

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**

Ю. А. Ковалгин

**Моделирование передающего и приемного трактов
систем цифрового радиовещания**

**Часть 1. Цифровое радиовещание в диапазоне ОВЧ:
системы и технологии**

Учебное пособие для проведения практических занятий,
курсового и дипломного проектирования.

СПбГУТ)))
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018

УДК 621.396.97
ББК 32.884.8
К 56

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Телевидения и метрологии» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф.

М.А.Бонч-Бруевича *А.А. Гоголь*;

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Телевидения и видеотехники» Санкт-Петербургского государственного электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) *Н.В.Лысенко*

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом СПбГУТ

Ковалгин Ю. А.

К 56

Моделирование передающего и приемного трактов систем цифрового радиовещания. Учебное пособие для проведения практических занятий, курсового и дипломного проектирования. Часть 1. Цифровое радиовещание: системы и технологии – СПб.: Издательство СПбГУТ, 2017. –118 с.

Приведены сведения о системах цифрового радиовещания, рекомендованных ITU-R для применения в диапазоне ОВЧ (30...3000 МГц). В частности рассмотрены процедуры, включающие компрессию и рандомизацию цифровых данных, канальное кодирование, защиту от групповых ошибок и селективного затухания в радиоканале, оценку эффективности применяемых типов модуляции и уровней защиты цифровых данных.

Учебное пособие предназначено для магистров, обучающихся по направлениям 11.04.01 – «Радиотехника» и 11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», содержит материалы для проведения практических занятий по дисциплинам «Системы, средства и сети цифрового радиовещания», «Формирование, хранение, обработка и передача аудиоконтента в медиакоммуникациях». Оно полезно также и для бакалавров указанных направлений подготовки при углубленном изучении дисциплины «Системы и сети цифрового радиовещания».

УДК 621.396.97
ББК 32.884.8
ISBN 978-5-89160-080-5

© Ковалгин Ю. А.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций» им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2017.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	
1.Краткие сведения и основные характеристики систем цифрового радиовещания	
2.Модуляция в системах цифрового радиовещания.....	
2.1. Одночастотная модуляция.....	
2.2. I/Q – модулятор	
2.3. Многочастотная модуляция OFDM.....	
3. Система цифрового радиовещания DAB	
3.1.Общие сведения, структура и характеристики системы DAB.....	
3.2.Кодирование и защита цифровых аудиоданных в системе в системе DAB на уровне аудиофрейма	
3.3. Защита цифровых данных в субканалах системы DAB	
3.4. Модуляция поднесущих частот в системе DAB	
3.5. Радиосигнал системы DAB	
3.6.Вероятность появления цифровых ошибок в системе в DAB	
3.7. Эволюция системы DAB	
4.Система цифрового радиовещания DRM+	
4.1.Общие сведения и структура системы DRM+	
4.2.Кодирование первичных звуковых сигналов в системе DRM+...	
4.3.Сервер мультимедийных данных и мультиплексор системы DRM..	
4.4.Цифровые потоки системы DRM+	
4.5.Рандомизация, канальное кодирование и модуляция в системе DRM+	
4.6.Радиоканал и условия радиоприема в диапазоне ОБЧ	
5. Спектральные маски излучения и защитные отношения	
Литература	

ВВЕДЕНИЕ

Анализ роли и места радиовещания в современном мире показывает, что в настоящее время и в дальнейшем радиовещание по-прежнему остается одним из наиболее востребованных источников информации, особенно на удаленных, труднодоступных и мало населенных территориях. Несмотря на это оно все же отстает от телевидения в части внедрения современных цифровых технологий, что, несомненно, сказывается на качестве и количестве принимаемых в каждом регионе программ.

Системы аналогового радиовещания к настоящему времени уже исчерпали свои возможности. Хотя ОВЧ-ЧМ радиовещание с использованием частотной модуляции обеспечивает достаточно высокое качество звучания, свойственное двухканальной стереофонии, однако при мобильном приеме часто, особенно в городах с разной по высоте застройкой, возникают в отдельных зонах искажения, иногда прием вообще оказывается невозможным. Кроме того аналоговое радиовещание остается достаточно энергоемким, весьма затратным с точки зрения требуемого радиочастотного ресурса.

В настоящее время существует большое число стандартов наземного цифрового телевидения и радиовещания. Имеющиеся в них различия приводят к излишним затратам при построении глобальных сетей доставки программ до населения, создают дополнительные проблемы при частотном планировании и использовании радиочастотного ресурса в разных регионах мира (Европа, Азия, Америка), затрудняют развитие эфирного телерадиовещания (ТРВ) на единой платформе цифровых технологий.

В данном пособии будем говорить только о системах наземного высококачественного цифрового радиовещания (ЦРВ), рекомендуемых ITU-R для применения в диапазоне ОВЧ (30...3000 МГц).

Цифровое радиовещание (ЦРВ) позволяет:

- путем применения наилучших с позиций сегодняшнего дня технологий организовать высококачественное звуковое вещание во всех полосах частот, выделенных для организации наземных сетей звукового вещания. Это особенно важно для России с ее крайне неравномерным распределением компактных мест проживания населения по территории, а также наличием значительных территорий с очень низкой плотностью населения;

- обеспечить возможность адресной передачи (как коллективным, так и избранным пользователям) разнообразной дополнительной информации (данные, текстовая и графическая информация, неподвижные изображения и т.п.);

- значительно повысить эффективность использования радиочастотного ресурса при одновременном существенном увеличении числа и качества передаваемых программ;

- в несколько раз уменьшить затраты на эксплуатацию передающего оборудования, прежде всего за счет экономии электроэнергии;

-сделать востребованными населением все полосы частот, выделенные в России для наземного радиовещания, привлекательными также и для коммерческого использования, включая и диапазоны ДВ, СВ и КВ, практически не интересные населению в настоящее время, но очень важные с государственной точки зрения в силу особенностей распространения радиоволн;

-создать единые автоматизированные сети доставки программ РВ до населения;

-обеспечить возможность стационарного и мобильного приема программ звукового вещания с высоким качеством, включая и многоканальные звуковые форматы, например, формат 5.1.

Учебное пособие состоит из двух частей. Первая его часть ориентирована на изучение структур построения, характеристик и технологий, применяемых в системах цифрового радиовещания; вторая часть будет посвящена исследованию и моделированию основных процедур обработки цифровых сигналов, выполняемых в передающей и приемной частях системы ЦРВ.

1. Краткие сведения и основные характеристики систем цифрового радиовещания

Структура передающего тракта любой системы цифрового радиовещания (ЦРВ) содержит три основных части (на примере системы DRM): контент-сервер, модулятор, собственно передатчик и GPS-приемник (рис.1). Контент-сервер служит для обработки цифровых данных, поступающих от поставщиков звуковых программ АСК-1,...АСК-п, здесь обычно выполняются компрессия, мультиплексирование цифровых данных и формирование основных цифровых потоков с целью их последующей передачи к модулятору. В модуляторе цифровые потоки обрабатываются, подвергаясь рандомизации, перемежению цифровых данных, каналному кодированию, формированию ячеек модуляции, их перемежению по поднесущим частотам, формированию OFDM-символов, а также обычно и переносу модулированного сигнала в полосу частот радиоканала. Далее модулированный сигнал поступает к передатчику (обычно это усилитель радиочастоты) и после усиления излучается в эфир. Синхронизация передающего и приемного оборудования выполняется с помощью GPS-приемника.

В мире существует достаточно большое число стандартов наземного цифрового радиовещания. В рекомендациях ITU-RBS 1114-9 [1] и ITU-RBS 1660-7 (10/2015) [2] представлены особенности построения, технические характеристики и планирование сетей следующих систем наземного цифрового радиовещания:

T-DAB/DAB+, [3,4], для неё выделена полоса частот 174...240 МГц, диапазон ОВЧ III;

ISDB-T_{SB}, [5,6], в телевизионных каналах шириной 6, 7 или 8 МГц для передачи программ звукового вещания выделяется сегмент как одна четырнадцатая часть полосы частот телевизионного канала, полоса частот этого сегмента составляет соответственно 429 кГц (6/14), 500 (7/14), 571 (8/14).

Ширину этой полосы следует выбирать с учетом ситуации в отношении частот, сложившейся в каждой стране;



Рис.1. Укрупненная структурная схема системы цифрового радиовещания

T-DAB/DAB+, [3,4], для неё выделена полоса частот 174...240 МГц, диапазон ОВЧ III;

ISDB-T_{SB}, [5,6], в телевизионных каналах шириной 6, 7 или 8 МГц для передачи программ звукового вещания выделяется сегмент как одна четырнадцатая часть полосы частот телевизионного канала, полоса частот этого сегмента составляет соответственно 429 кГц (6/14), 500 (7/14), 571 (8/14). Ширину этой полосы следует выбирать с учетом ситуации в отношении частот, сложившейся в каждой стране;

DRM, [7], рекомендована для применения в диапазонах НЧ (30...300 кГц) в полосе частот 0,1485...0,2855 МГц (длинные волны, ДВ), СЧ (300...3000 кГц) в полосе частот 0,5265...1,6065 МГц (средние волны, СВ) и ВЧ (3...30 МГц). В диапазоне ВЧ в разных его частях для радиовещания выделены полосы частот 3,2...3,640, 4,75...4,995, 5,006...5,06, 5,95...6,2, 7,10...7,30, 9,50...9,90, 11,65...12,05, 13,6...13,8, 15,10...15,60, 17,55...17,90, 21,45...21,85, 25,67...26,10 МГц (короткие волны, КВ);

DRM+, [8], (является расширением стандарта DRM) рекомендована для применения в диапазоне ОВЧ (30...300 МГц) в полосах частот, выделенных для радиовещания как при мобильном, так и стационарном приемах: ОВЧ I (65,9...74 МГц), ОВЧ II (87,5...108 МГц), ОВЧ III (174...240 МГц);

IBOC HD Radio FM, [9], рекомендована ИТУ-R для применения в диапазоне ОВЧ II (87,5...108 МГц);

IBOCHDRadioAM, [9], рекомендована ИТУ-R для применения в диапазонах НЧ, СЧ, ВЧ;

T-DMB, [10], предназначена для передачи в одном радиоканале одновременно программ телевидения и радиовещания в диапазоне ОВЧШ (174...240 МГц);

РАВИС, [11, 12, 13, 14], отечественная аудиовизуальная информационная система реального времени, рекомендована разработчиками для применения в диапазонах ОВЧ I (65,9...74 МГц), ОВЧ II (87,5...108 МГц).

Сведения о системе РАВИС включены в отчет ITU-RBT.2049-7 (02/2016), где она позиционируется как мультимедийная система для мобильного радиоприема, а не как система цифрового радиовещания. Она не фигурирует в отчетах ITU-R, посвященных радиовещательной службе (ITU-RBS), не включена ITU-R в число систем цифрового радиовещания, рекомендуемых для применения в диапазоне ОВЧ (30...3000 МГц).

Заметим, что технологии DRM и DRM+ в настоящее время представлены в едином документе DRM [8] и рассматриваются как единая система цифрового радиовещания, имеющая режимы работы A, B, C, D (для применения в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ) и режим работы E (для применения в диапазоне ОВЧ). Это единый стандарт цифрового радиовещания, где в каждой из выделенных для радиовещания полосах частот (НЧ, СЧ, ВЧ, ОВЧ) рекомендуется для применения тот или иной из указанных выше режимов работы.

Технологии IBOCHDRadioFM и IBOCHDRadioAM также объединены в рамках одного стандарта [9].

Система T-DMB [10] использует транспортные механизмы системы DAB, может рассматриваться в этом смысле как её дальнейшее развитие. Именно так она и позиционируется в Европе.

Система DRM (DigitalRadioMondiale - цифровое всемирное радио) – многофункциональная система цифрового радиовещания – была впервые стандартизована Европейским институтом телекоммуникационных стандартов (ETSI) в 2001 году. Изначально она предназначалась для работы в диапазонах длинных (ДВ), средних (СВ) и коротких (КВ) волн, т.е. на участках частот до 30 МГц, выделенных ITU-R для целей звукового вещания.

В 2009 году была опубликована новая версия стандарта DRM, [7], в которой диапазон рабочих частот был расширен до частоты 240 МГц. В этой новой версии стандарта добавлен режим работы E, сама версия системы при работе в этом режиме в ряде публикаций получила название DRM+. В январе 2014 года была опубликована последняя версия стандарта DRM [8].

Что касается системы DAB (DigitalAudioBroadcasting), то изначально она позиционировалась разработчиками только как система цифрового радиовещания (ЦРВ), предназначенная для передачи звуковых программ разного качества, сопутствующей им информации или просто цифровых данных. Она была разработана в рамках проекта Eureka-147. Стандарт европейского института по стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (EuropeanTelecommunicationsStandardsInstitute) на эту систему появился в 1997 году. Первая версия системы DAB предусматривала компрессию цифровых аудиоданных только по стандарту MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 Layer II [15] и возможность передачи программ звукового вещания в двух форматах – моно

(1/0) и двухканальное стерео (2/0). Позже были разработаны, а затем стандартизованы более эффективные алгоритмы компрессии цифровых аудиоданных [16,17,18,19]. Они были добавлены в новую вторую версию стандарта, получившую название DAB+ [4], появившуюся в 2006 году. В частности, были добавлены алгоритмы компрессии, реализованные в кодере HE-AACv.2 стандарта MPEG-4 ISO/IEC 14496-3 [17] и в стандарте MPEGDSurround [19]. Возможность использования алгоритма компрессии MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 LayerII осталась и в этой новой версии стандарта на систему DAB+. Изменения коснулись только применяемых алгоритмов компрессии цифровых аудиоданных и процедуры защиты аудиоданных на уровне аудиофрейма, при этом процедуры транспортных механизмов в новой версии стандарта не изменились.

В 2009 году появилось дополнение [10] к системе DAB, посвященное передаче видеoinформации (видеосервисов), что превращает ее уже в полноценную мультимедийную систему T-DMB, ориентированную на мобильный прием программ радиовещания и телевидения. В 2016 году появилась последняя версия стандарта на систему DAB [5].

Из перечисленных выше систем цифрового радиовещания лишь две из них являются наиболее универсальными и рекомендованными ИТУ-R для применения *во всех полосах* частот, выделенных для наземного радиовещания (диапазоны НЧ, СЧ, ВЧ, ОВЧ). Это системы DRM и IBOC HD Radio. Россия выбрала европейскую платформу цифрового телевидения и радиовещания, а это системы DVB-T2/DVB-T2 Lite, DAB/DAB+ и DRM/DRM+. Однако, с внедрением систем ЦРВ в нашей стране пока ещё не всё ясно. Решением Правительства Российской Федерации от 28 марта 2010 года выбрана система DRM. Однако это решение относится только к диапазонам НЧ, СЧ и ВЧ. Как показали многочисленные исследования, выполненные за рубежом, по целому ряду признаков технология, реализованная в стандарте DRM для диапазонов НЧ, СЧ и ВЧ, является наилучшей и с этой точки зрения наиболее перспективной. По этой причине сделанный Российской Федерацией выбор в пользу системы DRM представляется логичным и вполне оправданным. Что же касается режима работы E системы DRM, рекомендованного для применения в диапазоне ОВЧ, то соответствующего решения Правительства РФ пока нет, но проведенное в Санкт-Петербурге в июне-августе 2015 года экспериментальное радиовещание в данном формате подтвердило соответствие полученных характеристик заявленным в стандарте значениям.

Радиовещание в стандарте DAB в России также пока не регламентировано, хотя соответствующие экспериментальные исследования проведены. В частности, в 2014 году МТУСИ по заказу РТРС было проведено экспериментальное радиовещание в формате DAB+. Заявленные в стандарте характеристики системы DAB+ в ходе выполнения этой работы также были подтверждены.

Одиннадцатого сентября 2018 года в Министерстве цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации состоялось за-

седание государственной комиссии по радиочастотам, где было поддержано решение о выделении полосы радиочастот 65,9-74 МГц, 87,5-108 МГц для создания на территории России сетей цифрового радиовещания стандарта DRM+", (РИА Новости <https://ria.ru/society/20180911/1528303185.html>). Ранее аналогичное решение было принято для системы DAB+, для которой выделена полоса частот 174...230 МГц.

Основные технические характеристики перечисленных выше систем цифрового радиовещания, рекомендованных ИТУ-R для применения в диапазоне ОВЧ, представлены в **таблицах 1...6.**

Таблица 1

Характеристики и параметры качества системы цифрового радиовещания DAB/DAB+(DigitalAudioBroadcasting)

(Европейская платформа цифровых технологий радиовещания).

Удовлетворяет всем требованиям Рекомендаций ИТУ-R BS.774 и ВО.789, принята в Европе в качестве стандарта ETSI **EN 300 401** для звукового радиовещания на автомобильные, переносные и стационарные приемники.

Для которой

Наименование характеристики

Значения характеристики

1. Диапазон несущих частот, МГц:

174...240 (наземная сеть)

1452...1492 (спутниковая сеть)

2. Применение

Для приема программ на автомобильные, переносные и стационарные приемники; для работы в условиях многолучевости; позволяет использовать ретрансляторы в совмещенном канале для покрытия областей с затененными территориями; для работы в одночастотной сети; позволяет обеспечить массовое производство недорогих бытовых приемников

2. Применение режимов работы:

одночастотная сеть, региональные сети,

региональные сети, локальные сети, отдельные передатчики

спутниковое и кабельное радиовещание

Режим работы 1 (ТМ I)

Режим работы 2 (ТМ II)

Режим работы 3 (ТМ III)

Режим работы 4 (ТМ IV)

4. Номинальное значение центральной несущей частоты радиоканала, МГц, кратно частоте, кГц

16

5. Полоса частот радиоканала, МГц, не более:

на уровне излучения -26 дБ

1,536

на уровне излучения -56 дБ

1,94

на уровне излучения -71 дБ

1,94

на уровне излучения -106 дБ

3,5

<p>6.Радиосигнал системы DAB: типмодуляции</p>	<p>COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex) DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying)</p>
<p>модуляция несущих частот в частотном блоке DAB</p>	
<p>7.Параметры COFDM-символов при работе в режимах: ТМI</p>	<p>Длительность кадра передачи 96 мс; длительность нулевого символа 1,297 мс; длительность COFDM-символа 1,246 мс; длительность защитного интервала 246 мкс; число передаваемых несущих 1536; расстояние между несущими частотами 1 кГц.</p>
<p>ТМII</p>	<p>Длительность кадра передачи 24 мс; длительность нулевого символа 324 мкс; длительность COFDM-символа 312 мкс; длительность защитного интервала 62 мкс; число передаваемых несущих 384; расстояние между несущими частотами 4 кГц.</p>
<p>ТМIII</p>	<p>Длительность кадра передачи 24 мс; длительность нулевого символа 168 мкс; длительность COFDM-символа 156 мкс; длительность защитного интервала 31 мкс; число передаваемых несущих 192; расстояние между несущими частотами 8 кГц.</p>
<p>ТМIV</p>	<p>Длительность кадра передачи 48 мс; длительность нулевого символа 648 мкс; длительность COFDM-символа 623 мкс; длительность защитного интервала 123 мкс; число передаваемых несущих 768; расстояние между несущими частотами 2 кГц.</p>
<p>8.Системная тактовая частота, МГц</p>	<p>2,048</p>
<p>9.Формат передачи</p>	<p>по фреймам</p>
<p>12.Суммарная скорость передачи, кбит/с</p>	<p>2400</p>
<p>13.Каналы цифровых потоков: каналы пользователя MSC:</p>	<p>Программы радиовещания, сопутствующие им данные, дополнительные данные AIC, которые не могут быть переданы в канале FIC</p>
<p>канал быстрой информации FIC:</p>	<p>Данные о конфигурации мультиплексирования MCI, сервисная информация SI, информация быстрого досту-</p>

канал синхронизации SC:	па FIDS Нулевой символ OFDM Опорный символ OFDM 2304
14.Скорость передачи данных в канале MSC, кбит/с	
15.Скорость передачи данных в канале FIC, кбит/с	96 (режимы работы I, II, IV); 128 (режим работы III)
16.Входные сигналы системы DAB: звуковые сигналы радиовещания: частота дискретизации, кГц квантование предыскажение интерфейс AES/EBU полоса частот исходного аналогового сигнала, Гц	48, 24 Равномерное, 16...22 бит/отсчет Рек.651 МККР Документ IEC 958 20...20000;40...15000; 50...7000
цифровые сигналы данных:	Связанные с программами радиовещания, сервисная информация, данные о конфигурации мультиплексирования
17.Возможность передачи данных общей информации в каналах пользователя MSC	Имеется
18.Форматы звуковых сигналов	Моно; обычное стерео, совмещенное стерео, многоканальное стерео
19.Кодирование звуковых сигналов радиовещания: DAB (ETSI EN 300 401 v1.4.1 (2006-01)) стандарт кодирования уровень кодирования	MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 Layer 2
объем выборки звукового сигнала длительность звукового фрейма, мс скорость цифрового звукового потока, кбит/с	1152 отсчета звукового сигнала 24 32,48,56,64,96,112, 128 ,160,192 (на один канал), 64, 96, 112, 128, 160, 192, 224, 256, 320, 384 (для стерео, совмещенное стерео, на два канала).
DAB+ (ETSITS 102 563 v1.1.1 (2007-02))	MPEG-4 HE-AAC v2, MPEG D Surround
20.Защита от ошибок: в структуре данных звукового фрейма: защита преамбулы (Header) защита масштабных коэффициентов SCF в канале пользователя MSC: помехоустойчивое кодирование	CRC-код CRC-код Сверточный код, временное перемежение логических фреймов с глубиной 16 фреймов (384 мс)
в канале быстрого доступа FIC: помехоустойчивое кодирование в радиоканале:	Сверточный код Перемежение несущих частот
21.Скремблирование с целью устранения нежелательной регулярности в передаваемом цифровом сигнале	Имеется
22.Режимы передачи звук/данные:	Потоковый, пакетный

23. Сигнал идентификатора передатчика Имеется
 24. Возможность условного доступа к информации Предусмотрена
 звук/данные

25. Пороговое значение отношения сигнал/шум,
 дБ при скорости кода 0,5...06 вdB:
 стационарный прием 4,5.....8,3
 мобильный прием 7.....18

Таблица 2

Характеристики и параметры качества системы цифрового радиовещания DRM+.

(Европейская платформа цифровых технологий радиовещания).

Принята в Европе в качестве стандарта ETSI ES 201 980 v.4.1.1, удовлетворяет требованиям рекомендации ITU-RBS.774.

№	Наименование характеристики	Значения характеристики
1	Диапазон несущих частот, МГц	30-240 (выделенные для звукового вещания полосы частот: 47-68; 65,8-74; 76-90; 87,5-107,9; 174-240)
2	Применение	Для цифрового наземного звукового радиовещания на автомобильные, переносные и стационарные приемники; для работы в условиях многолучевости; работает на основе суммирования энергии эх-сигналов, попадающих в заданный временной интервал, что позволяет использовать ретрансляторы в совмещенном радиоканале для покрытия областей с затененными территориями; позволяет обеспечить массовое производство недорогих бытовых приемников.
3	Применение режимов работы	Одночастотная сеть, региональные сети, локальные сети, отдельные передатчики;
4	Полоса частот радиоканала, кГц	100 (96)
5	Число передаваемых программ в одном радиоканале	1...4
6	Число несущих частот в полосе частот радиоканала	213
7	Радиосигнал системы DRM+: тип модуляции параметры символов OFDM: элементарный временной период T, мкс величина разноса несущих частот, Гц число несущих частот в частотном блоке OFDM суммарная длительность символа OFDM, мс длительность полезной части символа OFDM, мс защитный интервал между символами OFDM, мс отношение длительностей защитной и полезной частей символа OFDM	OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)/QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 83 1/3 444 4/9 213 2,5(30·T) 2,25(27·T) 0,25 (3·T) 1/9
	OFDM-символа модуляция несущих частот в частотном блоке DRM+: в канале MSC	QAM (Quadrature Amplitude Modulation), 16-QAM, 4-QAM поверх 4-QAM (SM- StandardMapping,)

	в канале SDC в канале FAC OFDM-символ содержит	4-QAM 4-QAM пилот-ячейки, ячейки управления, ячейки данных
8	Формат звуковых сигналов	по аудиофреймам и супераудиофреймам
9	Формат фрейма передачи	По фреймам, суперфреймам, FAC и SDC-блокам передачи
10	Длительность фрейма передачи системы DRM+, мс	100
11	Длительность суперфрейма передачи системы DRM+, мс	400
12	Число символов OFDM во фрейме передачи (в кадре радиосигнала) DRM+	40
13	Скорость передачи цифровых данных, кбит/с	37...186
14	Максимальные значения скорости цифровых потоков в канале MSC кбит/с при модуляции (для EEPSSM): 4-QAM и скорости кода: 0,25 0,33 0,4 0,5 16-QAM и скорости кода: 0,33 0,41 0,5 0,62	37,3 49,8 59,68 74,6 99,5 122,6 149,3 186,6
15	Каналы цифровых потоков: канал пользовательской информации MSC канал быстрого доступа FAC канал описания пользовательской информации	программы радиовещания, сопутствующие им данные, дополнительные данные данные быстрого доступа данные о конфигурации мультиплексирования
16	Скорость передачи данных в канале MSC, кбит/с	два канала со скоростью передачи 64 кбит/с каждый или один канал со скоростью передачи 180 кбит/с
17	Скорость передачи сервисных данных, кбит/с	24x2 или 6 (данные, речь)
18	Сигналы: звуковые сигналы радиовещания: частота дискретизации, кГц длительность аудиофреймов, мс	24; 48 40 (при частоте дискретизации 24 кГц), 20 (при частоте дискретизации 48 кГц)
	длительность аудиосуперфреймов, мс число аудиореймов в аудиосуперфрейме стандарт (алгоритм) кодирования предыскажение цифровые сигналы данных	200 мс 5 (при частоте дискретизации 24 кГц) 10 (при частоте дискретизации 48 кГц) кодер MPEG-4 xHE-AAC (монофоническое и стереофоническое радиовещание); кодер MPEG-4, включающий алгоритмы AAC, SBR, PS (моно- и стереовещание); кодер MPEG D Surround (многоканальное стереовещание, форматы 5.1) Рек. 651 МККР Связанные с программами радиовещания, сервисная информация, данные о конфигурации мультиплексирования

19	Защита от ошибок	Сверточное кодирование; перемежение битов; перемежение QAM-ячеек
20	Возможность передачи данных общей информации в каналах пользователя MSC	Имеется
21	Форматы звуковых сигналов	Моно (1/0); обычное стерео (2/0); Surround 5.1
22	Скремблирование цифровых данных с целью устранения нежелательной регулярности в цифровом сигнале	Имеется
23	Возможность совместной передачи сигналов аналогового радиовещания и DRM+-сигналов	Имеется. Рекомендуемое расстояние между несущими ЧМ-сигнала и DRM-сигнала ≥ 150 кГц, при $\Delta f = 150$ кГц разница по мощности аналогового и цифрового сигналов $\Delta P > 20$ дБ.
24	Сигнал идентификатора передатчика	Имеется
25	Возможность условного доступа к информации звук/данные	Имеется

Примечание: длительность фрейма передачи составляет 100 мс, суперфрейма длительность передачи – 400 мс; число OFDM-символов в суперфрейме передачи равно 40.

Таблица 3

Характеристики системы цифрового радиовещания ISDB-T_{SB}

Система ISDB-T_{SB} удовлетворяет всем требованиям Рекомендации МСЭ-R BS.774, принята в качестве стандарта в Японии.

Наименование характеристики	Режимы и условия работы, значение характеристики.
1. Назначение	Прием программ звукового вещания на стационарные, переносные и мобильные приемники; для работы в условиях многолучевости; для наземного радиовещания; от телефонного качества до качества компакт-диска; совместима со службами аналогового ЧМ-радиовещания; надежна в случае повторного использования ретрансляторами той же частоты при работе в совмещенном канале для покрытия областей с затененными территориями; оптимизирована для массового производства недорогих приемников с использованием больших интегральных схем.
2. Применение	Одночастотные сети, региональные сети, локальные сети, отдельные передатчики. Унифицирована на физическом уровне с системой наземного цифрового телевизионного вещания ISDB-T и может взаимодействовать с системами ISDB-S, ISDB-T, DVB-S, DVB-T, где используется транспортный поток MPEG-2. Совместная передача в одном радиоканале шириной 6,7 или 8 МГц программ телевидения и радиовещания.
3. Полоса частот диапазона, МГц	30...3000 МГц. Работает на основе суммирования энергии эхо-сигналов, попадающих в заданный временной интервал.
4. Передаваемая информация	Программы звукового вещания, сопутствующие им дан-

	ные, цифровые данные.
5.Параметры частотного планирования	Rec. ITU-RBS 1114-9
6.Входной транспортный поток	MPEG-2. Структура мультимплекса системы полностью совместима с архитектурой систем MPEG-2.
7.Полная полоса частот радиоканала, BWf , МГц	6,7,8
8.Режимы работы	Режим 1, режим 2, режим 3
9.Модуляция	OFDMс сегментацией полосы передачи (использование части полосы частот радиоканала для передачи программ звукового вещания – BST-OFDM)
10.Полоса частот BWs сегмента сигнала ISDB-T _{SB} , кГц, при наличии: одного сегмента, $N_s=1$ трех сегментов, $N_s=3$	$BWs = BWf \cdot 1000/14$ 1/14 часть от полной полосы частот радиоканала равной 428,57 кГц при $BWf=6$ МГц; 500 кГц при $BWf=7$ МГц и 571,428 кГц при $BWf=8$ МГц; 1500 кГц
11.Разнос несущих частот C_s , кГц, при работе в: в режиме 1, в режиме 2, в режиме 3	$BWs/108,$ $BWs/216,$ $BWs/432$
12.Общее число несущих частот при работе в: в режиме 1, в режиме 2, в режиме 3	$108 \cdot N_s + 1$ $216 \cdot N_s + 1$ $432 \cdot N_s + 1$
13.Число несущих частот для передачи аудиоданных при работе в: режиме 1 режиме 2. режиме 3	$96 \cdot N_s$ $192 \cdot N_s$ $384 \cdot N_s$
14.Модуляция несущих частот	DQPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
15.Число OFDM-символов на фрейм (кадр) передачи	204
16.Длительность полезной части OFDM-символа T_u , мкс	$1000/C_s$
17.Длительность защитного интервала OFDM-символа, T_g	1/4, 1/8, 1/16 или 1/32 от длительности T_u полезной части OFDM-символа
18.Общая длительность OFDM-символа	$T_s = T_g + T_u$
19.Длительность фрейма передачи T_f	$T_s \cdot 204$
20.Защита от одиночных цифровых ошибок: внутренний код внешний код	Сверточный код, скорость кодирования: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8, (материнский код = 1/2). Код РС (204, 188), (Рида-Соломона).
21.Защита цифровых данных от групповых ошибок	Временное перемежение цифровых данных, пять значений времени перемежения: 0...1 с
22.Защита от групповых ошибок: параметр перемежения L при работе в: режиме 1 режиме 2 режиме 3	Временное перемежение $0,4,8,16,32$ $0,2,4,8,16$ $0,1,2,4,8$

длительность временного перемежения	$I \cdot 95 \cdot T_s$
23.Защита цифровых данных от селективного затухания в радиоканале	Частотное перемежение ячеек модуляции
24.Защита цифровых данных от эхосигналов (многолучевости)	Защитный интервал в OFDM-символе
25.Стандарт (алгоритм) кодирования цифровых аудиоданных:	MPEG-4 HE-AAC v2; MPEG D Surround
26.Скремблирование (рандомизация)	Имеется
27.Предсказание, мкс	Имеется
29. Форматы звуковых сигналов	Моно (1/0); двухканальное стерео (2/0); 5.1, многоканальное стерео, Surround
30.Полоса частот каналов звука, Гц	40...15000, 20...20000
31.Сигнал идентификатора передатчика	Имеется
42.Возможность условного доступа	Имеется

Примечание:полевые испытания системы и демонстрация ее работы были проведены в полосах частот 188–192 МГц и 2535–2655 МГц.

Таблица 4

Характеристики системы цифрового радиовещания IBOCHDRADIOFM
(Американская платформа цифровых технологий для диапазона ОВЧ).
Система IBOCHDRADIOFM принята в качестве стандарта NRSC-5 в США.

Наименование характеристики	Режимы и условия работы, значение характеристики
1.Назначение	Прием программ звукового вещания на стационарные, переносные и мобильные приемники; для работы в условиях многолучевости; для наземного радиовещания. Позволяет осуществлять одновременную передачу звуковых программ в общем радиоканале как в аналоговом, так и цифровом режимах; оптимизирована для приема программ на несложные автомобильные радиоприемники.
2.Применение	Одночастотные сети, региональные сети, локальные сети, отдельные передатчики.
3.Полоса частот диапазона ОВЧ, МГц	30...300 МГц
4.Передаваемая информация	Программы звукового вещания, сопутствующие им данные, цифровые данные.
5.Параметры частотного планирования	Rec. ITU-RBS 1114-9
6.Режимы работы: гибридный, расширенный гибридный, полностью цифровой	MP1, MP2,MP3,MP4,MP5,MP6,MP7; MP5,MP6,MP7,MS1,MS2,MS3,MS4
7.Полоса частот аналогового сигнала, кГц, в режимах	

работы: гибридный расширенный гибридный	258,722 203,488
8. Полоса частот цифровых поднесущих, кГц, в режимах работы: гибридный МР1 расширенный гибридный МР2-МР4, полностью цифровой МР5-МР7, MS1-MS4	2·69,04=138,08 2·96,658=163,316 392,8
9. Число частотных блоков цифровых поднесущих частот в полосе частот радиоканала в режимах работы: МР1 МР2-МР4 МР5-МР7, MS1-MS4	$2 \cdot (10 + 1_{оп})$ $2 \cdot (10 + 1 + 1_{оп})$; $2 \cdot (10 + 2 + 1_{оп})$; $2 \cdot (10 + 4 + 1_{оп})$ $2 \cdot (10 + 4 + 10 + 4) + 2 \cdot 1_{3ч} + 4 \cdot 1_{оп}$
10. Число поднесущих частот в режимах работы: МР1 МР2-МР4 МР5-МР7, MS1-MS4	$2 \cdot (10 \cdot 19) = 380$ $2 \times (10 \cdot 19 + 1 \cdot 19) = 418$; $2 \cdot (10 \cdot 19 + 2 \cdot 19) = 456$; $2 \cdot (10 \cdot 19 + 4 \cdot 19) = 532$ $2 \cdot (10 \cdot 19 + 4 \cdot 19 + 4 \cdot 19 + 10 \cdot 19) + 2 \cdot 12 + 4 \cdot 1 = 1092$
11. Число поднесущих частот в каждом частотном блоке	19
12. Тип модуляции в частотном блоке цифровых поднесущих частот: в каналах P1, P2, P3, S1, S2, S3, S опорных поднесущих частот в каналах PIDS, SIDS	OFDM/64-QAM OFDM/BPSK OFDM/16-QAM
13. Мощность цифровой поднесущих частот относительно номинальной мощности несущей аналогового сигнала, дБ/режимы работы	20/МР1; 20/(МР2-МР4); 10/(МР5-МР7), 10/(MS1-MS4)
14. Ослабление по уровню OFDM-блоков, дБ/режимы работы: первичные основные боковые полосы, первичные расширенные боковые полосы, вторичные основные боковые полосы, вторичные расширенные боковые полосы, защищенные боковые полосы, дополнительные опорные поднесущие	-41,39/МР1; -41,39/(МР2-МР7); -31,39/(МР5-МР7, MS1-MS4) -41,39/(МР2-МР7); -31,39/(МР5-МР7, MS1-MS4) -41,39/(МР5-МР7, MS1-MS4) (-41,39...-59,39)/(МР5-МР7, MS1-MS4) (-41,39...-59,39)/(МР5-МР7, MS1-MS4)
15. Частота передачи символов OFDM, Гц	344,5
16. Расстояние между соседними поднесущими частотами, Гц	363,4
17. Длительность полезной части OFDM-символа, мкс	2743,3
18. Длительность защитного интервала OFDM-символа, мкс	158,7 (7/128)
19. Длительность символа OFDM, мкс	2902
20. Модуляция поднесущих частот в частотном блоке OFDM в каждом из возможных режимов работы: в каналах P1, P2, P3, S1, S2, S3, S4; в каналах PIDS, SIDS	OFDM/64-QAM OFDM/16-QAM BPSK

21. Длительность кадра L1, мс	1486 (512 OFDM-символов)					
22. Частота передачи кадров L1, Гц	$6,729 \times 10^{-1}$					
23. Длительность блока L1, с	$9,288 \times 10^{-2}$ (32 OFDM-символа)					
24. Частота передачи блоков L1, Гц	10,77					
25. Длительность пары блоков L1, с	$1,958 \cdot 120^{-1}$					
26. Частота передачи пары блоков L1, Гц	5,383					
27. Скорости цифровых потоков в первичных логических каналах, кбит/св режимах работы: MP1(гибридный) MP2(расширенный гибридный) MP3(расширенный гибридный) MP4(расширенный гибридный) MP5(расширенный гибридный, полностью цифровой) MP6(расширенный гибридный, полностью цифровой) MP7(расширенный гибридный, полностью цифровой)	Первичный логический канал					
	P1	P2	P3	PIDS		
	25	74	0	1		
	25	74	12	1		
	25	74	25	1		
	25	74	50	1		
	25	74	25	1		
	50	49	0	1		
25	98	25	1			
28. Скорости цифровых потоков во вторичных логических каналах, кбит/св режимах работы: MS1(полностью цифровой) MS2(полностью цифровой) MS3(полностью цифровой) MS4(полностью цифровой)	Вторичный логический канал					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
	0	0	0	98	6	6
	25	74	25	0	6	6
	20	49	0	0	6	6
	25	98	25	0	6	6
29. Защита цифровых данных от одиночных ошибок	Свёрточные коды Витерби, скорость кодирования					
30. Защита цифровых данных от групповых ошибок	Индивидуальное временное перемежение в каждом логическом канале					
31. Защита цифровых данных от селективного затухания в радиоканале	Частотное перемежение ячеек модуляции					
32. Защита цифровых данных от эхо- сигналов (многолучевости)	Защитный интервал в OFDM-символе					
33. Стандарт (алгоритм) кодирования цифровых аудиоданных:	iBiquityHDCcodec (на основе кодека HE-AAC)					
34. Предыскажение, мкс	$\tau=75$					
35. Рандомизация цифровых данных	Имеется					
36. Форматы звуковых сигналов в режиме работы: гибридный, полностью цифровой	Моно (1/0); двухканальное стерео (2/0); Моно (1/0); двухканальное стерео (2/0); многоканальное стерео, Surround					
37. Полоса частот каналов звука, Гц	30...15000 (FM, моно, аналог); 20...20000 (FMHD, стерео); 20...15000 (FMHD, моно)					
38. Сигнал идентификатора передатчика	Имеется					
39. Возможность условного доступа	Имеется					

Примечание: ОП – опорная поднесущая частота; ЗЧ- группа защищённых поднесущих частот, состоит из 12 поднесущих частот;

Таблица 5

**Характеристики аудиовизуальной информационной системы реального времени
РАВИС, рекомендована разработчиками для применения в полосах частот
ОВЧ I (47...74 МГц) и ОВЧ II (87,5...108 МГц)**

Наименование характеристики	Значение характеристики. ГОСТ Р 54309-2011, отчет Rep. ITU-R BT.2049-7,
1. Назначение	Для приема на автомобильные, портативные и стационарные приемники; для работы в условиях многолучёвости и затенения.
2. Полоса частот диапазона ОВЧ, МГц	65,8...74 (ОВЧ I); 87,5...108 (ОВЧ II)
3. Полоса частот радиоканала, кГц	100; 200; 250
4. Применение	Одночастотные сети, региональные сети, локальные сети, отдельные передатчики.
5. Число режимов передачи	Три, в зависимости от полосы частот радиоканала.
6. Формат передаваемых данных	Пакеты постоянной или переменной длины; транспортные пакеты стандарта MPEG-2 фиксированной длины известного размера и структуры; пакеты протокола УИП (GSE – универсальная инкапсуляция потока); НСПД - неструктурированный пакет данных.
7. Тип модуляции	OFDM/BPSK; OFDM/QPSK; OFDM/16-QAM; OFDM/64-QAM
8. Параметры частотного планирования	Rep. ITU-R BS.2214, ГОСТ Р 54309-2011.
9. Каналы основных цифровых потоков	КОС – канал основного сервиса; НСК – низкоскоростной канал данных; НКД – надежный канал данных.
10. Число поднесущих в частотном блоке OFDM/полоса частот радиоканала, кГц	215 (из них 196 информационных поднесущих)/100; 439 (из них 400 информационных поднесущих)/200; 553 (из них 504 информационных поднесущих)/250
11. Расстояние между соседними поднесущими частотами, Гц	444 4/9
12. Расстояние между крайними поднесущими частотами, кГц/полоса частот радиоканала, кГц	95,1/100; 194,7/200; 245,3/250
13. Длительность полезной части OFDM-символа, мкс	2250
14. Длительность защитного интервала OFDM-символа, мкс	281,25
15. Длительность символа OFDM, мкс	2531,25
16. Модуляция поднесущих частот в частотном блоке OFDM: в логическом канале КОС в логическом канале НКД в логическом канале НСК	QPSK, 16-QAM, 64-QAM BPSK QPSK
17. Размер кадра, бит: в логическом канале КОС в логическом канале НКД в логическом канале НСК	Зависит от полосы радиоканала 533, скорость кодирования $\frac{1}{2}$, передают 26 поднесущих 656, скорость кодирования $\frac{1}{2}$, передают 26 поднесущих
18. Длительность фрейма передачи, мс	103,8 (41 OFDM-символ)
19. Скорость передачи цифровых данных, кбит/с	80 (полоса частот радиоканала 100 кГц, скорость кода $\frac{1}{2}$ и модуляция QPSK)... 900 (полоса частот радиоканала 250 кГц, скорость кода $\frac{3}{4}$ и модуляция 64-QAM)
20. Скорости цифровых потоков канала	

КОС, кбит/с./скорости кода при полосе частот радиоканала: 100 кГц и модуляции QPSK, 200 кГц и модуляции QPSK, 250 кГц и модуляции QPSK; 100 кГц и модуляции 16-QAM, 200 кГц и модуляции 16-QAM, 250 кГц и модуляции 16-QAM; 100 кГц и модуляции 64-QAM; 200 кГц и модуляции 64-QAM; 250 кГц и модуляции 64-QAM	80/(1/2), 100/(2/3), 120/(3/4); 160/(1/2), 210/(2/3), 240/(3/4); 200/(1/2), 270/(2/3), 300/(3/4); 150/(1/2), 210/(2/3), 230/(3/4); 320/(1/2), 530/(2/3), 470/(3/4); 400/(1/2), 210/(2/3), 600/(3/4); 230/(1/2), 310/(2/3), 350/(3/4); 470/(1/2), 630/(2/3), 710/(3/4); 600/(1/2), 800/(2/3), 900/(3/4).
21. Скорость цифровых потоков в канале НСК около, кбит/с	12
22. Скорость цифровых потоков в канале НКД около, кбит/с	5
23. Защита цифровых данных от одиночных ошибок	БЧХ (двоичный блочный код Боуэ-Чоудури-Хоквингема), (Bose-Chaudhuri-Nocquenghem multiple error correction binary block code); код LDPC (коды с малой плотностью проверок на четность (low density parity check)).
24. Защита цифровых данных от групповых ошибок	Временное перемежение цифровых данных в канале КОС
25. Защита цифровых данных от селективного затухания в радиоканале	Частотное перемежение ячеек модуляции
26. Защита цифровых данных от эхосигналов (многолучевости)	Защитный интервал в OFDM-символе
27. Стандарт (алгоритм) кодирования цифровых аудиоданных:	Кодер HE-AAC, включающий алгоритмы компрессии AAC, PS, SBR, MPEG Surround (стереозвук высокого качества при скорости цифрового потока 32 кбит/с).
28. Стандарт кодирования видеоданных	Кодер H.264/AVC, видео высокого качества при скорости цифрового потока менее 500 кбит/с.
29. Предыскажение	Рек. 651 МККР.
30. Рандомизация цифровых данных	Имеется.
31. Форматы звуковых сигналов:	Моно (1/0); двухканальное стерео (2/0) Моно (1/0); двухканальное стерео (2/0); многоканальное стерео, например, формата 5.1.

