

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

**Приоритетный национальный проект «Образование»  
Национальный исследовательский университет**

*А.Л. ГЕЛЬГОР   Е.А. ПОПОВ*

**СИСТЕМА ЦИФРОВОГО  
ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ  
СТАНДАРТА DVB-T**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по университетскому  
политехническому образованию в качестве учебного пособия для студен-  
тов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки  
Техническая физика*

Санкт-Петербург  
Издательство политехнического университета  
2011

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

**Приоритетный национальный проект «Образование»  
Национальный исследовательский университет**

*А.Л. ГЕЛЬГОР   Е.А. ПОПОВ*

**СИСТЕМА ЦИФРОВОГО  
ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ  
СТАНДАРТА DVB-T**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по университетскому  
политехническому образованию в качестве учебного пособия для студен-  
тов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки  
Техническая физика*

Санкт-Петербург  
Издательство политехнического университета  
2011

УДК 004.7:621,39(075.8)

ББК 32.94я73

Г 32

Рецензенты:

Кафедра радиопередающих устройств и средств подвижной связи СПбГУТ  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, зав. кафедрой д.т.н., профессор М. А. Сиверс

Кафедра военных телекоммуникационных систем Военной академии связи  
им. С. М. Будённого, начальник кафедры к.в.н., проф. А. Боговик

*Гельгор А.Л., Попов Е.А.* **Система цифрового телевизионного вещания стандарта DVB-T**: Учеб. пособие. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 207 с.  
ISBN

Предлагаемое учебное пособие посвящено изучению различных аспектов стандарта эфирного (наземного) телевизионного вещания DVB-T, наиболее полно представляющего те методы обработки сигналов, которые в настоящее время применяются во многих системах передачи информации.

В пособии рассмотрены как технические вопросы, связанные с принципами формирования, передачи, приёма и обработки сигналов системы DVB-T, так и организационно-правовые аспекты реализации Федеральной программы развития отечественного цифрового телевизионного вещания.

Учебное пособие рекомендовано Учебно-методическим объединением по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки “Техническая физика”. Оно также может быть полезно студентам, обучающимся по направлениям подготовки “Радиотехника”, “Инфокоммуникационные технологии и системы связи”.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития национального исследовательского университета “Модернизация и развитие политехнического университета как университета нового типа, интегрирующего мультидисциплинарные научные исследования и надотраслевые технологии мирового уровня с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики”

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

© Гельгор А.Л., Попов Е.А., 2011

© Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет, 2011

ISBN

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
1. Проект DVB-T .....	7
Вопросы и задания .....	18
2. Характеристики системы цифрового телевизионного вещания .....	19
2.1. Энергетические параметры радиопередающих устройств .....	21
2.2. Федеральная программа развития цифрового телевизионного вещания в Российской Федерации .....	31
2.3. Строительство наземных сетей цифрового телевизионного вещания .....	54
Вопросы и задания .....	71
3. Мультиплексирование потоков данных .....	72
3.1. Структура передающей части системы DVB-T .....	72
3.2. Передача служебных данных в транспортном потоке ...	83
3.3. Структура программного потока .....	90
3.4. Структура транспортного потока .....	99
Вопросы и задания .....	113
4. Канальный кодер и модулятор системы DVB-T .....	114
4.1. Канальный кодер .....	114
4.2. Сигналы с ортогональным частотным разнесением (OFDM) .....	131
4.3. Модулятор в системе DVB-T .....	140
4.4. Спектральные характеристики OFDM-сигналов и спектральная маска для системы DVB-T .....	165
4.5. Первичная обработка сигналов системы DVB-T .....	174
Вопросы и задания .....	193
Библиографический список .....	194
Приложение 1 .....	195
Приложение 2 .....	205

## **ВВЕДЕНИЕ**

Наблюдающийся в настоящее время стремительный переход от аналогового к цифровому телевизионному вещанию, обладающему несомненными преимуществами, приводит к существенному изменению технологической базы телевидения, внедрению цифровых технологий и методов формирования телевизионных программ, базирующихся на современных решениях, касающихся мультиплексирования и сжатия данных. С другой стороны, такой переход также требует переподготовки значительного числа специалистов, работающих в различных областях единой отрасли телерадиовещания, в том числе, связанных с администрированием современных сетей телевизионного вещания.

Предлагаемое учебное пособие посвящено изучению различных аспектов стандарта эфирного (наземного) телевизионного вещания DVB-T, наиболее полно представляющего те методы обработки сигналов, которые в настоящее время применяются во многих системах передачи информации.

Содержащийся в пособии материал можно условно разделить на две части.

Первая часть, охватывающая две первые главы, посвящена рассмотрению организационных и правовых вопросов, связанных с организацией и развитием сетей цифрового телевизионного вещания на территории Российской Федерации. Подробно излагаются и обсуждаются базовые положения реализуемой в настоящее время Федеральной Программы развития цифрового телевидения. Данный материал снабжён большим числом организационно-финансовых показателей, что, вообще говоря, не характерно для учебного пособия, предназначенного для технических направлений. Тем не менее, по мнению авторов, наличие таких показателей позволит студентам более глубоко проникнуть в изучаемую проблематику.

Вторая часть пособия — в пределах третьей и четвертой главы — посвящена техническим вопросам построения систем цифрового телевизионного вещания. Большое внимание уделено методом формирования транспортного потока, предназначенного для одновременной доставки мультимплексированных и сжатых телевизионных программ, сформированных разными источниками (студиями) и предназначенных для различных потребителей.

Авторы сознательно отказались от рассмотрения в данной книге большого количества вопросов, связанных с полноценными методами приёма, обработки и анализа сигналов телевещания, ограничившись небольшим разделом, посвященным первичной обработке (символьной и кадровой синхронизации) вещательных сигналов. Подробное рассмотрение методов приёма и анализа сигналов телевизионного вещания является предметом рассмотрения отдельного пособия, которое, по замыслу авторов, должно органично дополнять предлагаемое пособие, способствуя, тем самым, формированию у специалистов соответствующего профиля навыков и умений “сквозной” квалификации в отрасли телерадиовещания.

Как обычно, имеет место ставшая уже традиционной в телекоммуникационной литературе проблема обращения с терминами. Реалии сегодняшнего дня таковы, что осваиваемая специалистами телекоммуникационная терминология представляет собой, по существу, набор языковых заимствований (как правило, англоязычных). Более того, наблюдается очевидная тенденция к изъятию из научной лексики устоявшихся русскоязычных терминов и ничем не обоснованная замена их “оригинальными” вариантами<sup>1</sup> в виде языковых калек. Повидимому, остановить такую тенденцию уже не представляется воз-

---

<sup>1</sup> Нелишним будет вспомнить, что во времена интенсивного развития отечественной науки и техники на конференциях работали целые секции, где совместные комиссии лингвистов и технических специалистов вырабатывали совместные решения по переводу иностранных терминов и созданию их русскоязычных эквивалентов.

возможным. В этой связи авторы постарались по возможности сохранять традиционную отечественную терминологию и вводить заимствованные неологизмы лишь при очевидном отсутствии традиционного научного или технического термина. Как правило, наряду с вариантом перевода нового термина в тексте приводится его оригинальный (англоязычный) вариант, и авторы будут признательны, если им будет предоставлен более точный и удачный перевод.

Хотя в процессе написания книги авторы активно использовали материал, содержащийся в стандартах на цифровое телевизионное вещание (особенно, в части, касающейся методов формирования сигналов DVB-T), предлагаемое пособие не должно служить заменой технических спецификаций и рекомендаций, разработанных консорциумом DVB, даже несмотря на отсутствие официальных аутентичных русскоязычных документов.

