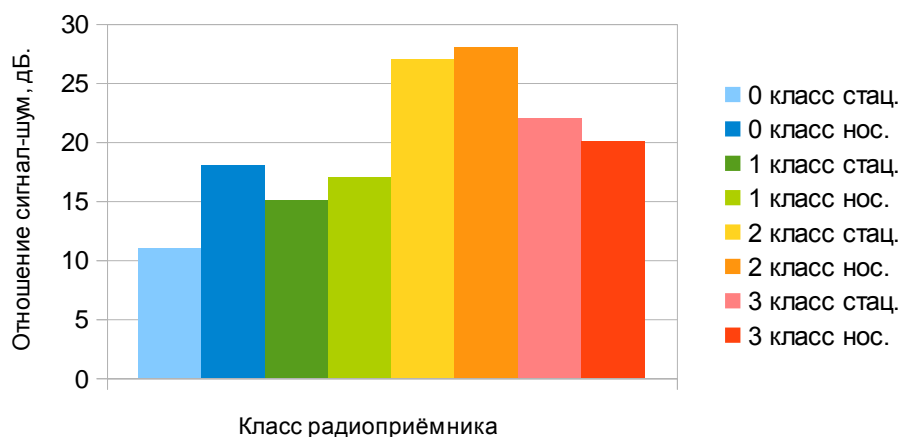


Рисунок ПВ.6 – Зависимость отношения сигнал-шум на выходе амплитудного детектора от группы сложности (класса) радиоприёмника при фиксированном отношении мощностей составляющих сигнала Simulcast. Полоса DRM 10кГц

Simulcast 20кГц. (DRM 9кГц, ПЧ 17кГц. АМ 10кГц, ПЧ 7кГц.)

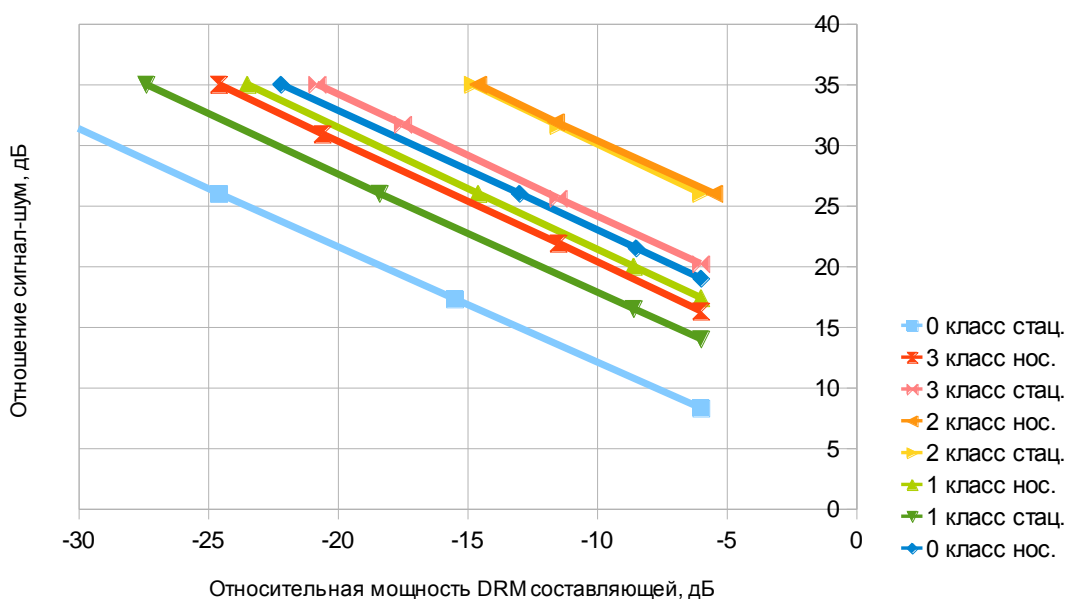


Рисунок ПВ.7 – Зависимость отношения сигнал-шум на выходе амплитудного детектора от относительной мощности DRM составляющей для различных значений полосы пропускания тракта ПЧ исследуемого приёмника.