Таблица 6

Характеристики системы цифрового мультимедийного вещания T-DMB, рекомендуемой ИТУ-R для применения в полосе частот 174...240 МГц диапазона ОВЧ

Наименование характеристики	Значение характеристики. Мультимедийная система А, рекомендация ИТУ-R BT.1833
1. Полоса частот диапазона ОВЧ, МГц	174-240
2. Полоса частот радиоканала, МГц	1,54
3. Применение	Одночастотные сети, региональные сети, локальные сети, отдельные передатчики; для приема на автомобильные, портативные и стационарные приемники; для работы в условиях многолучевости и затенения
5. Транспортный поток	MPEG-2 TS
6. Тип модуляции	COFDM/DQPSK
7. Параметры частотного планирования	Рекомендация ИТУ-R BS 1114.

8. Цифровая платформа формирования, обработки и передачи основных цифровых потоков/режимы передачи	DAB/Режим I, режим II, режим III, режим IV
4. Тип модуляции	COFDM/DQPSK
9. Число поднесущих в частотном блоке COFDM/режим работы	1536/TMI; 384/TMII; 192/TMIII; 768/TMIV
10. Длительность полезной части OFDM-символа, мкс	1246/TMI ; 312/TMII; 156/TMIII; 623/TMIV
11. Длительность защитного интервала OFDM-символа, мкс	246/TMI; 62/TMII; 31/TMIII; 123/TMIV
Длительность нулевого символа, мкс	1297/TMI; 324/TMII; 168/TMIII; 649/TMIV
6. Модуляция поднесущих в частотном блоке OFDM	DQPSK
6. Длительность фрейма передачи, мс	96/TMI; 24/TMII; 24/TMIII; 48/TMIV
8. Скорость передачи цифровых данных, кбит/с	
9. Скорость передачи данных, Мбит/с	0,576...1,728
Возможность передачи данных, связанных с программой (PAD)	Канал PAD пропускной способностью 0,66...64 кбит/с (за счет уменьшения пропускной способности аудиоканала); Пропускная способность канала быстрого доступа FIC до 16 кбит/с
Защита цифровых данных от одиночных ошибок	Сверточное кодирование, скорость кода от 1/3 (самый высокий уровень защиты до ...3/4 (самый низкий уровень защиты))
Защита цифровых данных от групповых ошибок	Временное перемежение цифровых данных с глубиной перемежения равной 16 кадрам
Защита цифровых данных от селективного затухания в радиоканале	Частотное перемежение
Защита цифровых данных от эхо-сигналов (многолучевости)	Защитный интервал в OFDM-символе
Защита от ошибок при передаче аудиоданных	Для звуковых сигналов предусмотрено пять уровней защиты; для услуг передачи данных – 8 уровней защиты за счет использования перфорированного сверточного кода для каждого из 64 субканалов
Максимальная задержка эхо-сигнала, не более, мкс	300/TMI; 75/TMII; 37,5/TMIII; 150/TMIV
10. Стандарт (алгоритм) кодирования цифровых аудиоданных:	MPEG-1 ISO/IEC 11172-3/MPEG-2 ISO/IEC 13818-3, Layer 2; MPEG-2 ISO/IEC 13818-7, AAC; MPEG-4 ERB-SAC; MPEG-4 ISO/IEC 14496-3, HE-AACv2; MPEG Surround ISO/IEC 23003-1
11. Стандарт кодирования данных	JPEG, PNG, MNG, BMP, etc. ; ACSII text, etc.
Возможные значения скорости цифрового потока при кодировании аудиоданных, кбит/с	32; 48; 64; 80; 96; 112; 128; 160; 192 (на один монофонический сигнал (в режиме стерео формата 2/0 имеет место удвоение скорости цифрового потока))
Стандарт и алгоритм кодирования видеоданных	H.264/MPEG-4 AVC; H.264/MPEG-4 SVC
11. Предысказание	Рек. 651 МККР
12. Защита от одиночных цифровых ошибок	Канальное кодирование: -с равной защитой от ошибок при передаче пакетных данных (EER); -неравной защитой от ошибок (UEP) отдельных частей аудиофрейма CRC-кодом с выкалыванием и скоростью кода 8/24 (защита заголовка, BAL, SCFSI), 8/18 (защита масштабных коэффициентов SCF), 8/14 (защита отсчетов ЗС и части поля данных X-PAD), 8/19 (защита части поля данных X-PAD, масштабных коэффициентов SCF и по-

	ля данных F-PAD).
13. Защита от групповых цифровых ошибок	Временное перемежение цифровых данных
14. Защита от селективного частотного затухания в радиоканале	Перемежение DQPSK-ячеек
13. Рандомизация цифровых данных	Имеется
14. Форматы звуковых сигналов: DAB DAB+/DMB/DRM+	Моно (1/0); двухканальное стерео (2/0) Моно (1/0); двухканальное стерео (2/0); многоканальное стерео, на- пример, формата 5.1
7. Максимальное расчетное расстояние между передатчиками в одночастотной сети, км/режим работы	96/TMI; 24/TMII; 12/TMIII; 48/TMIV
Условный доступ	Предусмотрен

Внимательное изучение данных, приведенных в табл. 1...6, показывает, что все рекомендованные ITU-R для применения в диапазоне ОБЧ системы ЦРВ имеют общие технологические особенности. К их числу, прежде всего, относятся:

- компрессия и рандомизация цифровых аудиоданных,
- высокоэффективные алгоритмы защиты от цифровых ошибок (канальное помехоустойчивое кодирование с разными уровнями защиты информации, временное перемежение битов, перемежение по поднесущим частотам ячеек модуляции);
- цифровые методы модуляции (PSK, QAM, COFDM/QPSK, OFDM/QAM);
- стереофонические системы повышенного качества звучания форматов 3/2, 5.1 и т.п.

Однако выбранные в разных системах ЦРВ для реализации этих процедур алгоритмы отличаются, что позволяет говорить о неодинаковой их эффективности и заложенных функциональных возможностях. Используемые здесь технологии часто отличаются лишь отдельными деталями, но различия в деталях приводят к излишним затратам при реализации глобальных сетей доставки программ радиовещания до населения, создают дополнительные проблемы использования радиочастотного ресурса в регионах мира (Европа, Азия, Америка), затрудняют технологические направления развития будущего эфирного вещания. Все это требует более тщательного изучения современных стандартов цифрового телевидения и звукового вещания с целью последующей гармонизации и разработки единого стандарта на систему цифрового вещания. Уже сегодня наблюдается постепенная интеграция цифровых платформ телевидения, радиовещания, кинематографа, звукозаписи и систем воспроизведения аудио- и видеоинформации. По этой причине можно говорить о конвергенции цифровых систем радиовещания.

Учитывая, что Россия выбрала европейскую платформу цифрового телерадиовещания, а это системы DVB-T2/DVB-T2 Lite, DAB/DAB+ и DRM/DRM+, будем подробнее рассматривать далее две из них - DAB и DRM,

режим работы E, рекомендованные для применения в диапазоне ОВЧ (30...3000 МГц).

3. Одночастотная модуляция

Основное назначение модуляции – это перенос спектра звукового сигнала в полосу частот радиоканала. Различают одночастотную модуляцию, когда в полосе частот радиоканала присутствует только одна несущая частота, параметры которой – амплитуда (ASK- AmplitudeShiftKeying), частота (FSK– FrequencyShiftKeying) или фаза (PSK- Phase-ShiftKeying) дискретно меняются по действием модулирующего сигнала. При этом сам модулированный сигнал в системах ЦРВ в полосе частот радиоканала является аналоговым. В системах ЦРВ под действием цифрового потока обычно меняется либо только фаза несущего колебания (PSK-модуляция), либо одновременно и фаза и амплитуда (QAM-QuadratureAmplitudeModulation). В системах цифрового радиовещания применяется также и дифференциальная фазовая модуляция DQPSK–DifferentialPSK).

В общем виде модулированный сигнал $s(t)$ можно представить в полярной и алгебраической формах записи соответственно в виде:

$$\begin{aligned} s(t) &= A(t)\cos[\omega_c t + \varphi(t)] = A(t)\operatorname{Re}\{\exp[j\omega_c t + \varphi(t)]\} \text{ или } (1) \\ s(t) &= I(t)\cos \omega_c t - Q(t)\sin \omega_c t, \end{aligned}$$

где $A(t)$ – амплитуда несущего колебания, $\varphi(t)$ – фаза несущего колебания, ω_c – частота несущего колебания, t – текущее время; в комплексной форме модулированный сигнал имеет вид:

$$s(t) = \operatorname{Re}\{g(t) \cdot \exp(j\omega_c t)\}, \text{ здесь } g(t) = I(t) + jQ(t), \quad (2)$$

$g(t)$ – символ модуляции.

В окончательном виде модулированный сигнал можно представить также в виде, содержащем вещественную и мнимую компоненты:

$$s(t) = \operatorname{Re}\{[I(t) + jQ(t)] \cdot [\cos\omega_c t + j\sin \omega_c t]\} = I(t)\cos\omega_c t - Q(t)\sin \omega_c t. \quad (3)$$

При цифровой модуляции один или одновременно несколько параметров несущего колебания (частота, амплитуда или фаза) дискретно меняются по величине через определенный интервал времени T_C , необходимый для передачи символа модуляции – сочетания битов, определяющих состояние вектора несущего колебания. Иначе говоря, модулированный сигнал принимает одно из $K=2^k$ возможных дискретных значений. При этом число битов k , определяющее состояние вектора несущего колебания (его амплитуду, частоту или фазу) называют символом модуляции.

Состояние вектора несущего колебания обычно представляют графически в виде, показанном на рис.2, и называют сигнальным созвездием.

Помехоустойчивость модулированного сигнала определяется минимальным расстоянием между двумя соседними векторами (точками) несущего колебания [11]:

$$d_{\text{ОПТ}} = d_{\text{min}} / \sigma, \quad (4)$$

где величины d_{min} равны

$$d_{\text{min}}^{\text{ASK}} = d_0 / (2k - 1) \text{ или } d_{\text{min}}^{\text{PSK}} = d_0 \sin\left(\frac{\pi}{2k}\right), \quad (5)$$

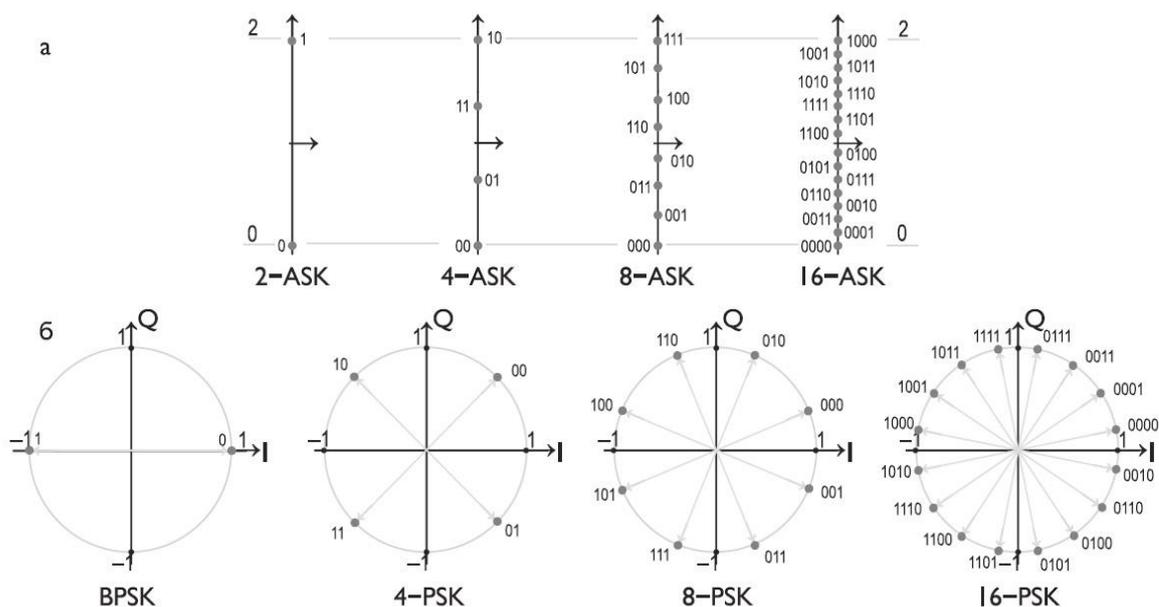


Рис.2. Примеры сигнальных созвездий:

а – модуляция ASK (2-ASK, $k=1$; 4-ASK, $k=2$; 8-ASK, $k=3$; 16-ASK, $k=4$);

б – модуляция PSK (BPSK, $k=1$; 4-PSK, $k=2$; 8-PSK, $k=3$; 16-PSK, $k=4$)

где $d_0 = 2$ – нормированное расстояние между двумя точками созвездий при модуляции 2-ASK и 2-PSK, а σ – среднеквадратический уровень векторов созвездия равный

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} C_n^2}, \quad (6)$$

C_n – длина вектора несущего колебания (n -ой точки сигнального созвездия). Значения d_{min} для разных видов модуляции представлены в табл.7, [11]. Видно, что чем больше число позиций вектора несущего колебания, тем хуже помехозащищенность, наибольшей помехозащищенностью при одном и том же числе позиций вектора несущего колебания обладает модуляция QAM, где одновременно меняются амплитуда и фаза несущего колебания, ее преимущество растет с увеличением числа позиций вектора несущего колебания.

Важнейшим параметром системы ЦРВ является отношение средней мощности сигнала к эффективной мощности шума, обозначаемое обычно как отношение сигнал/шум, S/N или SNR , определяемая отношением энергии бита информации $E_b = S \cdot T_b$ (S – мощность сигнала, T_b – время передачи одного бита информации) к спектральной плотности мощности шума N_0 . При этом [11]:

$$(E_b/N_0) = (S/N) \cdot (W/R),$$

где W – полоса частот радиоканала, R – скорость передачи битов ($R = 1/T_b$), N – мощность шума. Очевидно, чем меньше величина E_b/N_0 , тем эффективнее процесс демодуляции информации при заданной вероятности появления цифровой ошибки. Это отношение – удобная величина для оценки эффективности разных видов цифровой модуляции.

Таблица 7

Минимальное расстояние между точками сигнального созвездия для разных видов цифровой модуляции

Вид манипуляции	Минимальное расстояние между точками созвездия d_{\min}	Среднеквадратичский уровень созвездия σ	Нормированное расстояние $d_{\text{отн}} = d_{\min}/\sigma$
ASK-4	$\frac{2}{3} \approx 0,6667$	$\frac{\sqrt{14}}{3} \approx 1,24721$	$\sqrt{\frac{2}{7}} \approx 0,5345$
ASK-8	$\frac{2}{7} \approx 0,2857$	$\sqrt{\frac{10}{7}} \approx 1,1952$	$\sqrt{\frac{2}{35}} \approx 0,2390$
ASK-16	$\frac{2}{15} \approx 0,13334$	$\sqrt{\frac{62}{45}} \approx 1,1738$	$\sqrt{\frac{2}{155}} \approx 0,1136$
ASK-32	$\frac{2}{31} \approx 0,0645$	$\sqrt{\frac{42}{31}} \approx 1,1640$	$\sqrt{\frac{2}{651}} \approx 0,0554$
ASK-64	$\frac{2}{63} \approx 0,0317$	$\sqrt{\frac{254}{189}} \approx 1,1593$	$\sqrt{\frac{2}{2667}} \approx 0,0274$
QPSK	$2 \sin \frac{\pi}{4} \approx 1,4142$	1	$2 \sin \frac{\pi}{4} \approx 1,4142$
PSK-8	$2 \sin \frac{\pi}{8} \approx 0,7654$	1	$2 \sin \frac{\pi}{8} \approx 0,7654$
PSK-16	$2 \sin \frac{\pi}{16} \approx 0,3902$	1	$2 \sin \frac{\pi}{16} \approx 0,3902$
PSK-32	$2 \sin \frac{\pi}{32} \approx 0,1960$	1	$2 \sin \frac{\pi}{32} \approx 0,1960$
PSK-64	$2 \sin \frac{\pi}{64} \approx 0,0981$	1	$2 \sin \frac{\pi}{64} \approx 0,0981$
QAM-8	$\sqrt{\frac{2}{5}} \approx 0,6325$	$\sqrt{\frac{7}{10}} \approx 0,8367$	$\frac{2}{\sqrt{7}} \approx 0,7559$
QAM-16	$\frac{\sqrt{2}}{3} \approx 0,4714$	$\frac{\sqrt{5}}{3} \approx 0,7454$	$\sqrt{\frac{2}{5}} \approx 0,6325$
QAM-32	$\frac{\sqrt{2}}{5} \approx 0,2828$	$\frac{\sqrt{11}}{5} \approx 0,6633$	$\sqrt{\frac{2}{11}} \approx 0,4264$
QAM-64	$\frac{\sqrt{2}}{7} \approx 0,2020$	$\sqrt{\frac{3}{7}} \approx 0,6547$	$\sqrt{\frac{2}{21}} \approx 0,3086$

В своей классической работе Шеннон показал, что при наличии в радиоканале аддитивного белого гауссового шума справедливо соотношение

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad \text{или} \quad \frac{E_b}{N_0} = \frac{W}{C} (2^{(C/W)} - 1), \quad (7)$$

где C – пропускная способность канала или максимальная скорость цифрового потока для канала с полосой частот W , при этом нижнее предельное значение $(E_b/N_0) = (1/\log_2 e) \approx 0,693$ или минус 1,59 дБ. С помощью выражений (7)

можно получить зависимость C/W , бит/с/Гц от E_b/N_0 , дБ, изображенную кривой линией на рис.3. Здесь по оси ординат отложено отношение скорости цифрового потока R , бит/с, к полосе частот радиоканала W , Гц, а по оси абсцисс – требуемое значение отношения E_b/N_0 , дБ при вероятности появления символьной ошибки $P_B = 10^{-5}$, наличии в канале аддитивного гауссовского шума и фильтра с граничной частотой Найквиста идеальной прямоугольной формы.

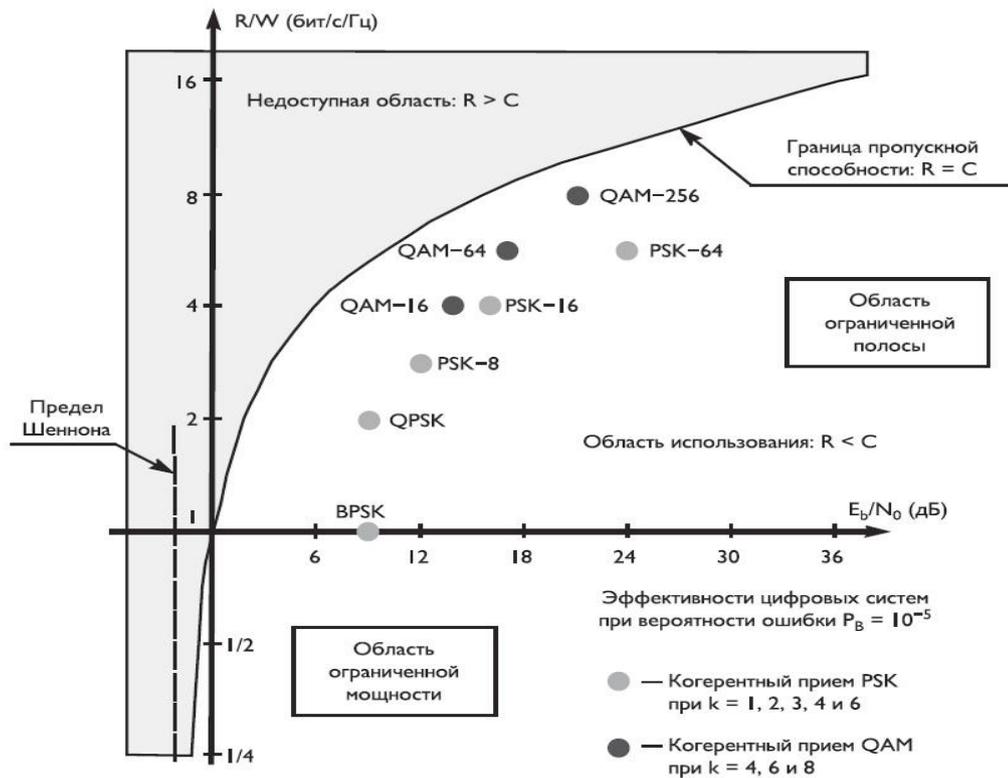


Рис. 3. Эффективность цифровой модуляции

Этот график характеризует эффективность использования полосы частот каналом системой цифровой связи.

Граница пропускной способности цифровых систем связи разделяет плоскость на две части, одна из них (правая часть от кривой линии) характеризует область возможной реализации системы связи, когда $R < C$, а вторая (затененная часть) — недоступную область при пропускной способности канала связи меньшей требуемой скорости передачи битов $C < R$. Верхняя часть при $R/W > 1$ и $R < C$ определяет область ограниченной полосы частот радиоканала, при использовании которой могут быть реализованы различные эффективные системы цифровой модуляции несущих частот. Точки на графике соответствуют цифровой модуляции PSK при вероятности появления цифровой ошибки равной 10^{-5} и различном числе позиций вектора несущего колебания.

Эффективность использования полосы частот радиоканала W (в идеальном случае при использовании прямоугольного фильтра с граничной частотой Котельникова–Найквиста) определяется соотношением:

$$R/W = \log_2 K = k \text{ (бит/с/Гц)}, \quad (8)$$

где K — число позиций вектора несущего колебания. Для реальных каналов радиосвязи эта эффективность несколько снижается в связи требованием увеличения полосы пропускания для создания условий применения реализуемых фильтров. Отметим, что положение точек фазовой манипуляции при BPSK ($K = 2, k=1$) и при QPSK ($K = 4, k=2$) соответствует одинаковым значениям E_b/N_0 . Следовательно, при одинаковом значении отношения E_b/N_0 для модуляции QPSK эффективность использования полосы частот равна 2 бит/с/Гц, а для схемы BPSK — только 1 бит/с/Гц. Кроме того, на рис.3 приведены точки для модуляции PSK-8 ($K=8, k=3$), PSK-16 ($K=16, k=4$), PSK-64 ($K=64, k=6$), а также при квадратурно-амплитудной модуляции QAM-16 ($K=16, k=4$), QAM-64 ($K=64, k=6$), QAM-256 ($K=256, k=8$). Видно, что модуляция QAM наиболее эффективно используют полосу радиочастот канала связи (k - число бит в символе модуляции).

В цифровой системе за время передачи символа модуляции, определяющего положение и длину вектора несущего колебания, передается k битов информации, например, для модуляции QPSK один символ модуляции передает 2 бита информации, при модуляции PSK-16 один символ модуляции передает уже 4 бита и т.п.

Требуемая ширина полосы частот радиоканала Δf связана со скоростью передачи символов модуляции R_S , скоростью передачи битов R , временем передачи каждого бита T_b следующим соотношением [11]:

$$\Delta f = 1/T_S = R_S = R/k = 1/(k \cdot T_b), \quad (9)$$

где k — число битов в символе модуляции, T_S — время передачи символа модуляции, а отношение мощности принимаемого сигнала P_r к спектральной плотности мощности шума N_0 определяется как

$$P_r/N_0 = E_b \cdot R / N_0 = E_S \cdot R_S / N_0, \quad (10)$$

где $E_S = k \cdot E_b$, причем E_b — энергия бита, E_S — энергия символа модуляции.

Для модулированного по фазе несущего колебания вероятность возникновения символьной ошибки P_E при наличии гауссовского шума в радиоканале при $k > 1$ с достаточной точностью определяется выражением

$$P_E \approx 2Q\left[\sqrt{2k \frac{E_b}{N_0}} \sin\left(\frac{\pi}{2k}\right)\right], \quad (11), \text{ где } Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-u^2/2) du - \text{гауссов интеграл вероятности появления ошибки.}$$

. (11)

Результаты расчетов по данным формулам (табл.8) показывают, что при модуляции QPSK и отношении $(E_b/N_0) \approx 4,5$ дБ вероятность появления символьной ошибки равна $P_E = 10^{-2}$, а при E_b/N_0 около 13 дБ она составляет уже $P_E = 10^{-9}$.

При удвоении числа позиций фазы несущего колебания (увеличении значения k) требуемая величина отношения E_b/N_0 возрастает примерно на 3,5 дБ.

Таблица 8

Вероятность появления символьной ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности белого шума при различном числе позиций вектора несущего колебания для модуляции PSK

Вид манипуляции	$\frac{P_E}{k}$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
	QPSK	2	4,323	6,790	8,398	9,588	10,530	11,309	11,972
PSK-8	3	7,895	10,362	11,970	13,160	14,102	14,881	15,544	16,122
PSK-16	4	12,500	14,964	16,573	17,763	18,705	19,483	20,147	20,724
PSK-32	5	17,508	19,974	21,583	22,772	23,714	24,493	25,156	25,734
PSK-64	6	22,726	25,192	26,801	27,990	28,932	29,911	30,375	30,952
PSK-128	7	28,074	30,541	32,149	33,339	34,281	35,060	35,723	36,301
PSK-256	8	33,514	35,981	37,589	38,779	39,721	40,500	41,163	41,741

При модуляции QAM, использовании кода Грея и наличии гауссовского шума в канале и при радиоприёме с помощью согласованных фильтров вероятность появления символьной ошибки определяется выражением [11]:

$$P_B = \frac{2(k-1)}{k \log_2 k} Q \left[\sqrt{2 \left(\frac{3 \log_2 k}{k^2 - 1} \right) \frac{E_b}{N_0}} \right], \quad (12) \text{ где } Q(x) = \frac{1}{2\pi} \int_x^\infty \exp(-u^2 / 2) du - \text{гауссов интеграл}$$

вероятности появления ошибки.

Результаты вычислений вероятности появления символьной ошибки по данным формулам для модуляции PSK представлены на рис.4 и в табл. 8

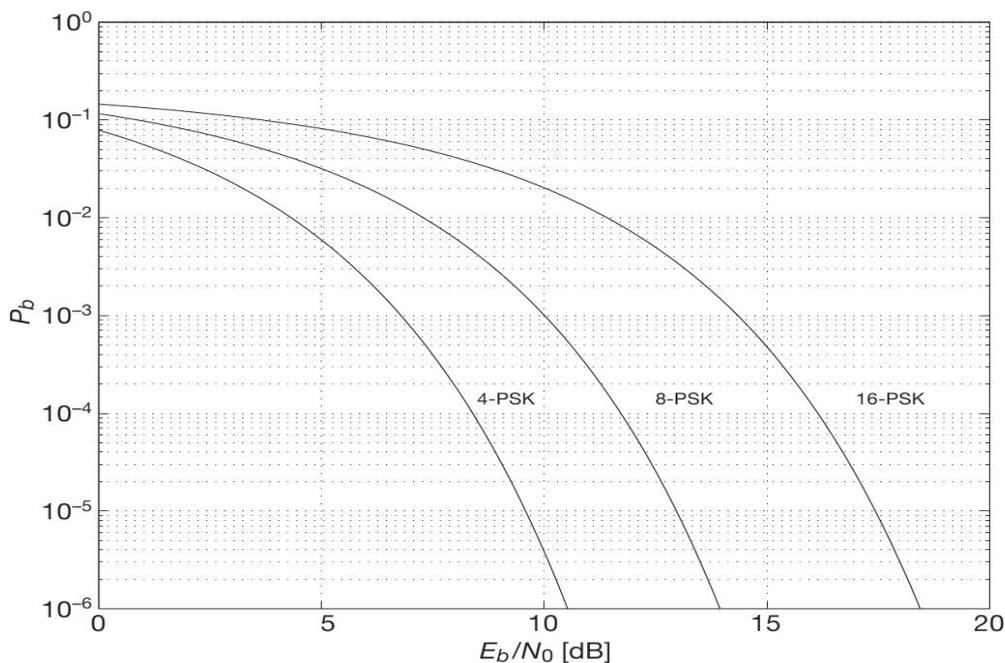


Рис.4. Вероятность появления символьной ошибки от отношения сигнал/шум для модуляции PSK

Результаты вычислений вероятности появления символьной ошибки по данным формулам для модуляции QAM представлены на рис.5. и в табл. 9 .

Сравнение результатов, представленных в табл.8 и 9, показывает, что модуляция QAM обладает большей эффективностью по сравнению с PSK, причем, чем больше число позиций вектора несущего колебания, тем больше это различие. При $k=4$ различие величин E_b/N_0 составляет 4 дБ, а при $k=8$ это различие увеличивается более чем на 20 дБ.

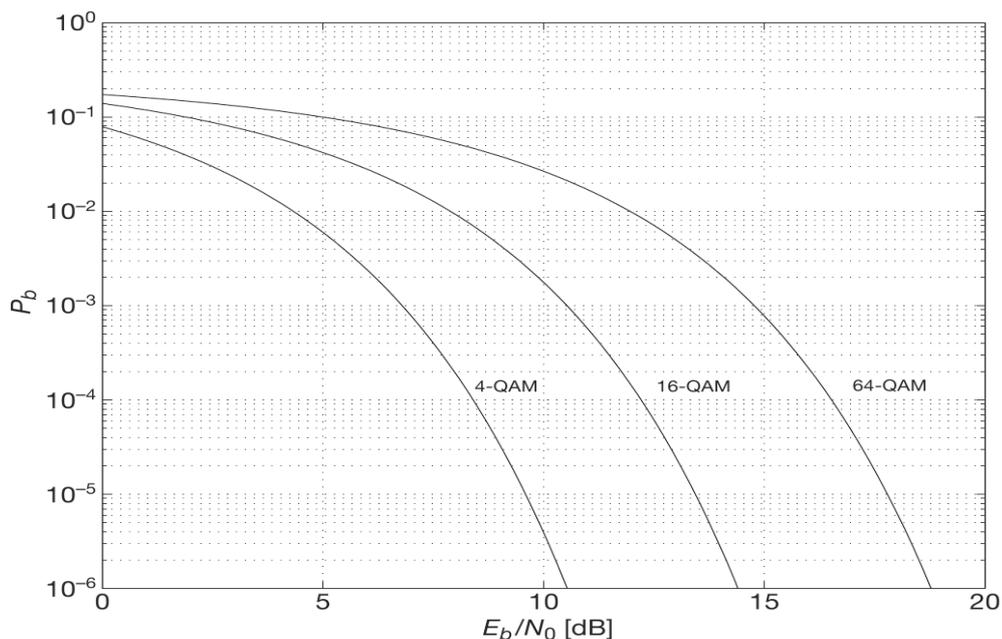


Рис.5. Вероятность появления символьной ошибки от отношения сигнал/шум для модуляции QAM

В системах цифрового радиовещания используются модуляции PSK (PSK-4, QPSK) и QAM (QAM-4, QAM-16, QAM-64), а также и иерархическую модуляцию.

Сигнальные созвездия для каждого из перечисленных выше типов модуляции представлены на рис.6 и рис.7. Здесь же показан также и порядок передачи битов символа модуляции.

Таблица 9.

Вероятность появления символьной ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности белого шума при различном числе позиций вектора несущего колебания для модуляции QAM

Вид манипуляции	P_E	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
	k								
QPSK	2	4,323	6,790	8,398	9,588	10,530	11,309	11,972	12,550
QAM-8	3	6,334	8,901	10,555	11,768	12,725	13,514	14,185	14,768
QAM-16	4	7,882	10,552	12,205	13,435	14,402	15,198	15,874	16,461
QAM-32	5	9,144	11,840	13,546	14,788	15,763	16,564	17,244	17,834
QAM-64	6	10,211	12,953	14,677	15,929	16,910	17,715	18,398	18,990
QAM-128	7	11,136	13,917	15,656	16,916	17,902	18,711	19,396	19,990
QAM-256	8	11,954	14,768	16,520	17,787	18,777	19,589	20,276	20,872

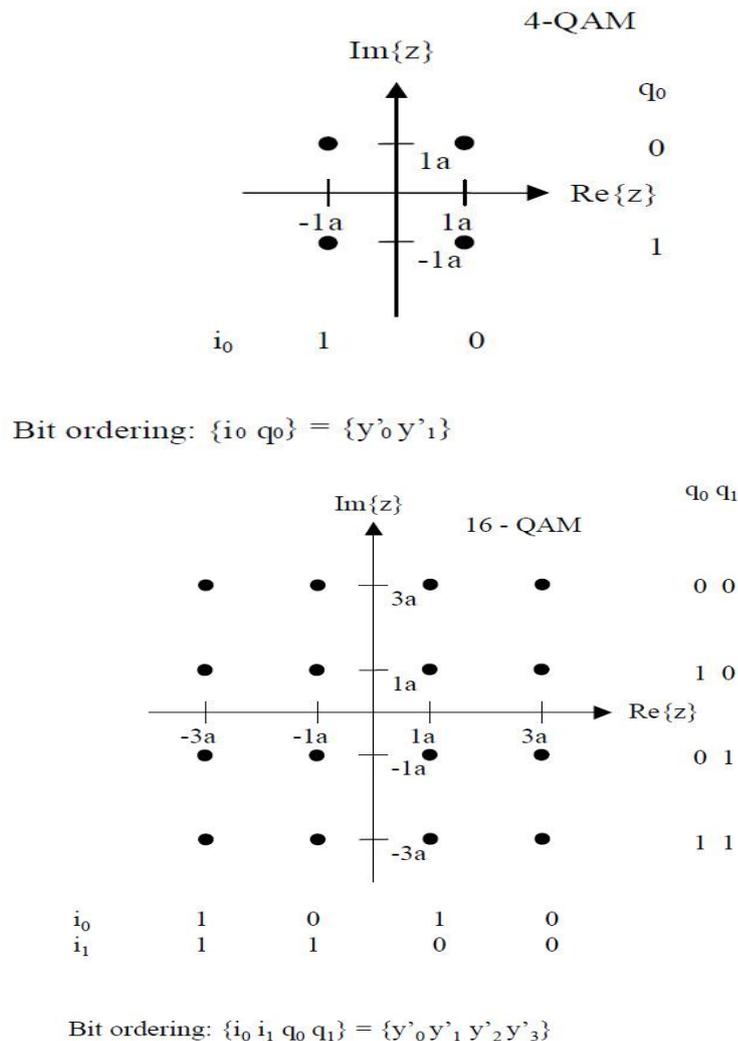


Рис. 6. Сигнальные созвездия и последовательность передачи бит символов модуляции для QAM-4 (PSK-4) и QAM-16 (низ), нормирующие коэффициенты $a=1/\sqrt{2}$ (QAM-4) и $a=1/\sqrt{10}$ (QAM-4)

В системах ЦРВ находит применение также и иерархическая QAM-модуляция (рис.8). В этом случае исходный цифровой поток разделяется на две части: цифровой поток высшего приоритета НР и цифровой низшего приоритета LP. Для передачи цифрового потока высшего приоритета применяется модуляция с лучшей помехозащищенностью 4-QAM. На полученный модулированный сигнал поверх накладывается модуляция цифровым потоком

низшего приоритета, например, 4-QAM или 16-QAM. При этом помехозащищенность потока NR несколько ухудшается (по сравнению с модуляцией 4-QAM в чистом виде), ибо при его демодуляции цифровой поток LR создает дополнительный шум, в тоже время помехозащищенность цифрового потока LR оказывается выше по сравнению с модуляцией 16-QAM. Это наглядно видно по изменению углового расстояния между положениями соответствующих векторов сигнальных созвездий.

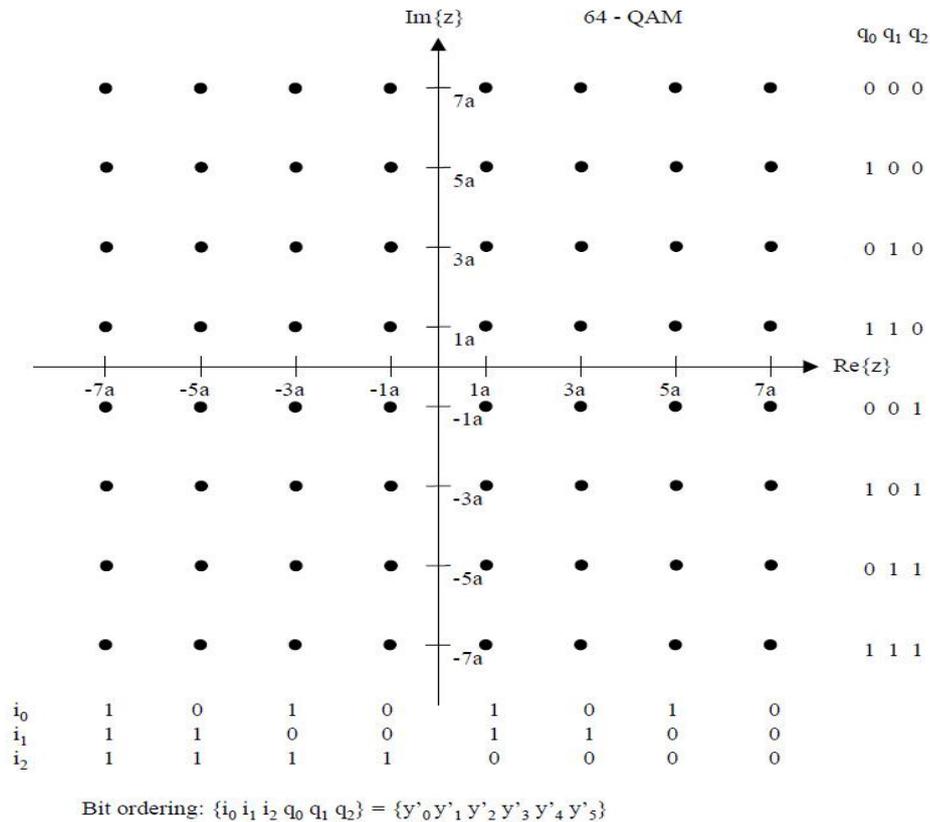


Рис.7. Сигнальное созвездие и последовательность передачи бит для модуляции 64-QAM и последовательность передачи битов (низ), нормирующий коэффициент равен $a=1/\sqrt{42}$

Более подробные сведения об эффективности различных видов модуляции приведены в [11] и [25].

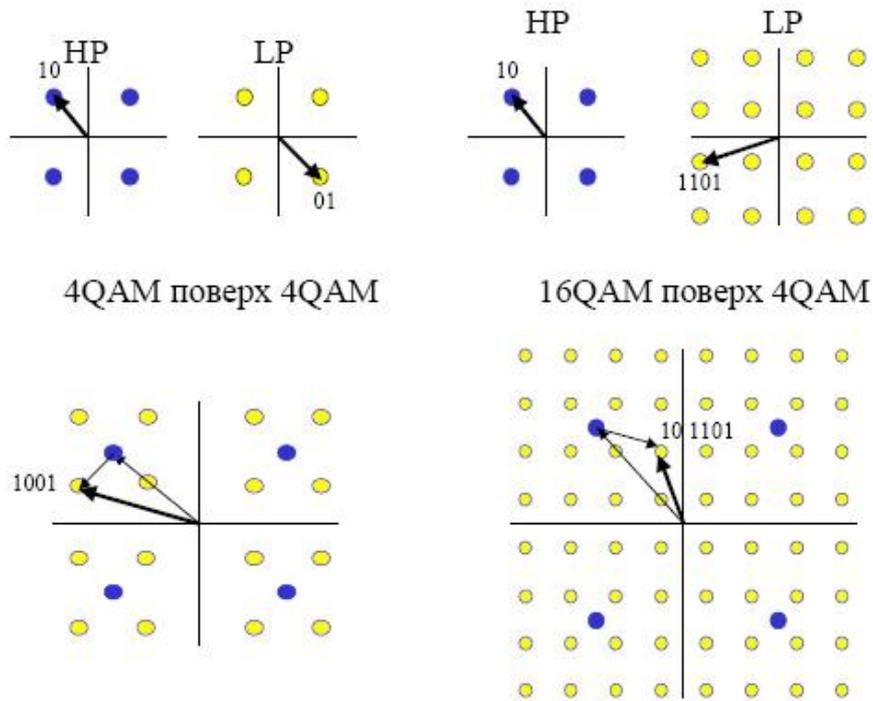


Рис.8. К пояснению иерархической модуляции

2.2. I/Q – модулятор

В современных системах ЦРВ обычно для переноса спектра сигнала модуляции в полосу частот радиоканала используют так называемый I/Q-модулятор (рис.9). Предварительно входной цифровой поток разделяют на

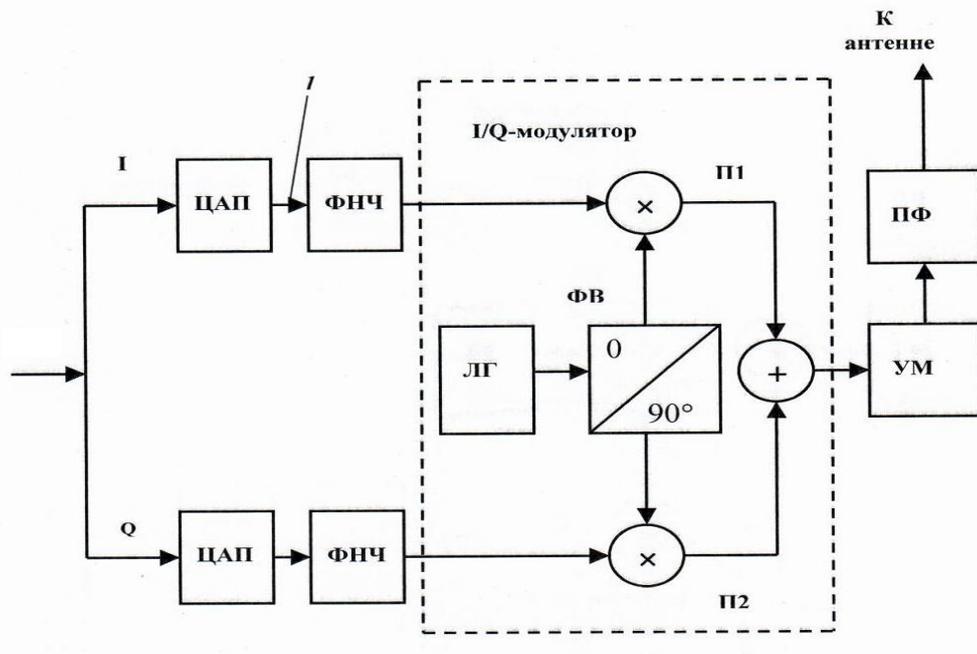


Рис.9. Структурная схема I/Q-модулятора

две компоненты I и Q, которые образуют синфазную и квадратурную составляющие сигнала модуляции (DIG – Digital In-Phase and Quadrature, стандарт EN 300798). Далее эти составляющие преобразуются в аналоговую форму цифроаналоговым преобразователем ЦАП проходят фильтр нижних частот ФНЧ и затем уже в аналоговом виде поступают на соответствующие тракты I/Q-модулятора.