Учебное пособие составлено преподавателями кафедры “Радиоэлектронные средства защиты информации” по материалам курсов лекций, читаемых авторами на радиофизическом факультете Санкт-Петербургского государственного политехнического университета и предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки “Техническая физика”, “Радиотехника”, “Инфокоммуникационные технологии и системы связи”. Она также может оказаться полезным для слушателей образовательных учреждений дополнительного профессионального образования.

# 1. ПРОЕКТ DVB

История регулярного телевизионного вещания в России насчитывает около восьмидесяти лет. Телевизионная индустрия страны была одной из немногих, которая, отвечая текущим общемировым требованиям, смогла не только выстоять десятилетний период реформирования российского общества, но и заложить основы дальнейшего научно-технического прогресса в развитии ТВ-вещания.

В последние годы цифровое телевизионное вещание (ЦТВ) внедряется в целом ряде стран мира, что обусловлено многими технико-экономическими преимуществами этой перспективной технологии. Общим подходом к организации цифровых телевизионных каналов является стандартизованное преобразование в цифровую форму и обеспечение независимой передачи различных цифровых потоков (сигналов телепрограмм, данных, звукового вещания) методами временного мультиплексирования, что позволяет говорить о цифровом телевещании как о мультимедийной технологии массового информационного обслуживания.

К исходу XX века ведущие производители вещательного оборудования вплотную подошли к необходимости кардинального изменения подхода к телевизионному вещанию. Разработка и реализация цифровых стандартов сжатия изображений показали возможность значительного увеличения объемов передаваемой информации по существующим стандартным телевизионным каналам с качеством, не хуже, а подчас, существенно превосходящим качество традиционного аналогового изображения. Кроме того, возникала возможность совместной передачи данных различной физической природы — изображения, звука, текстовых данных, управляющих команд и др., а также большого количества дополнительных услуг в едином информационном потоке.

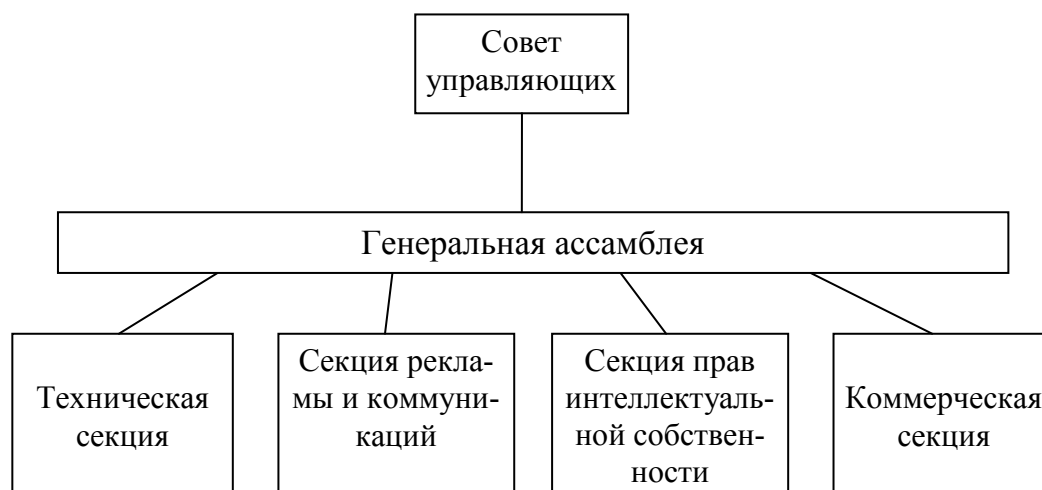
В 1993 г. группа ведущих европейских производителей вещательного оборудования образовала некоммерческую организацию по

разработке единого (европейского) стандарта цифрового телевизионного вещания DVB (Digital Video Broadcasting — цифровое телевизионное вещание). В настоящее время членами проекта DVB являются около 300 организаций, среди которых производители оборудования, вещатели, операторы связи и др. Для вступления в DVB достаточно подписать Меморандум о взаимопонимании, в котором подтверждается согласие с принципами проекта:

- оперативная реакция на требования рынка;
- обеспечение взаимной совместимости устройств;
- открытые (общедоступные) спецификации.

Организация, являющаяся членом проекта, имеет право участвовать в работе различных рабочих групп и Генеральной ассамблеи, пользоваться общими результатами исследований

На рис. 1.1 показана структура организации, которая, помимо Генеральной ассамблеи и руководящего Совета управляющих, включает четыре секции: Техническую секцию, Секцию рекламы и коммуникаций, Секцию прав интеллектуальной собственности и Коммерческую секцию.



**Рис. 1.1. Структура проекта DVB**

Разработка какого-либо документа начинается с того, что Коммерческая секция составляет список пользовательских предложений,

исходя из текущих запросов рынка. Техническая секция — наиболее многочисленная — в рабочих группах (их более 10) разрабатывает технические спецификации, которые либо создают новый стандарт, либо модернизируют существующие. После принятия Советом управляющих стандарт передается на утверждение в одну из европейских организаций по стандартизации: ETSI (European Telecommunication Standard Institute — Европейский институт стандартов электросвязи), CENELEC (Comite European de Normalisation Electronique — Европейский комитет по стандартизации в области электроники), DAVIC (Digital Audio-Video Council — Совет по цифровым аудиовизуальным средствам) и др. При этом сама организация проекта DVB какими-либо полномочиями по стандартизации не обладает, а лишь выпускает рекомендательные документы, так называемые “Голубые книги” (Blue Book), содержащие разъяснительную и справочную информацию к стандартам и руководства по их применению.

Стандарты DVB, которые приняты ETSI подразделяются на несколько групп: EN — обязательные стандарты, TS — техническая спецификация (неполный предварительный стандарт), TR — рекомендация, необязательная для исполнения. Стандарты, в названии которых имеется слово *guidelines* (руководство), содержат развернутые и подробные рекомендации и разъяснения, а также полезную сопутствующую информацию.

Одним из первых решений организации — принятие за основу всех разработок стандарта цифрового сжатия MPEG-2<sup>1</sup> (Motion Pictures Expert Group — экспертная группа по разработке стандарта подвижных изображений). Однако стандарт MPEG-2 в “чистом виде” не охватывает вопросы передачи цифрового сигнала по существующим вещательным каналам, и, в связи с этим, его необходимо было допол-

---

<sup>1</sup> Стандарт MPEG-2 принят как международный стандарт под номером ISO/IEC 13818 в 1996 г. и дополнен в 1997 г. Он называется “Информационные технологии. Обобщенное кодирование подвижных изображений и сопровождающей звуковой информации” и состоит из девяти частей.

нять рядом документов, регламентирующих дополнительную обработку сигнала перед его подачей в канал.

Далее, было принято решение об использовании общего мультиплексированного потока во всех средах распространения и максимальной унификации методов кодирования и модуляции. Для каждой физической среды передачи вещательного сигнала был разработан свой стандарт обработки и передачи транспортного потока, учитывающий ее специфику и, одновременно, максимально похожий на родственные стандарты. Стандарт спутникового вещания получил название DVB-S (satellite — спутник), эфирного (наземного) вещания — DVB-T (terrestrial — наземный), кабельного вещания DVB-C (cable — кабель), вещания на переносной приемник — DVB-H (hand-held — переносной).

Кроме того, разработаны стандарты для распределенных сетей цифрового вещания, передачи пользовательских данных (телетекст, субтитры и др.). В целях обеспечения совместимости цифровых потоков, передаваемых в различных инфокоммуникационных системах (например, в цифровых сетях интегрального обслуживания) разработаны таблицы информации об услугах SI (Service Information), которые описывают структуру размещения служебных данных в транспортных потоках.