Полоса DRM 9кГц

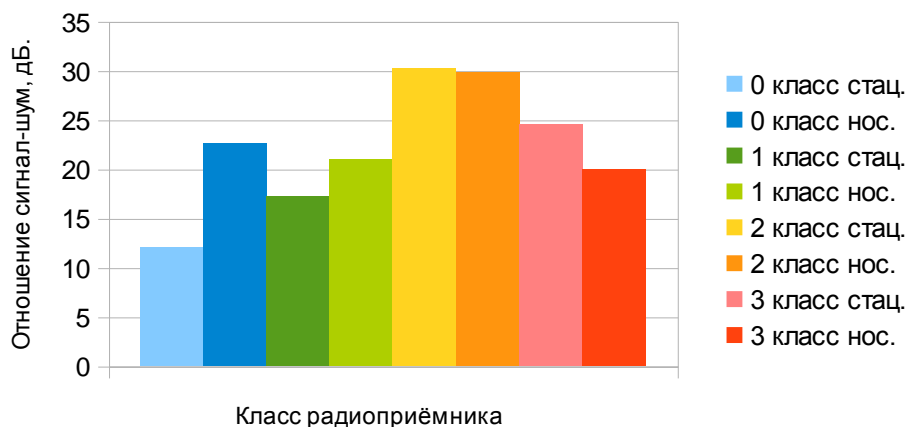


Рисунок ПВ.8 – Зависимость отношения сигнал-шум на выходе амплитудного детектора от группы сложности (класса) радиоприёмника при фиксированном отношении мощностей составляющих сигнала Simulcast. Полоса DRM 9кГц

Simulcast 18кГц. (DRM 4.5кГц, ПЧ 7кГц. АМ 10кГц, ПЧ 16кГц.)

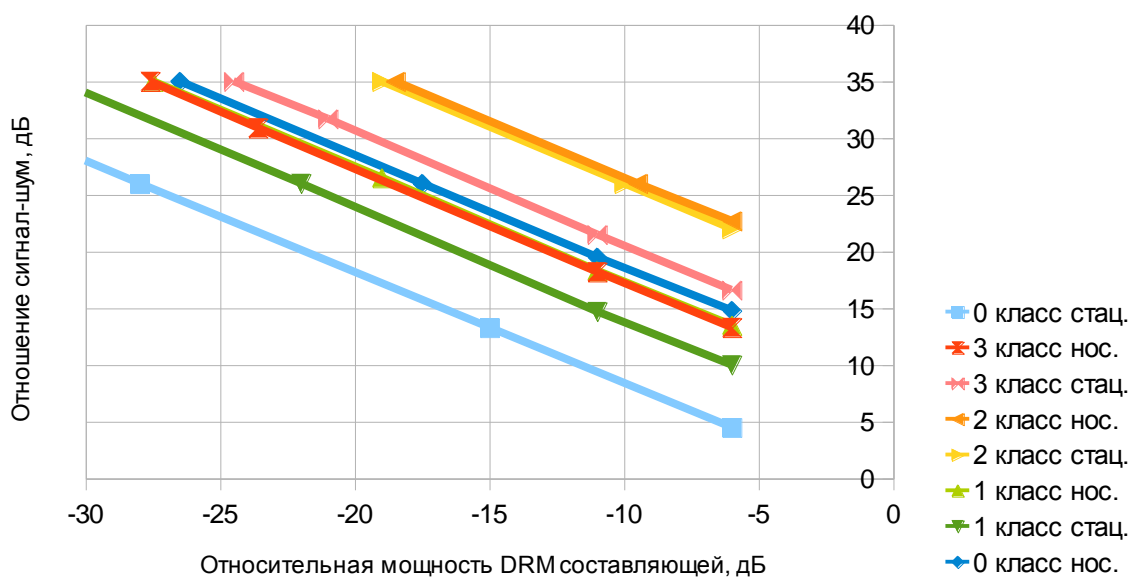


Рисунок ПВ.9 – Зависимость отношения сигнал-шум на выходе амплитудного детектора от относительной мощности DRM составляющей для различных значений полосы пропускания тракта ПЧ исследуемого приёмника.