Модулятор I/Q содержит генератор несущего колебания (ЛГ), фазовращатель ФВ, сдвигающий фазу генератора ЛГ на 90^0 , два перемножителя сигналов П1 и П2 и сумматор +. После модулятора сигнал усиливается УМ, проходит полосовой фильтр ПФ и далее излучается в эфир.

Работу I/Q-модулятора можно пояснить следующим образом. Напомним, что модулированный сигнал, например, для несущей частоты с индексом k (S_k), как это уже было показано ранее, можно записать следующим образом:

$$S_k(t) = z_k e^{j2\pi kt/T_U} = z_k [\cos(2\pi kt/T_U) + j \sin(2\pi kt/T_U)], \quad (13),$$

где z_k – комплексный символ модуляции несущего колебания с индексом k ; t – текущее время, T_U – длительность символа модуляции (время, в течение которого параметры несущего колебания не меняются, т.е. соответствуют символу модуляции z_k). При этом $z_k = c_k + j d_k = |z| e^{j\varphi_k}$, где $|z_k| = \sqrt{c_k^2 + d_k^2}$ и $\varphi(k) = \arctg(\frac{d_k}{c_k})$.

Запишем исходное выражение в виде двух частей отдельно для синфазной $S_{kI}(t)$ и квадратурной $S_{kQ}(t)$ составляющих модулированного сигнала:

$$\begin{aligned} S_{kI}(t) &= z_k \cos 2\pi kt/T_U = \operatorname{Re}[S_k(t)] \\ S_{kQ}(t) &= z_k \sin 2\pi kt/T_U = \operatorname{Im}[S_k(t)] \end{aligned} \quad (14)$$

Линейный генератор ЛГ создает напряжение $u_{ЛГ} = U_{ЛГ} \cos \omega_r t$. Это напряжение поступает на перемножитель П1, на П2 поступает напряжение от генератора ЛГ сдвинутое по фазе на $+90^0$, т.е. $u'_{ЛГ} = -U_{ЛГ} \sin \omega_r t$. Будем для простоты рассуждений считать, что $U_{ЛГ} = 1$, тогда после выполнения процедуры умножения получим:

$$\begin{aligned} S_{kI}(t) \times \cos(\omega_r t) &= z_k \cos(2\pi kt/T_U) \times \cos(\omega_r t) = S_{kI1}(t), \\ S_{kQ}(t) \times \cos(-\omega_r t) &= z_k \sin(2\pi kt/T_U) \times [-\sin(\omega_r t)] = S_{kI2}(t) \end{aligned} \quad (15)$$

Учитывая, что имеет место равенство:

$$\begin{aligned} \cos x \times \cos y &= \frac{1}{2} [\cos(x-y) + \cos(x+y)] \quad , \\ \sin x \times \sin y &= \frac{1}{2} [\cos(x-y) - \cos(x+y)] \quad , \end{aligned} \quad (16)$$

получим окончательно для сигналов на выходах П1 и П2:

$$S_{кП1}(t) = \frac{1}{2} [z_k \cos(2\pi kt / T_U - \omega_r t) + z_k \cos(2\pi kt / T_U + \omega_r t)] \quad , \quad (17)$$

$$S_{кП2}(t) = \frac{1}{2} [-z_k \cos(2\pi kt / T_U - \omega_r t) + z_k \cos(2\pi kt / T_U + \omega_r t)] \quad ,$$

Тогда на выходе сумматора (рис.9) будем иметь

$$S_{к\Sigma}(t) = z_k \cos[(2\pi k / T_U + \omega_r)t] \quad . \quad (18)$$

При сложении первые слагаемые в приведенных выше выражениях уничтожаются, видно, что сигнал на выходе сумматора представляет собой действительную часть сигнала $S_k(t)$ сдвинутую вверх по частоте на величину ω_r , т.е. перенесенную в полосу частот радиоканала.

Заметим, что полное взаимное уничтожение первых двух слагаемых сигналов на выходах П1 и П2 возможно только при идеальной идентичности параметров синфазного и квадратурного трактов I/Q-модулятора. Иными словами элементы трактов синфазного и квадратурного сигналов (ЦАП, ФНЧ, П1 и П2) должны быть согласованы по амплитуде и фазе в пределах всей полосы частот сигналов Iи Q. Любое нарушение здесь баланса приводит к появлению искажений радиосигнала, проявляющееся в появлении дополнительных спектральных составляющих. Должна быть также обеспечена и высокая линейность работы П1 и П2. Требуемые параметры для нормальной работы I/Q- модулятора сегодня выполняются. При этом достаточно иметь одно преобразование частоты для переноса сигнала в полосу частот радиоканала.

2.3. Многочастотная модуляция OFDM

В современных системах цифрового радиовещания используется многочастотная модуляция, получившая в литературе название OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing). В переводе это означает мультиплексирование с ортогональным частотным разделением, более кратко, ортогональное частотное мультиплексирование. При OFDM в полосе частот радиоканала имеется множество ортогональных поднесущих частот. Данные последовательных цифровых потоков распределяются по поднесущим частотам и передаются одновременно (параллельно) через их множество. При этом если распределение данных цифровых потоков по поднесущим частотам происходит в кодированной последовательности, известной декодеру, то такая модуляция называется COFDM (Coded Orthogonal frequency-division multiplexing).

Технология передачи OFDM обладает целым рядом достоинств:

- имеет высокую спектральную эффективность;
- существенно экономит радиочастотный ресурс за счет перекрытия спектров сигналов отдельных поднесущих частот;
- эффективна в условиях многолучевости;
- в каналах с медленными изменениями их характеристик возможно существенное увеличение пропускной способности за счет адаптации скоро-

сти передачи цифровых данных на каждой из поднесущих частот с разным уровнем защиты информации;

- устойчива к узкополосному селективному затуханию, ибо это наносит вред небольшой части модулированных поднесущих частот;

- обеспечивает возможность построения одночастотных сетей

Кроме достоинств технологии OFDMприсущи и некоторые недостатки:

- большая чувствительность к расстройке частоты и к фазовому шуму;

- имеет сравнительно большое отношение пиковой мощности к ее среднему значению (peak-to-averagerpoweratio – PAPR), что приводит к снижению энергетической эффективности радиочастотных усилителей;

- необходима повышенная линейность радиочастотного тракта;

- для реализации метода мультиплексирования с частично перекрывающимися спектрами необходимо сохранить при передаче по радиоканалу их ортогональность, при потере ортогональности независимая демодуляция поднесущих становится невозможной.

Структурная схема, поясняющая принцип формирования OFDM-сигнала, показана на **рис.10,а**. Исходная цифровая последовательность распараллеливается в блоке 1. После этого каждый из полученных цифровых потоков поступает, например, на свой ФМ-модулятор ($\Phi M_1, \Phi M_2, \dots, \Phi M_n$), на вторые входы которых подаются сигналы несущих частот ($f_{H1}, f_{H2}, \dots, f_{H(n-1)}, f_{Hn}$). Переход от последовательной к параллельной передаче двоичных символов цифровой последовательности для поднесущих частот условно изображен на **рис.10,б**. Здесь t_1 (слева) — время, необходимое для передачи n двоичных символов (нулей и единиц); T_S — время передачи одного двоичного символа. Очевидно, что при распараллеливании цифрового потока скорость передачи цифровых данных в каждом из субканалов падает в n раз, а время передачи одного символа соответственно возрастает в это же число раз, где n – количество поднесущих частот. Полученная совокупность ФМ-сигналов поступает на сумматор Σ , на выходе которого и образуются полезные части OFDM-сигнала. Поднесущие частоты должны быть ортогональны, для выполнения этого условия они располагаются на интервале кратном $1/T_S$, где T_S – длительность полезной части OFDM-символов. При этом каждая из этих поднесущих частот модулируется своим символом модуляции.

Интервал времени T_S (**рис.10,б**, справа), в течение которого каждой из поднесущих передается один символ модуляции образует OFDM- символ. Число бит, переданных каждым таким OFDM-символом, равно $k \cdot n$, где k – число бит в символе модуляции. Заметим, что **рис.10,а** иллюстрирует лишь идею формирования OFDM-сигнала.

Процесс образования OFDM-символа для большей наглядности иллюстрирует **рис.10,в**. При этом совокупность сигналов s_0, s_1, \dots, s_{n-1} на выходе DEMUX рассматривается как совокупность ортогональных частот с постоянным шагом по частоте. Длительность каждого такого сигнала $T_S = T_B \cdot n$, где

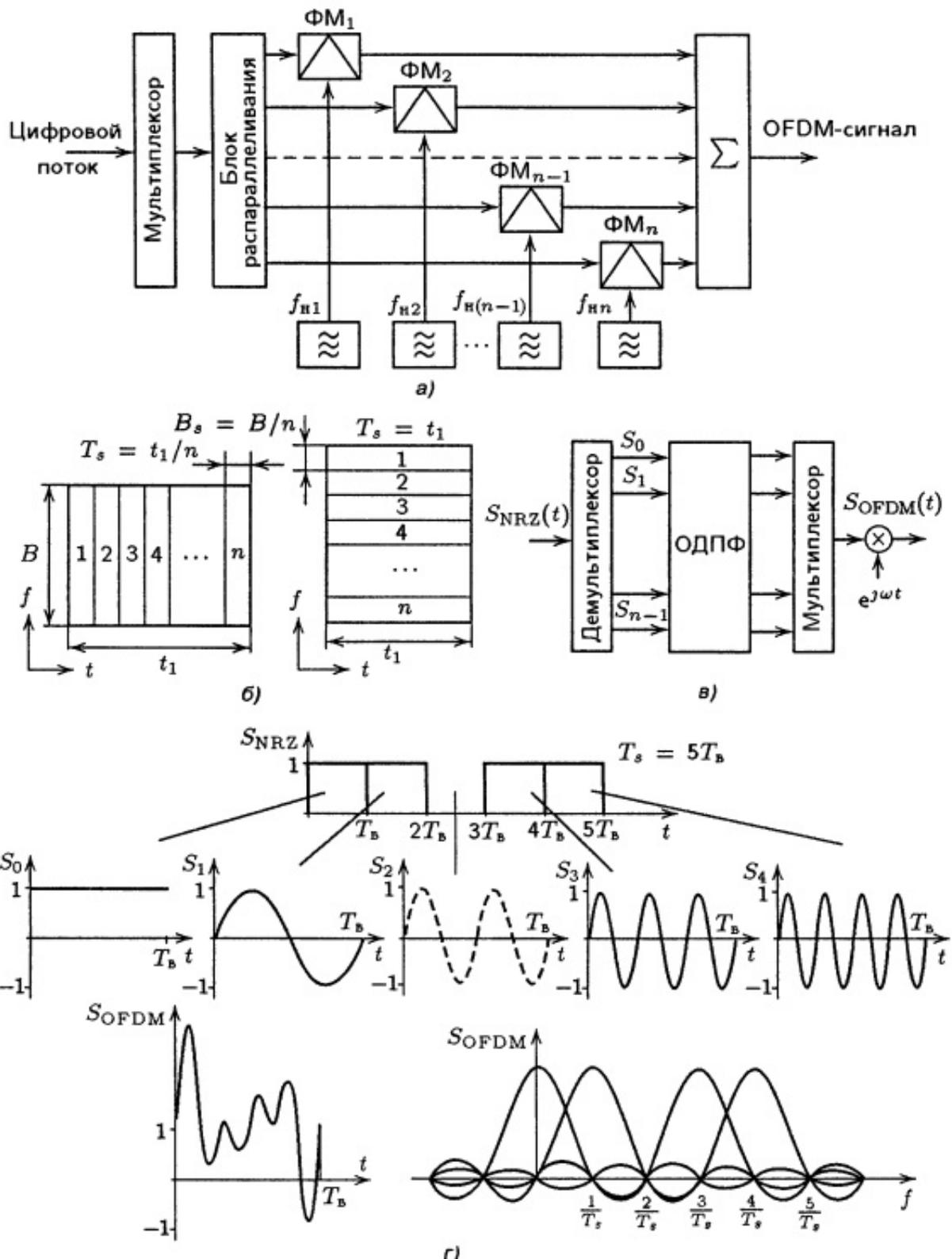


Рис.10. К принципу формирования OFDM-сигнала: а- концепция формирования OFDM-сигнала, б- преобразование последовательной цифровой последовательности в параллельную, в-устройство формирования OFDM-сигнала, г-пример формирования OFDM-сигнала из пятибитовой цифровой последовательности

T_B - время передачи одного бита для входного цифрового потока, n - число цифровых потоков на выходе демультиплексора. После суммирования этих сигналов образуется полезная часть OFDM-символа (рис.10,г, здесь слева – временное представление полезной части OFDM-символа, справа – его спектр).

Интервал времени T_s , в течение которого осуществляется передача одного символа с помощью n поднесущих частот, образует полезную часть OFDM-символа. Перед полезной частью OFDM-символа расположен так называемый "защитный интервал" длительностью T_G (рис.11). Столбики на данном рисунке – это условное изображение модулированных поднесущих частот OFDM-символов. Защитный интервал размещается в начале OFDM-символов. Его длительность не превышает $1/4$ полезной части символа T_s . Благодаря введению защитного интервала декодер игнорирует часть отраженных сигналов. Длительность защитного интервала должна удовлетворять условию $T_G \geq (d/c)$, где: d - расстояние между передатчиками, c - скорость распространения волны. Если это условие выполнено, то приемники не испытывают помех от наложения сигналов, поступающих от соседних передатчиков водночастотной сети. При $d=60$ км длительность защитного интервала должна быть не менее 200 мкс.

На практике такого множества генераторов несущих частот нет. Да это вряд ли возможно было бы реализовать, ибо число таких несущих частот составляет сотни или даже тысячи.

Метод получения OFDM-сигнала (его полезной части) можно пояснить с помощью обратного преобразования Фурье, имеющего вид:

$$s(t) = \sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} z_k e^{j2\pi kt/T_U} \quad (19)$$

где $s(t)$ – OFDM-сигнал (полезная часть OFDM-символа), K -число поднесущих частот, z_k - комплексный символ модуляции, T_U –временной интервал, на котором определен сигнал $s(t)$ или длительность полезной части OFDM-символа, k –индекс (номер) поднесущей частоты. В каждом последующем интервале T_U передается свой комплексный символ модуляции для каждой из поднесущих частот. Формирование OFDM-символа можно представить как модуляцию символом z_k комплексного поднесущего колебания $\exp(j2\pi kt/T_U)$ с частотой равной k/T_U для $k=(\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm K/2)$.

Полезная часть OFDM-символа формируется на самых низких частотах, начиная с нулевой частоты (рис.12, верх), спектр данного модулированного сигнала показан в средней части рисунка. В нижней его части укрупненно показаны спектральные характеристики модулированных частот в полосе частот радиоканала при наличии ортогональности. Условие ортогональности для поднесущих частот выполняется, если минимальный разнос между ними по частоте равен $1/T_U$.

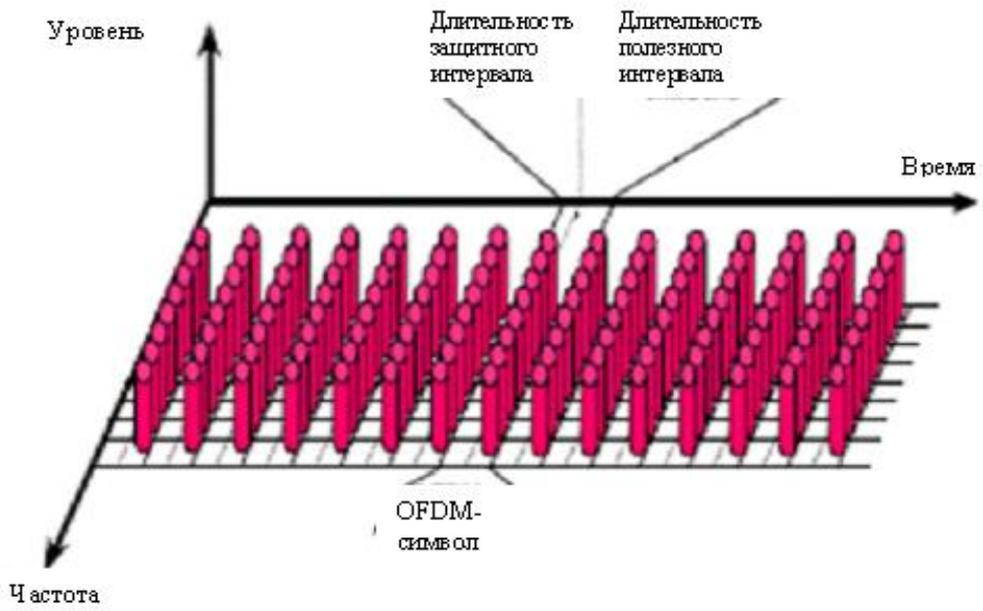
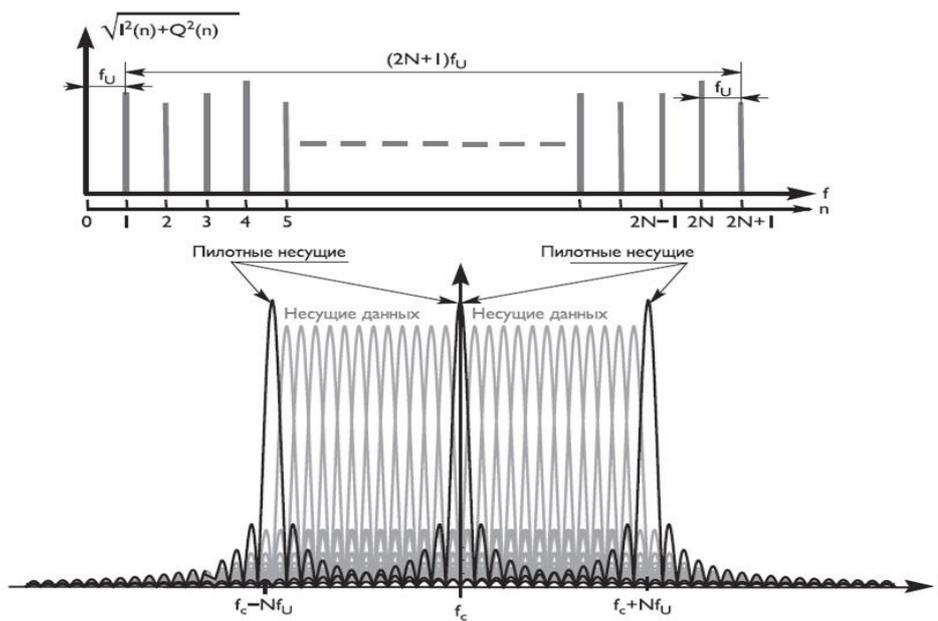


Рис.11. Сегментация OFDM-сигнала по времени и частоте



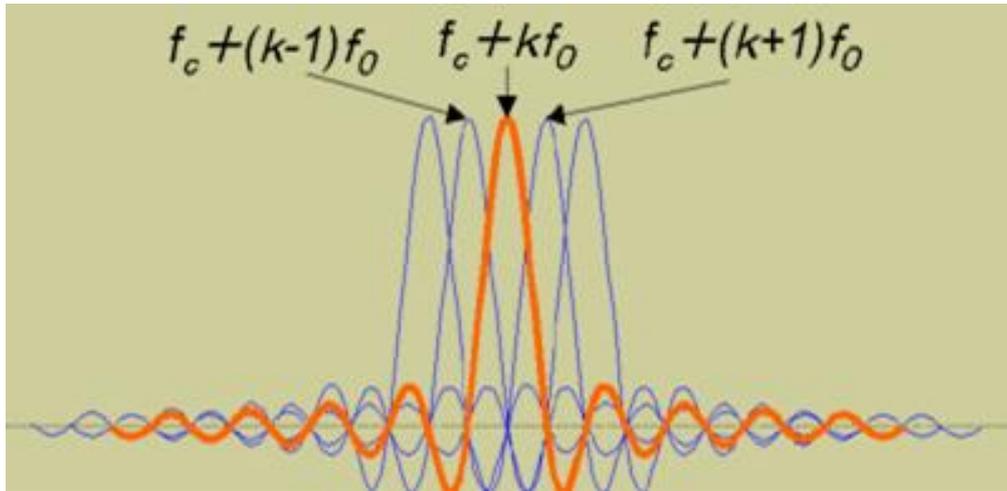


Рис.12. Спектральные компоненты полезной части OFDM-символа (верх) и его спектр при модуляции (середина): f_U – расстояние по частоте между соседними спектральными компонентами синтезированного спектра, N –число спектральных компонент, амплитуда и фаза каждой из них определяется соответствующим комплексным символом модуляции; спектральные характеристики модулированных несущих частот (низ)

Поясним уже сказанное выше другими словами. Входной последовательный цифровой поток (**рис.13**) преобразуется в параллельный поток по числу поднесущих частот. В каждом таком субканале формируются символы модуляции, содержащие вещественную $I(n)$ и мнимую $Q(n)$ составляющие соответствующего вектора сигнального созвездия

$$S(n) = I(n) + jQ(n), \quad (20)$$

где n – индекс (номер) поднесущей частоты. Каждому вектору сигнального созвездия ставится, начиная с самых низких частот, своя спектральная компонента, амплитуда и начальная фаза которой определяется соответствующим ей символом модуляции.

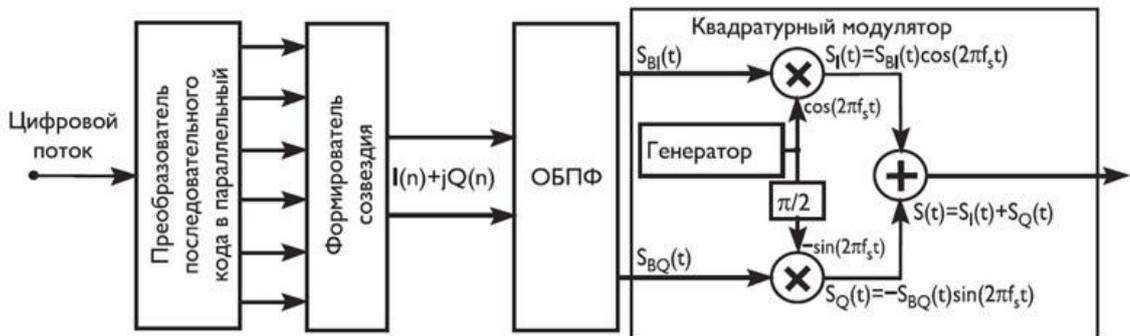


Рис.13. Структурная схема идеального OFDMI/Q–модулятора

Затем выполняется обратное преобразование Фурье (ОБПФ) после чего получаем временную функцию в комплексной форме вида:

$$S_B(t) = \sum_{n=1}^{2N+1} [I(n) + jQ(n)] \exp(2\pi j n f_U t) = S_{BI}(t) + jS_{BQ}(t) \quad (21)$$

где: синфазная компонента сигнала:

$$S_{BI}(t) = \sum_{n=1}^{2N+1} [I(n) \cos(2\pi n f_U t) - Q(n) \sin(2\pi n f_U t)]; \quad (22)$$

квадратурная компонента сигнала:

$$S_{BQ}(t) = \sum_{n=1}^{2N+1} [I(n) \sin(2\pi n f_U t) + Q(n) \sin(2\pi n f_U t)]. \quad (23)$$

Эти два сигнала поступают на входы квадратурного модулятора, который переносит их в полосу частот радиоканала. На выходах перемножителей I/Q-модулятора (рис.13.) имеем :

$$S_I(t) = S_{BI}(t) \cdot \cos(2\pi f_s t) = \sum_{n=1}^{2N+1} I(n) \left\{ \frac{1}{2} I(n) \cdot [\cos 2\pi(n f_U + f_s) + \cos 2\pi(n f_U - f_s)] - \frac{1}{2} Q(n) \cdot [\sin 2\pi(n f_U + f_s) + \sin 2\pi(n f_U - f_s)] \right\} \quad (24)$$

и

$$S_Q(t) = -S_{BQ}(t) \cdot \sin(2\pi f_s t) = \sum_{n=1}^{2N+1} I(n) \left\{ \frac{1}{2} I(n) \cdot [\cos 2\pi(n f_U + f_s) - \cos 2\pi(n f_U - f_s)] - \frac{1}{2} Q(n) \cdot [\sin 2\pi(n f_U + f_s) - \sin 2\pi(n f_U - f_s)] \right\}. \quad (25)$$

Если f_s представляет собой центральную частоту радиоканала, то $f_s = f_c + (N+1) \cdot f_U$ и выходной сигнал модулятора определяется выражением:

$$\begin{aligned} S_Q(t) &= \sum_{n=1}^{2N+1} \{I(n) \cdot \cos[2\pi(f_s + n f_U)t] - Q(n) \sin[2\pi(f_s + n f_U)t]\} \\ &= \sum_{n=-N}^N \{I(n) \cdot \cos[2\pi(f_s + n f_U)t] - Q(n) \cdot \sin[2\pi(f_s + n f_U)t]\} \end{aligned} \quad (26)$$

Здесь и ниже речь идет только о полезной части OFDM-сигнала.

Структурная схема OFDM-демодулятора приведена на рис.14. Укрупненная структурная схема OFDM-канала показана на рис.15. Учитывая уже изложенное выше, данная схема уже не требует дополнительного пояснения.

Схематическое представление спектра OFDM-сигнала показано на рис.16.

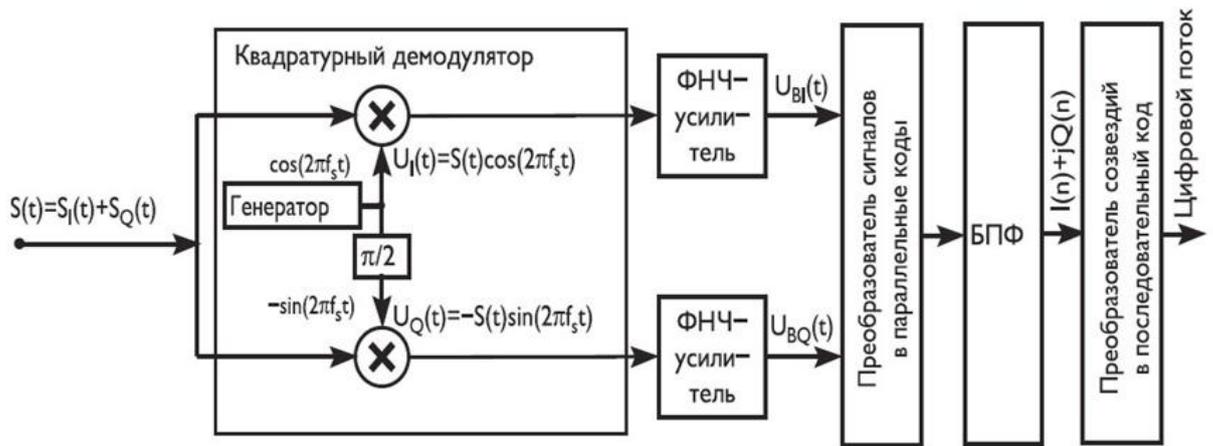


Рис.14 . Структурная схема OFDM-демодулятора

На выходах перемножителей демодулятора имеем:

$$\begin{aligned}
 U_I(t) &= S(t) \cdot \cos(2\pi f_s t) = \\
 &= \sum_{n=1}^{2N+1} I(n) \left\{ \frac{1}{2} I(n) \cdot [\cos(2\pi n f_U t) + \cos(2\pi(2f_s + n f_U)t)] \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{2} Q(n) \cdot [\sin(2\pi n f_U t) + \sin(2\pi(2f_s + n f_U)t)] \right\}
 \end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
 U_Q(t) &= S(t) \cdot (-\sin(2\pi f_s t)) = \\
 &= \sum_{n=1}^{2N+1} I(n) \left\{ \frac{1}{2} I(n) \cdot [\sin(2\pi n f_U t) - \cos(2\pi(2f_s + n f_U)t)] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} Q(n) \cdot [\cos(2\pi n f_U t) - \cos(2\pi(2f_s + n f_U)t)] \right\}
 \end{aligned} \tag{28}$$

Оба сигнала проходят фильтры нижних частот, затем усиливаются с коэффициентом передачи равном двум, после чего на входах преобразователя получим:

$$U_{BI}(t) = \sum_{n=1}^{2N+1} [I(n) \cdot \cos(2\pi n f_U t) - Q(n) \cdot \sin(2\pi n f_U t)] \tag{29}$$

$$U_{BQ}(t) = \sum_{n=1}^{2N+1} [I(n) \cdot \sin(2\pi n f_U t) + Q(n) \cdot \cos(2\pi n f_U t)]$$

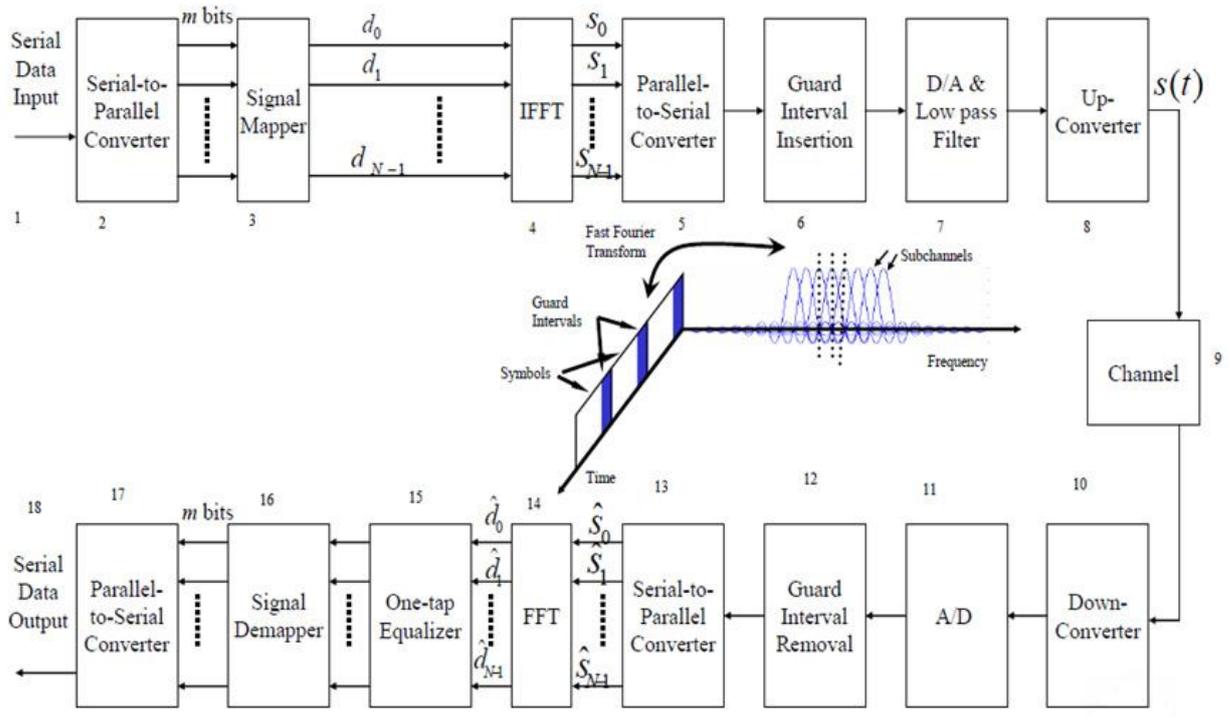


Рис.15. Укрупненная структура OFDM-канала система цифрового радиовещания: не показаны процедуры, выполняемые в контент-сервере, а также процедуры формирования цифровых потоков, рандомизации и защиты от цифровых данных от одиночных и групповых ошибок р селективного затухания в радиоканале

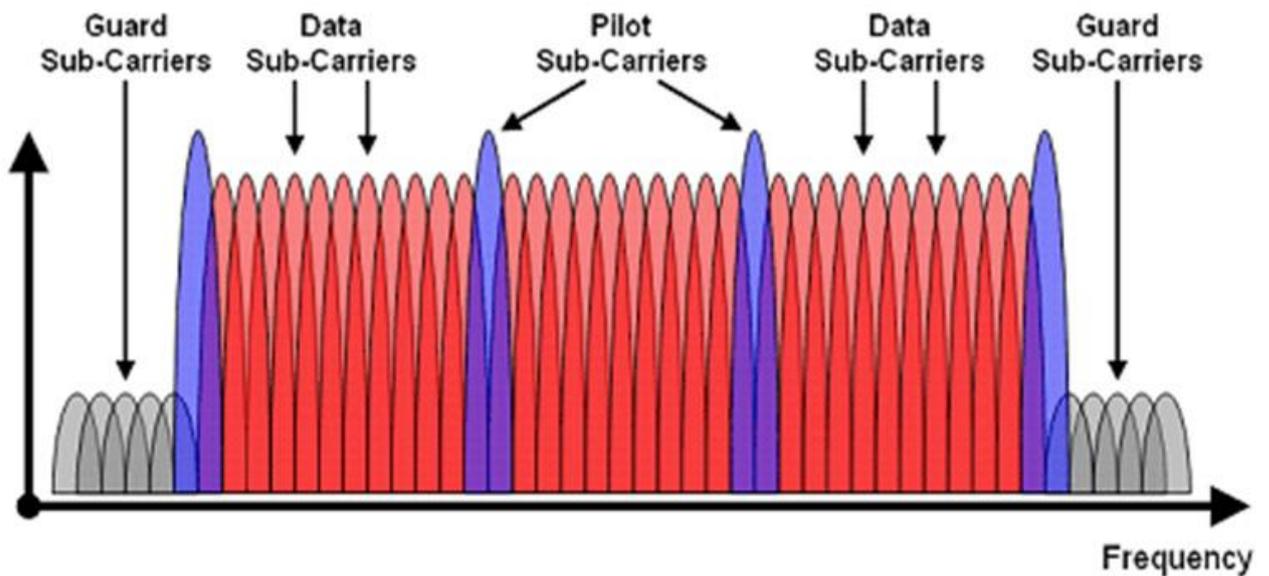


Рис.16. Схематическое представление спектра сигнала OFDM

3. Система цифрового радиовещания DAB

3.1. Общие сведения, структура и характеристики системы DAB

Система DAB (Digital Audio Broadcasting), [рис.17](#), [\[3\]](#), [табл.1](#), предназначена для доставки пользователям (слушателям) высококачественных звуковых программ и данных, передаваемых наземными и спутниковыми передатчиками в диапазонах частот 174...240 (T-DAB) и 1452...1492 (S-DAB) МГц, а также распределяемых с помощью кабельных сетей (C-DAB).

В радиоканале системы DAB шириной 1,54 МГц могут быть переданы одновременно несколько звуковых программ с разным уровнем качества; организованы звуковые системы любых форматов: 1/0, 2/0, 3/2, 5.1. Возможна и одновременная передача большого объема дополнительной информации: различных данных, актуальных сведений для бизнесменов, подвижных и неподвижных изображений, телевизионных сигналов, текстовой и графической информации и пр.

Система DAB удобна для применения в крупных мегаполисах, а также в районах с большой плотностью населения, где выгодно построение одночастотной сети. Однако это не исключает ее применения и на региональном уровне, и просто в качестве отдельно работающих радиостанций, что также предусмотрено стандартом.

Основное преимущество DAB - это высокое качество радиоприема в движущемся автомобиле, когда условия радиоприема и характеристики радиоканала непрерывно и достаточно быстро изменяются, устойчивость к воздействию помех, обусловленных многолучевостью, возможность передачи в реальном времени программ мобильного телевидения.

Входными сигналами системы DAB являются сигналы звуковых программ (Audio 1, Audio 2, ..., Audio n), сопутствующая звуковым программам информация (PAD 1, PAD 2, ..., PAD n), цифровые данные (Data 1, Data 2, ..., Data n), информация быстрого доступа FIC, информация о конфигурации мультиплексирования (MCI), разнообразная служебная информация (SI, FIDC). Аналоговые звуковые сигналы предварительно поступают на АЦП, где преобразуются в цифровую форму с частотой дискретизации 48 или 24 кГц. Первое значение используется для передачи высококачественных звуковых сигналов, второе - для передачи звуковых сигналов более низкого качества. Решение ИКМ при передаче высококачественных сигналов звукового вещания составляет 16...22 бита/отсчет, типичное значение 16 бит/отсчет. Далее каждый из входных данных звукового вещания (ЗВ) кодируется MPEG-кодером с целью компрессии цифровых аудиоданных. Компрессия первичных цифровых данных, их мультиплексирование и формирование основных трех цифровых потоков выполняются в контент-сервере системы DAB.

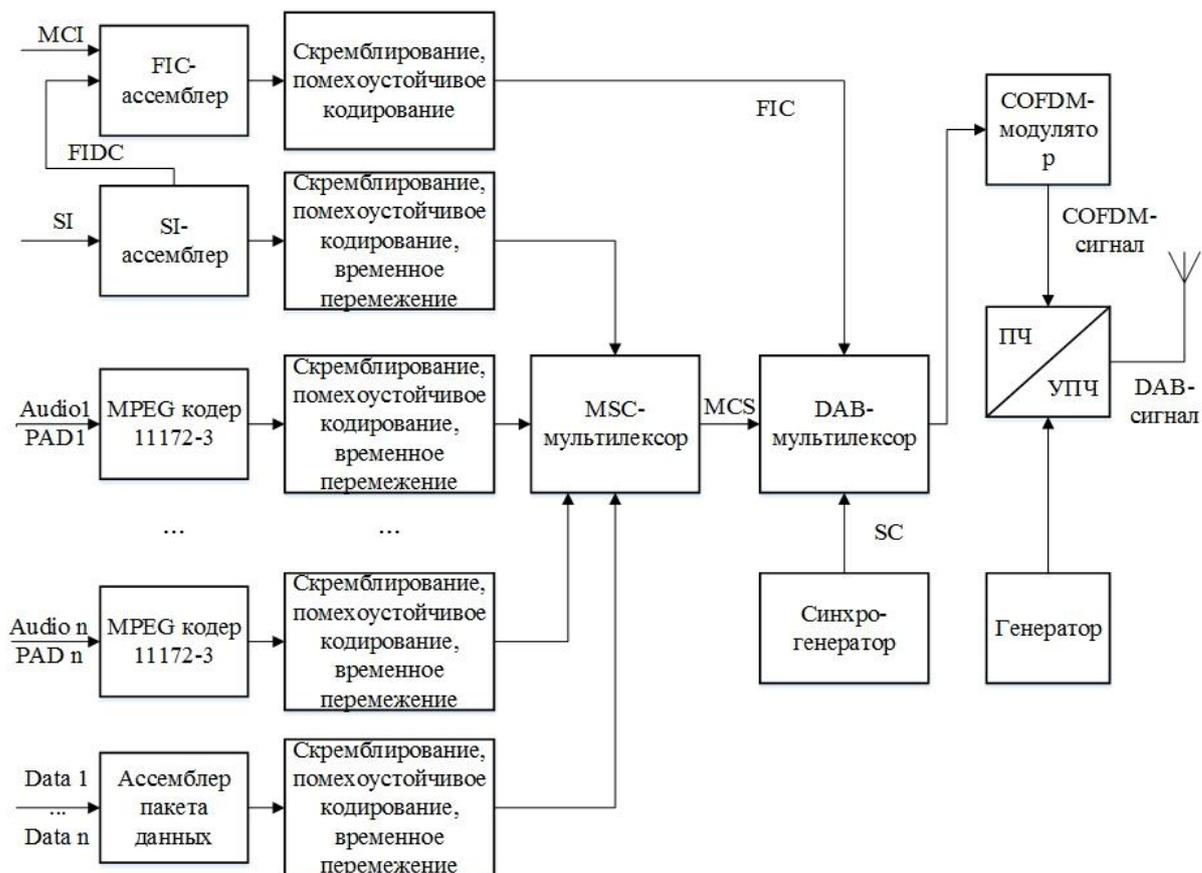


Рис.17. Увеличенная структурная схема передающей части системы DAB

В системе DAB формируются три канала передачи цифровых потоков:
MSC (MainServiceChannel) - каналпользователя, предназначен для передачи звуковых сигналов радиовещания (Audio) и цифровых данных PAD (ProgrammeAssociatedData), связанных с программами ЗВ).

Цифровые данные PAD могут содержать информацию:

- об управлении динамическим диапазоном звукового сигнала;
- о типе программы (речь/музыка, джаз, опера, романсы);
- тексты песен; фото исполнителей;
- сведения о дорожной информации;
- спорт;
- новости и т.п.

Скорость передачи данных PAD может варьироваться в пределах 65...667 кбит/с.