В табл. П.1 (Приложение 1) представлен краткий перечень стандартов и других существующих нормативных документов, касающихся организации услуг цифрового вещания.

В Российской Федерации практические аспекты развития цифрового телерадиовещания начали обсуждаться в 1997 г, когда в Министерстве связи (Минсвязи) были приняты первые концептуальные решения по переходу к цифровому вещанию и началу внедрения в России наземного и спутникового цифрового телевидения с подключением ряда отраслевых НИИ и КБ промышленности для разработки проектов модернизации существующих систем телерадиовещания и создания отечественной цифровой профессиональной и бытовой ап-

паратуры. Эти работы проводились при активной поддержке Минсвязи, Министерства печати и массовых коммуникаций (Минпечати), Российского агентства по системам управления (РАСУ), Национальной ассоциации телерадиовещателей (НАТ) и других ведомств.

Важной основой реализации упомянутых работ стало Постановление Правительства Российской Федерации от 26 мая 2000 г. № 413 “О сближении распределения и условий использования полос радиочастот в Российской Федерации с установленными Регламентом радиосвязи МСЭ распределением и условиями использования радиочастот для Района 1, включающего территорию России”.

Постановление указывает на приоритеты внедрения в России перспективных технологий общеевропейских стандартов, в том числе, стандартов цифрового вещания, что в значительной мере определяет выбор систем радиосвязи и вещания во всей стране. Поэтому разработка национальных стандартов, правил и норм в области стандартизации цифрового телерадиовещания в России ведется с учетом международных и региональных стандартов, а также с учетом результатов экспериментальных исследований в опытных зонах цифрового ТВ-вещания, развернутых в городах Нижнем Новгороде, Санкт-Петербурге и Москве.

Первый документ в области стандартизации для системы спутникового цифрового телевидения был подготовлен Научно-исследовательским институтом радио (НИИР) в 1999 г. в виде Руководящего документа отрасли (РД) “Временные нормы на цифровую передачу ТВ-сигналов стандартного качества по спутниковым каналам” (РД 45.065-99). Данный документ позволил приступить к цифровизации распределительной сети России вместе с решением весьма актуальной на тот период задачи существенной экономии необходимого орбитально-частотного ресурса спутниковой компоненты системы и начать распределение общегосударственных ТВ-программ (“Первый канал”, “Россия” и “Культура”) по зонам поясного вещания в цифровом формате.

Полный переход к цифровому распределению во всех пяти зонах поясного вещания Российской Федерации (зоны А, Б, В, Г, М) от Чукотки до Калининграда предполагалось завершить в 2005 г. вместе с реализацией программы модернизации российской спутниковой группировки космическими аппаратами серий “Экспресс-А” и “Экспресс-АМ”, однако этот переход завершается лишь к настоящему моменту времени.

Решения Всемирной конференции по радиосвязи 2000 г. в области цифрового телевидения дали старт активному практическому внедрению цифровых вещательных технологий. Поэтому вопрос о выборе национального стандарта цифрового ТВ-вещания в России, а также стандартизации передающей и приемной аппаратуры стал жизненно важным для отечественной промышленности и операторов цифрового телевидения.

Важнейшим моментом в развитии цифрового вещания в России стало согласованное решение Минсвязи, Минпечати, РАСУ и НАТ по разработке национальной нормативно-технической базы ЦТВ, для чего в 2001 г. была создана Межведомственная рабочая группа и утвержден “План разработки временных норм, государственных и отраслевых стандартов на цифровое телевидение”. В разработке пакета нормативно-технических документов приняли участие такие организации, как ФГУП НИИР, ОАО “Телеком”, ФГУП НИИТ (Научно-исследовательский институт телевидения), ОАО “ВНИИТР”, ЗАО “МНИТИ”, ОАО “МАРТ”, ФГУП НИИ “Рубин” и др.

На основании проведенного разработчиками стандартов анализа находящихся в эксплуатации и прошедших международную стандартизацию систем цифрового телевидения, результатов экспериментальных исследований и отечественного опыта цифрового наземного и спутникового телевизионного вещания во всех проектах стандартов предпочтение для Российской Федерации отдано Европейской системе цифрового телевидения DVB.

В соответствии с утвержденным планом-графиком предусматривалась поэтапная разработка 23 проектов национальных стандартов, правил стандартизации, норм и рекомендаций в области стандартизации системы цифрового телевидения в России, аналогичных тем, что представлены в табл. 1.1. Разработка и принятие указанных стандартов продолжается и в настоящее время.

Разработанные российские национальные стандарты, правила стандартизации и нормы согласованы с рекомендациями Международного союза электросвязи, Европейского института по стандартизации в области электросвязи и учитывают накопленный опыт по стандартизации телевизионного вещания в России и данные экспериментов, полученные в трех опытных зонах цифрового ТВ-вещания.

С позиции эффективного использования радиочастотного спектра в условиях России, международного согласования частотных присвоений, а также сопряжения с европейскими технологиями цифрового вещания с помощью спутниковых, кабельных и радиорелейных линий связи, цифровое наземное телевизионное вещание ориентировано на систему DVB-T.

Поскольку система цифрового ТВ-вещания должна использовать существующие частотные планы и в течение длительного переходного периода обеспечивать вещание наряду с действующими аналоговыми телевизионными системами (в России — это системы стандарта D, K/SECAM), она должна обладать требуемой помехозащищенностью со стороны аналоговых систем и не должна создавать для них недопустимых помех.

Система ЦТВ должна обладать существенной гибкостью, обеспечиваемой набором опций, выбором широкого набора параметров с целью адаптации ко всем каналам и режимам работы, обеспечивая фиксированный и мобильный прием, а также прием на переносные телевизоры. Важным свойством этой цифровой системы является возможность построения одночастотных сетей.

Среди всех систем цифрового наземного телевизионного вещания европейская система DVB-T развивается весьма динамично и завоевывает все больше сторонников, обеспечивая наиболее высокое качество во всех возможных применениях.

Успехам семейства европейских стандартов цифрового ТВ-вещания способствует широкая стандартизация всех подсистем и технологий, которые могут найти применение как сегодня, так и в перспективе с учетом прогресса других телекоммуникационных систем и изменения структуры и конъюнктуры рынка.

Проблема перехода к цифровым технологиям, или, как говорят, цифровизации отечественного телевизионного вещания может быть разделена на две составляющие:

- подготовка содержимого телевизионной программы (телевизионного контента);
- доставка в цифровом виде контента до потребителя.

Первая задача уже достаточно давно и успешно решается ведущими российскими телевизионными компаниями. Сейчас во всех звеньях технологического процесса подготовки контента используются цифровая передача, обработка и хранение информации. Специалисты давно убедились в неоспоримых преимуществах цифровых методов, а потребитель получил значительное улучшение качества телевизионной картинки и видеоряд, недостижимый ранее при использовании аналоговых методов обработки. Без цифровых устройств хранения (цифровые видеомэгнитофоны и серверы) и обработки информации (нелинейные монтажные системы и т.д.) сейчас невозможно представить себе телевизионный студийный комплекс.

За достаточно длинный период цифровизации телевизионного студийного оборудования в России сложился рынок, на котором успешно работают как крупные корпорации с внушительным стажем работы, так и небольшие новые компании. Все это помогает вещательным компаниям эффективно внедрять самые новейшие раз-

работки цифрового оборудования, к сожалению, в основном зарубежных производителей.