Полоса DRM 4.5кГц

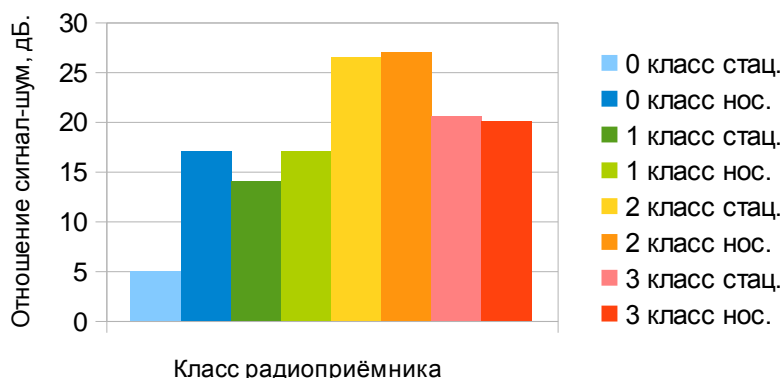


Рисунок ПВ.10 – Зависимость отношения сигнал-шум на выходе амплитудного детектора от группы сложности (класса) радиоприёмника при фиксированном отношении мощностей составляющих сигнала Simulcast. Полоса DRM 4,5кГц

На основании анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Зависимость отношения сигнал-шум на выходе приёмника от соотношения уровней аналоговой и цифровой составляющих сигнала Simulcast является линейной. Хотя при повышении уровня DRM сигнала (когда появляются нелинейные искажения) возрастает относительный уровень комбинационных составляющих, попадающих в полосу полезного аналогового сигнала (0...5 кГц). Однако их вклад в результирующий сигнал помехи остаётся пренебрежимо мал по сравнению с прямым прохождением части сигнала DRM в тракт АМ радиоприёмника.

2. Прослеживается зависимость уровня помехи, вызванной прямым прохождением сигнала DRM, от класса применяемой приёмной аппаратуры. Гистограммы на рисунках ПВ.6, ПВ.8, ПВ.10, построенные для различных значений полосы DRM сигнала, демонстрируют одинаковые тенденции.

Наихудшим случаем для приёма АМ составляющей сигнала Simulcast оказывается использование аппаратуры высшего и первого классов. Несмотря на повышенные требования к избирательности по соседнему каналу, широкая полоса

пропускания фильтра ПЧ приводит к беспрепятственному проникновению значительной части спектра DRM сигнала на вход амплитудного детектора.

Наилучшие результаты приёма сигнала Simulcast получаются при использовании аппаратуры второго класса. В этом случае минимальные требования на отношение сигнал-шум при уровне DRM составляющей -10дБ обеспечиваются для всех рассмотренных значений полосы цифрового сигнала. Радиоприёмники третьего класса показывают существенно худшие результаты. При этом, в отличие от аппаратуры высшего класса, здесь основной причиной прохождения сигнала помехи оказывается недостаточная избирательность по соседнему каналу.

3. Результаты для DRM составляющих с полосами 9 и 10 кГц оказываются сопоставимыми, с некоторым преимуществом девяти килogerцового варианта цифрового радиосигнала, обеспечивающего небольшой защитный интервал между спектрами. В тоже время, использование цифрового сигнала с узкой полосой 4,5 кГц, приводит к существенному росту уровня помехи. Данный эффект связан с тем, что энергия сигнала DRM оказывается сосредоточена ближе к верхней границе спектра АМ составляющей. Таким образом, варианты сигнала Simulcast с примыкающим к АМ сигналу узкополосным цифровым сигналом, не могут быть рекомендованы для практического использования, тем более с учетом того, что качество звука в узкополосных DRM каналах неудовлетворительно.

Анализ практической применимости полученных результатов ввиду отсутствия информации о распределении парка используемых радиоприёмных устройств может носить только оценочный характер. При этом можно руководствоваться следующими соображениями.