В канале MSC могут передаваться также и дополнительные данные (канал AIC – AuxiliaryInformationChannel), сервисная информация SI (ServiceInformation), данные условного доступа. Условный доступ предполагает использование секретных ключей и криптографических алгоритмов.

Цифровой поток канала MSC разбивается на множество субканалов, в каждом из которых производится:

- скремблирование (рандомизация),

-индивидуальное сверточное кодирование с равной (EER- EqualErrorProtection) и неравной (UEP – UnequalErrorProtection) защитой цифровых данных от ошибок,

-временное(цифровых данных) и частотное (ячеек модуляции DQPSK) перемежения.

Цифровой поток канала пользователя MSC (MainServiceChannel) состоит из логических фреймов CIF (CommonInterleavedFrames) с временным перемежением, являющихся частью фрейма передачи. Логический фрейм CIF состоит из 55296 бит, передаваемых каждые 24 мс. Наименьшая адресуемая часть фрейма CIF содержит целое число так называемых единиц емкости CU (CapacityUnits). Одна такая единица CU содержит 64 бита. Целое число CU составляет единицу передачи в канале MSC, называемую субканалом. Таким образом, канал MSC состоит из множества субканалов. Всего имеет место 864 единицы CU в каждом логическом фрейме CIF. Число субканалов в системе DAB равно 24, суммарная скорость цифрового потока в каждом из них не должна превышать 192 кбит/с, а скорость передачи аудиоданных – не более 174467...175400 бит/с в зависимости от выбранного значения частоты дискретизации 48, 32, 24 или 16 кГц. Предельная пропускная способность канала MSC составляет 2,304 Мбит/с. Диапазон изменения скоростей цифрового потока канала MSC без учета избыточных битов помехоустойчивого кодирования лежит в пределах 0,6...1,8 Мбит/с (она зависит от выбранного уровня защиты информации). Скорости цифрового потока в субканалах кратны величинам 8 кбит/с или 32 кбит/с. Информация, передаваемая в субканалах, подвергается свёрточному кодированию и временному перемежению.

Организация субканалов и канальных компонент называется конфигурацией мультиплексирования (MCI – MultiplexConfigurationInformation).

В мультиплексированном канале MSC возможны два режима передачи: потоковый и пакетный.

FIC (FastInformationChannel) - канал быстрой информации, используется для быстрого доступа к информации в приёмнике. По нему передаются информация о мультиплексировании MCI данных в канале пользователя MSC, часть сервисной информации SI (ServiceInformation), информация управления свободным доступом (CA- ConditionalAccess) и данные быстрого доступа FIDC (FastInformationDataChannel), например сигналы гражданской обороны и т.п.

В канале FIC не используется временное перемежение цифровых данных, поэтому он не имеет задержки по времени, возникающей при выполнении этой процедуры. Данные канала FIC подвергаются скремблированию. Они защищены сверточным кодом, для большей надежности правильного приема многократно повторяются. В этом канале формируются блоки быстрой информации FIB (FastInformationBlocs). Длина каждого блока FIB составляет 256 бит, из них 16 бит - это дополнительные биты помехоустойчивого кодирования CRC-кода. В свою очередь поле полезных данных блока FIB делится на более мелкие блоки FIG (FastInformationGroups), каждый из

которых передает определенный вид информации канала быстрого доступа [3,20,23,24].

Информация о мультиплексировании MCI включает: сведения об организации субканалов, перечень каналов U, входящих в вещательный канал ЦРВ, связь между каналами U и компонентами этих каналов, связь между субканалами и компонентами каналов U, управление реконфигурацией мультиплексирования.

SC (SynchronizationChannel) – канал синхронизации, используется внутри передающей части системы для синхронизации фрейма передачи, автоматического управления частотой, оценки состояния субканалов и идентификации передатчика.

Цифровые потоки звуковых сигналов, данных, связанных с программами, цифровых данных, сервисной информации SI после помехоустойчивого кодирования и временного перемежения поступают на главный мультиплексор передачи пользовательской информации (MSC-мультиплексор), образуя цифровой поток канала пользователя MSC со скоростью не более 2,304 Мбит/с. Последний далее в мультиплексоре фрейма передачи (DAB-мультиплексор) объединяется с потоком канала FIC и символами канала синхронизации SC; после объединения суммарный цифровой поток со скоростью 2,4 Мбит/с поступает на COFDM-модулятор (COFDM-кодер). Далее COFDM-сигнал переносится преобразователем частоты (ПЧ) в полосу частот радиоканала, усиливается, после чего излучается в эфир.

Рассмотрим подробнее основные процедуры обработки цифровых данных в системе DAB.

3.2. Кодирование и защита цифровых аудиоданных в системе DAB на уровне аудиофрейма

Компрессия цифровых аудиоданных звуковых программ выполняется в блоке, который получил название контент-сервер. На рынке широко известен ContentServer™, зарегистрированный фирмой Fraunhofer, он подходит для организации вещания в форматах DAB и DRM.

Контент-сервер Fraunhofer R5 выполняет следующие функции:

- кодирование аудиоданных;
- управление дополнительными медиаданными (текст, видео, графика);
- формирование основных цифровых потоков MSC, FIC, SC;
- мультиплексирование данных основных цифровых потоков в единый выходной MDI-поток.

Контент-сервер компании Fraunhofer включает в себя (рис.18):

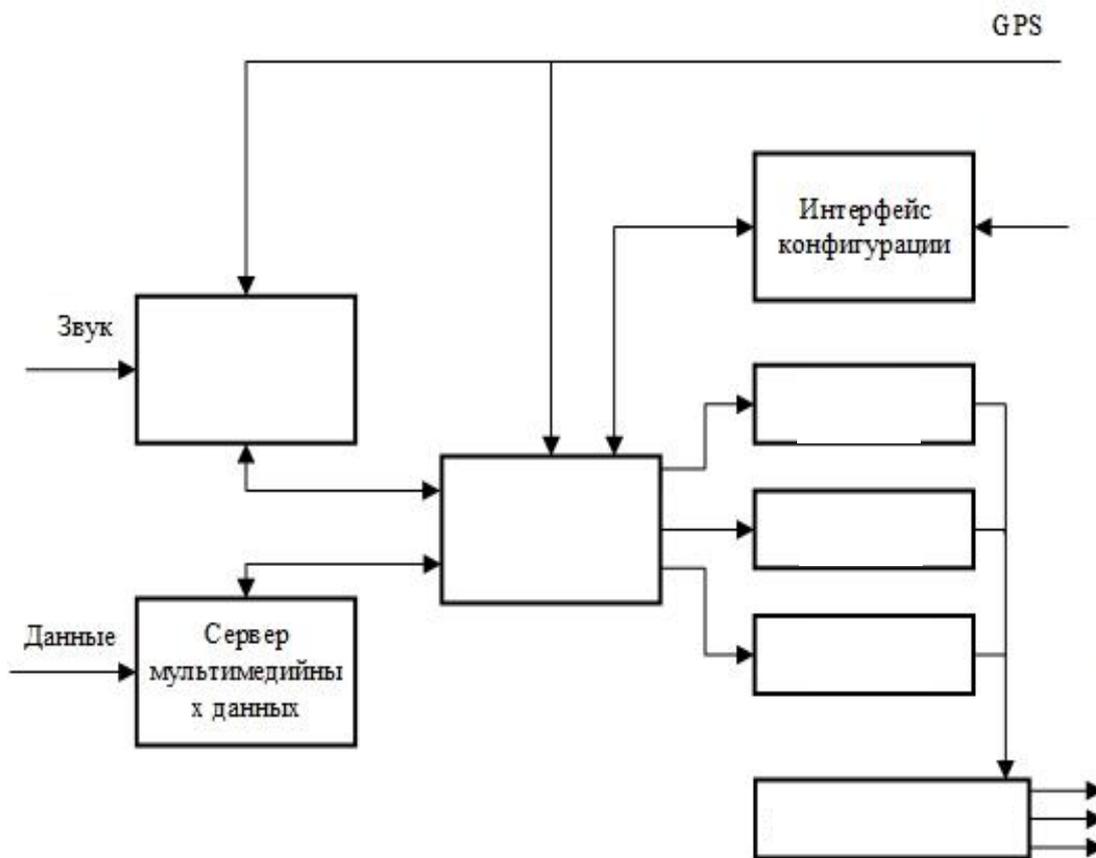


Рис.18. Структура контент-сервера систем DAB

- аудиокодер (AudioServer), выполняющий кодирование данных звуковых программ в реальном времени;
- сервер мультимедийных данных (MultimediaDataServer), осуществляет прием, хранение, кодирование, импорт, мультимедийных сигналов данных;
- мультиплексор (MultiplexGenerator) формирует основные цифровые потоки каналов MSC, FAC, SDC и объединяет их в единый поток. Используется интерфейс EDI/DSP для передачи MDI-потока к модулятору.

Контент-сервер состоит из ноутбука, на котором установлено специальное программное обеспечение, и ключа Dongle. На консоли ноутбука доступны основные настройки контент-сервера и пользовательский Web-интерфейс. С помощью Web-интерфейса существует возможность удаленного контроля уровней сигналов, выполнения настроек и управления контент-сервером. Доступ к Web-интерфейсу можно получить через любой Web-браузер. Передача звука в контент-сервер выполняется с помощью карты, которая подключается через USB-порт.

Для защиты контент-сервера от взлома встроен межсетевой экран (firewall), осуществляется самодиагностика системы. Отчеты о состоянии системы могут быть отправлены на консоль, Web-интерфейс, электронную почту, логические релейные выходы и SNMP.

Используются протоколы `httpmirror`, `ftpmirror`, TCP/IP, RS-232, а также аналоговый модем для импорта данных.

Контент-сервер Fraunhofer R5 может работать в стандартах DAB и DRM. Сигнал на выходе содержит мультиплексированный поток данных, который с помощью EDI/DSP-протокола может быть доставлен не только одному, но также множеству модуляторов для организации одночастотной сети, (согласно ETSI TS 102 820 - Multiplex Distribution Interface and ETSI TS 102 821 - Distribution and Communications Protocol), [26], [27]. В таком случае, система должна быть синхронизирована по времени с помощью GPS-приемника или через IP-сеть помощью протокола NTP (Network Time Protocol) (рис.19), [28].

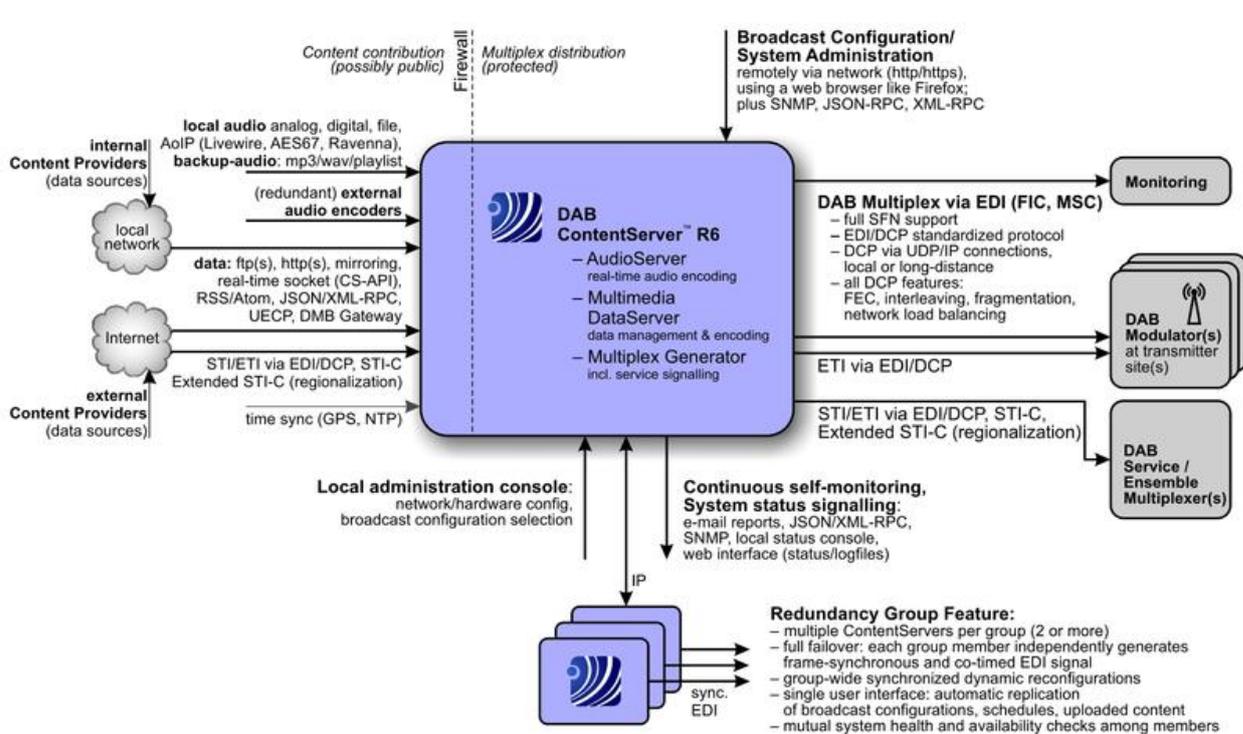


Рис.19. Контент-сервер систем DAB

В первоначальной версии стандарта на систему DAB использовался алгоритм компрессии MPEG -1 ISO/IEC 11172-3, Layer 2 [15]. Его суть подробно изложена в [23] и поэтому здесь не приводится.

Структура данных аудиофрейма первой версии стандарта системы DAB представлена на рис.20. Он содержит информацию о 1152-х отсчетах выборки звукового сигнала и дополнительные части, отличающие его от аудиофрейма стандарта MPEG-1 ISO/IEC 11172-3, Layer II. Это поля данных X-PAD, SCF-CRC, F-PAD.

Аудиофрейм стандарта MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 Layer II (рис.20, верх) представляет собой последовательность цифровых данных, включающих: служебную информацию (заголовок аудиофрейма, Header); избыточные биты помехоустойчивого кодирования CRC-кода (16 бит, для защиты наиболее

важных цифровых данных заголовка); информацию о распределении общего числа бит по субполосам кодирования (BitAllocation), (всего 88 бит); информацию о распределении индексов значений масштабных коэффициентах (SCFSI), (2 бита на каждую субполосу кодирования); значения индексов масштабных коэффициентов (SCF — ScaleFactor), (6 бит на каждое значение индекса масштабного коэффициента); кодовые слова нормированных отсчетов субполосных сигналов (Sub-bandSamples), (от 1,37 (в случае группирования отсчетов 3С при кодировании) до 16 бит на отсчет); биты дополнительных данных (Ancillarydata).

В отличие от этого аудиофрейм в системе DAB (рис.20, низ) дополнительно содержит байты для передачи данных PAD, сопутствующих программам. Это поле данных состоит из двух частей: X-PAD и F-PAD. Данные F-PAD имеют постоянную длину, равную 2 байтам, здесь передается информация управления в реальном времени и данные с очень низкой скоростью передачи. Данные X-PAD имеют переменную длину, они передают дополнительную информацию, относящуюся к звуковой программе, например, поясняющий текст.

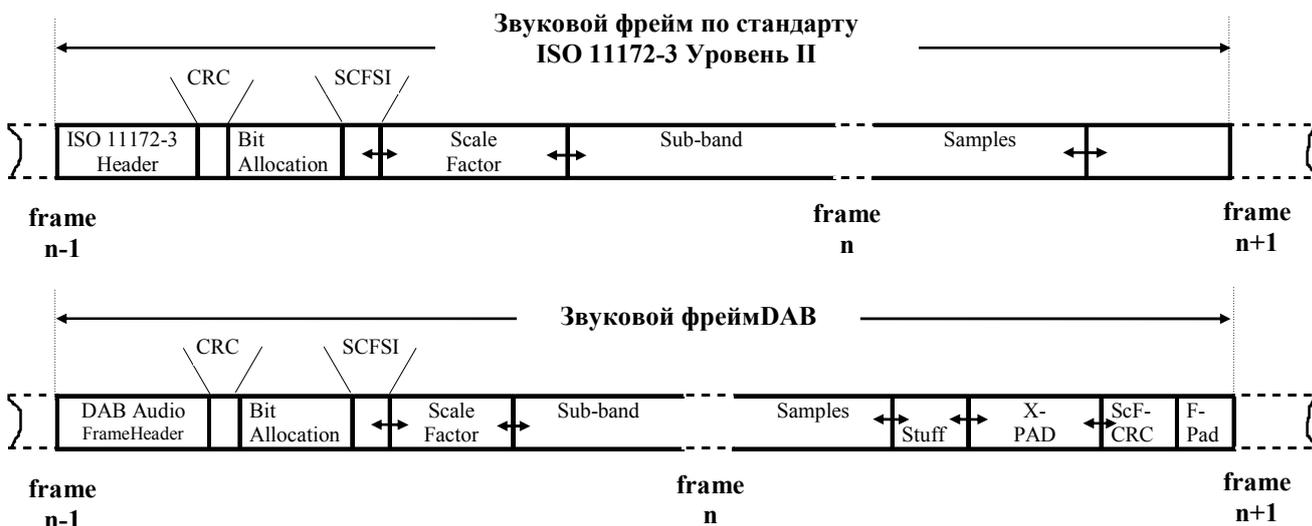


Рис.20. Структура фрейма по стандарту ISO/IEC 11172-3, Layer II (верх) и соответствующего аудиофрейма системы DAB (низ)

Аудиофрейм системы DAB содержит также биты помехоустойчивого кодирования значений индексов масштабных коэффициентов (ScF-CRC) и биты заполнения Stuff. При этом одним проверочным 8-ми битовым словом защищена группа значений индексов масштабных коэффициентов сразу нескольких субполосных сигналов: 0...3, 4...7, 8...15, 16...26. Здесь цифрами обозначены номера субполос кодирования, индексы значений масштабных коэффициентов в которых защищены одним проверочным словом. Например, информацию полей данных Header, Bit Allocation, SCFSI аудиофрейма защищают свёрточным кодом со скоростью кода $R_c=8/24$. Значения индексов масштабных коэффициентов защищают свёрточным кодом со скоростью кода $8/18$; субполосные отсчеты 3С и часть информации X-PAD свёрточным кодом со скоростью кода $8/14$; часть информации X-PAD, ScF-CRC, F-PAD

свёрточным кодом со скоростью кода 8/19. Это пример неравной UEP (наиболее целесообразной) защиты от ошибок отдельных частей аудиофрейма системы DAB. Если вероятность появления ошибки $BER=10^{-4}$ в субполосных отсчетах приводит к чуть слышимому снижению качества воспроизведения, то любая ошибка в управляющей части аудиофрейма (Header, BAL, ScF-FSI) приводит к тотальной ошибке во всем аудиофрейме. Поэтому метод UEP наиболее целесообразен для применения в системе DAB. Как уже было сказано чуть выше, по уровням защиты звуковой фрейм разделен на четыре части. При этом сверточный код со скоростью $R=8/24$ с наибольшей избыточностью применен для кодирования информации управления, наиболее чувствительной к ошибкам. Скорости кода для других частей аудиофрейма выбраны исходя из результатов анализа влияния цифровых ошибок на качество воспроизводимого сигнала. Заметим также, что для каждой скорости цифрового потока свои уровни защиты для разных частей аудиофрейма.

Длина выборки аудиофрейма DAB составляет также 1152 отсчета звукового сигнала, время ее передачи 24 мс при частоте дискретизации 48 кГц и 48 мс при частоте дискретизации 24 кГц. Следовательно, данные аудиофрейма передаются здесь с помощью одного или двух логических фреймов CIF системы DAB (рис.20, верх).

С появлением стандарта MPEG-2 ISO/IEC 13818-3 [16] в системе DAB появилась возможность передачи сигналов многоканальной стереофонии, например, форматов 3/2 и 5.1. В этом случае длительность аудиофрейма при частоте дискретизации равной 48 кГц составляет 48 мс. Для его передачи в системе DAB необходимы уже два логических фрейма, каждый из них по-прежнему длиной 24 мс.

Еще позже появились более эффективные алгоритмы сжатия цифровых аудиоданных. Это позволило расширить области применения системы DAB, повысить ее спектральную эффективность за счет передачи большего числа программ звукового вещания, реализовать передачу мультимедийной информации, как это сделано в системе DMB (Digital Multimedia Broadcasting, стандарт ETSI TS 102427, TS 102428) при мобильном радиоприеме.

В последней версии стандарта, получившей название DAB+ [4,5, 18], добавлены алгоритмы компрессии, реализованные в кодере HE-AACv.2 стандарта MPEG-4 ISO/IEC 14496-3 [17] и в стандарте MPEG Surround [19], рис.21. В кодере MPEG-4 ISO/IEC 14496-3 HE-AACv.2 разрешены частоты дискретизации 48, 32, 24 и 16 кГц, при этом длина аудиофрейма соответственно равна 20, 30, 40 и 60 мс, выборка включает 960 отсчетов звукового сигнала (рис.21). Это так называемые блоки доступа AU (Access Unit).

На рис.22 приведены данные о качестве алгоритмов компрессии, разработанных группой MPEG для радиовещания, отдельно для речевых (а) и музыкальных сигналов (табл.11).

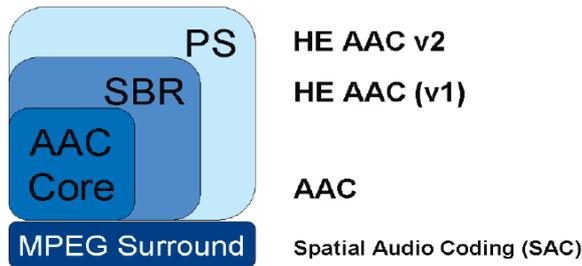
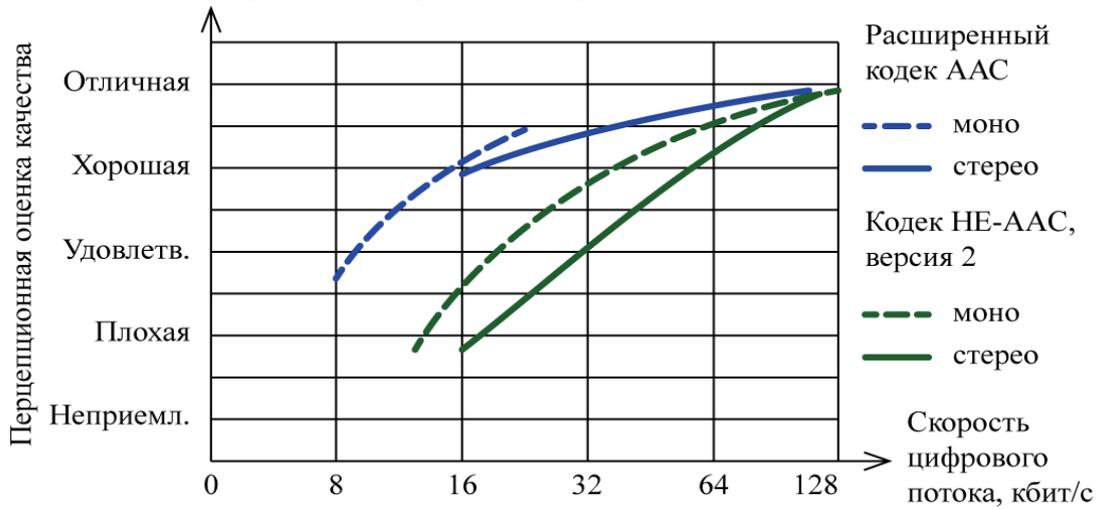
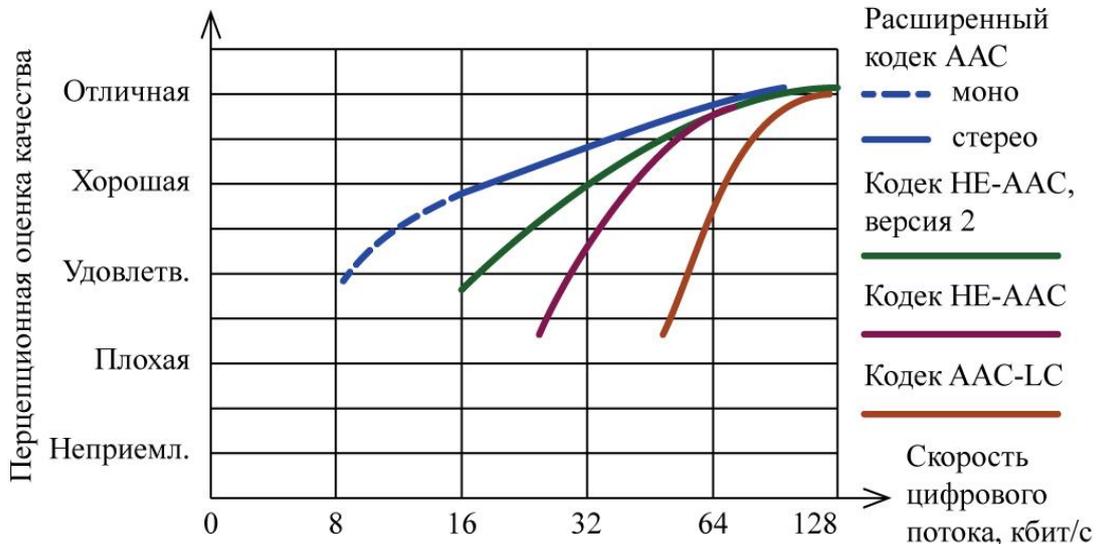


Рис.21. Алгоритмы компрессии кодера MPEG-4 HE-AACv.1 и v.2



а)



б)

Рис.22. Качество кодеков с компрессией цифровых аудиоданных при кодировании: а- речевых сигналов; б- музыкальных сигналов

Таблица 11

Шкала оценки качества кодеков

Значения шкалы оценки	Шкала субъективной оценки качества
100-80	Превосходно (Excellenz)
80-60	Хорошо (Good)
60-40	Довольно (достаточно) хорошо (Fair)

40-20	(Poor)
20-0	Плохо (Bad)

В системе DAB+ при использовании кодера MPEG-4 ISO/IEC 14496-3 HE-AACv.2 формируются аудиосуперфреймы (рис.23). Каждый такой аудиосуперфрейм содержит соответственно 2 аудиофрейма кодера HE-AACv.2 при частоте дискретизации 16 кГц, 3 аудиофрейма при частоте дискретизации 24 кГц, 4 аудиофрейма при частоте дискретизации 32 кГц и 6 аудиофреймов при частоте дискретизации 48 кГц. При этом аудиосуперфрейм имеет длину 120 мс, что эквивалентно 5-ти логическим фреймам СИФ системы DAB.

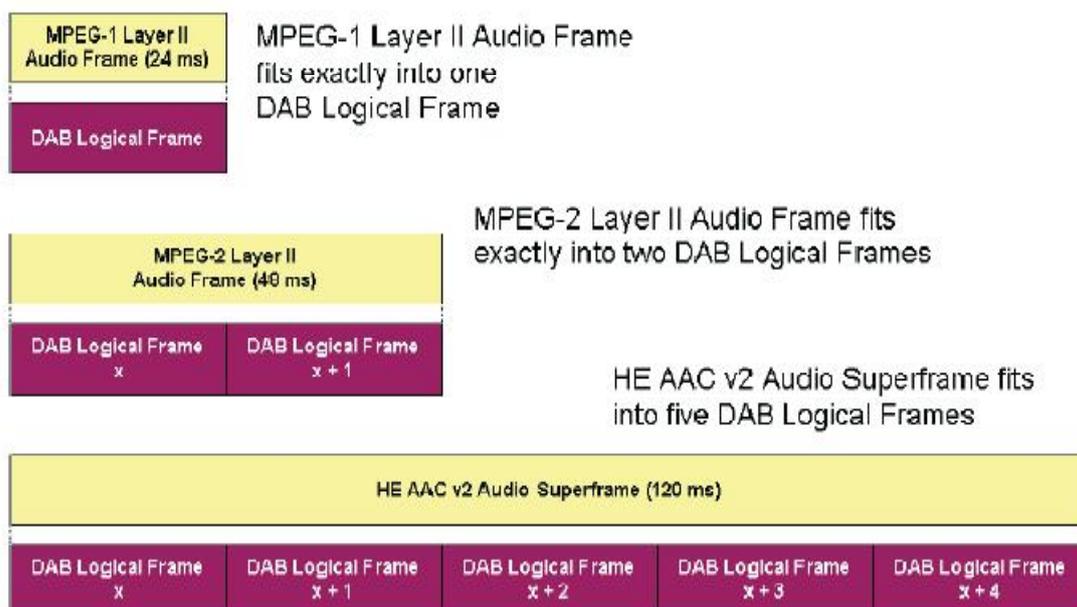


Рис.23. Размещение цифровых данных кодеров стандартов MPEG-1 Layer II и MPEG-4 HE-AACv.2 в логических аудиофреймах системы DAB

Из-за более высокой степени сжатия данные аудиосуперфрейма требуют дополнительной защиты от цифровых ошибок. Она реализуется здесь с помощью кода Рида-Соломона и временного перемежения цифровых данных (рис.24). Заметим, что каждый аудиофрейм (так называемый блок доступа AU—AccessUnit) кодера HE-AACv.2 содержит данные PAD (ProgrammeAssociatedData) аналогично аудиофреймам кодера MPEG-1 Layer II.

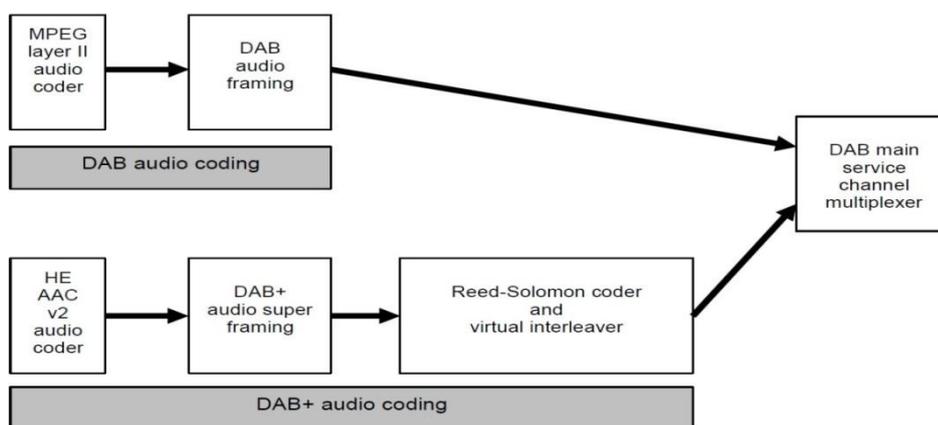


Рис.24. К применению кодера HE-AACv.2 в системе DAB+

При использовании кодера MPEGDSurround (MPEG-D, Part-1 ISO/IEC 23003-1) пространственные параметры многоканального сигнала должны быть переданы по крайней мере 1 раз в течение 480 мс. Заметим, что скорость цифрового потока при их передаче невелика, обычно не превышает 8...12 кбит/с.

3.3.Защита цифровых данных в субканалах системы DAB

Рандомизация(скремблирование) цифровых данных (**рис.17**) применяется для придания сигналу в следовании нулей и единиц псевдослучайного характера, что обеспечивает в конечном итоге более равномерное распределение энергии в полосе частот радиоканала. Псевдослучайные символы, используемые при рандомизации, поступают от генератора PRBS (Pseudo-RandomBinarySequence).

Помехоустойчивое кодирование. Канальному кодированию подвергаются цифровые данные каналов MSC и FIC. Для этой цели использован свёрточный код с процедурой перфорирования (выкалывания), (RateCompatiblePuncturingConvolutionalCodes). Это процедура позволяет применять коды с различной избыточностью без изменения декодера, учесть чувствительность разных элементов цифрового потока к ошибкам и реализовать благодаря этой процедуре разные уровни защиты от ошибок в блоках цифровых данных этих каналов. Используется как равная (**EER**– EqualErrorProtection), так и неравная защита (**UEP**-UnequalErrorProtection) цифровых данных от ошибок. Всего предусмотрено пять уровней UEP-защиты. Неравной защите от ошибок подвергаются разные части логических фреймов CIF. Важно, что все семейство используемых свёрточных кодов образовано из одного материнского кода, имеющего скорость $\frac{1}{4}$. Производные коды формируются из материнского кода путем выкалывания некоторых битов на выходе свёрточного кодера. При этом на приемной стороне необходимо знать, какие именно биты были исключены при кодировании. В этом случае для всего такого семейства

сверточных кодов требуется один декодер, использующий алгоритм декодирования Витерби.

Равная защита от ошибок EEP(табл. 12)используется при передаче *данных*. В этом случае возможно 8 уровней защиты. При этом используются профили защиты А (1-А, 2-А, 3-А, 4-А) и В (1-В, 2-В, 3-В, 4-В). Для профилей защиты А скорости цифровых потоков кратны значению 8 кбит/с, для профилей защиты В – значению 32 кбит/с.

Таблица 12

Скорости кода при равной защите от ошибок

Уровни защиты	1-А	2-А	1-В	3-А	2-В	3-В	4-А	4-В
Скорость кода R_c	1/4	3/8	4/9	1/2	4/7	2/3	3/4	4/5

Подробнее о процедуре получения таких кодов и вообще о процедуре помехоустойчивого кодирования применительно к системе DAB сказано в [20]. Напомним, что помехоустойчивое (канальное) кодирование применяется для борьбы с одиночными ошибками.

Для борьбы с групповыми (пакетными) ошибками используется временное перемежение цифровых данных (рис.17).

Для эффективной борьбы с последствиями селективных затуханий используется перемежение цифровых данных суммарного потока по несущим частотам радиоканала (перемежение ячеек модуляции), вследствие чего отдельные части цифрового потока одной и той же программы передаются на нескольких несущих частотах, расположенных равномерно во всей полосе частот радиоканала.

3.4. Модуляция поднесущих частот в системе DAB

В системе DAB, как и в других системах европейской платформы наземного цифрового телерадиовещания, используется модуляция OFDM, точнее ее разновидность COFDM (CodedOrthogonalFrequencyDivisionMultiplex). Здесь исходный цифровой поток в кодированной последовательности распределяется на большое число поднесущих частот. Термин поднесущие частоты принят в зарубежной литературе, в отечественной литературе они называются часто несущими частотами. При этом в каждом таком канале скорость цифрового потока уменьшается в K раз, где K —число несущих частот. Каждый такой низкоскоростной цифровой поток используют для модуляции несущих частот многочастотного сигнала COFDM.

Несущие частоты в полосе частот радиоканала распределены равномерно (с одинаковым шагом по частоте) и ортогональны. Для выполнения этого последнего условия они располагаются на интервале кратном $1/T_U$, где T_U – полезная часть OFDM-символа. При этом каждая из этих несущих модулируется по фазе, образуя DQPSK-сигнал (Differential Quadrature Phase Shift Keying), после суммирования всего множества этих модулированных по фазе поднесущих частот получаем OFDM-сигнал. Интервал времени T_U , в течение

которого каждой из поднесущих частот передается один символ модуляции, образует полезную часть OFDM- символа. Число бит, переданных каждым таким OFDM-символом, равно $2K$, ибо для каждой из поднесущих частот здесь используется дифференциальная квадратурная фазовая модуляция DQPSK, отличающаяся от модуляции QPSK наличием дифференциального кодера, позволяющего упростить демодуляцию данного сигнала при радиоприеме. Каждый символ модуляции передает 2 бита. Модулированная несущая частота образует ячейку полезной части OFDM-символа.

Интервал времени T_U , в течение которого осуществляется передача одного символа с помощью K поднесущих частот, образует полезную часть OFDM-символа. Между символами OFDM имеется так называемый "защитный интервал" длительностью T_G (рис.25, слева). Спектральная характеристика полезной части OFDM-символа показана на рис.25, справа.

Спектр COFDM-сигнала не отличается от спектра OFDM-сигнала. Защитный интервал размещается в начале полезной части OFDM-символа. Его длительность не превышает $\frac{1}{4}$ полезной части OFDM-символа T_U . Благодаря введению защитного интервала декодер игнорирует часть отраженных сигналов. Длительность защитного интервала должна удовлетворять условию $T_G \geq (d/c)$, где: d - расстояние между передатчиками, c - скорость распространения волны. Если это условие выполнено, то приемники не испытывают помех от наложения сигналов, поступающих от соседних передатчиков одночастотной сети. При $d=60$ км длительность защитного интервала должна быть не менее 200 мкс.

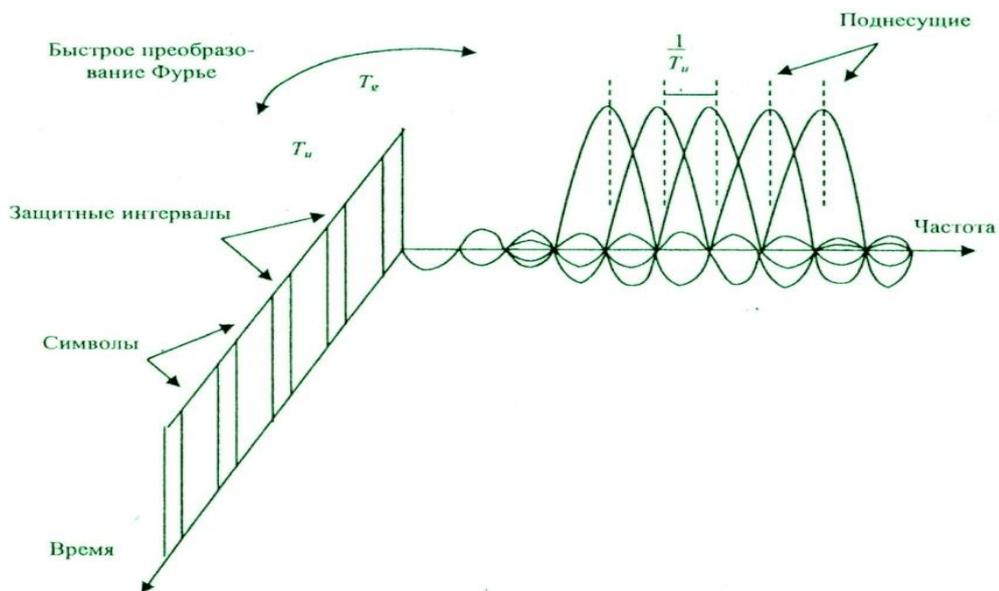


Рис.25. Упрощенное время - частотное представление OFDM-сигнала

На практике для получения OFDM-символа используется быстрое обратное преобразование Фурье.

Приведем выражение для COFDM-сигнала в том виде, как оно представлено в стандарте:

$$s(t) = \text{Re} \left\{ \exp(2j\pi f_c t) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=0}^L \sum_{k=-K/2}^{+K/2} Z_{m,l,k} g_{k,l}(t - mT_F - N_{NULL} - (l-1)T_s) \right\}$$

$$\text{при } g_{k,l}(t) = \exp[2j\pi k(t - \Delta)T_U] \text{Rect}(t / T_s) \quad \text{для } l = 1, 2, \dots, L$$

$$g_{k,l}(t) = 0 \quad \text{для } l = 0$$

$$\text{и } T_s = T_U + \Delta$$

(30)

где:

L - число OFDM-символов на фрейм передачи (здесь нулевой символ исключен);

K - число поднесущих частот;

k - номер поднесущей частоты;

T_F - длительность фрейма передачи;

T_{NULL} -длительность нулевого символа;

T_s - длительность символов OFDM с индексами $l=1, 2, 3, \dots, L$;

$T_U=1/\Delta f$ - длительность интервала между поднесущими частотами;

Δ - длительность защитного интервала;

$Z_{m,l,k}$ - комплексный символ модуляции DQPSK, связанный с несущей k OFDM-символа l во время передачи фрейма с номером m , для $k=0$, $Z_{m,l,k} = 0$, т.к. центральная несущая частота не передается;

f_c - центральная частота радиосигнала.

$\text{Rect}(x)$ -функция, определяемая выражением:

$$\text{Rect}(x) = \begin{cases} 1 & \text{если } 0 \leq x < 1 \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases}$$

(31)

Для обеспечения работы в широком диапазоне частот от 30 МГц до 3 ГГц предусмотрены четыре режима передачи ТМ I, ТМ II, ТМ III, ТМ IV. Для каждого из этих режимов параметры OFDM-символов были приведены в табл. 13. Значения различных параметров, связанных со временем, приводятся в виде величин кратных элементарному периоду $T = 1/2048000$ с.

Таблица 13

Параметры OFDM-символов для режимов передачи I, II, III и IV

Параметр	Режим передачи ТМ I	Режим передачи ТМ II	Режим передачи ТМ III	Режим передачи ТМ IV

L	76	76	153	76
K	1 536	384	192	768
T _F	196 608 Т 96 мс	49 152 Т 24 мс	49 152 Т 24 мс	98304 Т 48 мс
T _{NULL}	2 656 Т ≈1,297 мс	664 Т ≈324 мкс	345 Т ≈168 мкс	1328 Т 648 мкс
T _s	2 552 Т ≈1,268 мс	638 Т ≈312 мкс	319 Т ≈156 мкс	1276 Т 623 мкс
T _u	2 048 Т 1 мс	512 Т 250 мкс	256 Т 125 мкс	1024 Т 500 мкс
Δ	504 Т ≈246 мкс	126 Т ≈62 мкс	63 Т ≈31 мкс	252 Т 123 мкс
f _c	≤ 375 МГц	≤ 1,5 ГГц	≤ 3 ГГц	≤ 1,5 ГГц
1/T _U	1	4	8	2
Максимальное расчетное расстояние между DAB-передатчиками в одночастотной сети	96 км	24 км	12 км	48 км

Ширина спектра сигнала системы DAB для всех режимов передачи составляет 1,54 МГц. При этом для всех режимов работы отношение Δ/T_U остается постоянным.

Режим работы TMI имеет наибольший защитный интервал. Он используется в случаях, где возможны большие задержки отраженных сигналов (для больших зон покрытия). Диапазон рабочих частот в этом случае не должен превышать значение 375 МГц. Данный режим более других ориентирован на построение одночастотных сетей SFN (SingleFrequencyNetwork).

Режим передачи TMII разработан для регионального и локального радиовещания, может быть использован на частотах, не превышающих 1,5 ГГц. Здесь также возможно построение одночастотных сетей, но с существенно меньшим расстоянием между передатчиками.

Режим передачи TMIII можно использовать для спутникового, кабельного и наземного вариантов вещания на частотах, не превышающих значение 3 ГГц.

Режим передачи TMIV – это промежуточный вариант между режимами TMII и TMIII. Он добавлен в стандарт позже с учетом особых условий вещания в Канаде для частот не более 1,5 ГГц и ограниченной скорости движения автомобилей, оснащенных DAB-приемниками.