В последние годы появились принципиально новые подходы к созданию цифрового студийного оборудования, в частности, устройств видеозаписи. Еще совсем недавно отказ от записи видеосигналов на магнитную ленту и переход в профессиональной аппаратуре к записи на видеодиск или твердотельную память казались делом далекого будущего. Сегодня это реальность: линейки серийного оборудования существенно изменяют весь технологический процесс подготовки телевизионных программ. Одновременно совершенствуются нелинейные монтажные системы, обеспечивающие почти что фантастические возможности создания видеоряда.

Успешно развиваются сетевые (IP) технологии передачи телевизионного контента, в частности, для перегона оперативных материалов из отдаленных филиалов в центральные аппаратные, и это только начало процесса интеграции телевидения и IP-технологий.

Решение второй составляющей проблемы цифровизации телевизионного вещания — перехода сети распространения телевизионных программ на формат DVB оказывается значительно более сложным. За прошедшие 10–15 лет новейшей Российской истории существенно обновился парк аналоговых телевизоров (в основном, за счет качественного импорта), и потребитель пока плохо воспринимает необходимость перехода на цифровое вещание.

С другой стороны, модернизация сети наземного вещания и окончание процесса перевода системы спутникового распределения телевизионного сигнала на цифровой формат требуют громадных финансовых затрат. Только телевизионных передатчиков на территории России около 15 000, причем подавляющее большинство из них полностью выработало свой ресурс. Нуждаются в реконструкции или, хотя бы, существенном ремонте антенно-мачтовые сооружения, построенные много десятилетий назад.

Тем не менее, несмотря на многие нерешенные вопросы, процесс перехода к цифровому телевизионному вещанию вступил в стадию решения практических задач. Поэтому очень важно ознакомить технических специалистов с освоенной отечественной промышленностью номенклатурой цифрового оборудования для модернизации сети распространения телевизионных программ. В первую очередь, это относится к так называемым “гибридным” телевизионным передатчикам, которые в переходной период будут работать в аналоговом режиме, а после внедрения формата DVB-T могут быть быстро и экономически эффективно перестроены на выдачу в эфир цифрового сигнала. Отечественная промышленность в этом направлении сохраняет серьезные позиции и предлагает достаточно качественное оборудование, стоимость которого существенно ниже зарубежных аналогов.

Приоритетным направлением разрабатываемой в настоящее время программы развития системы цифрового телевизионного вещания DVB в России является использование потенциала отечественной радиоэлектронной промышленности. Это касается не только телевизионных передатчиков, но и коммутационно-распределительного, контрольно-измерительного, кодирующего оборудования. Поэтому появление на рынке отечественного телевизионного оборудования, удовлетворяющего всем современным требованиям, дает надежду на успешное развитие этой важной для страны отрасли.

Отметим, что параллельно с разработкой европейского стандарта DVB на системы цифрового вещания в других странах (и континентах) разрабатывались и другие стандарты. В частности, конкурентами DVB являлись (особенно в то время, когда стандарт ещё не был официально принят многими европейскими вещателями) североамериканский стандарт ATSC (Advanced Television Systems Committee) и японский стандарт ISDB (Integrated Service Digital Broadcasting).

При разработке стандарта ATSC, прежде всего, преследовалась цель совместимости с существующей национальной (США) системой

аналогового телевизионного вещания NTSC. Как показывают опыты, в реальных условиях эксплуатации системы ATSC и DVB имеют приблизительно одинаковые характеристики.

Стандарт ISDB изначально был ориентирован на системы телевидение высокой чёткости (ТВЧ), поэтому напрямую сравнивать его со стандартами ATSC и DVB представляется некорректным.

Заметим, что уже разработан стандарт цифрового эфирного вещания второго поколения — DVB-T2, в котором заложена возможность интерактивного общения пользователем с вещателем (поставщиком услуг). Однако вряд ли следует ожидать в ближайшее десятилетие появление на российском рынке большого спроса на такие услуги.

## **Вопросы и задания**

1. Какая система аналогового телевизионного вещания в настоящее время используется в Российской Федерации?
2. Чем отличаются документы DVB с маркировками EN и TS? Является ли документ с маркировкой TR обязательным для исполнения?
3. Составьте перечень отечественных стандартов и спецификаций, являющихся официально утверждёнными документами, относящимися к проекту DVB.
4. Проведите анализ основных характеристик системы DVB-H мобильного вещания. В каком частотном диапазоне предполагается работа этой системы?
5. Проведите анализ действующей в настоящее время отечественной спутниковой группировки, предназначенной для организации телевизионного вещания на территории Российской Федерации. Укажите основные технико-экономические характеристики отечественных спутниковых ретрансляторов. Сравните эти характеристики с зарубежными аналогами.

## **2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВЕЩАНИЯ**

При разработке стандарта DVB-T были определены следующие коммерческие требования [3]:

1. Стандарт должен поддерживать концепцию контейнера данных, обеспечивая передачу телевизионных данных стандартной и высокой четкости, звука, любую их комбинацию, пока это позволяет емкость контейнера.

2. Стандарт должен обеспечивать высокую помехозащищенность, максимальную гибкость использования спектральных ресурсов с возможным обменом канального ресурса на размер зоны обслуживания, возможность передачи служебных таблиц, телетекста, условного доступа.

3. Стандарт должен быть максимально унифицирован со стандартами спутникового и кабельного вещания в целях удешевления производства универсальных элементов приемников.

4. Система должна допускать обслуживание с уже существующих передающих центров и прием на уже существующие стационарные антенны.

5. Стандарт должен обеспечить поддержку приема сигнала на комнатные антенны и переносимые приемники (не находящиеся в движении).

6. Стандарт должен поддерживать работу в одночастотной сети.

7. Приемник должен иметь выход цифровых данных для выделения сигналов дополнительных услуг, желательно наличие модема для организации канала взаимодействия.

8. Уровень выбранной технологии должен соответствовать достигнутым возможностям промышленности для быстрого развертывания производства.

В соответствии с различными нормативными документами, регламентирующими алгоритмы преобразования потока информации и сигнала на всех этапах — от передающей камеры до приёмного мони-

тора, проектированию подлежит ряд составных частей приёмопередающей системы. Так, согласно требованиям упомянутых стандартов и общих принципов построения систем радиосвязи, в состав передатчика входят следующие устройства:

- мультиплексор;
- модулятор;
- преобразователь частоты и предварительный усилитель;
- усилитель мощности;
- фильтр внеполосных составляющих спектра выходного колебания;
- антенно-фидерное устройство.

Данные устройства обеспечивают преобразование входной дискретной последовательности в радиосигнал, перенос этого радиосигнала в заданную область частот, усиление, фильтрацию и излучение результирующего колебания в определённую зону окружающего пространства. Рассматривая передатчик как устройство, выполняющее все перечисленные функции, можно сформулировать следующие основные специфические для систем цифрового вещания требования, которым он должен удовлетворять:

- требования на величину  $P_{\text{ср}}$  средней мощности выходного колебания;
- требования на величину  $P_{\text{п}}$  пиковой мощности выходного колебания;
- требования на соответствие уровня внеполосных составляющих заданным в стандартах величинам;
- требования на величину вероятности ошибочного приёма  $p_{\text{ош}}$  (практически — коэффициентам ошибок BER) на выходе специального измерительного приёмника.

Рассмотрим, прежде всего, основные соотношения и количественные оценки, позволяющие определить необходимые энергетические параметры радиопередающих устройств.

## 2.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Величина  $P_{\text{ср}}$  определяется, исходя из конкретных условий вещания, в которые входят размеры зоны обслуживания, высота размещения и коэффициент усиления антенны, а также предполагаемый режим работы.