Радиоприёмники высшего класса выпускались весьма ограниченным тиражом. Кроме того, в течение последних пятнадцати лет, аппаратура высшего класса, как, впрочем, и всех других классов, в России массово не производится. В современных импортных приёмниках АМ диапазон является вспомогательным, рассчитанным на использование вне зоны действия ЧМ радиостанций. Соответственно, приоритетным при проектировании АМ тракта является не

наилучшее качество звука, обеспечиваемое широкой полосой пропускания, а максимальная помехоустойчивость, требующая ограничения полосы пропускания по критерию максимальной разборчивости речевого сигнала. Появление современной аппаратуры, соответствующей по избирательности третьему классу сложности, также маловероятно. Это связано с тем, что пьезокерамический фильтр промежуточной частоты является самым дешёвым и универсальным решением, независимо от конечной цены радиоприёмного устройства. Типовая избирательность современных фильтров составляет 40 дБ при отстройке 9 кГц, независимо от их полосы пропускания. Таким образом, можно принять, что наиболее массовый радиоприёмный тракт аппаратуры, импортированной в последнее десятилетие, по избирательности соответствует первому классу сложности, а по полосе пропускания близок ко второму классу по отечественной классификации.

В результате можно сделать вывод о возможности одновременной передачи цифрового и аналогового сигналов с относительными уровнями, обеспечивающими примерное равенство зон покрытия, ценой незначительного ухудшения качества приёма аналогового сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

П.В.1. ГОСТ 9783-88. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Методы электрических высокочастотных измерений. – М.: Издательство стандартов, 1991.

П.В.2. ГОСТ 5651-89. Аппаратура радиоприемная бытовая. Общие технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акты внедрения



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«РОССИЙСКАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ И РАДИОВЕЩАТЕЛЬНАЯ СЕТЬ»

УТВЕРЖДАЮ



Первый заместитель генерального
директора РТРС по управлению,
эксплуатации и развитию сети

В. Н. Пинчук

«18» 10 2016г.

АКТ

**о внедрении результатов докторской
диссертационной работы Варламова Олега Витальевича на тему
«Технология создания сети цифрового радиовещания стандарта DRM для
Российской Федерации»**

Комиссия в составе:

председатель: заместитель генерального директора - директор Департамента радиовещания и радиосвязи В.Д. Горегляд,

члены комиссии: начальник управления радиосвязи Департамента радиовещания и радиосвязи В.М. Журавлев, начальник отдела мощного радиовещания управления радиовещания Департамента радиовещания и радиосвязи Ф.Д. Шустерман,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Технология создания сети цифрового радиовещания стандарта DRM для Российской Федерации», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук:

- метод преобразования кривых распространения земной волны МСЭ (Rec. ITU-R P.368-9) в кривые ОСШ, учитывающие частотную зависимость напряженности поля атмосферных шумов в локальном географическом регионе;

- основные положения методики частотно-территориального планирования сетей цифрового радиовещания (ЦРВ) стандарта DRM диапазонов НЧ и СЧ, учитывающие в том числе распределение атмосферных шумов по поверхности Земли;

- величины защитных отношений для трех видов каналов распространения (однолучевого, двухлучевого и четырехлучевого) при наличии помех от станций с

амплитудной модуляцией (с АЧХ в соответствии с рекомендацией МСЭ Rec. ITU-R BS.1615-1 и в соответствии с ГОСТ-P51742-2001) и от станций с цифровой модуляцией;

- методика расчета защитных отношений для сигнала ЦРВ при одновременном воздействии произвольного количества мешающих сигналов;

- требования на параметры приемного оборудования сетей ЦРВ стандарта DRM, и методы измерений радиочастотных параметров приемного оборудования сетей ЦРВ стандарта DRM;

- требования к техническим параметрам радиоэлектронных средств цифрового звукового радиовещания стандарта DRM, включая параметры, влияющие на электромагнитную совместимость.

Использованы в деятельности РТПС:

- при разработке системного проекта «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации»;

- при подготовке решения ГКРЧ № 06-13-03-001 от 24.04.2006 «О ходе реализации решения ГКРЧ от 01.12.2003 № 30/3 «Об организации опытных зон экспериментального цифрового звукового радиовещания стандарта DRM в диапазоне 3,95-26,1 МГц»;

- при подготовке решения ГКРЧ № 09-01-05 от 20.01.2009 «О результатах работ в опытных зонах экспериментального цифрового звукового радиовещания стандарта DRM в диапазонах 526,5-1606,5 кГц, 3,95-4,0 МГц, 5,9-6,2 МГц, 7,1-7,45 МГц, 9,4-9,9 МГц, 11,6-12,1 МГц, 13,57-13,87 МГц, 15,1-15,8 МГц, 17,78-17,9 МГц, 18,9-19,02 МГц, 21,45-21,85 МГц и 25,67-26,1 МГц»;