3.5. Радиосигнал системы DAB

Передаваемый радиосигнал имеет фреймовую структуру длительностью 96 мс (ТМ 1 — режим передачи 1), 24 мс (ТМII и ТМIII — режимы передачи 2 и 3) и 48 мс (режим передачи ТМIV), табл.13

Фрейм передачи системы DAB состоит из последовательности трех групп символов: символов канала синхронизации, символов канала быстрой информации FIC и символов канала пользователя MSC (рис.26).

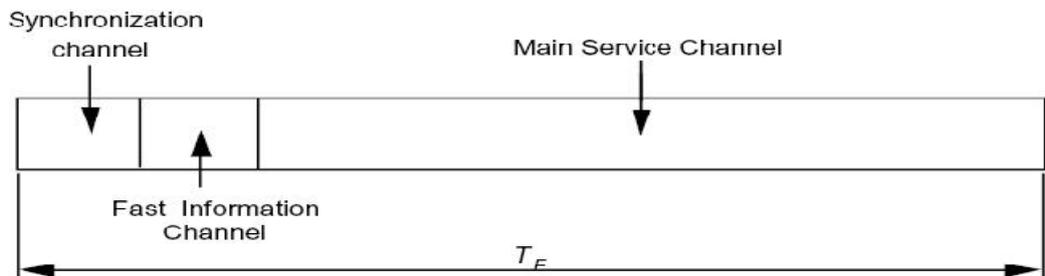


Рис.26. Структура фрейма передачи системы DAB

Более подробная структура фрейма мпередачи представлена на рис.27.

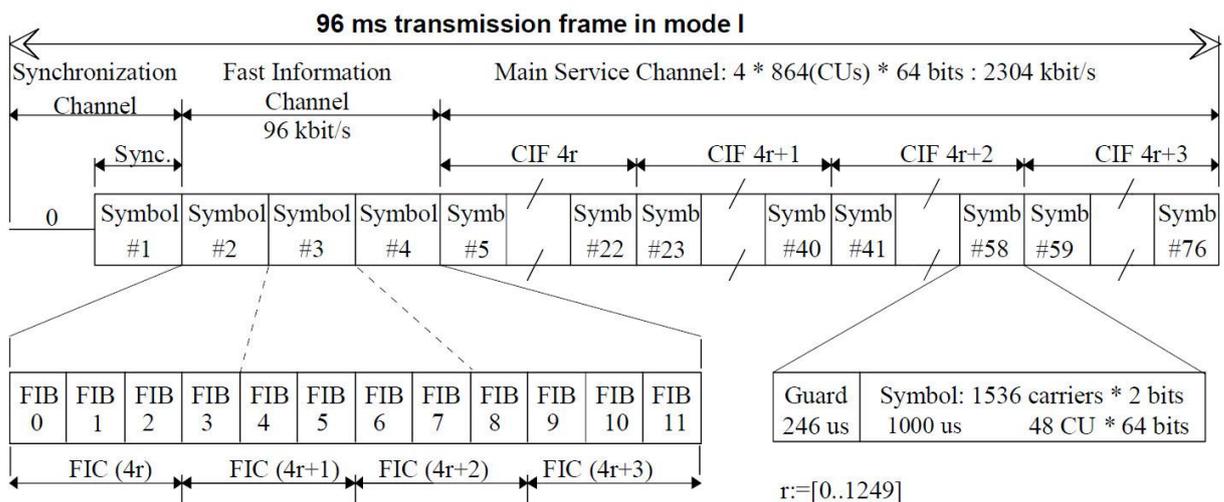


Рис.27. Более подробная структура фрейма передачи при работе в режиме ТМI

Канал синхронизации SC. К каналу синхронизации относятся первые два OFDM-символа. Первым здесь расположен нуль-символ (0, T_{NULL}). На этом интервале значение радиосигнала $s(t)$ равно нулю. Нуль-символ служит для грубой синхронизации и для передачи дополнительного сигнала $s_{TH}(t)$, содержащего информацию об идентификации передатчика. Второй OFDM-символ канала синхронизации представляет собой символ опорной фазы. Символ опорной фазы соответствует значению комплексного символа модуляции $z_{m,l,k}$ для $l=1$ и произвольного m (поскольку символ опорной фазы имеется во фрейме передачи с любым номером индекс m можно опустить). С учетом этого выражение для сигнала опорной фазы имеет вид

$$Z_{l,k} = \begin{cases} e^{j\varphi_k} & \text{для } -\frac{k}{2} \leq k < 0 \text{ и } 0 < k \leq \frac{k}{2} \\ 0 & \text{для } k = 0 \end{cases} \quad (32)$$

Значения параметра φ_k определяются в стандарте формулой

$$\varphi_k = \frac{\pi}{2} (h_{i,k'} + n), \quad (33)$$

где индексы i и k' , а также параметр n определяются как функции индекса несущей частоты k для четырех режимов передачи. Значения этих индексов и параметра n приведены в соответствующих таблицах стандарта на систему DAB.

Остальная часть фрейма передачи представляет собой последовательность следующих друг за другом символов OFDM каналов FIC и MSC.

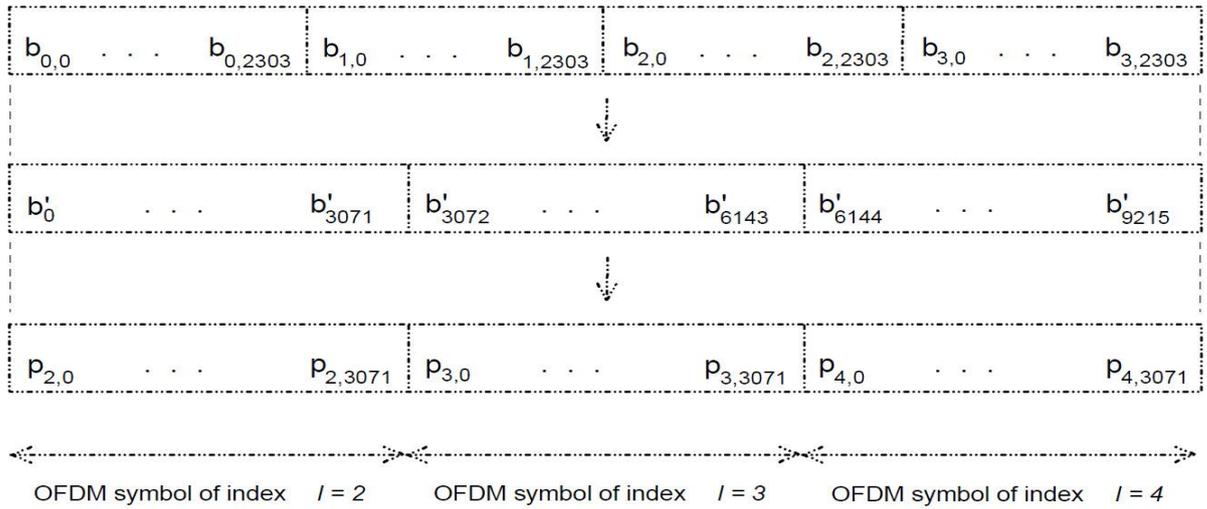
Канал быстрого доступа FIC. В режиме передачи TMI (рис.27) двенадцать блоков FIB канала быстрого доступа FIC разделяются на четыре группы блоков FIB, каждый из которых кодирован с использованием свёрточного кода и передаётся в пределах одного фрейма. Эти четыре последовательных свёрточных кодовых слова b_0, b_1, b_2, b_3 , (рис.28,а), каждое из которых $(b_i)_{i=0}^{2303}$ содержит 2304 бита, объединяются в мультиплексорах MUX1 и MUX3, образуя одну кодовую комбинацию, называемую вектором. Полученный вектор $(b'_{i'})_{i'=0}^{9215}$, содержащий 9216 бит, разделяется на три последовательных блока P_l , причем каждый блок, содержит биты, которые должны передаваться в символах OFDM соответственно с индексами $l = 2, 3$ и 4 . Каждый блок P_l представляет собой вектор $(p_{l,n})_{n=0}^{3071}$. Последний содержит 3072 бита и передаётся при работе в режиме передачи TMI одним OFDM-символом. При работе в этом режиме каждый фрейм передачи системы DAB содержит три OFDM-символа с индексами $l = 2, 3$ и 4 .

В режиме передачи TMI (рис.28,б) свёрточное слово $(b_i)_{i=0}^{2303}$ разделяется на три последовательных блока P_l , при этом каждый блок P_l представляет собой вектор $(p_{l,n})_{n=0}^{767}$, содержащий 768 бит и передаваемый одним OFDM-символом. При работе в этом режиме каждый фрейм передачи системы DAB содержит три OFDM-символа с индексами $l = 2, 3$ и 4 .

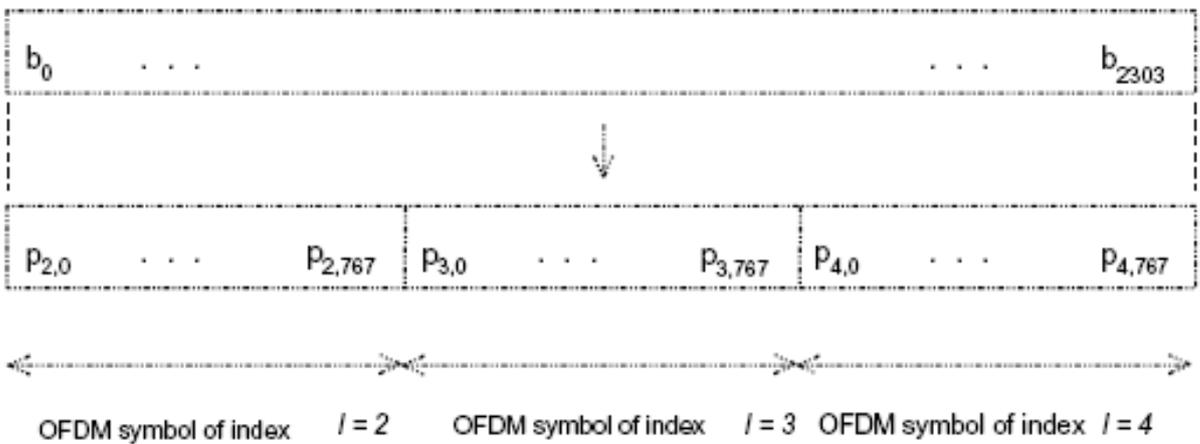
В режиме передачи TMI (рис.28,в) свёрточное кодовое слово $(b_i)_{i=0}^{3071}$ разделено на восемь последовательных кодовых слов P_l , при этом вектор $(p_{l,n})_{n=0}^{383}$ содержит 384 бита, передаваемый одним OFDM-символом.

При работе в этом режиме каждый фрейм передачи системы DAB содержит восемь OFDM-символов канала FIC с индексами $l = 2, 3, \dots, 9$.

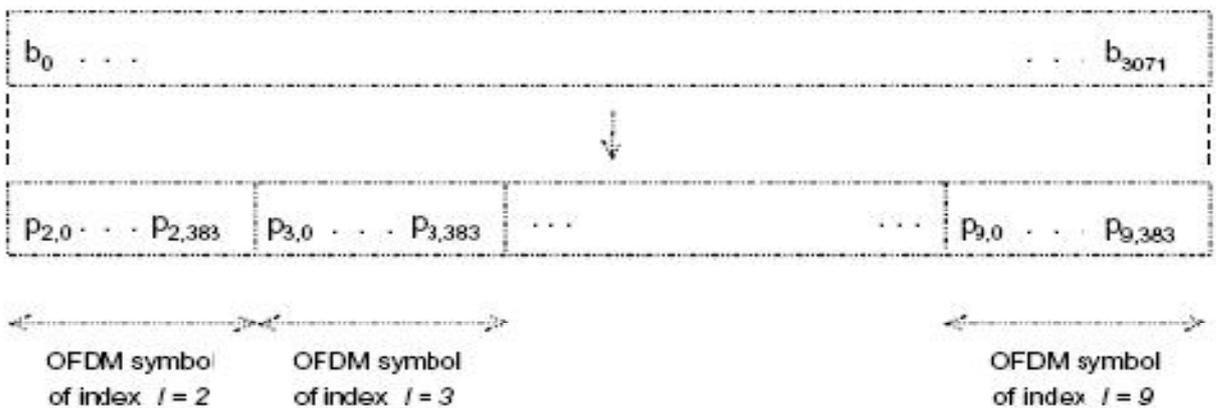
В режиме передачи TMIV(рис.28,а) - каждый вектор $(p_{l,n})_{n=0}^{1535}$ содержит 1536 бит, передаётся одним OFDM-символом. При работе в этом режиме каждый фрейм передачи системы DAB содержит три OFDM-символа канала FIC с индексами $l = 2, 3$ и 4.



a)



b)



c)

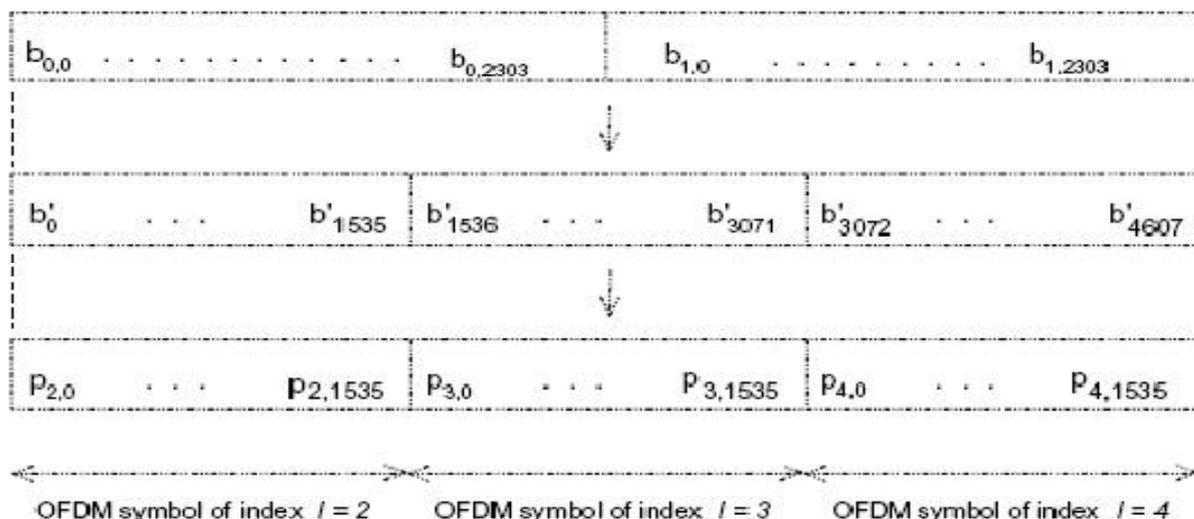


Рис.28. Разделение блоков FIB в канале FIB для режимов передачи:
 а- TM I; б – TMII; в – TMIII; г – TM- IV

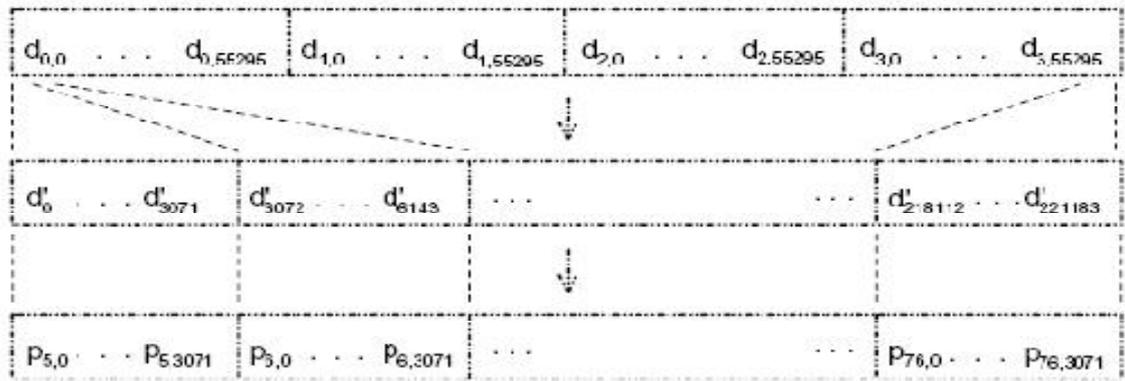
2)

Канал передачи пользовательской информации MSC. Логические фреймы CIF канала пользователя MSC подвергаются мультиплексированию в устройствах MUX 2 и MUX 3. При работе в режиме TM I мультиплексируются четыре логических фрейма CIF, в режиме TM IV – два фрейма CIF. В режиме TM II один фрейм CIF содержится в одном фрейме передачи и мультиплексирование в MUX 2 не требуется. Каждый логический фрейм CIF содержит 55296 бит.

При работе в режиме TM I (рис.29,а) после мультиплексирования четырех логических фреймов CIF каждый длиной 55296 бит, полученный при этом вектор $(d'_{i'})_{i'=0}^{221183}$ общей длиной 221184 бита, в разделителе блоков делится на 72 блока P_l , каждый из которых $(p_{l,n})_{n=0}^{3071}$ включает 3072 бита. Каждый такой блок передается одним OFDM-символом с номерами $l = 5, 6, \dots, 76$, где l – порядковый номер OFDM-символа во фрейме передачи, а n – порядковый номер бита в блоке P_l для разных режимов передачи.

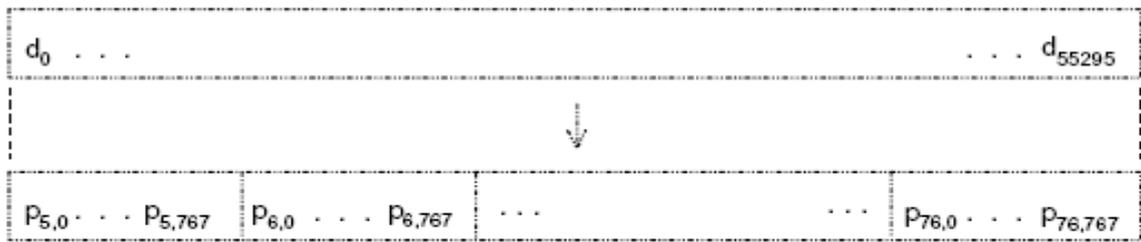
В режиме передачи TM II (рис.29,б) вектор $(d_i)_{i=0}^{55295}$ длиной 55296 бит делится также на 72 блока, каждый из них $(p_{l,n})_{n=0}^{767}$ содержит уже по 768 бит и передается одним OFDM-символом, в этом случае имеем 72 OFDM-символом с номерами соответственно $l=5, 6, \dots, 76$.

В режиме передачи TM III (рис.29,в) вектор $(d_i)_{i=0}^{55295}$ делится на 144 блока $(p_{l,n})_{n=0}^{383}$, каждый по 384 бита. Для их передачи требуется уже 144 OFDM-символа. И наконец, в режиме передачи TM IV (рис.29,г) сверточное кодирование



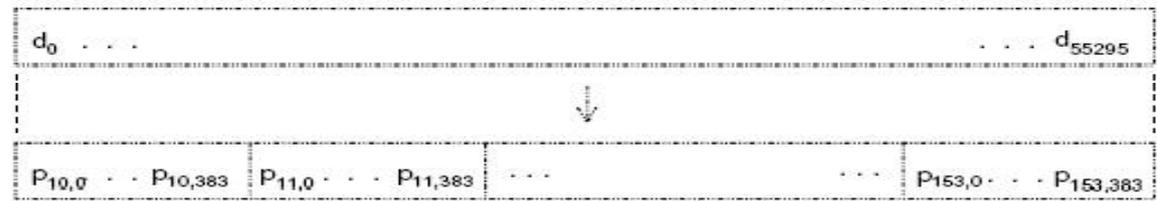
OFDM symbol of index $l = 5$ OFDM symbol of index $l = 6$ OFDM symbol of index $l = 76$

a)



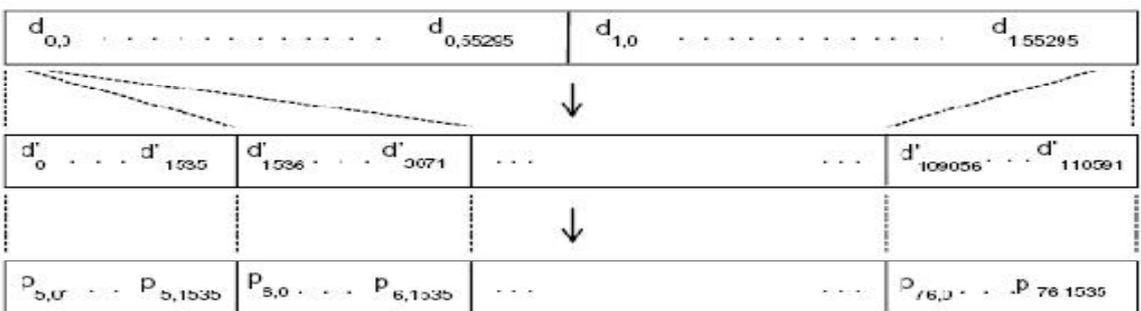
OFDM symbol of index $l = 5$ OFDM symbol of index $l = 6$ OFDM symbol of index $l = 76$

б)



OFDM symbol of index $l = 10$ OFDM symbol of index $l = 11$ OFDM symbol of index $l = 153$

в)



OFDM symbol of index $l = 5$ OFDM symbol of index $l = 6$ OFDM symbol of index $l = 76$

г)

Рис.29 . Разделение блоков в канале MSC для режимов передачи:
а- TM I; б – TMII; в – TMIII; г – TM- IV

слово после мультиплексирования двух CIF-фреймов $(d_i)_{i=0}^{110591}$ разделяется на 72 блока $P_l = (p_{l,n})_{n=0}^{3071}$ каждый из которых содержит 3072 бита и передается одним OFDM-символом.

Устройство отображения символа QPSK. Для любого символа OFDM с индексом $l = 2, 3, 4, \dots, L$ $2K$ -битный вектор $(p_{l,n})_{n=0}^{2K-1}$, элементы которого $p_{l,n}$ были пояснены выше, отображают при помощи K комплексных символов $q_{l,n}$ QPSK в соответствии со следующим соотношением:

$$q_{l,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(1 - 2p_{l,n}) + j(1 - 2p_{l,n+K})] \quad \text{для } n = 0, 1, 2, \dots, K-1, \quad (34)$$

где n – номер QPSK-символа.

Частотное перемежение. Устройство частотного перемежения распределяет QPSK-символы (ячейки модуляции) по несущим частотам в соответствии с псевдослучайной функцией $F(n)$, определяемой в стандарте отдельно для каждого режима передачи. Можно говорить о кодированном перемежении цифровых данных (ячеек модуляции QPSK) по несущим частотам.

Модуляция OFDM, где выполняется временное и частотное перемежение символов (COFDM), эффективна для широкополосных каналов с замираниями. После частотного перемежения QPSK-символы подвергаются дифференциальному кодированию, после чего выполняется модуляция QPSK несущих частот, в итоге имеем DQPSK.

Система DAB обеспечивает надежный прием звуковых программ в ситуациях, когда условия радиоприема и характеристики радиоканала непрерывно и достаточно быстро изменяются.

Спектр радиосигнала системы DAB. Символы OFDM представляют собой совокупность равноудаленных друг от друга по частоте ортогональных поднесущих частот с постоянными амплитудами и разными начальными фазами, вследствие QPSK-модуляции. Модулированная несущая частота представляет собой OFDM-ячейку. Спектр каждой такой ячейки – это функция Sinx/x , принимающая нулевые значения через определенные частотные интервалы (рис.25, правая часть). В той точке, где спектр определенной несущей достигает максимума, значения всех остальных модулированных несущих частот равны нулю. Это условие их ортогональности, необходимое для демодуляции несущих частот на приемной стороне. Напомним, что условие ортогональности выполняется, если частотные интервалы между соседними несущими частотами равны $1/T_U$.

Спектральная плотность мощности $P_k(f)$ каждой несущей с частотой $f_k = f_c + k/T_U$, где $-K/2 \leq k < 0$ и $0 \leq k \leq K/2$, определяется выражением

$$P_k(f) = \left[\frac{\text{Sin}\pi(f - f_k)T_S}{\pi(f - f_k)T_S} \right]^2 \quad (35)$$

Спектральная плотность мощности модулированного DAB-сигнала равна сумме значений спектральных плотностей мощности всех имеющихся несущих частот (рис.30). Жирной линией здесь изображена

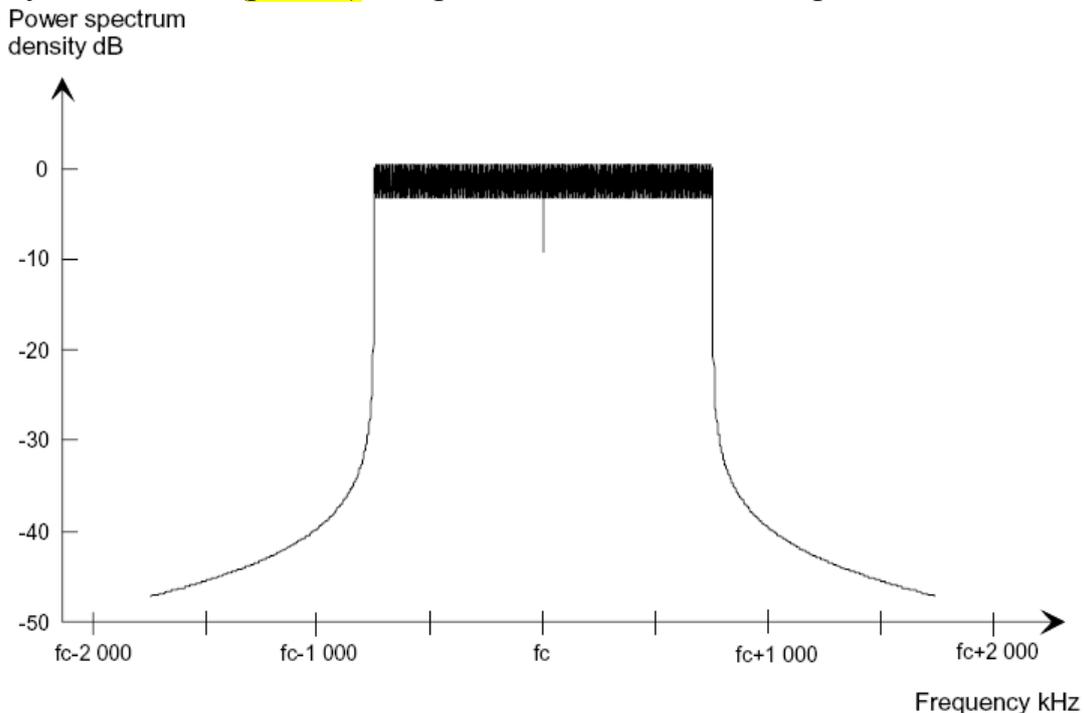


Рис.30. Теоретический спектр мощности радиосигнала системы DAB (для режима работы TMI)

полная полоса частот радиоканала системы DAB, составляющая 1,54 МГц.

Вследствие ортогональности несущих частот модулированные сигналы разделяются друг от друга без помех.

Маска излучения для системы DAB представлена на рис.31.

По состоянию на осень 2014 года регулярное вещание по какой-либо системе из семейства DAB ведется в 21 стране, а экспериментальное вещание еще в 18 странах.

Внедрение систем семейства DAB можно считать весьма успешным.

3.6. Вероятность появления цифровых ошибок в системе в DAB

Вероятность появления ошибок от отношения сигнал-шум в точке радиоприема для систем ЦРВ должна быть не хуже 10^{-4} , что обеспечивается при отношении сигнал/шум в точке радиоприёма примерно не менее 12,5 дБ.

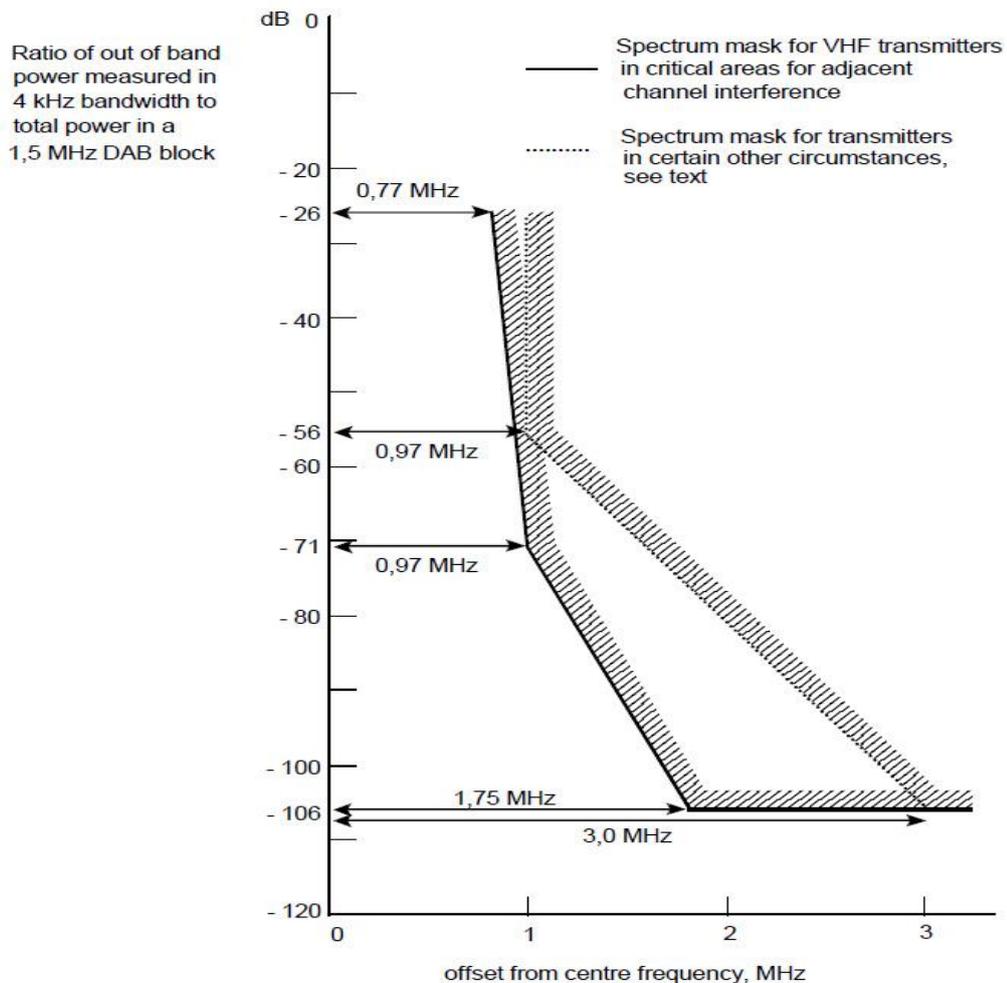


Рис.31. Спектральная маска излучения для системы DAB

Входное отношение сигнал/шум SNR_i в точке радиоприема связано с отношением E_b/N_0 следующим образом [11]:

$$SNR_i = \frac{E_b}{N_0} \frac{1}{BT_b} = \frac{E_b}{N_0} \frac{bN_S r}{BT_S}, \quad (36)$$

где B - ширина полосы частот входного шума, b - число бит в символе модуляции, приходящихся на одну несущую частоту, N_S - число несущих частот в блоке OFDM, r - скорость кода. Спектральная эффективность модуляции зависит от числа битов b на несущую, которое в конечном итоге определяется размерностью сигнального созвездия (числом позиций вектора несущего колебания), скоростью кода, защитным интервалом, который косвенно входит в данное выражение, как часть длительности T_S OFDM-символа. Число несущих частот не влияет на спектральную эффективность, ибо ширина спектра OFDM-сигнала увеличивается линейно с ростом числа несущих частот.

Вероятность появления ошибок от отношения сигнал-шум в точке радиоприема для системы DAB+ приведена на **рис.32**. Заметим, что для систем ЦРВ вероятность появления ошибок должна быть не хуже 10^{-4} , что обеспечи-

ваются при отношении сигнал/шум в точке радиоприёма примерно не менее 12,5 дБ (рис.32).

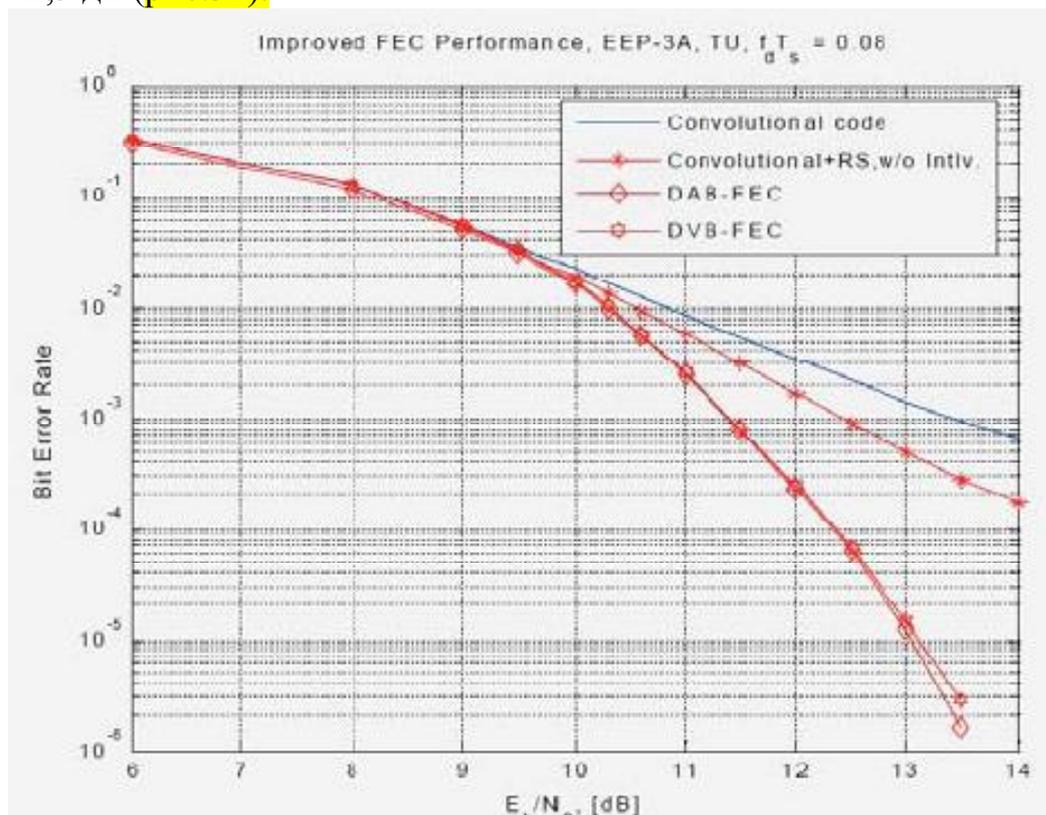


Рис.32. Вероятность появления ошибок в системе DAB+ от величины отношения сигнал-шум

3.8. Эволюция системы DAB

В 2009 году появилось дополнение [10] к системе DAB, посвященное передаче видеoinформации (видеосервисов). Это превращает ее уже в полноценную мультимедийную систему, ориентированную на мобильный прием программ радиовещания и телевидения (рис.33), при этом обеспечена полная обратная совместимость с системой DAB/DAB+. По данным [20] регулярное вещание по системам DAB/DMB ведется в 21 стране, экспериментальное вещание еще в 18 странах. С 2005 года по системе T-DMB началось вещание в Сеуле (Южная Корея). К началу 2006 года в мире насчитывалось уже 18 проектов по внедрению технологии DMB на основе существующей наземной вещательной инфраструктуры T-DAB. В Европе [11] основные проекты были развернуты в Германии, Франции, Норвегии, Голландии, Финляндии, Англии и Италии. Лидером в этом процессе является ФРГ, где в июне 2006 г. работало уже 39 передатчиков T-DMB в 12 городах на основе применения транспортных механизмов системы DAB.

Как видно из рис.33 модуль T-DMB добавлен в начало стандартной DAB системы, без всяких модификаций или изменений структуры передачи DAB. Видеокодер (H.264) и аудиокодер звукового сопровождения телевизионной программы (ER-BSAC) выполняют сжатие цифровых данных мультимедийного контента, например, программ телевидения. Блоки рандомиза-

ции, канального кодирования (кодер Рида-Соломона (204, 1888)) и временно-го перемежения цифровых данных необходимы для более надежного и ста-бильного приёма видеослужб (например, программ телевидения) при стацио-нарном и особенно мобильном радиоприеме.

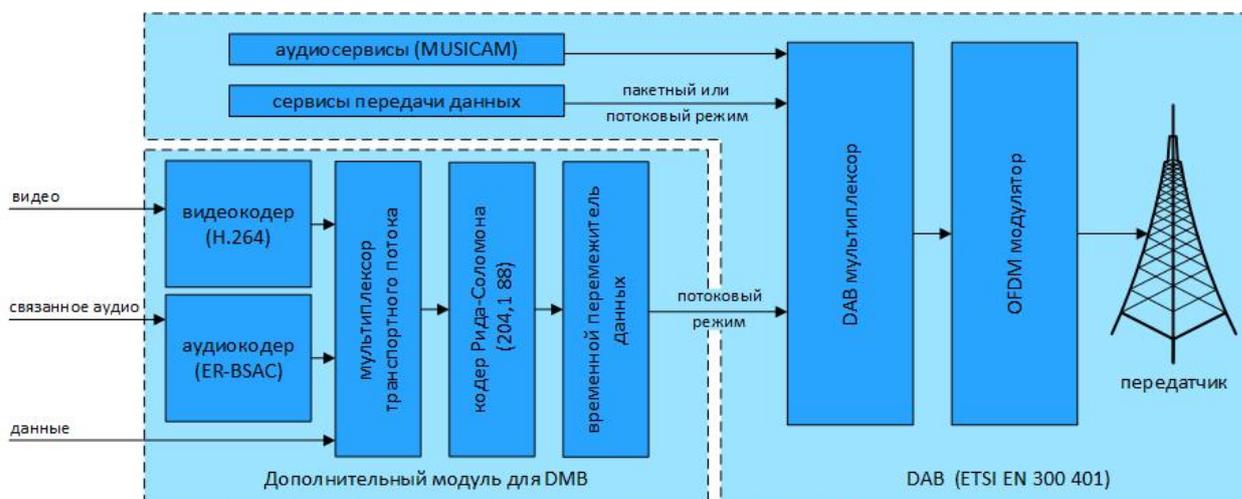


Рис.33. Система DAB/DAB+ с модулем T-DMB

При передаче видеосервисов (рис. 33), включая возможно применение двух профилей сложности при компрессии цифровых аудиоданных:

- профиль 1 включает применение алгоритмов компрессии цифровых аудиоданных MPEG-4 ER-BSAC (максимальная скорость передачи 128 кбит/с);
- профиль 2 включает применение алгоритмов компрессии цифровых аудиоданных MPEG-4 HE-AAC v.2 (с использованием алгоритмов компрессии цифровых аудиоданных AAC, SBR, PS) и MPEG Surround стандарта ISO/IEC 23003-1.

В обоих случаях при компрессии видеоданных используется стандарт MPEG-4 AVC (кодер H.264). Аудиоданные, сопутствующие видеопрограмме, передаются кодером ER-BSAC. При передаче цифровых данных видеосервиса, подаваемых на DAB-мультиплексор, используется потоковый режим работы.

Передача данных видеосервиса осуществляется через канал MSC системы DAB, при этом структура данных соответствует транспортному потоку MPEG-2 TS.

Спецификация [10] превращает систему DAB/DAB+ по своим характеристикам в мультимедийную систему A [29,30,31], (табл.6). В радиоканале шириной 1,54 МГц с использованием транспортных механизмов системы DAB могут быть переданы одновременно:

- несколько звуковых программ с разным уровнем качества, включая звуковые форматы 1/0, 2/0, 3/2, 5.1;
- несколько телевизионных программ с монофоническим или стереофоническим сопровождением;

- различных данных, актуальных сведений для бизнесменов, подвижных и неподвижных изображений, текстовой и графической информации и пр.

Укрупненная структурная схема передающей части системы T-DMB представлена на **рис.35**. Важно, что процедуры формирования логических каналов, обработки данных основных цифровых потоков (рандомизация, канальное кодирование, временное перемежение цифровых данных и ячеек модуляции), применяемых видов модуляции остались теми же самыми, что и в системе DAB проекта Eureka 147. Это позволяет говорить об обратной совместимости семейства DAB.

Приемник DMB может принять сигналы формата DAB+. Однако сигналы DMB не могут быть декодированы приемником DAB+, для этой цели необходим приемник DMB. А сигналы приемника DAB+ не могут быть декодированы приемником DAB.

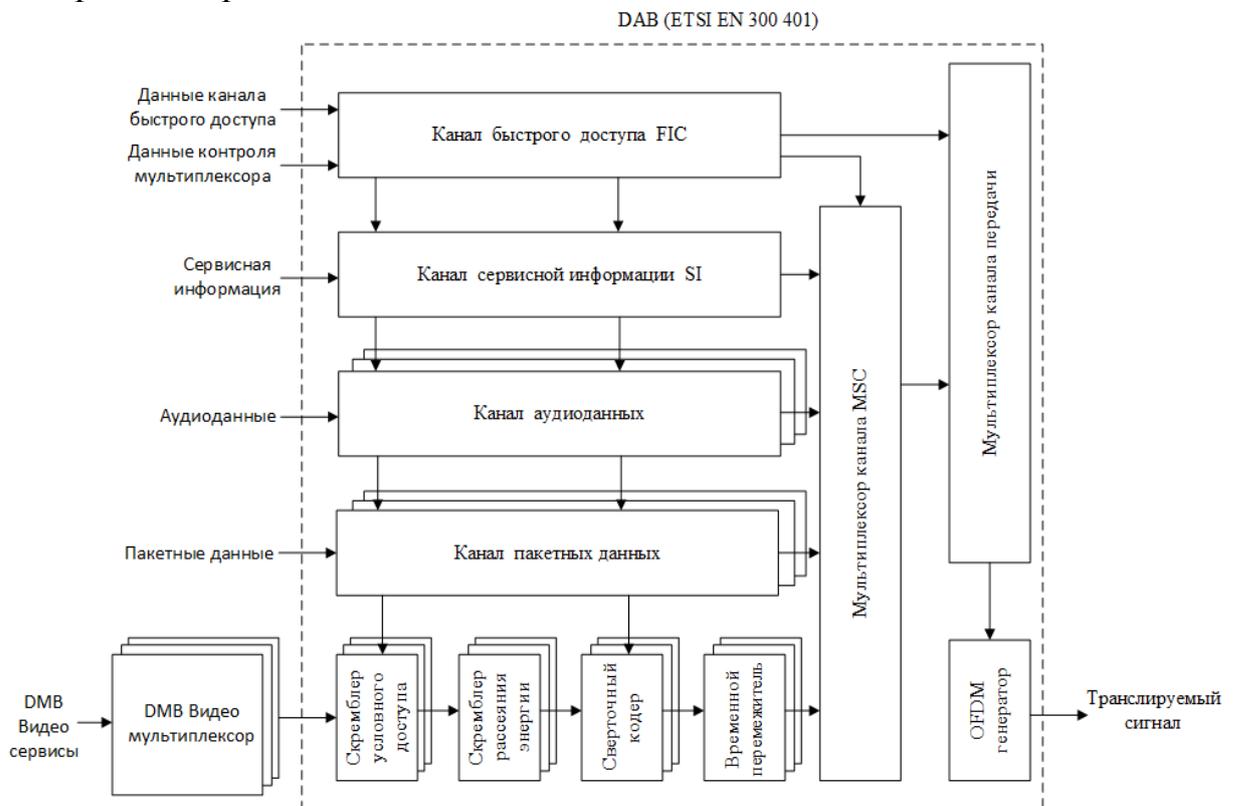


Рис.35. Укрупненная структурная схема системы DAB с возможностью передачи видеослужбы (T-DMB)

Структура видео мультиплексора, который осуществляет обработку и объединение данных видеослужбы, представлена на **рис.36**.