Ориентировочное значение соотношения между  $P_{\text{п}}$  и  $P_{\text{ср}}$ , как правило, изначально определяется из материалов теоретических исследований и результатов первичных экспериментов в опытной зоне вещания. Предполагается, что эта величина в дальнейшем будет уточняться в ходе проектирования и ввода в эксплуатацию отдельных элементов передатчика. Решение данного вопроса рассматривается как часть задачи по оптимизации соотношения требований к усилителю мощности и фильтру внеполосных составляющих. В зависимости от стоимости технических решений при реализации усилителя мощности и фильтра внеполосных составляющих должен быть выбран вариант, обеспечивающий минимум суммарной стоимости передатчика.

Вероятность ошибочного приёма однозначно регламентирована в соответствующих стандартах, и при проектировании передатчика должны быть приняты меры для уменьшения влияния различного рода искажений на этот параметр. Таким образом, при составлении, например, технического задания на разработку передатчика достаточно определить величину его средней мощности. Рассмотрим соображения, лежащие в основе определения мощностных характеристик передающего устройства.

Как показывает опыт, для уверенного приема сигналов цифрового телевизионного вещания в дециметровом диапазоне<sup>1</sup> необходимо обеспечить напряженность поля не ниже уровня 900 мкВ/м. Относительно уровня в 1 мкВ/м эта величина соответствует 59 дБ. При

---

<sup>1</sup> Ожидается, что именно в этом диапазоне будет сосредоточено наибольшее число коммерческих телевизионных каналов.

приеме на направленные антенны этот уровень может быть снижен пропорционально их коэффициенту направленного действия (КНД). В этих случаях требуемый уровень напряженности поля  $E_T$  должен быть не ниже значения

$$E_T = 59 - G_{\text{ПР}}, \quad (2.1)$$

где  $G_{\text{ПР}}$  — КНД приемной антенны, выраженный в децибелах.

Ориентируясь на указанный уровень поля, определим необходимые величины эквивалентной излученной мощности  $P_{\text{изл}}$ , понимая под ней произведение средней мощности передатчика  $P_{\text{пер}}$  (которая, вообще говоря, не равна средней мощности выходного колебания  $P_{\text{ср}}$ ) на коэффициент усиления  $G_A$  передающей антенны:

$$P_{\text{изл}} = P_{\text{пер}} G_A. \quad (2.2)$$

С учётом наличия подстилающей поверхности, но для идеализированной модели (без учета ее рельефа и кривизны) напряженность поля  $E$  при работе на длине волны  $\lambda$  на расстоянии  $r$  (в километрах) до точки наблюдения можно вычислить по известной формуле Введенского

$$E = \frac{2,18 \sqrt{P_{\text{изл}}} h N}{\lambda r^2},$$

где  $N$  — высота передающей антенны, а  $h$  — высота точки, в которой определяется напряжённость поля.

Подчеркнём, что эту формулу можно использовать только для ориентировочного расчета, так как она не учитывает кривизну Земли и холмистый характер рельефа земной поверхности. В реальной ситуации значения напряженности поля вблизи поверхности носят спорадический характер: они зависят от конкретного места приема (находится ли оно на вершине холма или в низине за холмом), определяются уровнем интерференции прямого и отражённых лучей и др. Перечислим наиболее значимые факторы, влияющие на значение напряжённости поля в точке приёма.

- Дифракционные потери при огибании поверхности Земли и затеняющих препятствий.

- Потери при рассеянии радиоволн в лесопарковых зонах.
- Интерференционные потери, вызванные переотражениями радиоволн от поверхности крупных объектов (особенно данный фактор влияет при организации мобильного телевидения).
- Рассеяние энергии радиосигнала на неровностях поверхности Земли.
- Поглощение радиоволн в водяных парах и осадках.
- Потери за счёт отрицательной рефракции<sup>1</sup> в атмосфере.
- Различные помехи естественного и искусственного происхождения.

Для учёта указанных факторов к настоящему времени разработано большое число методик оценки уровней напряженности поля. К сожалению, ни одна из них не является универсально адекватной при различных условиях распространения радиоволн, т.е. требуют уточнения по мере развёртывания вещательной станции.

Воспользуемся методикой, предложенной в [12], согласно которой уровень напряженности поля относительно величины 1 мкВ/м определяется как сумма

$$E = E_{\text{med}} + \kappa(T) + \kappa(L) + \kappa(\Delta h) + P_{\text{изл}}, \quad (2.3)$$

где все величины выражены в децибелах.

В выражении (2.3)  $E_{\text{med}}$  является средним (медианным) уровнем напряженности поля, который обеспечивается в течение 50% времени и в 50% местах приема. Эти величины определяются по графикам, построенным на основе многочисленных измерений, проведенных в различных странах. Графики выражают зависимость  $E_{\text{med}}$  от  $r$  и  $H$  для случая, когда холмистость рельефа (разность высот) в окрестности места приема  $\Delta h$  близка к 50 метрам [12]. Остальные слагаемые являются поправочными коэффициентами, зависящими от процента времени  $\kappa(T)$  и процента пунктов приема  $\kappa(L)$ , при которых напряжен-

---

<sup>1</sup> Рефракция — это искривление пути радиоволн при их прохождении через среды с различной диэлектрической проницаемостью или различной степенью ионизации.

ность поля превышает средний уровень. Поправка  $\kappa(\Delta h)$  вводится в том случае, если  $\Delta h$  заметно отличается от 50 м; в противном случае этой поправкой можно пренебречь.

Считается, что поправку  $\kappa(T)$  при приеме сигналов цифрового телевидения можно не учитывать, так как в этом случае прием осуществляется одновременно на нескольких частотах, и, поэтому, изменения уровня напряженности поля во времени, обусловленные многолучевостью, усредняются.

Будем считать, что типичной высотой подвеса передающей антенны на мачте телецентра является 75...80 м. На этой высоте средняя напряженность поля  $E_{\text{med}}$  соответствует значениям, приведенным в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Средняя напряженность поля  $E_{\text{med}}$  в зависимости от  $r$**

$r$ , км	10	12	14	16	18	20	22
$E_{\text{med}}$ , дБ	70	66	62	59	56	55	52

Одна из первых отечественных опытных зон цифрового телевидения была реализована в г. Нижнем Новгороде — достаточно холмистой области, расположенной в месте слияния рек Волги и Оки. Поэтому дальнейшие оценки проведём именно для этого города.

В пределах основной части<sup>1</sup> города Нижний Новгород можно считать, что параметр холмистости  $\Delta h$  не превышает 50 м и, следовательно, поправку  $\kappa(\Delta h)$  также можно не учитывать. Величины поправки  $\kappa(L)$  в зависимости от процентного соотношения числа пунктов уверенного приёма приведены в табл. 2.2.

Таким образом, уровень излучений мощности, обеспечивающий прием сигналов цифрового телевидения определяется выражением

$$P_{\text{изл}} = E_{\text{т}} - E_{\text{med}} - \kappa(L)$$

или, с учетом (2.1),

---

<sup>1</sup> За исключением районов, примыкающих к высокому берегу Волги — волжскому откосу.

$$P_{\text{изл}} = 59 - G_{\text{пр}} - E_{\text{мед}} - \kappa(L) \quad (2.4)$$

Таблица 2.2

**Значения поправки  $\kappa(L)$  в зависимости от процентного соотношения числа пунктов уверенного приёма**

Процент приёма %	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0
$\kappa(L)$ , дБ	+ 8	+ 3	+ 1	0	– 2	– 4,5	– 8
Процент приёма %	85,0	90,0	94,0	96,0	98,0	99,0	99,5
$\kappa(L)$ , дБ	– 9	– 11	– 15	– 17	– 20	– 21	– 26

Зоной уверенного приема будем считать площадь, в границах которой обеспечивается необходимый уровень поля для 90% пунктов приёма. Для обеспечения такой вероятности поправочный коэффициент  $\kappa(L)$ , как это следует из значений, представленных табл. 2.2, должен быть принят равным –11 дБ. Подставляя это значение в выражение (2.4) и ориентируясь на величины  $E_{\text{мед}}$  в табл. 2.1, можно определить необходимые величины  $P_{\text{изл}}$  (табл. 2.3) в зависимости от расстояния и направленности приемных антенн.