- при подготовке решения ГКРЧ № 12-14-06 от 16 марта 2012 «О результатах проведения работ в опытной зоне экспериментального цифрового звукового радиовещания стандарта DRM в полосе радиочастот 148,5-283,5 кГц»

- при разработке «Правил применения систем радиовещания. Часть I. Правила применения эфирных цифровых радиовещательных передатчиков, работающих в диапазонах частот 148,5 – 283,5 кГц, 526,5 – 1606,5 кГц и 3,95 – 26,1 МГц», утвержденных приказом Мининформсвязи России № 13 от 04.02.2008г.;

- при подготовке Вклада Администрации связи РФ в МСЭ: ITU-R Doc. 6A/228-E. Measurements of DRM coverage area in the mediumfrequency band in the daytime, night-time and in the fading zone. Russian Federation, 2013.

- при подготовке Вклада Администрации связи РФ в МСЭ: ITU-R Doc. WP6A/307. Tests of single frequency DRM radio networks in the SW range. Russian Federation, 2013.

Использование результатов диссертационной работы позволило создать нормативно-правовую базу для применения в РФ сетей цифрового звукового радиовещания стандарта DRM в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ, а также сократить количество планировавшихся к применению мощных радиопередающих устройств со 126 единиц (в соответствии с ФЦП «Развитие телерадиовещания в Российской Федерации на 2009 - 2015 годы») до 50 единиц в соответствии с Системным проектом «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации».

Предложенный метод использования крупно-кластерных зон одночастотного синхронного вещания в диапазоне НЧ для построения глобальных сетей цифрового радиовещания и разработанные параметры кластера могут быть использованы при актуализации Системного проекта «Сеть государственного наземного вещания Российской Федерации», что позволит сократить количество планирующихся к применению мощных радиопередающих устройств до 29 единиц. При этом их суммарные мощности (1,94 МВт) и затраты на электроэнергию будут в 6 раз меньше, чем планировавшиеся в действующем Системном проекте (11,77 МВт).

Предложенный способ расширения полосы согласования передающих вещательных антенных систем диапазонов НЧ и СЧ на основе применения частотно-расширительных цепей с потерями и разработанная методика расчетов частотно-расширительных цепей позволит использовать 14 существующих антенно-мачтовых сооружений вместо строительства 8 АМС высотой 257 метров и 6 АМС высотой 375 метров, что приведет к экономическому эффекту более 1,2 млрд. рублей.

Председатель комиссии:



В.Д. Горегляд

Члены комиссии:

В.М. Журавлев

Ф.Д. Шустерман

«КАЗТЕЛЕРАДИО»
АКЦИОНЕРЛІК
ҚОҒАМЫ

 **КАЗТЕЛЕРАДИО**

АКЦИОНЕРНОЕ
ОБЩЕСТВО
«КАЗТЕЛЕРАДИО»

050040, Алматы қ-сі, Әл-Фараби а-ына, 118
Тел: +7 (727) 271-75-01, факс: 271-76-30, 271-76-10
E-mail: kaztelradio@kaztelradio.kz
www.kaztelradio.kz

050040, г. Алматы, пр-т Аль-Фараби 118
Тел: +7 (727) 271-75-01, факс: 271-76-30, 271-76-10
E-mail: kaztelradio@kaztelradio.kz
www.kaztelradio.kz

№ _____

УТВЕРЖДАЮ
Первый заместитель Председателя Правления, член Правления



А. Байжикеев
« 20 » 10 2016 г.

АКТ

об использовании результатов докторской диссертационной работы
Варламова Олега Витальевича на тему «Технология создания сети цифрового
радиовещания стандарта DRM для Российской Федерации»

Бажикеев А.М. - Первый заместитель Председателя Правления, член
Правления

Кулбаев Т.А. - Управляющий директор по эксплуатации сетей ТРВ;

Акпенова Р.Т. - Управляющий директор по техническому развитию;

Алатау Е.А. - Директор Департамента развития сетей ТРВ и управления
проектами;

Ержанов Б.Д. - Главный менеджер Департамента развития сетей ТРВ и
управления проектами.