На этом рисунке [44]:

- генератор IOD создает IOD (начальный дескриптор объекта), который соответствует стандарту ISO/IEC 14496-1 Standard;
- генератор OD/BIFS создают потоки OD/BIFS двоичного формата данных в соответствии со стандартом ISO/IEC 14496-1 Standard;

- видеокодер выполняет сжатие видеоданных в соответствии с рекомендацией ITU-T H.264/AVC;

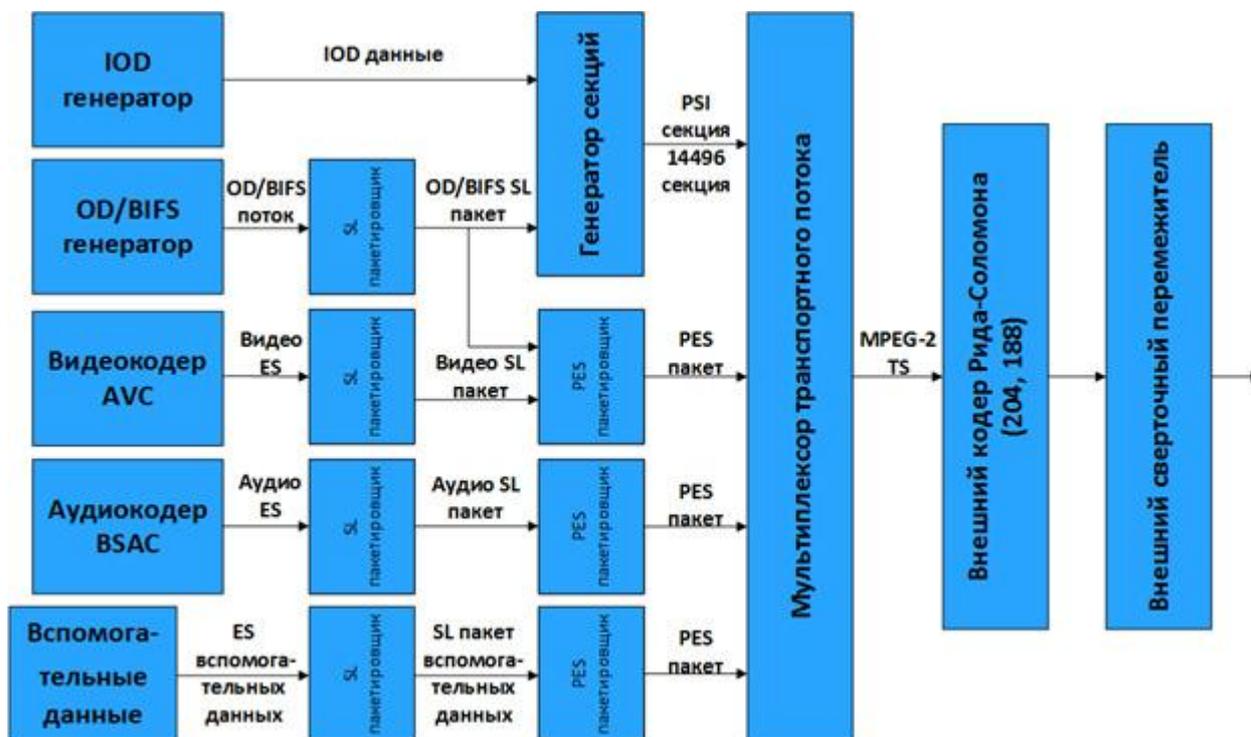


Рис. 36. Схема формирования цифровых данных видеосервиса: IOD (initialobjectdescriptor) – начальный дескриптор объекта; OD (objectdescriptor) – дескриптор объекта; BIFS (binaryformatforscene) – двоичный формат сцены; ES (elementarystream) – элементарный поток; SL (synchronizationlayer) – слой синхронизации; PES (packetizedelementarystream) – пакетированный элементарный поток; PSI (ProgramSpecificInformation) - специальная информация о программах; TS (transportstream) - транспортный поток.

- аудиокодер выполняет сжатие данных звукового сопровождения видеосервиса в соответствии со стандартом ISO/IEC 14496-3 ER-BSAC, где используется арифметическое кодирование;

- каждый полученный после обработки цифровой поток медиаданных пакетизируется SL, при этом структуры SL-пакетов совместимы со стандартом ISO/IEC 14496-1 Standard;

- генератор PSI формирует информацию, относящуюся к программе, далее в блоке PES происходит пакетизация входящих SL-пакетов в соответствии со стандартом ISO/IEC 13818-1;

- мультиплексор TS комбинирует входные пакеты PSI и PES в общий поток формата MPEG-2 TS, совместимый со стандартом ISO/IEC 13818-1;

- внешний кодер Рида-Соломона (204,188) выполняет помехоустойчивое кодирование, добавляя дополнительные биты к каждому пакету в мультиплексированный поток данных формата MPEG-2 TS, необходимые для обнаружения и исправления ошибок при декодировании принятого сигнала в приемнике;

- для борьбы с групповыми ошибками далее выполняется временное перемежение цифровых данных.

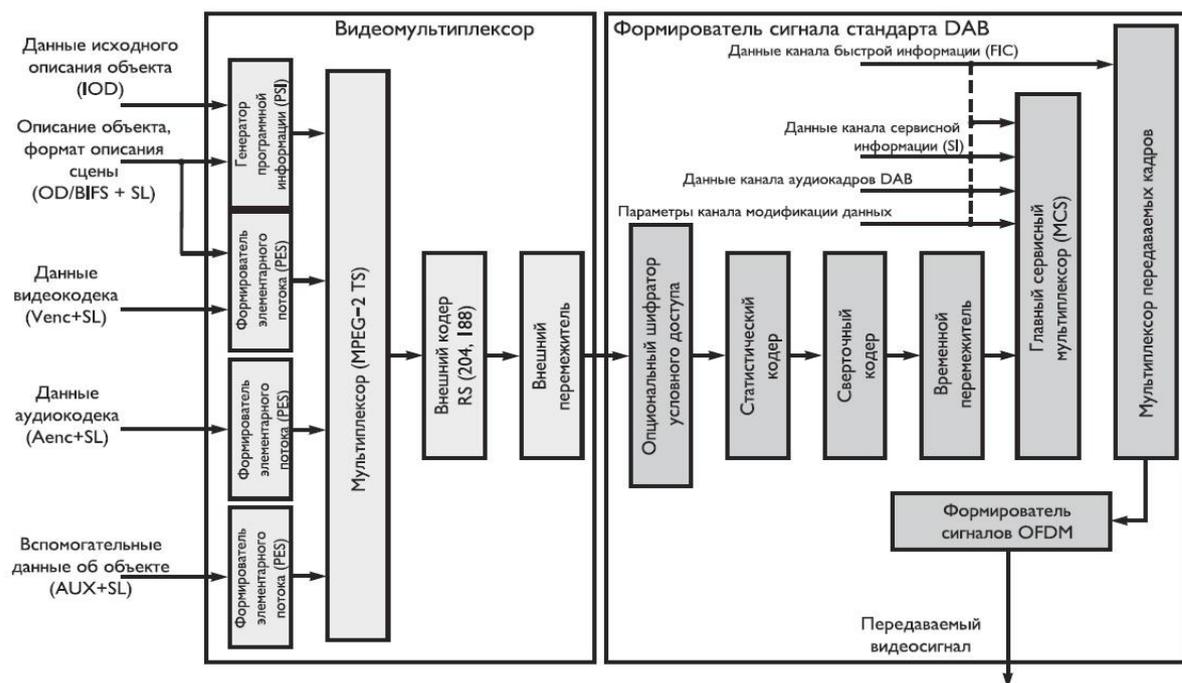


Рис.37. Структура формирования OFDM-сигнала в системе DMB

Укрупненная структурная схема передающей части системы DMB, включающая видеосервис и формирователь сигнала стандарта DAB, представлена на **рис. 37**[11]. Она не требует дополнительных пояснений.

Примеры возможных вариантов передачи программ ТВ и РВ с использованием технологии систем семейства DAB могут быть пояснены следующим образом. Если мультимплекс семейства DAB содержит аудиоданные с использованием только кодера MPEG-1 LayerII, то он передает примерно до 9 программ звукового вещания. Применение кодера MPEG-4 HE-AACv.2 позволяет передать уже до 28 программ звукового вещания в одном радиоканале DAB. Если мультимплекс содержит данные кодера MPEG-1 LayerII и кодера MPEG-4 HE-AACv.2, то в полосе частот радиоканала DAB+ шириной 1,536 МГц можно, например, одновременно передать 5 программ ЗВ в формате MPEG-1 LayerII и до 11 программ ЗВ в формате MPEG-4 HE-AACv.2. И наконец, в полосе частот радиоканала 1,536 МГц можно передать три программы ЗВ в стандарте MPEG-1 LayerII, 8 программ ЗВ в стандарте MPEG-4 HE-AACv.2 и две программы мобильного телевидения (рисунок **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, правая картинка).

Кроме того на сетях DMB, например в Южной Корее предлагаются дополнительно следующие слуги:

-информацию о ситуациях на дорогах (наличие происшествий, уведомление о строительстве, расчет времени движения, пути объезда заторов и т.п.);

-информация о достопримечательностях, о различных сервисных центрах, о наличии ресторанов, театров, торговых центрах, заправочных станций, что полезно людям при планировании различных путешествий с выбором наиболее привлекательных маршрутов;

-сведения, необходимые для выбора оптимального маршрута до пункта назначения; необходимые для покупок, о наличии программ ТВ и РВ и кратком их содержании, электронный гид по программам;

-различные текстовые сообщения и просмотр слайд-шоу;

-аварийные предупреждения;

-условный доступ и многие другие услуги, набор которых постоянно расширяется.

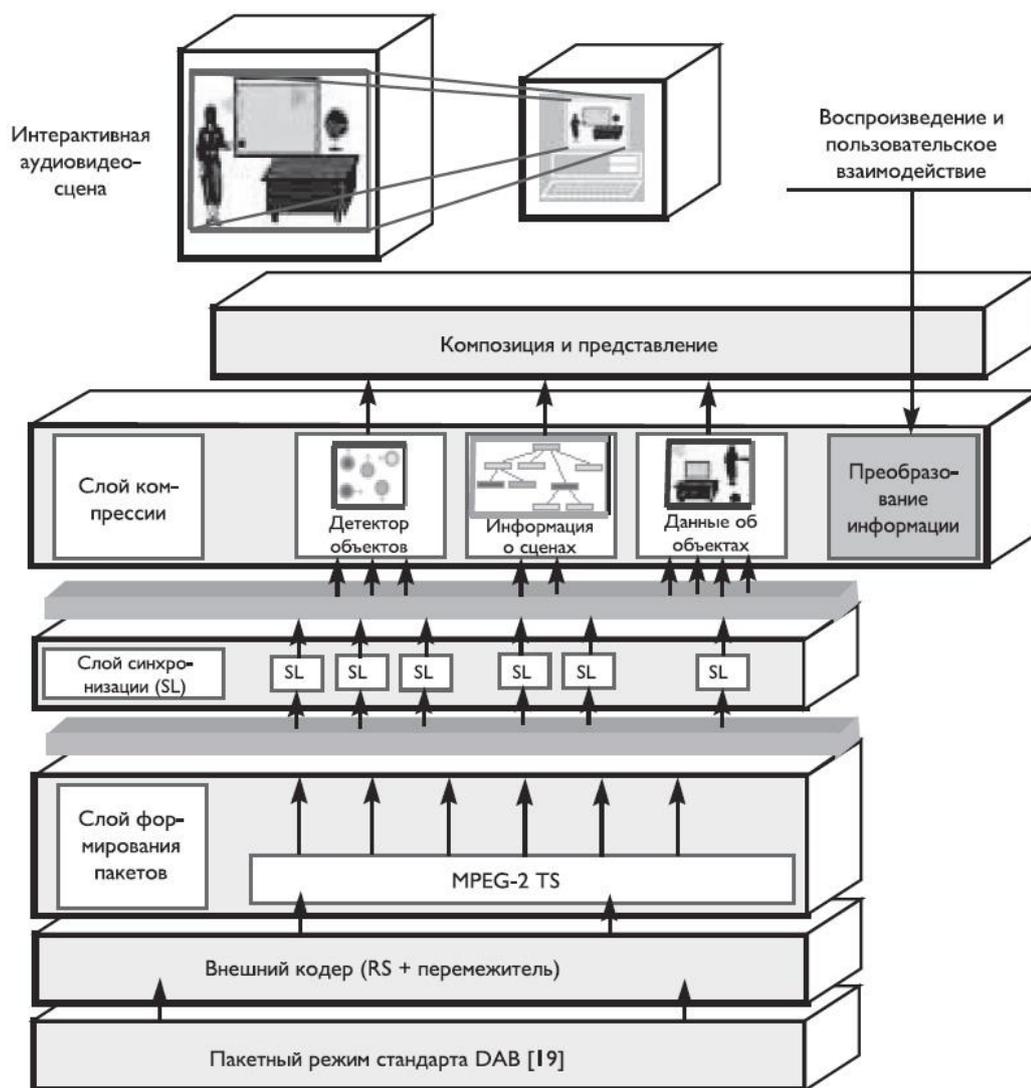


Рис.38. Архитектура обслуживания потребителей сервиса

На **рис. 38** приведена архитектура видеообслуживания потребителей в системах T-DMB и S-DMB, содержащая:

-пакетный режим формирования сигнала стандарта DAB,

-внешний кодер RS (204, 188) и перемежитель цифровых данных,

-тракт формирования пакетов MPEG-2 TS,

- тракт введения синхронизирующих сигналов,
- область компрессии, содержащую детектор объектов, информацию о сценах и данные объектов, а также систему композиции и представления аудио- и видеоинформации.

4. Система цифрового радиовещания DRM+

4.1. Общие сведения и структура системы DRM+

DigitalRadio Mondiale (DRM, цифровое всемирное радио) – многофункциональная система цифрового радиовещания – была впервые стандартизована Европейским институтом телекоммуникационных стандартов (ETSI) в 2001 году. Она предназначалась для работы в радиовещательных диапазонах длинных (ДВ), средних (СВ) и коротких (КВ) волн, т.е. на участках частот до 30 МГц, выделенных ИТУ-R для целей звукового вещания.

В 2009 году была опубликована новая версия данного стандарта [5], в которой диапазон рабочих частот был расширен до 240 МГц. В этой версии стандарта добавлен режим работы E, сама версия данной системы при работе в режиме E получила название DRM+.

В январе 2014 года была опубликована последняя версия данного стандарта [6]. Система DRM+ обеспечивает качество воспроизведения компакт-диска при передаче двухканальных стереофонических программ, а также передачу сигналов многоканальной стереофонии форматов 5.1 и 7.1, разнообразной мультимедийной информации (сведения о пробках на дорогах, прогноз погоды, актуальные новости). В память приёмника может быть записана информация для последующего прослушивания или просмотра (услуги могут быть платными); возможна параллельная трансляция программ с возможностью выбора нужного языка. Система DRM+ обеспечивает качественный прием программ в стационарных и мобильных условиях, работу в одночастотных сетях (SFN – SingleFrequencyNetwork), имеет функцию условного доступа. В системе DRM+ возможно автоматическое переключение приемника на альтернативный источник той же программы, если возникли проблемы с приемом (AFS – AlternativeFrequencySwitching). Ей свойственны высокая помехозащищенность и защита от многолучёвости при радиоприеме..

Оборудование системы DRM+ включает: контент-сервер (DRM-контент-сервер), где выполняется компрессия цифровых данных, мультиплексирование индивидуальных цифровых потоков, поступающих от разных поставщиков, и формируются основные цифровые потоки; модулятор (DRM-модулятор); собственно передатчик (обычно усилитель радиочастоты) и GPS-приемник, необходимый для синхронизации работы всех устройств.

Структурная схема контент-сервера системы DRM+ представлена на рис. 39.

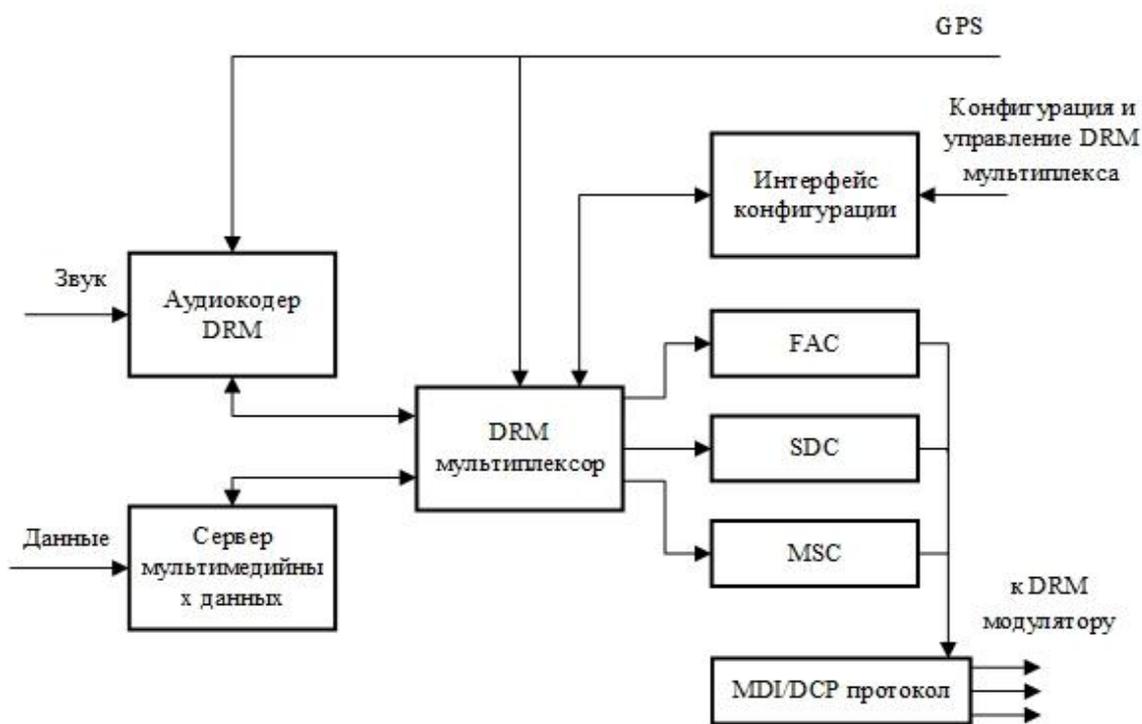


Рис.39. Контент-сервер системы DRM

В состав контент-сервера входят (рис.39):

- DRM-аудиокодер, обеспечивающий кодирование входного аудиосигнала; выход аудиокодера содержит части цифровых данных аудиофреймов с разной степенью защиты от ошибок;

- сервер мультимедийных данных, который обеспечивает приём, сортировку, хранение и кодирование данных, предназначенных для дальнейшей обработки и передачи в стандарте DRM;

- мультиплексор DRM, служащий для формирования трех основных цифровых потоков MSC, FAC, SDC с их последующим объединением в единый выходной MDI-поток.

Контент-сервер реализует возможность работы в стандарте DRM30 и DRM+. Выходной MDI/DCP сигнал контент-сервера FraunhoferR5 несет в себе полный мультиплексированный поток цифровых данных каналов FAC, MSC, SDC, который может быть доставлен любому количеству DRM - модуляторов, расположенных у разных передатчиков, имеющих возможность работы в одночастотной радиовещательной сети.

Для быстрой и удобной системной конфигурации, а также для осуществления контроля уровня сигнала можно получить доступ к пользовательскому Web-интерфейсу через любой современный Web-браузер. Для обеспечения надежной работы в контент-сервер встроен межсетевой экран (Firewall) и осуществляется постоянная самодиагностика. Информация о состоянии системы передается на электронную почту, консоль, Web-интерфейс, логические релейные выходы и SNMP. Для этого используются протоколы httpmirror, ftpmirror, TCP/IP, RS-232, а также аналоговый модем для импорта данных.

Контент-сервер, как правило, находится в студии, имеет дистанционное управление для предоставления данных и администрирования. Контент-сервер может осуществлять прием входных аудиоданных в виде «живых»

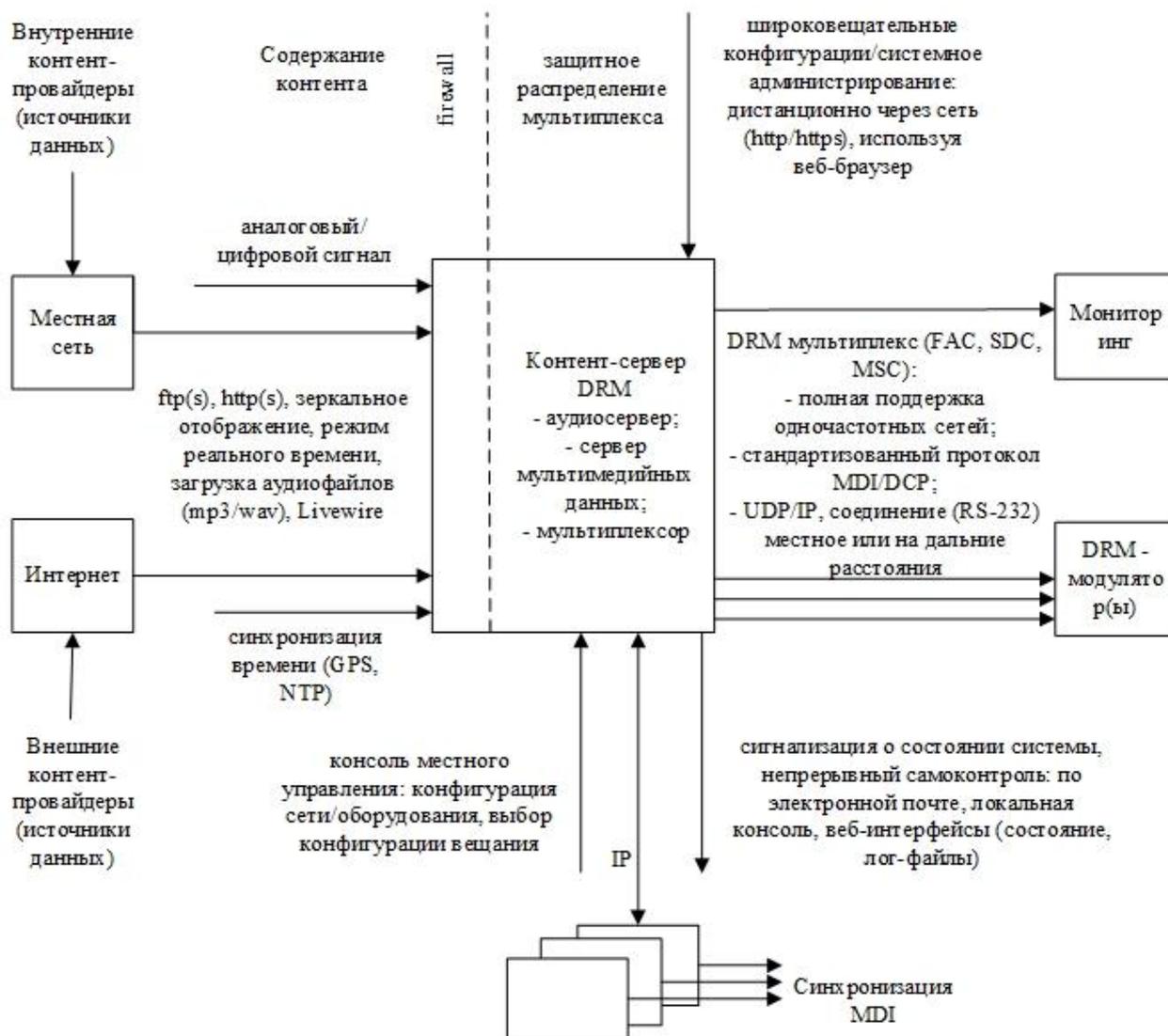


Рис.40. Контент-сервер системы DRM

программ звукового вещания в цифровом и аналоговом видах (рис.40).

Сигнал на выходе содержит мультиплексированный поток данных, который с помощью MDI/DCP-протокола может быть доставлен не только одному, но также множеству модуляторов для организации одночастотной сети (согласно ETSITS 102 820 - MultiplexDistributionInterfaceandETSITS 102 821 - DistributionandCommunicationsProtocol), [21], [22].

Укрупненная структурная схема передающей части системы DRM+ представлена на рис.41. В передающем тракте системы формируются три основных цифровых потока: MainServiceChannel (MSC – главный канал передачи пользовательской информации); FastAccessChannel (FAC – канал быст-

рогодоступа); ServiceDescriptionChannel (SDC – канал описания пользовательской информации).

Входные потоки преобразуются в цифровой формат с помощью предва-

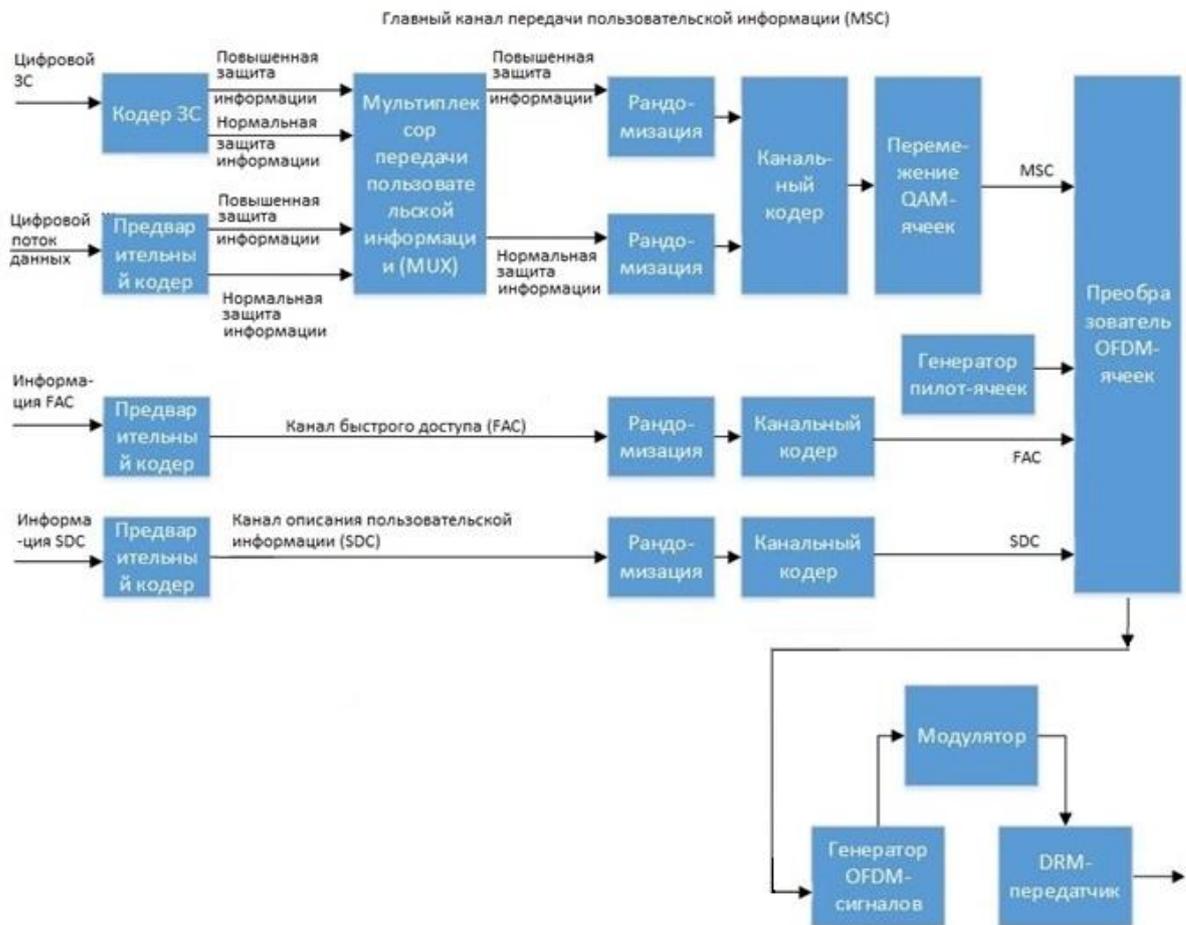


Рис.41 Укрупненная структурная схема передающей части системы DRM+

рительных кодеров и кодеров источника. Канал MSC формируется на выходе мультиплексора передачи пользовательской информации (MUX). На вход мультиплексора поступают от одного до четырех цифровых потоков, которые соответствуют кодированным звуковым сигналам или сигналам дополнительной информации. Полученные цифровые данные содержат две части, которые имеют различные уровни защиты от ошибок (нормальная защита и высокая защита). Для большей наглядности виды информации, передаваемые в канале MSC представлены на **рис. 42**.

Блок рандомизации необходим для устранения систематических повторов комбинаций двоичных символов в цифровом потоке. Далее осуществляется помехоустойчивое кодирование, перемежение битов, перемежение QAM-ячеек. В каналах FAC и SDC перемежение QAM-ячеек не применяется для исключения временных задержек. Генератор пилот-сигналов используется для синхронной демодуляции сигналов на приемной стороне.

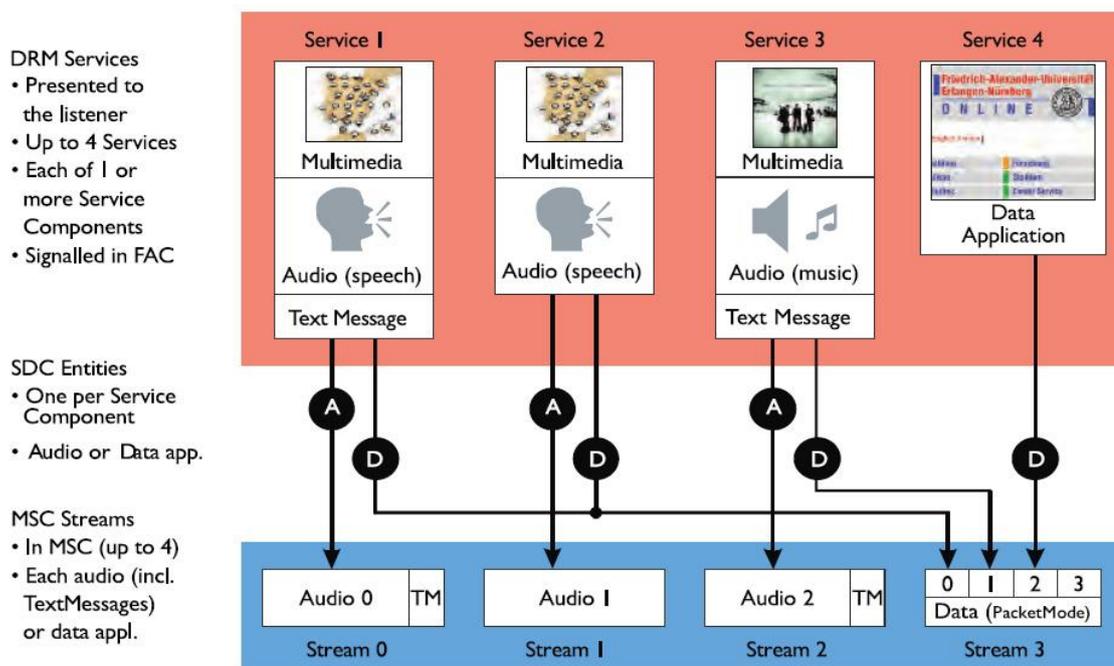


Рис.42. Виды передаваемой информации в канале MSC

Символ OFDM, как и в любой системе ЦРВ, содержит полезную часть и защитный интервал. Из цифровой формы в аналоговую OFDM-сигнал обычно преобразуется в модуляторе; здесь же сигнал переносится в полосу частот радиоканала. В этом случае передатчик представляет собой радиочастотный усилитель с высокой линейностью амплитудной характеристики. При работе системы DRM в диапазоне ОВЧ (DRM+) используется режим Е (табл.14).

Основные технические характеристики системы DRM+ при работе в режиме Е (диапазон ОВЧ, 30...240 МГц) представлены в табл.2. Ниже для большей наглядности в табл.15 представлено сравнение основных характеристик системы DRM отдельно для режимов работы в диапазонах НЧ, СЧ, ВЧ и ОВЧ.

В системе DRM введены режимы устойчивости А, В, С, D, Е. Они учитывают особенности распространения радиоволн. Режимы устойчивости А, В, С, D относятся к частотам ниже 30 МГц, режим устойчивости Е – к работе

Таблица 14.

Режимы устойчивости системы DRM

Режим устойчивости	Типичные условия распространения
А	Гауссовский канал с малыми замираниями
В	Каналы, имеющие временную и частотную селективность, с увеличенными задержками распространения
С	Подобен режиму В, но с увеличенным эффектом Доплера
Д	Подобен режиму В, но с существенными задержками распространения и значительным эффектом Доплера
Е	Каналы, имеющие временную и частотную селективность

Сравнительные характеристики системы DRM для разных режимов работы

	DRM	DRM+
Основные характеристики системы	Значения параметров, характеристики	
Диапазон частот, МГц	НЧ, СЧ, ВЧ: ниже 30	ОВЧ: 30...240
Значение ширины полосы частот радиоканала, кГц	4.5; 5; 9; 10; 18; 20	100 (96)
Режимы устойчивости	A, B, C, D	E
Возможность совместной передачи в одном радиоканале сигналов аналогового радиовещания и DRM-сигналов	Имеется	
Виды сигналов, поступающих от поставщиков программ	Звуковые и речевые сигналы, мультимедийная информация	
Режимы передачи звуковых сигналов	Моно, стерео	Моно, стерео, многоканальное стерео
Методы кодирования звуковых сигналов	MPEG-4 HVXC; MPEG-4 CELP; MPEG-4 ISO/IEC14496-3	MPEG-4 xHE AACv2; MPEG D Surround;
Диапазон скоростей передачи цифровых звуковых сигналов, кбит/с	2-72	37-186
Методы защиты информации от ошибок	Применение сверточного кодирования; перемежение битов и перемежение QAM-ячеек	
Способ организации цифрового потока	OFDM	
Вид модуляции	4-QAM 16-QAM 64-QAM	4-QAM 16-QAM
Возможность условного доступа к информации	Имеется	
Скорость передачи данных, кбит/с	8...20...72	37...186
Значения OFDM-параметров: T_g/T_u $T_s = T_g + T_u$, мс T_f , мс $\Delta f = \frac{1}{T_u}$, Гц	1/9...11/14 26.66...16.66 400	1/9 2.5 100
T_u – длительность полезной части OFDM-символа; T_g – длительность защитного интервала; T_f – длительность кадра передачи; Δf – частотный разнос между несущими частотами		

системы в полосе частот от 30 до 240 МГц. В этом последнем случае рассматриваются радиоканалы, имеющие временную и частотную селективность.

4.2. Кодирование первичных звуковых сигналов в системе DRM+

В системе DRM+ для компрессии цифровых аудиоданных используются алгоритмы, относящиеся к семейству стандартов группы MPEG – это стандарт MPEG-4 ISO/IEC 14496-3 [17, 33,34] и MPEG D Surround Part 1 ISO/IEC 23003-1 [19,33,34].

Стандарт DRM предполагает использование двух кодеков для кодирования звуковых сигналов: HE-AAC v.2 и xHE-AAC (рис.43). В кодеке HE-AAC

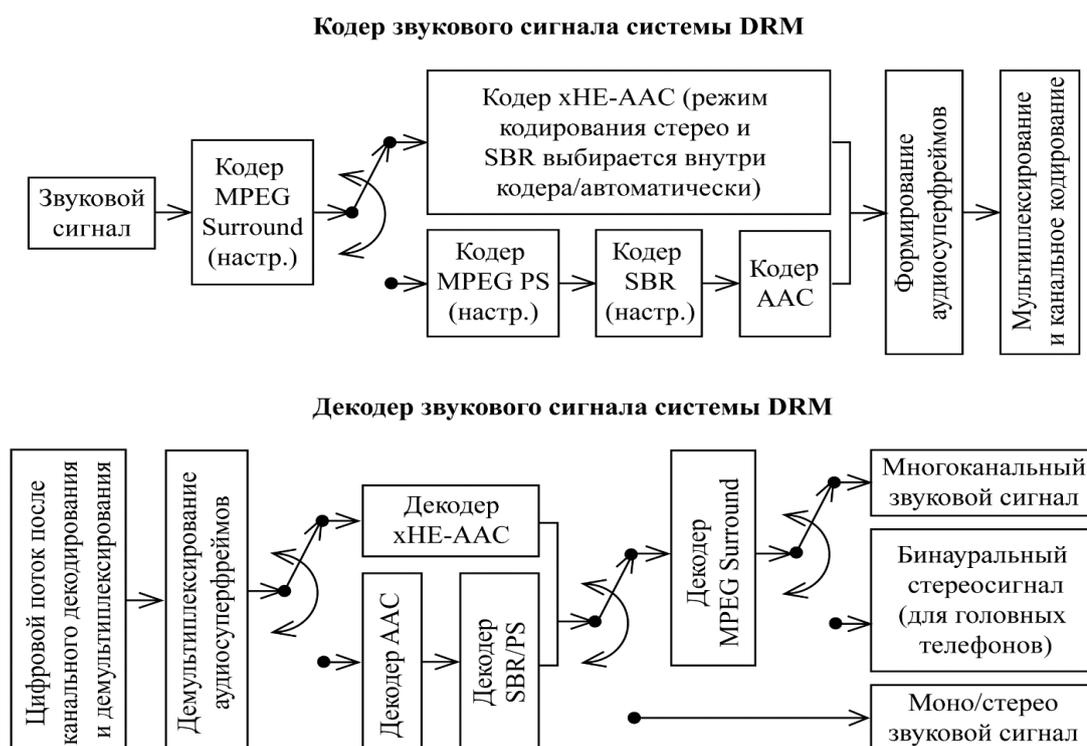


Рис.43. Структурные схемы кодера и декодера системы DRM (версия стандарта ETSI ES 201980 v.4.1.1 (2014-01))

v.2 применяются алгоритмы компрессии стандарта MPEG-4 ISO/IEC 14496-3: AAC, SBR, PS. В данном кодеке можно более гибко менять скорость цифрового потока при кодировании с шагом 80 бит/с, кроме того число аудиофреймов в одном аудиосуперфрейме не является фиксированным. Однако в обоих случаях один аудиосуперфрейм размещается при работе в режиме E в двух логических фреймах. Дополнительно при кодировании сигналов многоканальной стереофонии применен алгоритм компрессии MPEG D Surround. В ходе полевых испытаний системы DRM было выявлено, что наиболее эффективным является метод xHE-AAC (Extended High Efficiency Advanced Audio Coding), что нашло отражение в редакции стандарта 2014 года (ETSI ES 201 980 v.4.1.1). Метод xHE-AAC обеспечивает высокое качество звуковых сигналов на приемной стороне при скоростях передачи цифровых потоков для монофонических сигналов от 8 кбит/с и от 16 кбит/с для стереофонических аудиосигналов. В кодеке HE-AAC v.2 длина аудиофрейма постоянна. Итак, кодер xHE-AAC обеспечивает более высокое каче-

ство кодирования фрагментов звука, содержащих речь, музыку или их произвольные сочетания при малых скоростях цифрового потока.

О кодеке HE-AACv.2 уже было сказано ранее в разд.3.2 настоящего пособия. Заметим лишь, что в последней версии стандарта рекомендовано сочетание методов кодирования MPEG-4 AAC v.2 и MPEG-4 AAC (SBR+PS). Кодеки MPEG-4 AAC v.2 обеспечивают более высокое качество звуковоспроизведения, чем кодеки MPEG HE-AAC, при кодировании только аудиосигналов с высокими скоростями цифрового потока. Главным отличием алгоритма HE-AAC от HE-AAC v.2 является автоматическая установка всех внутренних параметров кодирования для обеспечения максимально достижимого качества звучания.

В системе DRM+ методы кодирования MPEG-4 CELP (CodeExcitedLinearPrediction - линейное предсказание с кодовым возбуждением) и MPEG-4 HVXC (HarmonicVectorExcitationCoding - кодирование с гармоническим векторным возбуждением) не применяются. Однако они также входят в стандарт MPEG-4 ISO/IEC 14496. Данные алгоритмы компрессии предназначены для кодирования речи и сигналов с простой структурой и могут быть использованы в стандарте DRM (режимы работы A,B,C,D).

Итак, в стандарте DRM+ (режим работы E) используются следующие алгоритмы компрессии (рис.43):

MPEG-4 AAC (AdvancedAudioCoding – усовершенствованное аудиокодирование)[33,34], применяется для кодирования высококачественных музыкальных сигналов; значения частот дискретизации составляют 24 (если используется сочетание алгоритмов AAC+SBR) или 48 кГц. Длина выборки равна 960 отсчетам 3С, длина аудиофрейма составляет 40 или 20 мс, длина аудиосуперфрейма - 200 мс, при этом каждый аудиосуперфрейм может содержать 5 (при частоте дискретизации 24 кГц) или 10 аудиофреймов (при частоте дискретизации 48 кГц), если применен кодек HE-AACv.2;

MPEG-4 SBR (SpectralBandReplication – спектральное полосовое копирование)[33,34] применяется для кодирования высокочастотной части спектра звукового сигнала с целью уменьшения скорости цифрового потока, используется в сочетании с алгоритмом MPEG-4 AAC (AAC+SBR).