Таблица 2.3

**Уровень излучаемой мощности в зависимости от расстояния**

$r$ , км	10	12	14	16	18	20
$P_{\text{изл}}$ , дБ при:						
$G_{\text{ПР}} = 10$ дБ	–10	–6	–2	–1	–4	–6
$G_{\text{ПР}} = 5$ дБ	–5	–1	–3	–6	–9	–11
$G_{\text{ПР}} = 0$ дБ	0	+4	+8	+11	+14	+16

Если рассматривать географию г. Нижнего Новгорода, то можно сделать вывод, что максимальное удаление границ города от радиопередающего телецентра составляет примерно 18 км (Сормовский и Автозаводский районы города). Поэтому, как следует из табл. 2.3, для

обеспечения на удаленных границах города приема в 90% пунктах необходимо обеспечить излученную мощность 4 дБ, если прием будет осуществляться на достаточно направленные антенны с КНД = 10 дБ. При приеме на ненаправленные антенны (комнатные или установленные на транспортных средствах) уровень излученной мощности должен быть повышен до 14 дБ.

В связи с тем, что радиопередающий телецентр располагается вблизи северной границы города целесообразно использовать антенну с секторной диаграммой направленности (ДН), коэффициент усиления (КУ) которой почти в 2 раза (точнее, на 2,5 дБ) больше, чем у антенны с круговой ДН. Более того, возможна установка 4-секционной антенны с секторной ДН, для которой КУ будет равен 14 дБ.

Учтём теперь потери в питающих антенно-фидерных трактах. При установке антенны на высоте 75...80 м длина питающего антенну кабеля будет порядка 100 м. Если использовать кабель марки РК 75-60-62 с погонным затуханием 0,015 дБ/м на частоте 700 МГц, то потери в нем составят 1,5 дБ. Следовательно, КУ антенны с учетом потерь кабеля будет равен 12,5 дБ. Взяв за основу эту величину, оценим вероятность приема сигналов цифрового телевидения на различных расстояниях от телецентра при различных мощностях передатчиков и разных КПД приемных антенн. Результаты таких расчетов представлены в табл. 2.4–2.6.

Таблица 2.4

**Процент вероятности приема при  $P_{\text{ср}} = 100$  Вт**

Расстояние до телецентра $r$ , км	10	12	14	16	18	20
$G_{\text{ПР}} = 10$ дБ	99	98	94	91	85	78
$G_{\text{ПР}} = 5$ дБ	95	93	88	78	70	50
$G_{\text{ПР}} = 0$ дБ	92	85	72	55	45	30

Таблица 2.5

**Процент вероятности приема при  $P_{\text{ср}} = 200$  Вт**

Расстояние до телецентра $r$ , км	10	12	14	16	18	20
$G_{\text{ПР}} = 10$ дБ	99,5	99	97	94,5	91,5	78
$G_{\text{ПР}} = 5$ дБ	97	95	92	88	78	75
$G_{\text{ПР}} = 0$ дБ	95	91	88	72	60	50

Таблица 2.6

**Процент вероятности приема при  $P_{\text{ср}} = 500$  Вт**

Расстояние до телецентра $r$ , км	10	12	14	16	18	20
$G_{\text{ПР}} = 10$ дБ	99,8	99,5	99	98	85	94
$G_{\text{ПР}} = 5$ дБ	99	98	96	93	90	85
$G_{\text{ПР}} = 0$ дБ	98	95	91,5	85	77	70

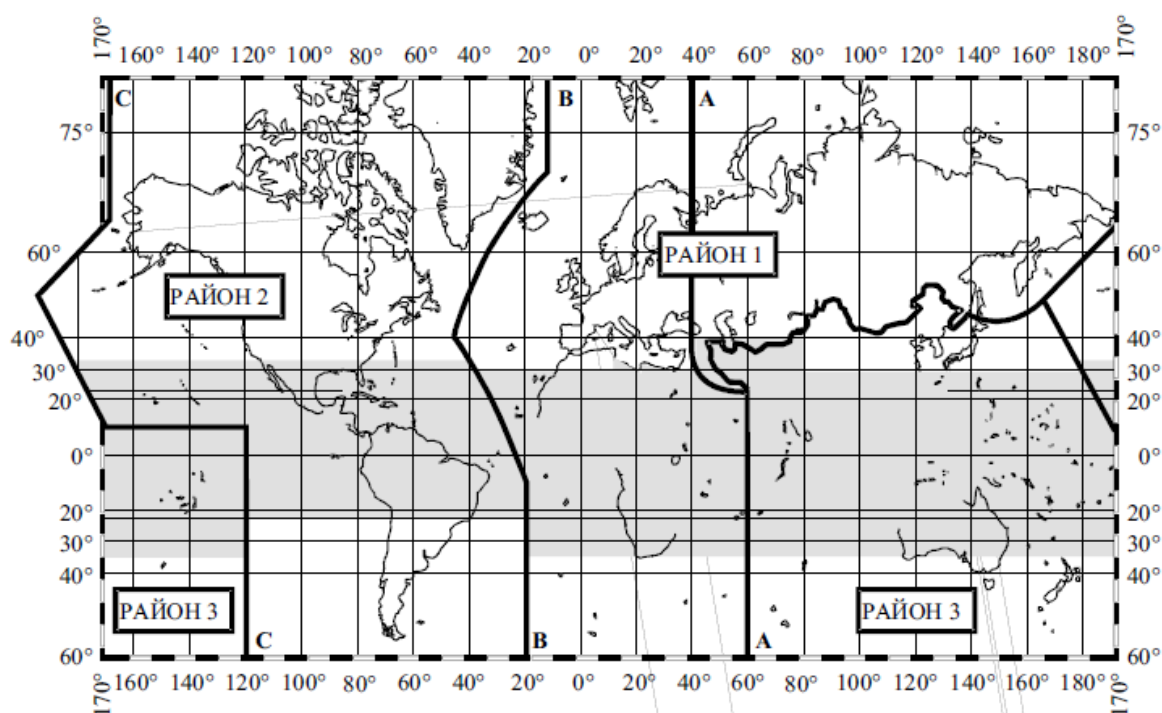
Как следует из анализа данных, представленных в табл. 2.4–2.6, при наличии направленных приемных антенн с КНД = 10 дБ и мощности передатчика 200 Вт будет обеспечиваться прием в пределах всего города с вероятностью более 90%. При приеме на ненаправленные антенны 90%-ая вероятность обеспечивается в большей части города (до расстояний 12 км), и только вблизи границ вероятность приема уменьшается до 60...70 % что следует считать удовлетворительным. Таким образом, можно полагать, что передатчик со средней мощностью излучения 200 Вт является вполне достаточным для организации, по меньшей мере, опытной зоны вещания.

При использовании ненаправленной передающей антенны, КУ которой на 2,5 дБ меньше, необходимо среднюю мощность передатчика увеличить до значения примерно 350 Вт.

Рассмотрим основные технические требования, предъявляемые к передающим устройствам систем цифрового телевизионного вещания.