составили настоящий акт о том, что результаты, полученные в
диссертационной работе «Технология создания сети цифрового радиовещания
стандарта DRM для Российской Федерации», представленной на соискание
ученой степени доктора технических наук:

- метод использования крупно-кластерных зон одночастотного синхронного
вещания в диапазоне НЧ для построения глобальных сетей цифрового
радиовещания;

- метод преобразования кривых распространения земной волны МСЭ (Rec.
ITU-R P.368-9) в кривые ОСШ, учитывающие частотную зависимость
напряженности поля атмосферных шумов в локальном географическом регионе;

- основные положения методики частотно-территориального планирования
сетей цифрового радиовещания (ЦРВ) стандарта DRM диапазонов НЧ и СЧ,

014747

учитывающие в том числе распределение атмосферных шумов по поверхности Земли;

использованы в производственной деятельности АО «Казтелерадио» при разработке Проекта топологии сети ЦРВ стандарта DRM для Республики Казахстан в виде:

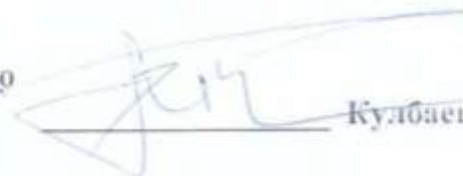
- эскизных проектов топологии на частотах 243 кГц и 549 кГц;
- методик расчета и моделирования зон покрытия;
- рекомендаций по дислокации радиовещательных передатчиков с использованием существующих объектов;
- технических предложений по мощности передающего оборудования в сети.

Использование предложенных в диссертационной работе одночастотной сети DRM вещания в диапазоне ДВ и элементов методики частотно-территориального планирования позволило:

- повысить качество проектирования сети ЦРВ;
- достичь расчетного покрытия до 99% территории Республики Казахстан при снижении требуемой суммарной мощности передатчиков и упрощении международной координации частотных присвоений;
- сократить планируемые затраты на проведение работ по организации сети ЦРВ за счет использования инфраструктуры существующих объектов;
- повысить уровень подготовки специалистов на этапе проектирования.

Управляющий директор
эксплуатации сетей ТРВ

по



Кулбаев Т.А.

Управляющий директор
техническому развитию

по



Акпенова Р.Т.

Директор Департамента развития
сетей ТРВ и управления проектами



Алатау Е.А.

Главный менеджер Департамента
развития сетей ТРВ и управления
проектами



Ержанов Б.Д.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

Ордена Трудового Красного Знамени
федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И
ИНФОРМАТИКИ»
(МТУСИ)

FEDERAL COMMUNICATIONS
AGENCY OF
THE RUSSIAN FEDERATION

MOSCOW TECHNICAL
UNIVERSITY
OF COMMUNICATIONS
AND INFORMATICS
(MTUCI)

ул. Авиамоторная, д. 8а, Москва, 111024,
www.mtuci.ru; mtuci.pф; e-mail: kanc@mtuci.ru
Телефон ЦДО (495) 957-77-31; факс (495) 957-77-36
ОГРН 1027700117191; ИНН/КПП 7722000820/772201001; ОКПО 01179952;
ОКВЭД 80.30, 80.42, 22.15, 51.19, 64.20, 73.10.; ОКТМО 45388000

20 г. №

На №

от



УТВЕРЖДАЮ

И.о. ректора МТУСИ

С.Д. Ерохин

января 2017 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы О.В. Варламова
«Технология создания сети цифрового радиовещания стандарта DRM для
Российской Федерации»

Результаты диссертационной работы Варламова Олега Витальевича «Технология создания сети цифрового радиовещания стандарта DRM для Российской Федерации» внедрены в учебный процесс ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики». В частности:

1. В программно-аппаратном лабораторном практикуме из трех работ «Изучение работы радиопередатчиков, построенных по методу раздельного усиления составляющих модулированных колебаний, при передаче сложных АФМ сигналов», используемом в процессе обучения студентов магистратуры на кафедре радиооборудования и схемотехники.

2. Использованы при выполнении магистрантами МТУСИ выпускных квалификационных работ.

Заведующий кафедрой
радиооборудования и схемотехники
МТУСИ, д.т.н., профессор

А.В. Пестряков