Структурная схема, иллюстрирующая процесс кодирования звукового сигнала с применением метода SBR, представлена на рис. 44. Низкочастотная часть сигнала (в полосе частот от 0 до 5,5 кГц) подвергается обработке кодером AAC, а высокочастотная (от 5,5 до 15,0 кГц) - кодером SBR.

Входной сигнал с помощью банка полифазных квадратурных зеркальных фильтров (PQMF-фильтров) разделяется на 64 субполосные компоненты, каждая из которых имеет полосу частот 344 Гц (при $f_d = 44,1$ кГц). На выходе сигнал содержит комплексные составляющие для упрощения дальнейших вычислений. В блоке выделения контрольных параметров кодера формируется частотно-временная сетка. Энергия сигнала, вычисляемая в каждом сегменте сетки, несет информацию об огибающей спектра исходного сигнала.

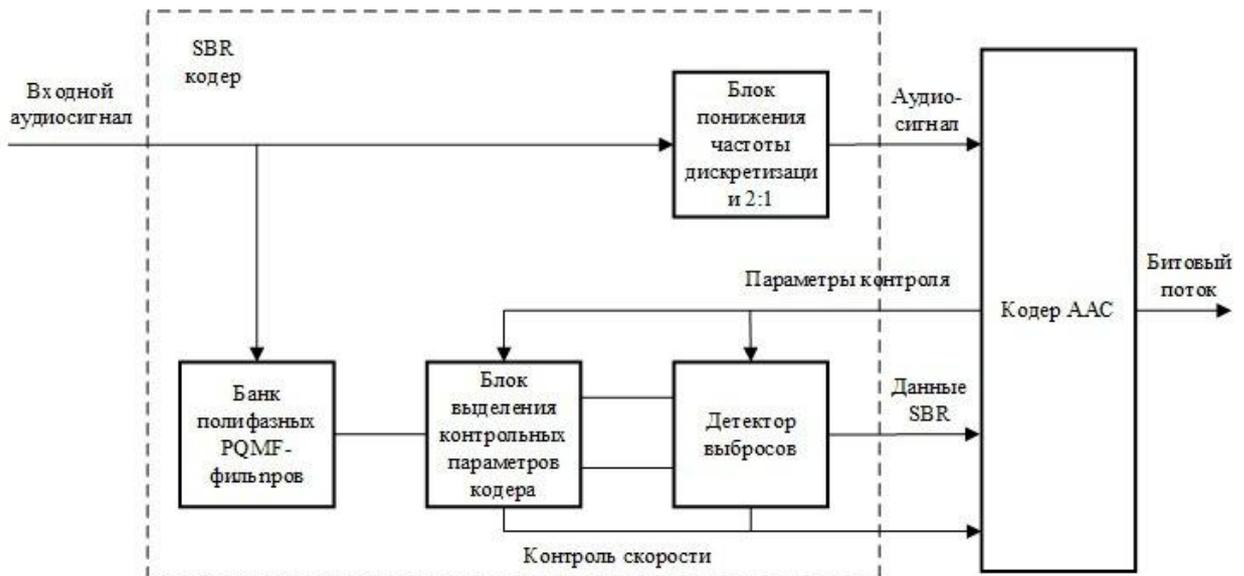


Рис.44. Структурная схема кодера SBR

Длительность сегмента может меняться от одной выборки к другой. Для регулировки длительности сегментов необходим детектор выбросов. Необходимый уровень шума для добавления к гармоническим компонентам вычисляется в кодере SBR. Данная информация совместно с огибающей спектра квантуется и кодируется также SBR-кодером с применением энтропийного кодирования Хаффмана. Одновременное использование методов MPEG-4 AAC и SBR позволяет снизить скорость цифрового потока до 22 кбит/спри высоком качестве звучания сигнала (табл.16).

Таблица 16

Параметры звукового сигнала при применении метода SBR

№	Наименование параметра	Значение параметра
1	Скорость передачи ЗС	22 кбит/с
2	Длительность аудиофрейма	40 мс
3	Частота дискретизации MPEG-4 AAC	24 кГц
4	Частота дискретизации SBR	48 кГц
5	Частотный диапазон ЗС при применении MPEG-4 AAC	0-6 кГц
6	Частотный диапазон ЗС за счет применения SBR	6-15,2 кГц
7	Средняя скорость цифрового потока SBR на канал	2 кбит/с

MPEG-4 PS (ParametricStereo – параметрическое стерео) [33,34], позволяет дополнительно снизить скорость цифрового потока при кодировании сигналов обычной двухканальной стереофонии; может использоваться в сочетании с алгоритмами AAC+SBR+PS или AAC+PS.

Укрупненная структурная схема кодека, реализующего принцип параметрического кодирования пространственной информации, представлена на **рис.45**.

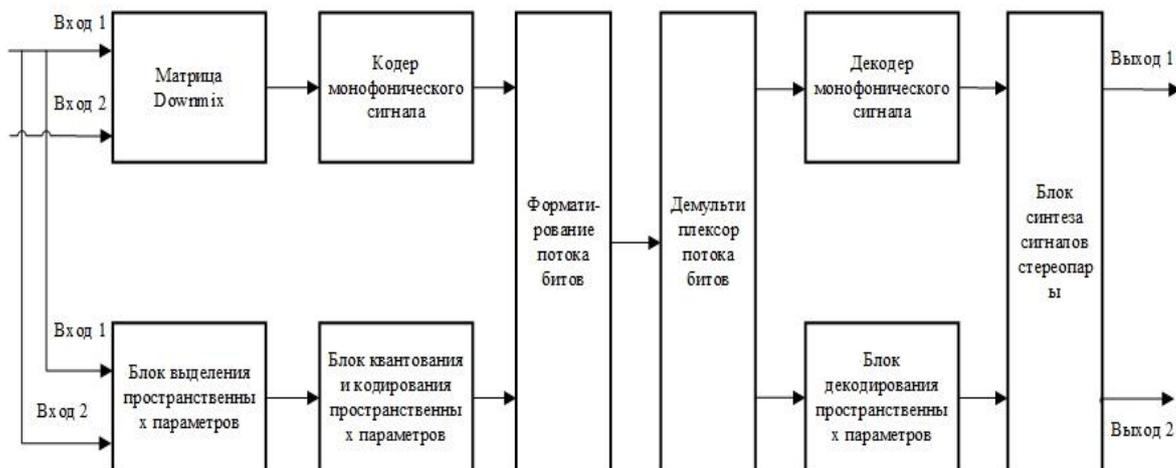


Рис.45. Укрупненная структурная схема кодека, использующего параметрическое кодирование PS пространственных параметров сигнала стереопары

Идея параметрического кодирования заключается в объединении исходной стереопары в один монофонический сигнал, выделении пространственных параметров из исходных сигналов стереопары, кодировании и передачи декодеру полученных сигналов. Объединение стереопары в один монофонический сигнал происходит с помощью понижающего матрицирования (Downmix), затем полученный монофонический сигнал кодируется, как правило, с помощью алгоритма AAC+SBR. Выделение пространственных параметров осуществляется в результате психоакустического анализа множества пар субполосных сигналов, полученных из исходной пары сигналов, после чего выделенные пространственные параметры квантуются с учетом разрешающей способности слуха и затем кодируются в параметрическом кодере. Полученные цифровые потоки передаются по каналу связи к декодеру. На приемной стороне монофонический сигнал декодируется и используется для воссоздания стереосигналов на основе пространственных параметров.

Для каждой пары сигналов субполосы вычисляются три пространственных параметра: разность уровней в дБ (как логарифм отношения энергий соответствующих субполосных сигналов левого и правого каналов стереопары), среднее различие по фазе, взаимная корреляция левого и правого субполосных сигналов.

При передаче пространственных параметров сигналов обычной стереопары требуется незначительная часть от полной скорости цифрового потока, обычно она не превышает 2500 бит/с, а её среднее значение составляет около 1200 бит/с.

Применение алгоритмов AAC+SBR+PS позволяет снизить скорость цифрового потока до 24 кбит/с. При использовании технологии HE-AAC v.2

для достижения такого же высокого качества скорость цифрового потока должна быть повышена до 32 кбит/с.

MPEG D Surround (MPS, SAC- SpatialAudioCoding, MPEGDISO/IEC 23003-1, [19, 33,34]), используется для кодирования сигналов многоканальной стереофонии форматов, например, 5.1, а также и более высоких звуковых форматов.

В основе данного метода кодирования лежит та же идея, что и в алгоритме параметрического кодирования (рис.46). Звуковые сигналы, поступающие на кодер, могут быть сигналами обычной стереофонии или многоканальной любого формата. При этом кодируются пространственные параметры многоканального аудиосигнала. Также кодируется полученный с помощью понижающего матрицирования из множества исходных сигналов одноканальный или двухканальный сигналы. В декодере пространственные параметры используются для восстановления исходного множества сигналов. Для передачи пространственных параметров необходима скорость цифрового потока в пределах 3... 32 кбит/с.

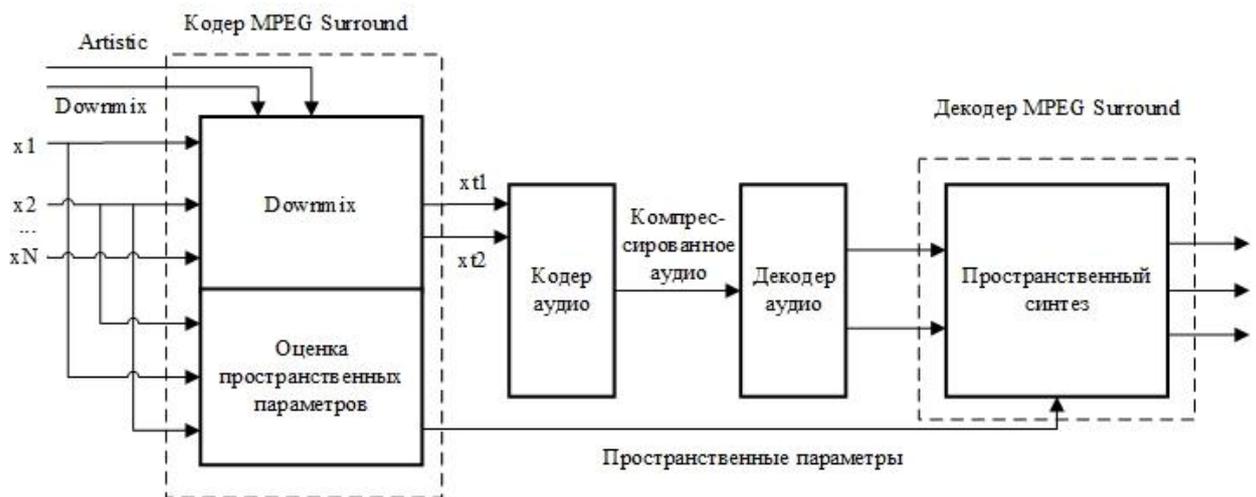


Рис.46. Укрупненная структурная схема кодера, реализующего алгоритм MPEG D Surround

Каждый из входных сигналов поступает на банк анализирующих PQMF-фильтров (рис.47) для разделения сигналов на достаточно узкие полосы частот, изменяющиеся по ширине. Это обычно 86 Гц на частотах не превышающих 344 Гц, 172 Гц на частотах от 344 Гц до 1034 Гц и 344 Гц на более высоких частотах. В общей сложности имеем 69 субполос для выделения пространственных параметров. При этом не должны появляться слышимые искажения в местах наложения субполосных сигналов при их объединении в банке синтезирующих квадратурных полифазных зеркальных фильтров декодера.

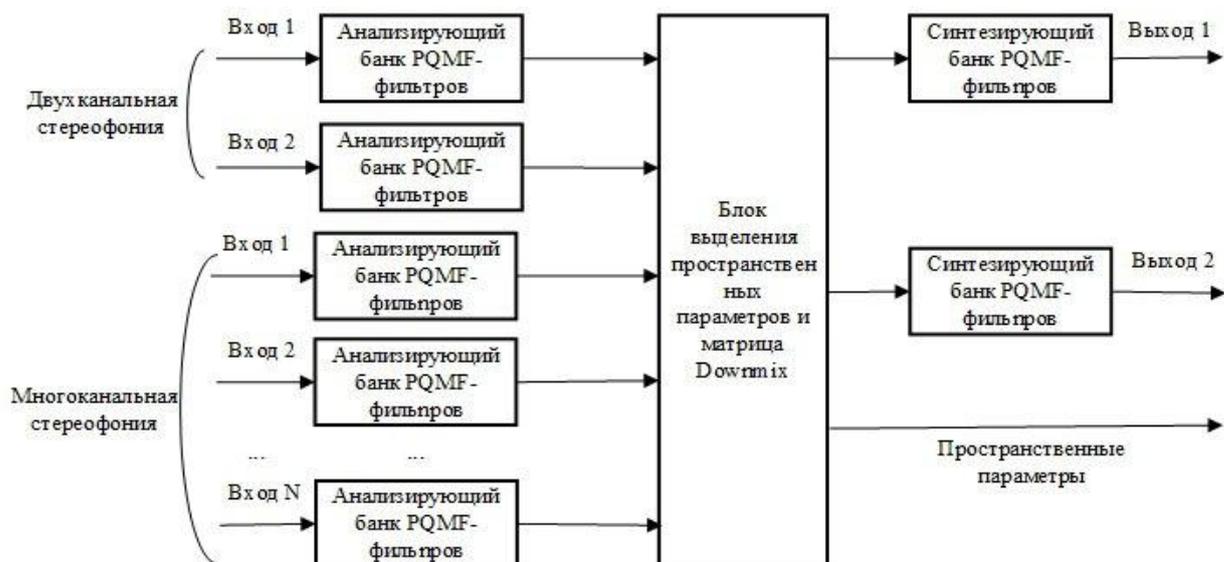


Рис.47. Структурная схема кодера MPEG D Surround

В стандарте MPEG D Surround используется неравномерное квантование: при малых значениях пространственных параметров шаг квантования мал, при больших - намного больше. Помимо выделения пространственных параметров, с помощью матрицирования (Downmix) выполняется уменьшение размерности исходного многоканального сигнала до обычной стереофонии или монофонического сигнала. При анализе многоканального сигнала оцениваются три основных пространственных параметра: различие по уровню, величина коэффициента корреляции и разность фаз для каждой пары анализируемых субполосных сигналов. Их использование в блоке пространственного синтеза позволяет восстановить исходный многоканальный сигнал, [34].

Структурная схема декодера MPEG D Surround представлена на рис.48. В декодере системы выполняются обратные преобразования.

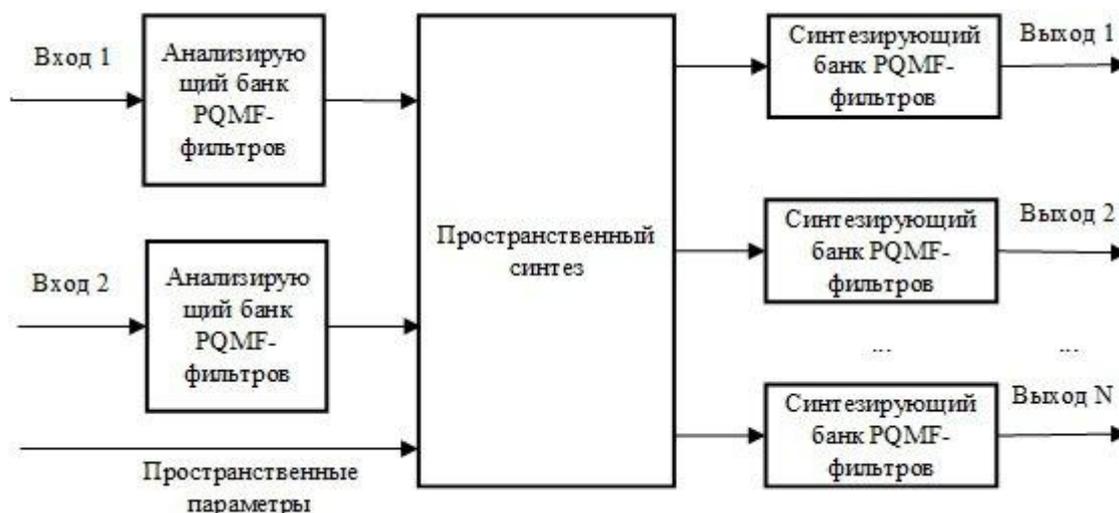


Рис.48. Структурная схема декодера MPEG D Surround

Результаты тестирования кодека уже были представлены ранее отдельно для речевых (а) и музыкальных (б) сигналов [рис.22](#), а шкала оценки - в [табл.11](#). На [рис.49](#) показано размещение цифровых данных в аудиофрейме при использовании различных алгоритмов компрессии и их сочетаний.

Для защиты цифровых данных аудиосуперфрейма в кодере HE-AACv.2 используется неравная защита отдельных его частей от ошибок. При этом наиболее защищенная часть (высокая защита от ошибок) и наименее защищенная часть (нормальная защита от ошибок) разделены каждая на две части для передачи соответственно в двух логических фреймах ([рис.50](#)). В кодере xHE-AAC неравная защита от ошибок не используется.

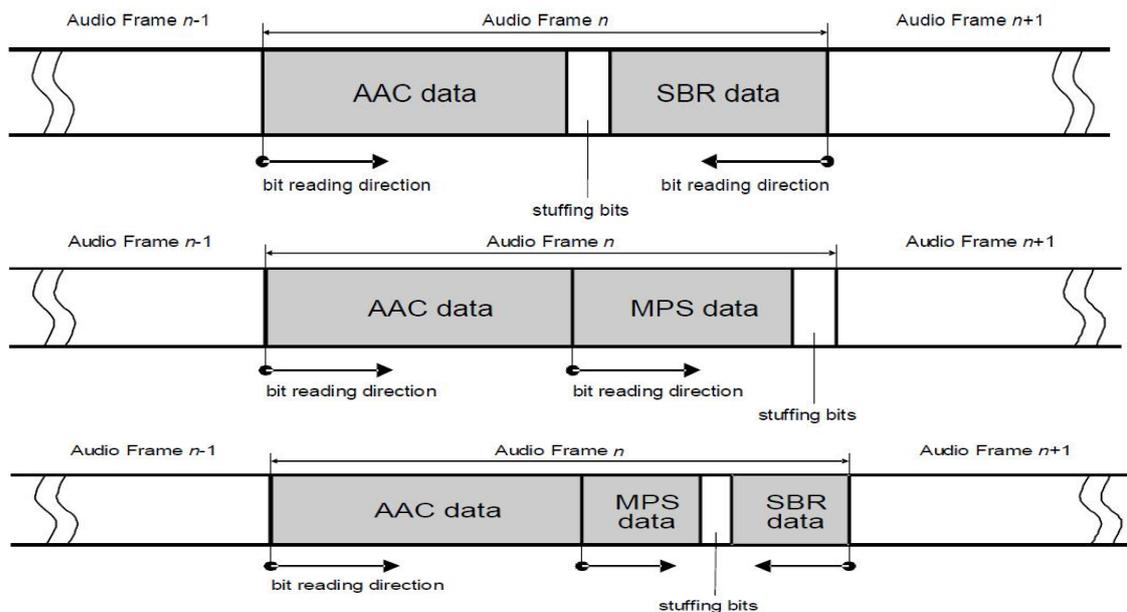


Рис.49. Размещение цифровых данных внутри аудиофрейма при применении алгоритмов компрессии: а- AAC+SBR; б- AAC+MPS; в- AAC+MPS+SBR. Здесь же стрелками показаны и направления считывания цифровых данных

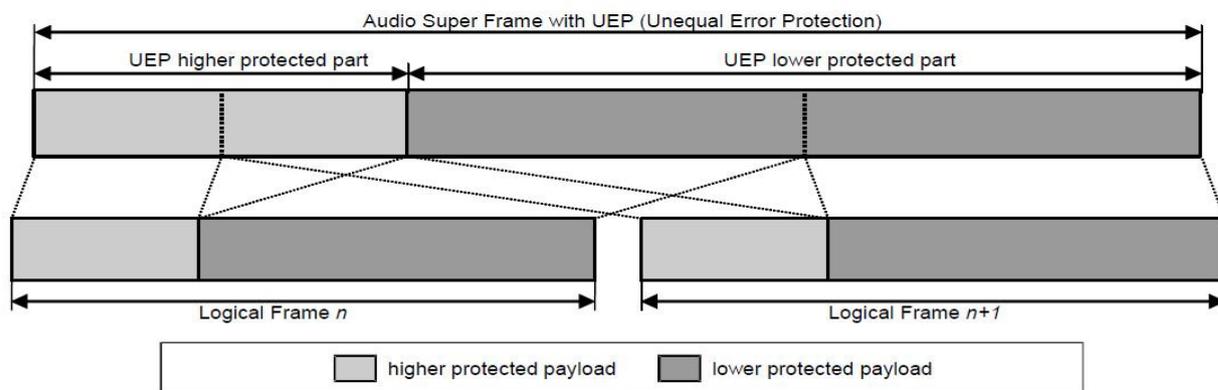


Рис. 50. Неравная защита от ошибок отдельных частей цифровых данных аудиосуперфрейма и их размещение в логических фреймах (режим работы E)

Несколько подробнее о применении кодера xHE-AAC в системе DRM+. Структура данных кодера xHE-AAC приведена на **рис.51**:

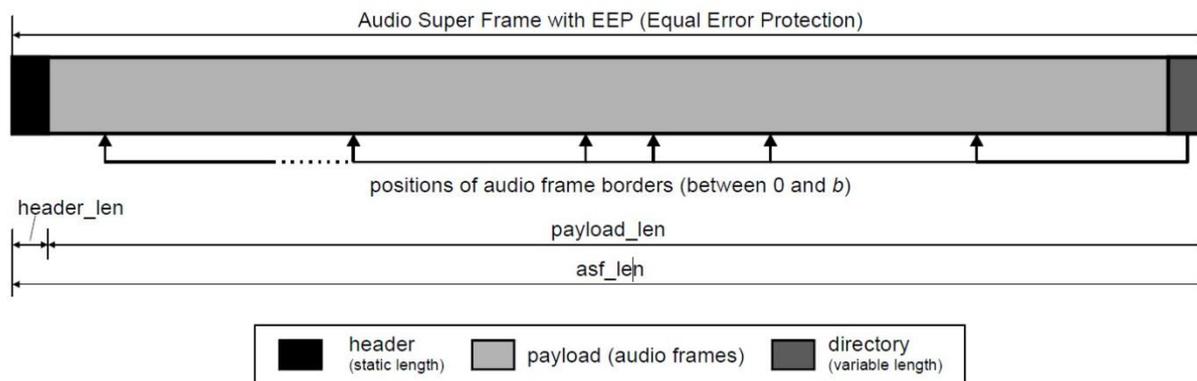


Рис. 51. Структура аудиофрейма кодера xHE-AAC

- заголовок (header) имеет постоянную длину, содержит информацию о числе аудиофреймов в аудиосуперфрейме, а также данные заполнения;
- основная часть (Payload) - цифровые данные аудиофреймов;
- в конце размещено поле данных directory – содержит информацию о границах расположения аудиофреймов, определяет их длину, имеет переменную длину; длина аудиофрейма может варьироваться в пределах имеющегося резервуара битов.

Длина аудиосуперфрейма кодера xHE-AAC фиксирована, цифровые данные имеют равную (EEP) защиту от ошибок, он размещается в двух логических фреймах.

Каждый аудиофрейм (af1, af2,...,afn) кодера xHE-AAC может иметь переменную длину в пределах имеющегося резервуара битов (рис.////). Он содержит поле доступа USAC и звуковые данные, защищенные CRC-кодом. Подробнее о деталях структуры цифровых данных кодера xHE-AAC можно прочитать в самом стандарте. Он, ко всему прочему, включает и механизм интерполяции при наличии ошибки.

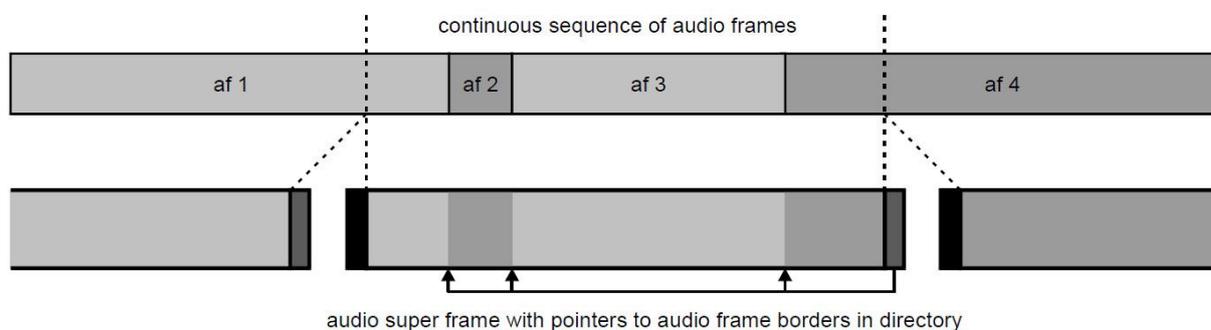


Рис. 52. Пример размещения аудиофреймов разной длины внутри аудиосуперфрейма

Звуковые данные кодера HE-AAC на уровне аудиофрейма защищены CRC-кодом от ошибок (**рис.53**). В случае неравной защиты от ошибок для

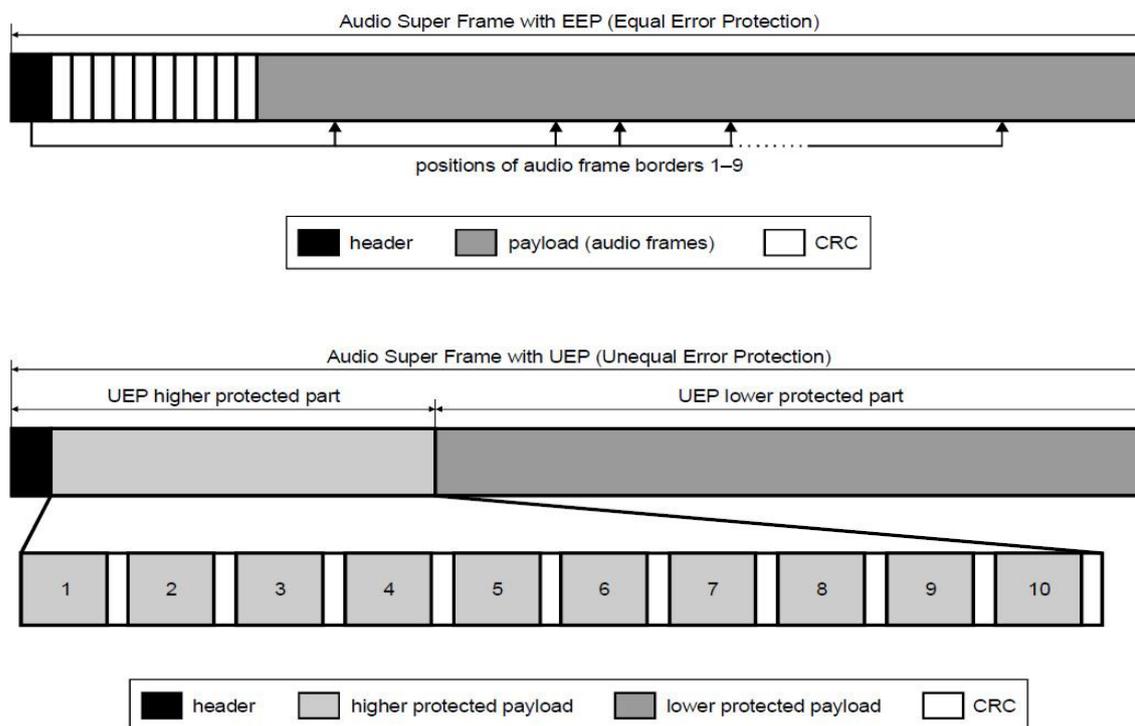


Рис.53. Пример построения аудиосуперфрейма кодера HE-AAC при равной (верх) и неравной (низ) защите от ошибок для аудиосуперфрейма, содержащего 10 аудиофреймов

наиболее чувствительной части цифровых данных аудиофрейма используется высокая защита от ошибок, а для наименее чувствительной части - нормальная защита от ошибок.

4.3.Сервер мультимедийных данных и мультиплексор системы DRM

Сервер мультимедийных данных (MultimediaDataServer) контент-сервера поддерживает все стандартизированные приложения, а также приложения отдельных телекомпаний. Он включает в себя сбор данных, импорт, преобразование, проверку, обработку и кодирование.

Стандартные приложения DRM включают в себя текстовые сообщения (с кодировкой UTF-8 и команды управления), сервис текстовой информации Journaline®, EPG (Electronic Programme Guide), PRBS, TMC (TrafficMessageChannel). Открытые интерфейсы позволяют передачу любых нестандартных приложений на различных уровнях, включая протоколы передачи мультимедийных объектов (MOT), IP-вставки, блоки данных DRM, синхронные и асинхронные вставки потока. Для удобного использования текстовая информация имеет иерархическую структуру. Пользователь может легко получить доступ к темам, которые ему интересны, с помощью меню. Это могут быть, например, новости, информация о пробках на дороге, текст воспроизводимой песни или информация о ее исполнителе. Службу Journaline поддерживает различные приемники: мобильные устройства или цифровые радиоприемники с экранами, автомобильные приемники. Journaline®

поддерживается многочисленными вещателями Европы, в том числе ROCK-ANTENNE, DeutschlandRadio, AbsolutRadio, ARD, RadioVaticana и многими другими.

В состав интерфейсов обмена данными входят следующие: импорт RSS/Atom (срабатывание автоматическое по расписанию или вручную), Web-интерфейсы для быстрого редактирования с использованием стандартного Web-браузера; защищенные соединения для безопасного и надежного импорта данных, ограниченного определенными источниками данных: ftps, ftps-mirroring.

DRM-мультиплексор (MultiplexGenerator) контент-сервера управляет обширными возможностями сигнализации системы DRM+. Он формирует цифровой мультиплекс в соответствии со стандартами ETSI TS 102 820 (multiplex distribution interface) и ETSI TS 102 821 (distribution and communications protocol), [36], [37]. Данные могут быть переданы на любое количество модуляторов через последовательный порт RS-232 или одноадресное/многоадресное IP соединение. С помощью веб-интерфейса возможно контролировать содержание передаваемого контента в режиме реального времени.

Выходной сигнал контент-сервера (MDI/DCP) может быть подан на любое количество DRM-модуляторов. Содержание выходного сигнала может контролироваться в режиме реального времени с помощью Web-интерфейса. Предоставляется возможность записи мультиплексированного сигнала MDI/DCP и сигнала каждого отдельного цифрового канала в файл. Параллельно может быть определено неограниченное количество конфигураций мультиплексов. Функция автоматического планирования вещания позволяет вручную или автоматически по расписанию активировать конфигурации мультиплекса, а также выполнять динамическую реконфигурацию мультиплекса на основе календаря вещания и недельных расписаний.

В состав интерфейсов обмена данными входят следующие: импорт RSS/Atom (срабатывание автоматически вручную или по расписанию), веб-интерфейсы для быстрого редактирования данных с использованием стандартного веб-браузера, защищенные соединения для безопасного и надежного импорта данных: ftps, ftps-mirroring, [35].

В контент-сервере для автоматизации формирования, мультиплексирования и конфигурации основных цифровых потоков используется специальное программное обеспечение.

4.4. Цифровые потоки системы DRM+

Канал MSC. В канале MSC передается информация, поступающая от поставщиков программ радиовещания, он может содержать от одной до четырех программ радиовещания или просто цифровые данные. Многопрограммный цифровой поток – результат объединения (мультиплексирования) цифровых потоков звуковых программ. Канал MSC может содержать от одного до четырех цифровых потоков.

Цифровой поток, в котором передается сжатый звуковой сигнал (звуковой цифровой поток), может также содержать текстовую информацию.

Каждый цифровой поток, в свою очередь, разделен на логические фреймы (кадры), имеющие длительность 100 мс (DRM, режим работы E). Два таких логических аудиофрейма передают один аудиосуперфрейм.

Цифровые данные логического фрейма могут иметь равную или неравную защиту от ошибок. При неравной защите от ошибок логический фрейм состоит из двух частей, каждая из которых имеет свой уровень защиты от ошибок: повышенный или нормальный. Из логических фреймов всех цифровых потоков формируются фреймы мультиплексированного потока, длительность каждого из которых равна 200 мс (режим E). Эти фреймы, пройдя обработку в блоках рандомизации (рассеивания энергии), поступают на вход канального кодера MSC.

Итак, канал MCS представляет последовательность фреймов мультиплексированного цифрового потока. Фреймы мультиплексированного цифрового потока формируются из логических фреймов и содержат части с повышенной и нормальной защитой от ошибок.

Канал FAC. Канал быстрого доступа (FAC) используется для передачи информации быстрого доступа, позволяющей приемнику без задержек находить требуемый радиоканал DRM. Он содержит информацию о параметрах радиоканала DRM (например, о полосе частот, занимаемой радиоканалом, количестве и типах программ, которые передаются в данном канале, видах модуляции в каналах MSC и SDC). Канал FAC содержит также информацию о программах, подготовленных соответствующими службами, которые передаются в звуковых (речевых) каналах или каналах данных системы DRM. Это позволяет владельцу DRM-приемника либо декодировать этот мультиплексированный поток, либо продолжить перестройку приемника по частоте.

Информация канала FAC передается в виде FAC-блоков. Эти блоки затем используются при построении фреймов передачи и суперфреймов передачи, рассмотренных ниже. Один FAC-блок содержит информацию о параметрах программы, подготовленной одной службой.

Если в мультиплексированном потоке содержатся программы нескольких служб, то для их описания требуется несколько FAC-блоков.

Канал SDC. В канале SDC передается информация о способах декодирования данных канала MSC, о поиске альтернативных источников одной и той же информации и идентификации программ, входящих в мультиплексированный поток.

Информация SDC формируется в виде блоков (SDC-блоки); эти блоки используются при построении суперфреймов передачи. Поле данных SDC-блока служит для передачи данных канала SDC. Его длина зависит от режима устойчивости радиоканала, вида QAM-модуляции SDC и ширины полосы частот, занимаемых радиоканалом DRM. 16-битовое кодовое слово CRC предназначено для контроля ошибок в блоке SDC.

4.5. Рандомизация, канальное кодирование и модуляция в системе DRM+

Укрупненная структурная схема для выполнения этих процедур представлена на [рис.54](#).



[Рис.54](#). Обобщенная схема рандомизации, канального кодирования, модуляции и перемежения данных в каналах MSC, FAC и SDC

Как уже было сказано ранее, в системе DRM+ для защиты информации применяются методы равной (EER – Equal Error Protection) и неравной защиты от ошибок (UEP – Unequal Error Protection). При равной защите от ошибок используется помехоустойчивый код с одной и той же избыточностью для защиты всей информации в канале. При неравной защите от ошибок для кодирования наиболее чувствительной к ошибкам части информации применяются коды с большей избыточностью и большей исправляющей способностью (информация с высоким уровнем защиты). Для кодирования остальной части информации применяются коды с меньшей избыточностью (информация с нормальным уровнем защиты).

В канале MSC могут применяться оба метода: UEP и EER.

В каналах FAC и SDC применяется метод защиты от ошибок EER.

Рандомизация цифровых потоков MSC, FAC и SDC. Процедура рандомизации (рассеяния энергии) обязательна для обработки цифрового потока. Она необходима для равномерного распределения энергии в полосе частот радиоканала, что достигается при псевдослучайном распределении нулей и единиц. Информационные символы, поступающие на входы устройств рассеивания энергии, складываются по модулю 2 с символами псевдослучайной последовательности битов, поступающими от генератора PRBS (Pseudo-RandomBinarySequence). В приемнике будет выполняться обратная процедура. Данная процедура выполняется вне зависимости от скремблирования, выполняемого в устройствах условного доступа. Генератор PRBS выполнен по схеме, примененной в системе DAB.

Канальное кодирование. При канальном кодировании ([рис.54](#)) информация, передаваемая в каналах MSC, FAC и SDC, обрабатывается независимо. Обработке подвергаются кадры мультимплексированного потока в канале MSC, блоки FAC и SDC.

Цель канального кодирования – защита информации от одиночных ошибок.

Система DRM+ обеспечивает широкие возможности выбора приемлемого уровня защиты информации в зависимости от свойств каналов связи, имеет несколько уровней защиты информации.

Для канального кодирования в системе DRM+ применяются перфорированные свёрточные коды, полученные из одного базового кода. Скорость базового кода -это отношение количества битов, поступающих на вход сверточного кодера в единицу времени, к количеству битов, формируемых на выходе этого кодера в течение такого же интервала времени.

Ниже в качестве примера приведены уровни защиты информации для цифровых потоков MSC, SDCи FAC (табл.16) и соответствующие им скорости кода для каждого из применяемых видов модуляции при работе системы в режиме E.

Подробнее процедура канального кодирования и структура сверточного кодера изложена в [20].

Заметим, что для всего примененного в данной системе семейства сверточных кодов требуется только один декодер, использующий алгоритм максимального правдоподобия (алгоритм декодирования Витерби).

Таблица 16

Уровни защиты информации и скорость кода в канале MSC
(режим работы E, модуляция 4-QAM и 16-QAM)

Уровень защиты	Канал MSC		Канал SDC	Канал FAC
	4-QAM	16-QAM	4-QAM	4-QAM
0	0,25	0,33	0,25	0,25
1	0,33	0,41	0,5	-
2	0,4	0,5	-	-
3	0,5	0,62	-	-

Для защиты от групповых (пакетных) ошибок применяется временное перемежение битов, то есть изменение порядка следования битов по известным на передающей и приемной сторонах системы DRM алгоритмам.

Квадратурная амплитудная модуляция. В системе DRM после канального кодирования и временного перемежения битов производится преобразование цифровых данных в так называемые, «QAM-ячейки» (QAM – Quadrature Amplitude Modulation, квадратурная амплитудная модуляция). Кодовые комбинации, определяющие амплитуду и начальную фазу несущего колебания и состоящие из 2 или 4 битов, в системе DRM+ называются QAM-ячейками.

В канале MSC при работе в режиме E может применяться модуляция либо 4-QAM (рис.5,а), либо 16-QAM (рис.5,б), а также иерархическая модуляция: 4-QAM поверх 4-QAM (рис.7). Напомним, что при модуляции QAMодновременно меняются как фаза, так и амплитуда несущего колебания. Модуляция 4-QAM эквивалента модуляции 4-PSK. При иерархической модуляции исходный цифровой поток разделяется на две части: цифровой поток высшего приоритета HPи цифровой поток низшего приоритетаLP. В начале несущая частота модулируется потоком высшего приоритета, а затем поверх происходит модуляция цифровым потоком низшего приоритета. При этом помехозащищённость цифрового потока HPнесколько ухудшается (если бы

поверх не накладывалась модуляция 4-QAM потоком LP), а помехозащищенность потока LP показывается выше по сравнению с модуляцией 16-QAM.

В канале SDC используется модуляция 4-QAM. Модуляция типа 4-QAM имеет более высокую устойчивость к ошибкам. Применяется равная защита от ошибок EEP, то есть неизменная скорость сверточного кода для всей передаваемой информации. Сигнальное созвездие следует выбирать с учетом параметров MSC таким образом, чтобы обеспечить большую устойчивость данных канала SDC, по сравнению с данными канала MSC.

Для передачи информации в канале FAC применяется модуляция несущих частот 4-QAM. Используется равная защита от ошибок EEP.

Применяемые виды QAM-модуляции и канального кодирования обеспечивают высокую гибкость возможных скоростей цифровых потоков (рис.55).

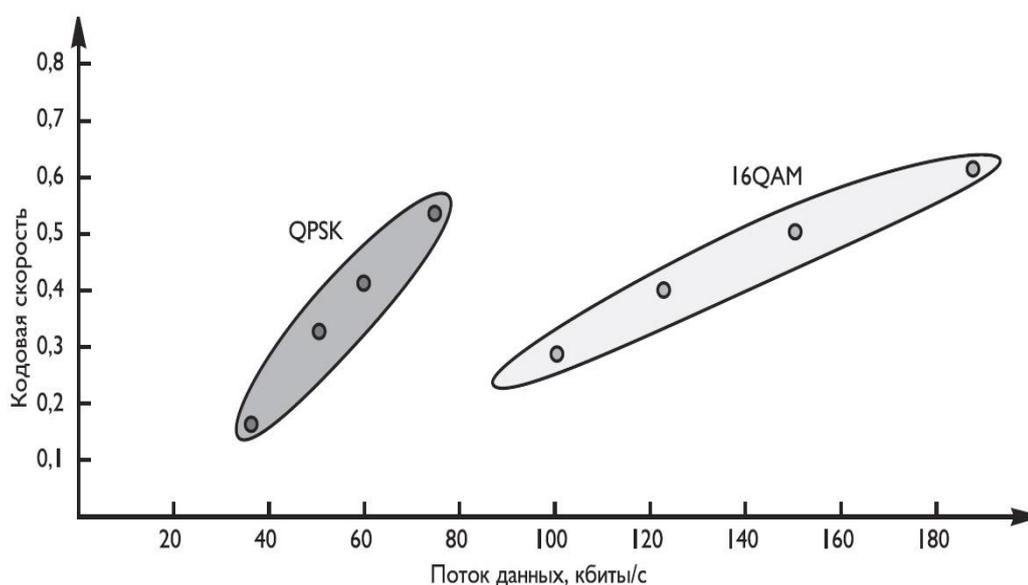


Рис.55. Зависимость между видом применяемой модуляции и выбранной скоростью сверточного кода и суммарной скоростью цифрового потока после канального кодирования для режима устойчивости E

Перемежение QAM-ячеек в канале MSC. Перемежение QAM-ячеек в канале MSC применяется после многоуровневого канального кодирования с возможностью выбора малой или большой глубины перемежения (глубина перемежения связана с длительностью процесса перемежения). Малая или большая глубина перемежения (обозначим это как «короткое» и «длинное» перемежение) выбирается в соответствии с ожидаемыми условиями распространения радиосигнала DRM. Базовые параметры перемежения адаптированы к размеру фрейма (кадра) мультиплексированного потока. Для радиоканалов с умеренными замираниями короткое перемежение обеспечивает приемлемые условия для правильной работы декодера в приемнике. При сложных условиях распространения радиосигналов DRM, то есть существенных замираниях.

При работе в режиме E допустимо только «длинное» перемежение.

Перемежение QAM-ячеек в каналах FAC и SDC не производится с целью исключения временных задержек при передаче системной информации. Тем не менее, эта информация имеет достаточно высокую степень защиты от ошибок.