Согласно Регламенту радиосвязи [13], Российская Федерация, а также большинство сопряжённых с ней государств решением Между-

народного Союза электросвязи (МСЭ) отнесены к так называемому Району 1 (рис. 2.1), который включает в себя зону, ограниченную на востоке линией А, а на западе — линией В, за исключением любой части территории Ирана, расположенной между этими границами. В этот район также полностью включены территории Армении, Азербайджана, Грузии, Казахстана, Монголии, Узбекистана, Кыргызстана, Таджикистана, Туркменистана, Турции и Украины, также зона между линиями А и С, расположенная к северу от Российской Федерации.



**Рис. 2.1. Распределение различных государств на три Района**

Для систем телерадиовещания в Районе 1 выделены следующие полосы частот:

- 48,5...66,0 МГц (1 и 2 телевизионные каналы);
- 66,0...74,0 МГц (звуковое вещание с частотной модуляцией);
- 76,0...100,0 МГц (3–5 телевизионные каналы);
- 100,0...108,0 МГц (звуковое вещание с частотной модуляцией);

- 148,0...174,0 МГц (служебные и специальные каналы, сейчас частично используемые в сетях кабельного телевидения);
- 174,0...230,0 МГц (6–12 телевизионные телеканалы);
- 470,0...582,0 МГц (21–34 телевизионные телеканалы);
- 582,0...790,0 МГц (35–60 телевизионные телеканалы).

Кроме указанных полос для наземного телевизионного вещания выделены полосы частот в гигагерцовом диапазоне: 10,7...12,75 ГГц, 27,5...29,5 ГГц, 40,5...42,5 ГГц и 84,0...86,0 ГГц, которые в настоящее время успешно осваиваются многоканальными системами наземного вещания, такими, как MMDS, LMDS, MVDS и др.

Специфика требований к передатчикам для цифрового наземного (эфирного) вещания определяется исключительно свойствами используемых сигналов, характеризующихся, сравнительно большим значением пик-фактора (вызванным использованием многочастотных сигналов) и высокими требованиями к уровню внеполосных излучений спектра (см. разд. 4.4). Искажения входного колебаний возбуждателя, происходящие в процессе преобразования частоты и усиления, приводят к изменению формы модулирующего сигнала и появлению дополнительных составляющих в спектре излучаемого колебания. Следствием этого является понижение энергетической эффективности системы (ухудшение отношения сигнал-шум при приёме) и ухудшение условий электромагнитной совместимости.

Известно, что при преобразовании и усилении колебаний метрового и дециметрового диапазонов имеют место следующие виды искажений:

- нелинейные искажения амплитудной характеристики (зависимости выходного напряжения от напряжения на входе);
- нелинейность фазовой характеристики или, что эквивалентно, неравномерность группового времени задержки (ГВЗ);
- зависимость фазы выходного колебания от мгновенного значения амплитуды — так называемая, амплитудно-фазовая конверсия;
- быстрые и медленные флуктуации фазы выходного колебания.

Все упомянутые выше виды искажений в той или иной мере сказываются на свойствах выходного колебания. Однако на основе имеющихся сведений только лишь о свойствах сигналов системы DVB-T не представляется возможным принять решение об исключении из рассмотрения какой-либо вид искажений или же сформулировать требования к его параметрам. Поэтому необходимо проводить исследования, направленные на определение зависимости между параметрами искажений и свойствами выходного колебания для конкретных типов радиопередающих устройств.

Большая часть перечисленных выше видов искажений достаточно хорошо изучена применительно к системам аналогового телевидения, и требуется только уточнить количественные соотношения. Исключением является искажение вида “нелинейные искажения амплитудной характеристики”. Это обусловлено тем обстоятельством, что современные передатчики используются одновременно для усиления и сигналов изображения, и сигналов звукового сопровождения; как следствие работы в таком режиме, характеристика нелинейности передатчика регламентируется только в области значений амплитуд, равной 0,2...0,8 от максимального значения.

В качестве примера приведём набор требований на передающие устройства российской фирмы “МАРТ” (мощная аппаратура радиовещания и телевидения), которая многие десятилетия занимается разработкой и производством передатчиков как для телевизионного, так и стереофонического радиовещания с различным уровнем мощности: от сотен ватт до десятков киловатт.

- стабильность центральной частоты не хуже  $10^{-8}$ ;
- суммарный уровень амплитудных и фазовых шумов на выходе модулятора в режиме формирования гармонического колебания не более  $-120\text{дБ}$  в полосе 1 Гц при отстройках от 1 до 15кГц;
- средний уровень входной мощности 1 мВт;
- входное сопротивление 50 Ом;
- средний уровень выходной мощности 500 Вт;

- пиковое значение выходной мощности 4000 Вт;
- максимальное значение динамических искажений фазы не более 3 град.;
- уровень шумовых составляющих спектра в области отстроек от 1 до 15 кГц не более –120 дБ относительно средней мощности;
- уровень внеполосных составляющих спектра относительно уровня спектральной плотности в рабочей части спектра в области отстроек от центральной частоты от  $\pm 4,2$  МГц до  $\pm 12$  МГц не должен превышать –45 дБ и в области отстроек более  $\pm 12$  МГц не должен превышать –65 дБ;
- качественные показатели передатчика обеспечиваются при его работе на нагрузку с волновым сопротивлением 50 Ом при коэффициенте стоячей волны (КСВ) не более 1,3;
- работоспособность передатчика обеспечивается при его работе на нагрузку при КСВ не более 2;
- неравномерность коэффициента усиления в полосе  $\pm 3,7$  МГц не более  $\pm 0,1$  дБ;
- неравномерность ГВЗ в полосе  $\pm 3,7$  МГц не более  $\pm 50$  нс.
- охлаждение передатчика воздушное принудительное, с встроенной системой охлаждения. Забор воздуха для охлаждения производится из помещения, выброс отработанного воздуха — в помещение.
- массо-габаритные характеристики: 570×1700×600 мм, 180 кг.
- выход передатчика представляет собой жесткий коаксиал сечением 35/15, центральная жила — утопленный штырь;
- устройство должно исполнять все функции при температуре окружающей среды от +5 до 45 °С и относительной влажности 85%.

## **2.2. ФЕДЕРАЛЬНАЯ ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Одной из особенностей организации цифрового телевизионного вещания в странах, где большой процент составляют территории с

плотностью населения менее 1 чел/м<sup>2</sup>, к которым, в первую очередь, относится Российская Федерация, является наличие большого парка мощных передатчиков, изначально ориентированных на аналоговое телевизионное и радиовещание. Часть из них работает, другие — выведены из штатного функционирования (что связано с общим уменьшением потребностей в традиционных аналоговых вещательных услугах) и законсервированы. Конечно, такие передатчики до некоторой степени физически и морально устарели, однако после небольшой модернизации их параметры можно привести к требованиям цифрового вещания, а физический запас прочности позволит им функционировать достаточно долго.

В этой связи представляется целесообразным переход к цифровому вещанию через гибридный аналого-цифровой режим, что обеспечит совместимость с существующими услугами аналогового вещания.

В настоящее время российская государственная сеть радиовещания в диапазонах длинных (ДВ), средних (СВ) и коротких (КВ) волн построена более, чем на 450 передатчиках различной мощности: от 1 кВт до 1,2 МВт, из которых, как уже было отмечено, значительная часть (более трети) в силу отсутствия коммерческой загрузки не используется. В табл. 2.7 представлено распределение радиопередающих устройств (РПДУ) по диапазонам и наиболее социально значимым транслируемым программам.