Построение OFDM-символов. После перемежения QAM-ячейки преобразуются в OFDM-символы. Каждый OFDM-символ передается за время T_s и представляет собой множество, состоящее из несущих частот, распределенных в заданном частотном диапазоне (полосе частот радиоканала) с равномерным шагом по частоте, при этом каждая такая несущая частота имеет свою амплитуду и свою начальную фазу, определяемую соответствующей ей QAM-ячейкой. Иными словами, OFDM-символ – это элементарный передаваемый сигнал для такого интервала времени, в течение которого значения амплитуд и начальных фаз всех несущих частот остаются неизменными. Эти параметрам несущих частот соответствуют комбинации битов QAM-ячеек, действительных для данного интервала времени. Таким образом, полезная часть OFDM-символа T_i представляет собой сумму колебаний модулированных несущих (рис.11).

Перед полезной частью OFDM-символа размещается защитный интервал. Итак, общая длительность символа OFDM представляет собой сумму длительностей полезной (используемой приемником) части T_i и защитного интервала T_g . Несущие ортогональны. Расстояние между соседними несущими частотами OFDM-сигнала равны $1/T_i$. В этом случае несущие ортогональны и продукты модуляции могут быть корректно выделены в приемнике. В защитном интервале размещается фрагмент полезной части символа, перенесенный из правой части OFDM-символа, равной по длительности защитному интервалу. При этом задержанные копии OFDM-символа (вследствие многолучевости) всегда имеют целое число периодов внутри интервала БПФ, пока задержка меньше по длительности защитного интервала. Вследствие этого многолучевые сигналы с задержкой меньшей длительности защитного интервала не вызывают интерференции между поднесущими частотами OFDM-символа. Итак, введение защитных интервалов в OFDM-символы позволяет бороться с межсимвольной интерференцией в радиоканалах с многолучевым распространением сигналов и подверженных эффекту Доплера.

Спектр сигнала OFDM представлен также на рис.11.

Из определенного количества OFDM-символов формируются фреймы (кадры) передачи. Первый OFDM-символ каждого фрейма передачи содержит сигнал опорного времени. Длительность фрейма передачи в режиме E составляет 100 мс. Из четырех таких фреймов передачи формируется суперфрейм (сверхкадр) передачи. Длительность суперфрейма передачи при работе в режиме E составляет 400 мс.

В кадре передачи OFDM-символы нумеруются от 0 до N_S-1 . Все символы содержат цифровые данные и опорную информацию. При многолучевом распространении и частотно-селективных замираниях в радиоканалах DRM

часть несущих, входящих в OFDM-сигнал, может быть ослаблена или вообще утрачена. При этом, однако, информация, содержащаяся в таких несущих, во многих случаях может быть восстановлена по оставшимся неповрежденными несущим за счет помехоустойчивого кодирования, перемежения битов в фреймах мультиплексированного потока, FAC- и SDC-блоках, а также перемежения QAM-ячеек в канале MSC. В случае невозможности восстановить информацию в OFDM-символе или ряде символов применяется маскировка ошибок. Такие технические решения обуславливают высокую надежность и устойчивость приема сигналов в системе DRM.

Радиосигнал в системе DRM описывается следующим выражением [7, 20]:

$$x(t) = \operatorname{Re} \left\{ e^{j2\pi f_R t} \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{N_s-1} \sum_{k=K_{\min}}^{K_{\max}} c_{r,s,k} \psi_{r,s,k}(t)_k \right\} \quad (37)$$

где:

$$\psi_{r,s,k}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi \left(\frac{k}{T_u} \right) (t - T_g - sT_s - N_s r T_s)} & \text{при } (s + N_s r)T_s \leq t \leq (s + N_s r + 1)T_s \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (38)$$

и

N_s – количество OFDM-символов во фрейме передачи;
 k – обозначение номера несущей (от K_{\min} до K_{\max});
 s – обозначение номера OFDM-символа (от 0 до $N_s - 1$);
 r – обозначение номера фрейма передачи (от 0 до \mathbb{N} , где \mathbb{N} – неопределенность);
 T_g – длительность защитного интервала OFDM-символа;
 T_u – длительность полезной части OFDM-символа;
 T_s – длительность OFDM-символа;
 K – количество несущих частот в сигнале DRM ($K_{\min} \leq k \leq K_{\max}$);
 f_R – опорная частота радиосигнала DRM;
 $c_{r,s,k}$ – значение комплексной QAM-ячейки для несущей k в символе s кадра r .

Значения $c_{r,s,k}$ зависят от типа ячеек. Для OFDM-ячеек данных и ячеек управления (в каналах MSC, SDC и FAC) $c_{r,s,k} = z$, где z – это точка сигнального созвездия для каждой QAM-ячейки (комплексный символ модуляции).

Ячейки OFDM-символов. Каждый OFDM-символ может быть рассмотрен как разделенный по частоте на OFDM-ячейки. OFDM-ячейка представляет собой отрезок модулированной несущей частоты. Ее параметры модуляции не меняются в течение времени передачи одного OFDM-символа. Можно сказать, что каждой OFDM-ячейке соответствует QAM-ячейка, которая определяет амплитуду и начальную фазу данной несущей частоты.

Фрейм передачи содержит следующие виды OFDM-ячеек: пилот-ячейки; ячейки управления; ячейки данных.

Пилот-ячейки передают заранее известные на приемной стороне значения частот, фаз и амплитуд поднесущих частот и служат для кадровой, частотной и временной синхронизации, оценки характеристик канала передачи и выбора режима устойчивости. Они разделяются на три типа: ячейки опорных частот, ячейки опорного времени и ячейки опорного усиления. Расположение этих ячеек в частотно-временной области OFDM-символа, их параметры даны в соответствующих таблицах стандарта для каждого режима работы.

Ячейки управления. Имеется два типа ячеек управления:

-ячейки канала быстрого доступа (FAC), которые размещаются в каждом фрейме передачи; они обеспечивают быструю передачу информации, которая необходима DRM-приемнику для демодуляции сигнала;

-ячейки канала описания пользовательской информации (SDC). Они повторяются в каждом суперфрейме передачи, содержат информацию, которая описывает имеющиеся в наличии звуковые программы, конфигурацию мультиплексирования в канале MSC и др. Ячейки канала SDC используются также для автоматического переключения приемника на альтернативный источник той же программы в случае ухудшения параметров принимаемого сигнала (AFS).

Ячейки данных. К ним относятся OFDM-ячейки, которые не относятся к пилот-ячейкам и ячейкам управления, они передают звуковых программ или данные канала MSC, т.е. передается основная информация системы DRM+.

Расположение OFDM-ячеек каналов MSC, FAC и SDC в суперфрейме передачи показано на рис.56и 57, а также в табл.17 .

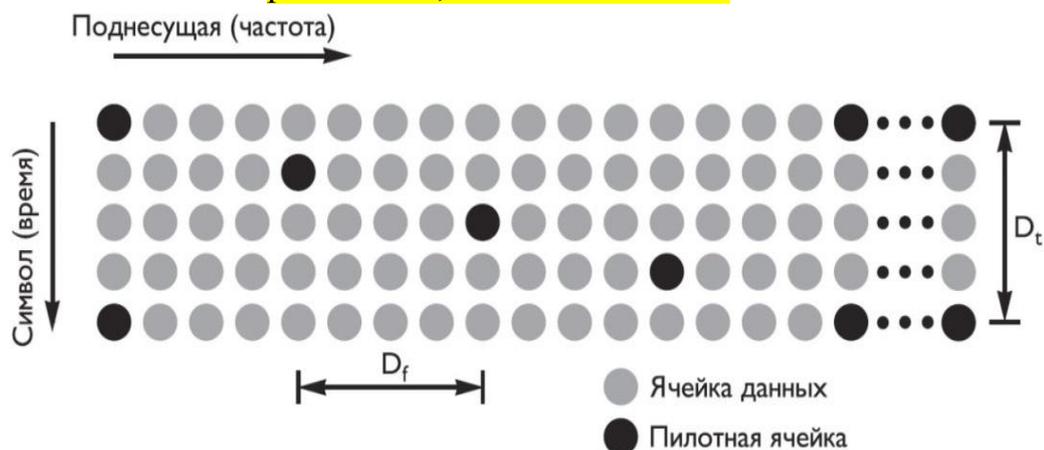


Рис.56. Пример размещения OFDM-ячеек по времени и по частоте в OFDM-символе (ячейки управления не показаны)

Таблица 17

Распределение OFDM-ячеек в суперфрейме передачи

Наименование ячейки OFDM-символа	Номер фрейма передачи в суперфрейме передачи			
	0	1	2	3
MSC-ячейки	6738	7715	7715	7674
SDC-ячейки	936	0	0	0

ФАС-ячейки	244	244	244	244
Пилот-ячейки	602	561	561	602

Примечание: длительность фрейма передачи составляет 100 мс, длительность суперфрейма– 400 мс; число OFDM-символов в суперфрейме передачи равно 40.

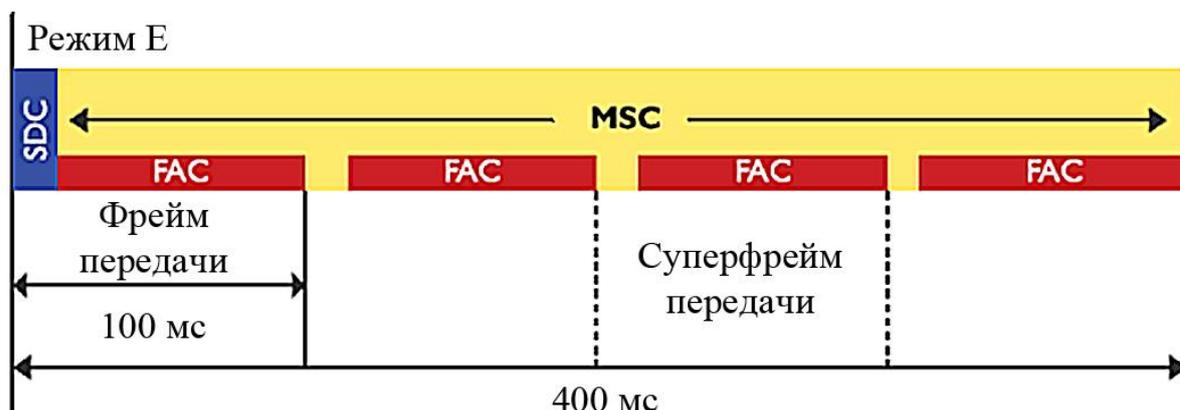
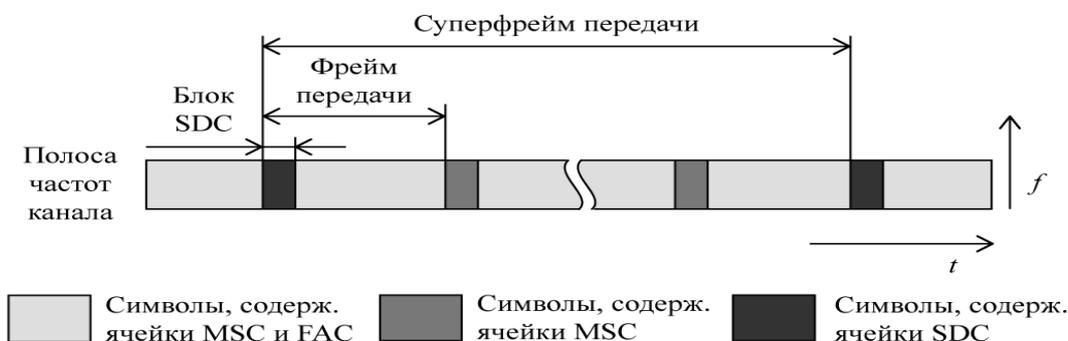


Рис.57. Частотно-временное размещение информации MSC, FAC и SDC в суперфрейме передачи.

4.6. Радиоканал и условия радиоприема в диапазоне ОВЧ

Распространение радиоволн в диапазоне ОВЧ характеризуется частотно-зависимым затуханием, многолучевостью, рассеянием, эффектом Доплера при мобильном радиоприеме. Вследствие этого в точке радиоприема сигнал имеет достаточно сложную структуру, непрерывно изменяется во времени и, как показали многочисленные исследования, при моделировании может быть представлен выражением [11]:

$$s(t) = \sum_{k=1}^N \rho_k \cdot c_k(t) \cdot e(t - \tau_k), \quad (39)$$

где N – число лучей в точке радиоприема с мощностью каждого ρ_k и задержкой относительно прямой волны τ_k . Изменяющиеся во времени весо-

вые коэффициенты задержки в линии передачи $c_k(t)$ представляют собой гауссовские случайные процессы с нулевым средним, с амплитудами, распределенными по законам Релея или Райса, и равномерно распределенными фазами. Характеристики каналов диапазона ОВЧ, относящиеся к системе DRM+, представлены в табл. 18 для ряда профилей, каждый из которых имеет свое число приходящих лучей с их задержками и доплеровскими сдвигами часто

Наличие защитного интервала перед каждым OFDM-символом позволяет полностью избежать межсимвольной интерференции. При определении параметров OFDM-символов учитываются следующие требования [11,25]:

– величина самой длительной задержки волны должна быть меньше величины защитного интервала; при выборе значения $T_G = 250$ мкс это требование выполняется для всех профилей каналов, за исключением профиля 6 табл. 18, но наиболее поздние эхо-сигналы водночастотной сети SFN имеют пренебрежимо малую мощность;

Таблица 18

Профили каналов					
№	Название профиля	Скорость v [км/ч]	Макс. доплеровская частота * $f_{D,max}$ [Гц]	Кол-во лучей N	Максимальная задержка τ_{max} [мкс]
1	AWGN (аддитивный белый гауссов шум)	0	0	1	0
2	Городская местность	2 / 60	0,2 / 5,6	9	3
3	Сельская местность	150	13,9	9	3
4	Труднопроходимая местность	60	5,6	9	16
5	Холмистая местность	100	9,3	12	82,7
6	SFN (одночастотная сеть)	150	13,9	7	600

* при центральной частоте несущих 100 МГц

– величина защитного интервала должна быть значительно меньше, чем длительность полезной части OFDM-символа; при выборе значения $T_U = 2,25$ мс потери мощности, обусловленные защитным интервалом, составляют менее 0,5 дБ;

– приближенный подсчет показывает, что расстояние между поднесущими частотами OFDM-символа должно быть не менее чем в 10 раз больше, чем максимальные доплеровские сдвиги частоты; расстояние между поднесущими частотами $\Delta F = 444$ Гц позволяет достичь очень высоких скоростей при мобильном приеме без значительного ухудшения отношения сигнал/шум.

Спектральная эффективность системы DRM+ на примере для нескольких значений скорости кода, двух видов модуляции поднесущих частоты отношения сигнал/шум показана на рис. 58. Они теоретически показывают максимальную скорость передачи данных при вероятности появления ошибочных битов (BER), равной 10^{-4} принятого для систем радиовеща-

ния. Заметим, что результаты моделирования для канала с белым шумом (AWGN) и для канала при труднопроходимой местности (RA) показывают, что:

- производительность канала RA близка к теоретической производительности релейского канала и, что модель канала AWGN даже превосходит эти пределы;

- очевидно наличие широчайшего диапазона возможных скоростей передачи данных в зависимости от порогового значения отношения сигнал/шум.

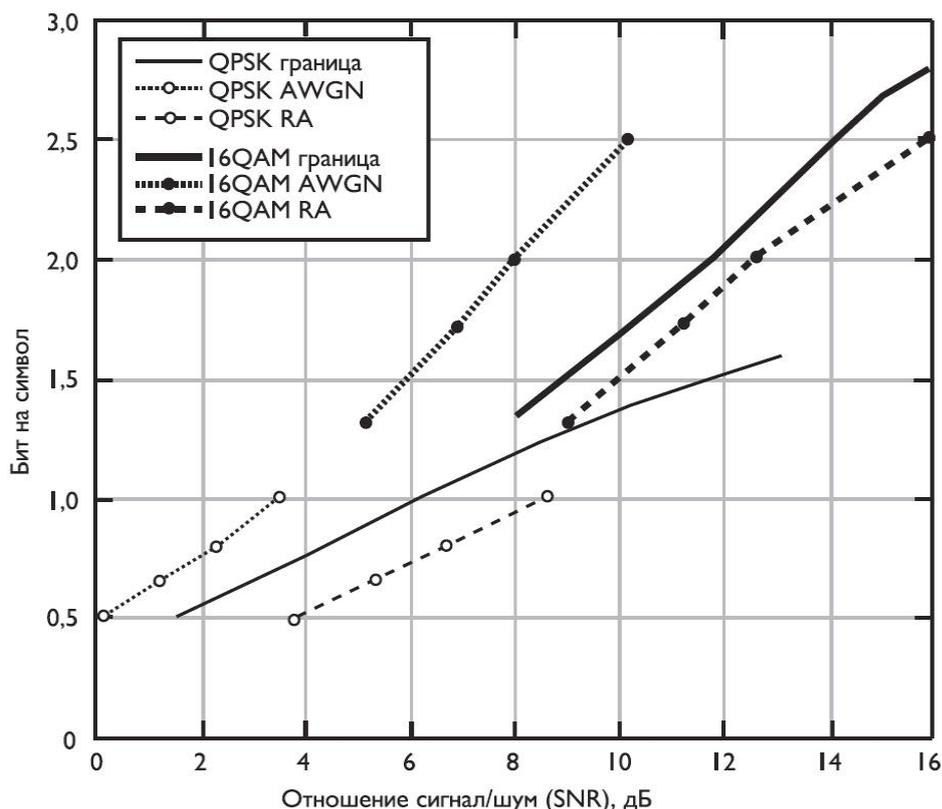


Рис.58. Спектральная эффективность и отношение сигнал/шум для системы DRM+ для разных видов модуляции поднесущих частот, значений скорости кода и условий радиоприема: AWGN – канал при наличии белого шума, RA-трудно проходимая местность; модуляция QPSK эквивалента модуляции 4-QAM

5. Спектральные маски излучения и защитные отношения

Номинальная ширина спектра в системе DRM+ составляет 100 кГц, реальная – около 96 кГц (рис. 59).

Сигналы системы DRM+ могут быть переданы на свободных участках ОВЧ-ЧМ (FM) диапазонов одновременно с сигналами аналогового радиовещания. Пример такой совместной передачи представлен на рис. 60. Здесь

слева показаны спектры сигналов аналогового и цифрового радиовещания и приняты следующие обозначения: ΔP – разность уровней мощности сигналов FM-радиовещания и сигнала DRM+; Δf – разность несущих частот аналогового и цифрового радиовещания. Рекомендуемая величина разнеса центральных несущих – не менее 150 кГц, при этом значение ΔP должно быть не менее 20 дБ [38, 39] для нормального радиоприема. На рис. 60 справа приведены требуемые для нормального радиоприема значения $\Delta P_{\text{в}}$ функции от разнеса несущих частот радиостанций.

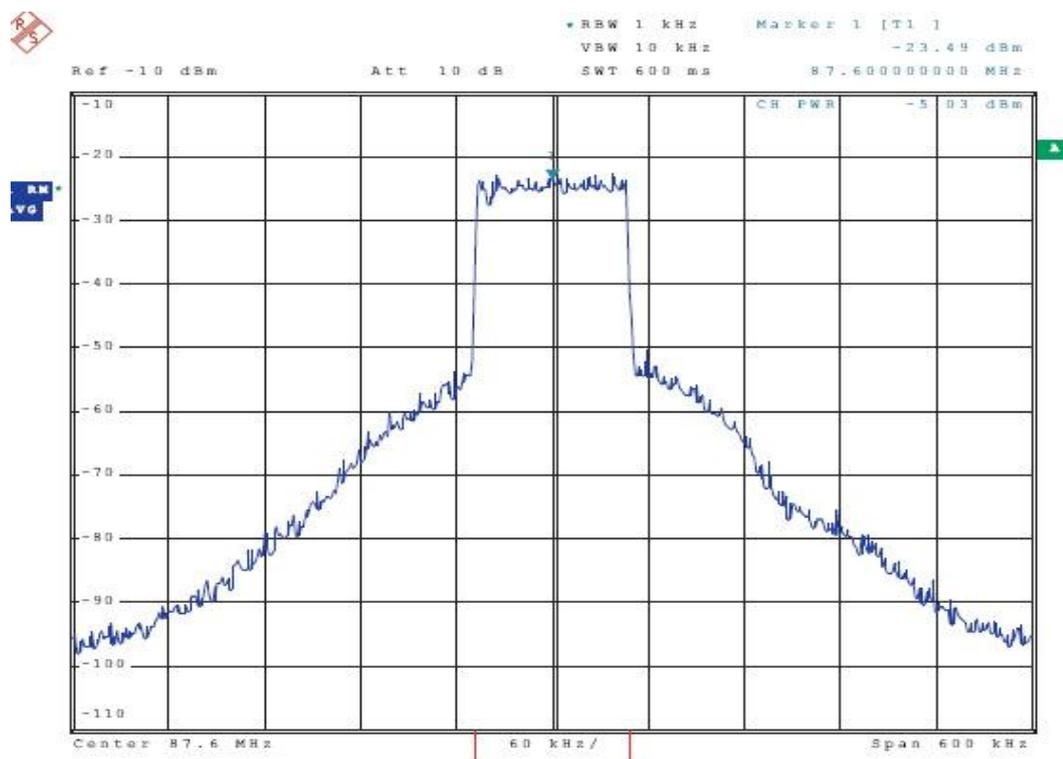


Рис.59. Реальный спектр сигнала системы DRM+ (по данным [38, 39])

Как известно разнос несущих частот ОВЧ-ЧМ-радиостанций в России составляет 400 кГц, а полоса частот радиоканала – не более $\Delta f \approx 2 \cdot (F_{\text{в}} + \Delta f_{\text{д}}) = 2 \cdot (53 + 75) = 256$ кГц для системы с пилот-тоном (рис. 61), реально она не превышает 200 кГц.

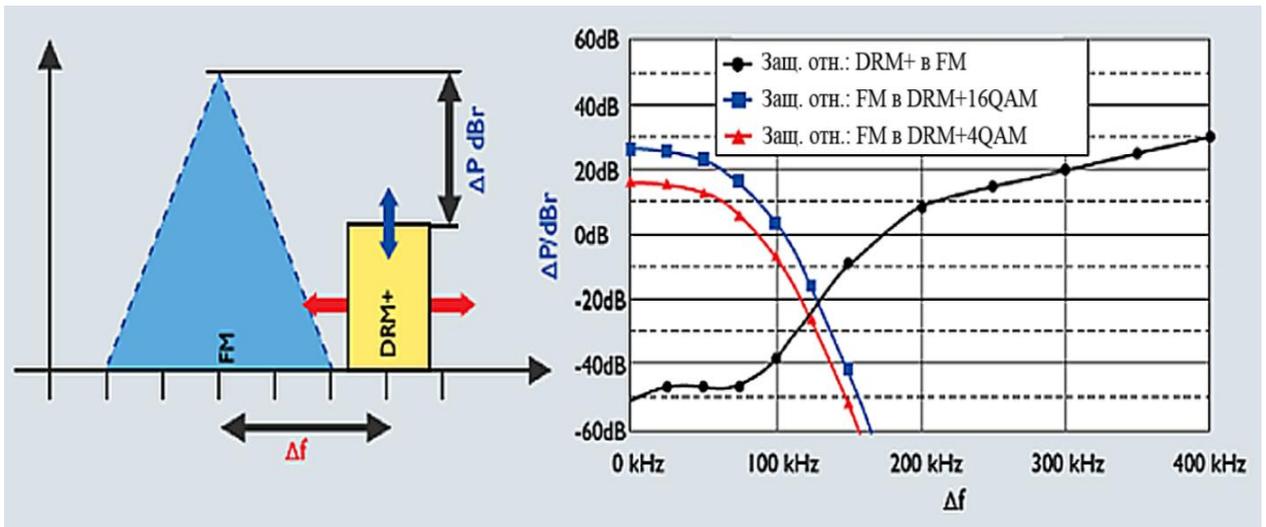


Рис.60 Пример совместной передачи сигналов аналогового (ЧМ) и цифрового (DRM+) радиовещания

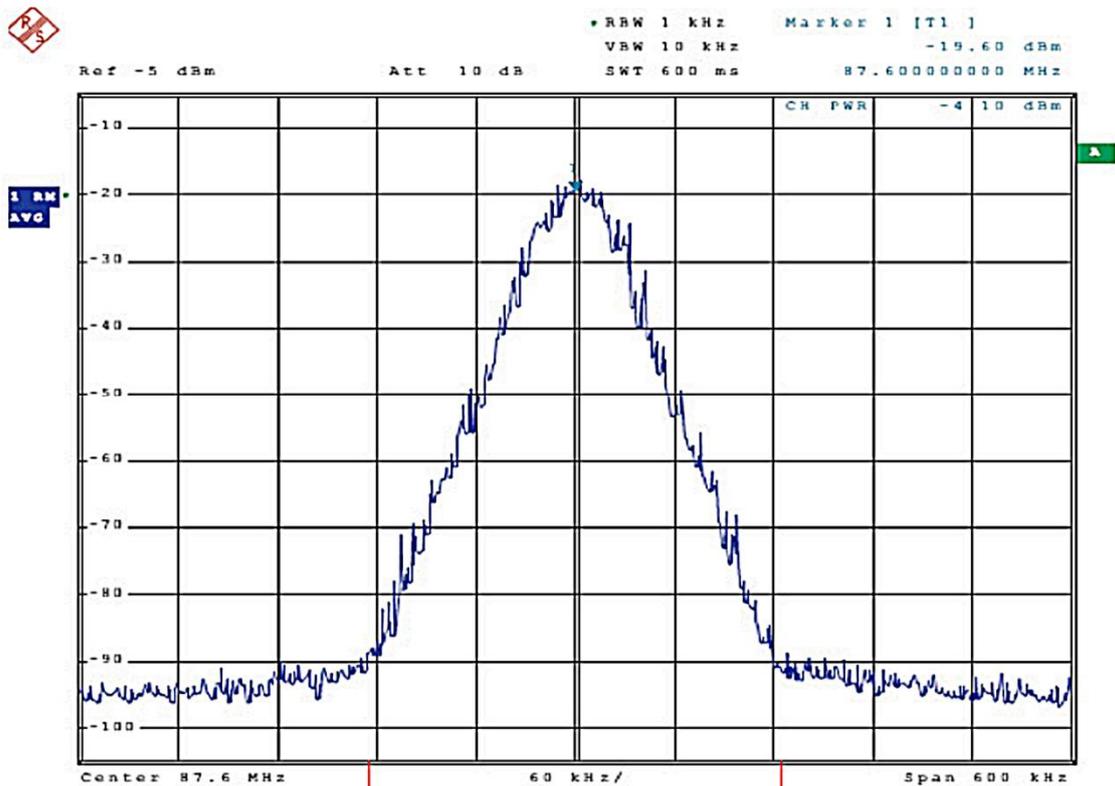
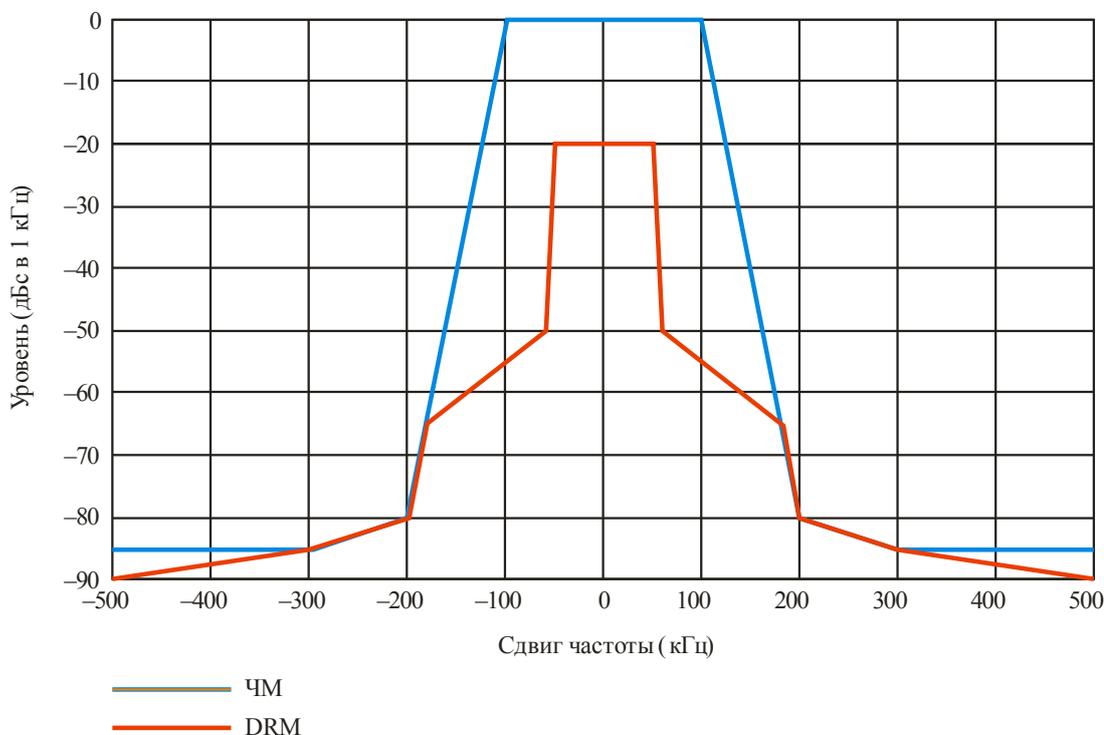


Рис.61. Спектр сигнала FM- радиостанции при наличии модуляции

Эти данные позволяют предположить, что при совместной работе систем аналогового (ОВЧ-ЧМ) и цифрового радиовещания (DRM+) несущие частоты цифрового радиовещания могут быть расположены со сдвигом на 200 кГц от несущих частот FM- радиостанций. При этом допустимое значение ΔP , при котором будет обеспечено отсутствие взаимного влияния при радиоприеме может быть найдено из рис.60, правая часть.

Внеполосная спектральная маска излучения для системы DRM+ в полосе ОВЧ I и полосе ОВЧ II, приведена на **рис.62** и в **табл.19** вместе с симметричной внеполосной спектральной маской излучения для ЧМ передатчиков [40] в качестве минимального требования к передатчикам, с шириной полосы по разрешению 1 кГц (RBW).



BS.1660-11

Рис.62. Внеполосные спектральные маски для ЧМ в полосе II ОВЧ и для DRM в полосе I ОВЧ и полосе II ОВЧ

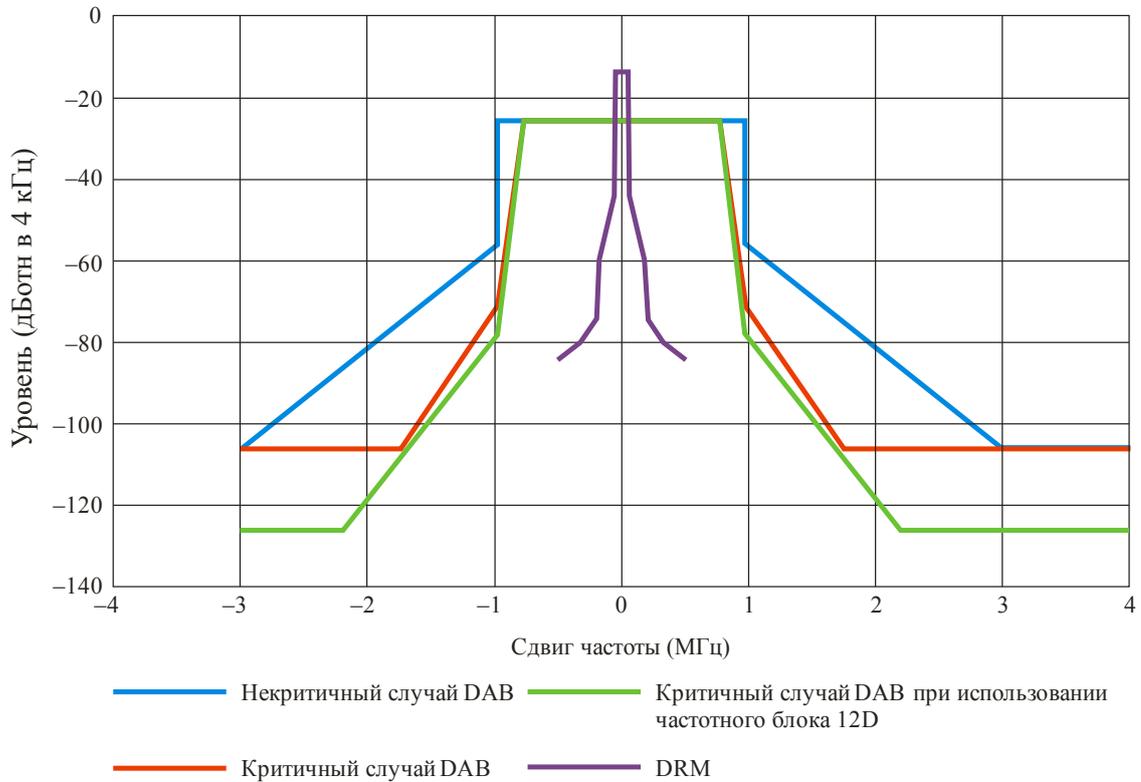
Таблица 19

Внеполосные спектральные маски для ЧМ в полосе II ОВЧ и для DRM в полосе I ОВЧ и полосе II ОВЧ

№	Спектральная маска (канал 100 кГц) / относительный уровень для ЧМ		№	Спектральная маска (канал 100 кГц) / относительный уровень для DRM	
	Сдвиг частоты (кГц)	Уровень (дБн)/(1 кГц)		Сдвиг частоты (кГц)	Уровень (дБн)/(1 кГц)
1	0	0	8	0	-20
2	±50	0	9	±50	-20
3	±100	0	10	±60	-50
4	±181,25	-65	11	±181,25	-65
5	±200	-80	12	±200	-80
6	±300	-85	13	±300	-85
7	±500	-85	14	±500	-90

Внеполосная спектральная маска излучения для системы DRM+ в полосе частот диапазона ОВЧIII (174...240 МГц) приведена на **рис. 63** и в **табл.20** вместе с симметричной внеполосной спектральной маской излучения для пе-

редатчиков системы DAB в качестве минимального требования к передатчикам, с шириной полосы по разрешению 4 кГц (RBW). Таким образом, результатом для DRM является значение -14 дБотн.



BS.1660-12

Рис.63. Внеполосные спектральные маски для DAB и DRM в полосе III ОВЧ

Таблица 20

Внеполосные спектральные маски для DAB и DRM в полосе III ОВЧ

№	Спектральная маска (канал 1,54 МГц) / относительный уровень для DAB (в 4 кГц)				№	Спектральная маска (канал 100 кГц) / относительный уровень для DRM (в 4 кГц)	
	Сдвиг частоты (МГц)	Уровень (дБн) (некритичные случаи)	Уровень (дБн) (критичные случаи)	Уровень (дБн) (критичные случаи/частотный блок 12D)		Сдвиг частоты (кГц)	Уровень (дБн)
1	±0,77	—	-26	-26	7	0	-14
2	< ±0,97	-26	—	—	8	±50	-14
3	±0,97	-56	-71	-78	9	±60	-44
4	±1,75	—	-106	—	10	±181,25	-59
5	±2,2	—	—	-126	11	±200	-74
6	±3,0	-106	-106	-126	12	±300	-79
	—	—	—	—	13	±500	-84

Литература

- 1.Recommendation 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.
- 2.Recommendation ITU-R BS.1660-7 (10/2015). Technical basis for planning of terrestrial digital sound broadcasting in the VHF band.
- 3.European Telecommunication Standard ETS 300401. Radio Broadcasting System; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers, ETSI, May 1997.
- 4.European Standard (Telecommunications series) EN 300401. Radio Broadcasting System; Digital Audio Broadcasting (расширениестандарта DAB) to mobile, portable and fixed receivers, V1.4.1. (2006-06), ETSI.
- 5.ETSI EN 300 401 V2.1.1 (2016-10). Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers.
- 5.ARIB STD-B31 Version 2.2 (2014-3) Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting.
- 6 ARIB STD-B29 Version 2.2 (2005-11). Transmission System for Digital Terrestrial Sound Broadcasting.
- 7.ETSI ES 201980 v3.1.1.(2009 – 08).Digital Radio Mondiale; System Specification.EBU-UER. – 221p
- 8.ETSI ES 201 980 v4.1.1 (2014-01).Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification.
- 9.NRSC-5-B In-band/on-channel Digital Radio Broadcasting Standard April, 2008
- 10.ETSI TS 102 428 V1.2.1 (2009-04).Digital Audio Broadcasting (DAB); DMB video service; User application specification.
- 11.Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые информационные системы (теория и практика), М.: Техносфера, 2012.- 1008 с.
- 12.ГОСТ Р 54309-2011. Аудиовизуальная информационная система реального времени (РАВИС). Процессы формирования кадровой структуры, канального кодирования и модуляции для системы цифрового наземного узкополосного радиовещания в ОБЧ диапазоне. Технические условия.
- 13.Дворкович В., Дворкович А. Отвечает ли отечественная система РАВИС потребностям локального радиовещания. Часть 1//Broadcasting. Телевидение и радиовещание, 2011, № 2.
- 14.Дворкович В., Дворкович А. Отвечает ли отечественная система РАВИС потребностям локального радиовещания. Часть 2//Broadcasting. Телевидениеи радиовещание, 2011, № 3.
- 15.International Standard ISO/IEC 11172-3. Information technology-Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1,5 Mbit/s- Part 3: Audio, 1993-08-01.

16. International Standard ISO/IEC 13818-3. Information technology- Generic coding of moving pictures and associated audio information. Part 3: Audio, 1995-05-15.
17. ISO/IEC FCD 14496-3 Subpart 1. Information Technology- Very Low Bitrate Audio-Visual Coding. Part 3: Audio, 1998-05-10 (ISO/JTC 1/SC 29, N2203).
18. International Standard ISO/IEC 13818-7. Information technology- Generic coding of pictures and associated audio information. Part 7: Advanced Audio Coding (AAC), 1997 (E).
19. ISO/IEC 23003-1:2007/Cor.1:2008, "Information Technology—MPEG Audio Technologies—Part 1: MPEG Surround, TECHNICAL CORRIGENDUM 1," International Standards Organization, Geneva, Switzerland (2008).
20. Кацнельсон Л.Н. Системы цифрового радиовещания DAB, DAB+, DMB. Современное состояние // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. 2015. - №1. - С.25.
21. Рихтер С.Г. Системы и сети цифрового радиовещания. - М.: Горячая линия – Телеком, 2017. - 448 с.
22. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов. - М.: Горячая линия – Телеком, 2007. - 432 с. 1
23. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов/ И.А.Алдошина, Э.И.Вологдин, А.П.Ефимов, Г.П.Катунин, Л.Н.Кацнельсон, Ю.А.Ковалгин, А.А.Фадеев; Под ред. Ю.А.Ковалгина. - М.: Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007. - 872 с.: ил.
24. Стереофоническое радиовещание и звукозапись: Учебное пособие для вузов/ Ю.А.Ковалгин, Э.И.Вологдин, Л.Н.Кацнельсон; Под ред. профессора Ю.А.Ковалгина. - Горячая линия – Телеком, 2007. - 720 с.
25. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM. - М.: Горячая линия – Телеком, 2016. - 352 с.
26. ETSI TS 102 820 V4.1.1 (2016-03) Digital Radio Mondiale (DRM); Multiplex Distribution Interface (MDI).
27. ETSI TS 102 821 V1.4.1 (2012-10) Digital Radio Mondiale (DRM); Distribution and Communications Protocol (DCP).
28. ISO/IEC 10646: "Information technology - Universal Multiple-Octet Coded Character Set (UCS)".
29. Рекомендация МСЭ-R (02/2014). Радиовещание для приема на портативные приемники сигналов мультимедийных применений и применений передачи данных.
30. ETSI TS 102 427 V.1.1.1 (2005-07) Digital Audio Broadcasting (DAB); Data Broadcasting - MPEG-2 TS streaming.
31. Report ITU-R BT.2049-7 (02/2016). Broadcasting of multimedia and data applications for mobile reception.
32. ISO/IEC 10646: "Information technology - Universal Multiple-Octet Coded Character Set (UCS)".
33. Ковалгин Ю.А., Вологдин Э.И. Аудиотехника. Учебник для вузов. - М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 742 с.

- 34.Ковалгин Ю.А. Психоакустика и компрессия цифровых аудиоданных. Монография.. Спб.: СПбГУТ, 2013.- 300 с.
- 35.Fraunhofer DRM ContentServer™ R5 – Features, Editions & Product Lines (2014-09-03)
- 36.ETSI TS 102 820 V1.1.1 (2003-12) Digital Radio Mondiale (DRM); Multiplex Distribution Interface (MDI)
- 37.ETSI TS 102 820 V4.1.1 (2016-03) Digital Radio Mondiale (DRM); Multiplex Distribution Interface (MDI)
- 38.Abschlussbericht zu Untersuchung zur Implementierung eines digitalen Übertragungssystem auf OFDM-basis im UKW-Frequenzbereich". Wolfstein, 17.11.2005. Verfasser: Frank Bernhard, FH Keiserslautern im Auftrag der technischen Kommission der Landesmedienanstalten Deutschlands. Projektpartner: Landesanstalt für Medien und Kommunikation Rheinland-Pfalz Prof. Dr. Andreas Steil, FH Keiserslautern.
- 39.Abschlussbericht zum technisch-wissenschaftlichen Vergleich der Verträglichkeit von UKW-FM mit HD-Radio und mit DRM+. Oberscheidweiler, 18.09.2008. Verfasser: Mark Rosenbaum, FH Keiserslautern im Auftrag der Landeszentrale für Medien und Kommunikation (LMK) Rheinland-Pfalz Prof. Dr. Andreas Steil, FH Keiserslautern. Betreuer: Dipl.-Ing. J. Lehnert (LMK), Prof. Dr.-Ing. R. Urbansku (TU Keiserslautern), Dr.-Ing. W. Sauer-Greff (TU Keiserslautern).
- 40.EN 302 018-2 Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the Frequency Modulated (FM) sound broadcasting service.

Ковалгин Юрий Алексеевич

Моделирование передающего и приемного трактов систем цифрового радиовещания

Часть 1. Цифровое радиовещание в диапазоне ОВЧ: системы и технологии

Учебно-методическое пособие для проведения практических занятий,
курсового и дипломного проектирования

Редактор
Компьютерная верстка

План издания учебной литературы 2016 г., п.

Подписано к печати
Объем усл.-печ. л. Тираж экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ
191186 СПб., наб. р. Мойки, 61
Отпечатано в СПбГУТ