Таблица 2.7

**Распределение РПДУ по диапазонам**

Диапазон	Всего	Не используется	“Радио России”	“Маяк”	“Голос России”	Итого действует
ДВ	293	106 (36%)	16	5	—	187
СВ	(100%)		57	98	13	(64%)
КВ	171 (100%)	51 (30%)	27	10	83	120 (70%)

Зоны охвата вещанием данных передатчиков в зависимости от излучаемых мощностей, типа антенн и условий местности варьируются в достаточно широких пределах (табл. 2.8).

Таблица 2.8

**Зона охвата в зависимости от мощности РПУ**

Мощность РПУ, кВт	Радиус зоны охвата, км
Диапазон ДВ	
75	280
500	520
Диапазон СВ	
75	220
150	300
250	350
500	400
1200	1040

Представленные в табл. 2.7, а также в ряде следующих таблиц данные взяты из доклада “Состояние и методы повышения эффективности государственного радиовещания Российской Федерации в диапазонах ДВ, СВ и КВ”, представленного в 2009 г. группой ведущих российских специалистов в области радиовещания, и на основании которого было принято Постановление Правительства РФ “О Федеральной целевой программе “Развитие телерадиовещания в 2009–2015 гг.” [14]. Прежде чем перейти к обсуждению положений и задач, сформулированных в Программе для решения в ближайшее пятилетие, приведём краткий перечень базовых понятий, относящихся к сути рассматриваемых вопросов.

*Абонент* — пользователь услугами связи по трансляции, с которым заключен договор об оказании таких услуг при выделении для этих целей уникального кода идентификации.

*Аудитория средств массовой информации* — совокупность потребителей продукции средств массовой информации в течение определенного промежутка времени.

*Государственная телерадиовещательная организация* — телерадиовещательная организация, созданная в форме государственного унитарного предприятия, государственного учреждения, государственной корпорации.

*Зона обслуживания сети связи для трансляции телевизионных каналов, радиоканалов (зона покрытия)* — территория, в пределах которой обеспечивается доставка сигнала телевизионных каналов, радиоканалов в соответствии с техническими нормами, или территория, в пределах которой обеспечивается техническая возможность доставки сигнала телевизионных каналов, радиоканалов.

*Использование радиочастоты или радиочастотного канала для целей цифровой телерадиотрансляции* — осуществление трансляции телевизионных каналов и радиоканалов с использованием методов цифровой обработки сигнала, позволяющих на данной частоте (радиочастотном канале) одновременно транслировать сигналы нескольких телевизионных каналов и (или) радиоканалов, составляющих один мультиплекс (пакет каналов).

*Кабельная телерадиотрансляция* — трансляция, осуществляемая посредством кабельных сетей связи.

*Конверсия радиочастотного спектра* — совокупность действий, направленных на расширение использования радиочастотного спектра радиоэлектронными средствами гражданского назначения.

*Лицензиат* — юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, имеющие лицензию на осуществление конкретного вида деятельности.

*Лицензионные требования и условия* — совокупность определенных лицензией на вещание и приложениями к лицензии организационных, технологических и содержательных характеристик вещания,

выполнение которых лицензиатом обязательно при осуществлении лицензируемого вида деятельности.

*Лицензия на вещание* — специальное разрешение на осуществление деятельности по обеспечению населения телевизионными и радиопрограммами, рассчитанными на общероссийскую, региональную или местную аудиторию, а также на осуществление зарубежного телевизионного вещания и (или) радиовещания.

*Межрегиональная телерадиовещательная организация* — телерадиовещательная организация, имеющая лицензию на вещание телевизионного канала и радиоканала, трансляция которых осуществляется в пределах территории трёх или более субъектов Российской Федерации, но не более двух третьих субъектов Российской Федерации.

*Мультиплекс* (пакет телевизионных каналов, радиоканалов) — перечень телевизионных каналов и радиоканалов, телерадиотрансляция которых осуществляется с использованием одного радиочастотного канала.

*Муниципальная телерадиовещательная организация* — телерадиовещательная организация, созданная в форме муниципального унитарного предприятия, муниципального учреждения.

*Общероссийская телерадиовещательная организация* — телерадиовещательная организация, имеющая лицензию на вещание телевизионного канала и радиоканала, трансляция которых осуществляется в пределах территории более двух третьих субъектов Российской Федерации и аудитория которого составляет более двух третьих населения Российской Федерации.

*Общероссийский обязательный общедоступный телевизионный канал, радиоканал* — телевизионный канал, радиоканал свободного доступа, обязательный для трансляции операторами связи на всей территории Российской Федерации. Перечень общероссийских обязательных общедоступных телевизионных каналов, радиоканалов определяется в порядке, установленном законодательством Российской Федерации.

*Оператор связи* — юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, оказывающие услуги связи на основании лицензии на осуществление деятельности в области оказания услуг связи.

*Пользовательское (оконечное) оборудование* — технические средства для приема, обработки и (или) воспроизведения сигнала телевизионных каналов, просмотра телевизионных каналов.

*Присвоение (назначение) радиочастоты или радиочастотного канала* — разрешение в письменной форме на использование конкретной радиочастоты или радиочастотного канала с указанием конкретного радиоэлектронного средства, целей и условий такого использования.

*Программная концепция вещания* — обязательное приложение к лицензии на вещание, которым определяются основные содержательные и количественные характеристики вещания.

*Радиоканал* — электронное средство массовой информации, представляющее собой совокупность радиопрограмм и (или) иных звуковых сообщений и материалов, фонограмм, сформированных в соответствии с сеткой вещания для последующего распространения.

*Радиоканал свободного доступа* — радиоканал, распространяемый для неопределенного круга лиц без взимания платы с потребителей (радиослушателей) за право прослушивания.

*Распределение полос радиочастот* — определение предназначения полос радиочастот посредством записей в Таблице распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации, на основании которых выдается разрешение на использование конкретной полосы радиочастот, а также устанавливаются условия такого использования.

*Региональная телерадиовещательная организация* — телерадиовещательная организация, имеющая лицензию на вещание телевизионного канала и радиоканала, трансляция которых осуществляется в пределах территории одного или двух сопредельных субъектов Российской Федерации

*Региональный (межрегиональный) обязательный общедоступный телевизионный канал, радиоканал* — телевизионный канал или радиоканал свободного доступа, обязательный для трансляции оператором связи на всей территории одного или нескольких субъектов Российской Федерации. Перечень региональных (межрегиональных) обязательных общедоступных телевизионных каналов и радиоканалов определяется в порядке, установленном законодательством Российской Федерации.

*Сеть электросвязи для трансляции телевизионных каналов, радиоканалов (телерадиотрансляционная сеть)* — технологическая система, включающая средства и линии связи и предназначенная для трансляции (ретрансляции) сигнала телевизионных каналов, радиоканалов.

*Сигнал телевизионного канала* — электромагнитный сигнал, технологические параметры которого определены вещателем в соответствии с установленными требованиями.

*Слот* — условное обозначение позиции телевизионного канала и радиоканала в мультиплексе.

*Спутниковая непосредственная телерадиотрансляция* — эфирная телерадиотрансляция, осуществляемая с использованием радиоэлектронных средств, размещаемых на космических аппаратах для непосредственного приема сигналов пользовательским (оконечным) оборудованием.

*Телевизионный канал* — электронное средство массовой информации, представляющее собой совокупность телевизионных программ и (или) иных аудиовизуальных сообщений и материалов, сформированных в соответствии с сеткой вещания для последующего распространения.

*Телерадиовещательная организация (вещатель)* — юридическое лицо, осуществляющее телерадиовещание на основании лицензии на вещание.

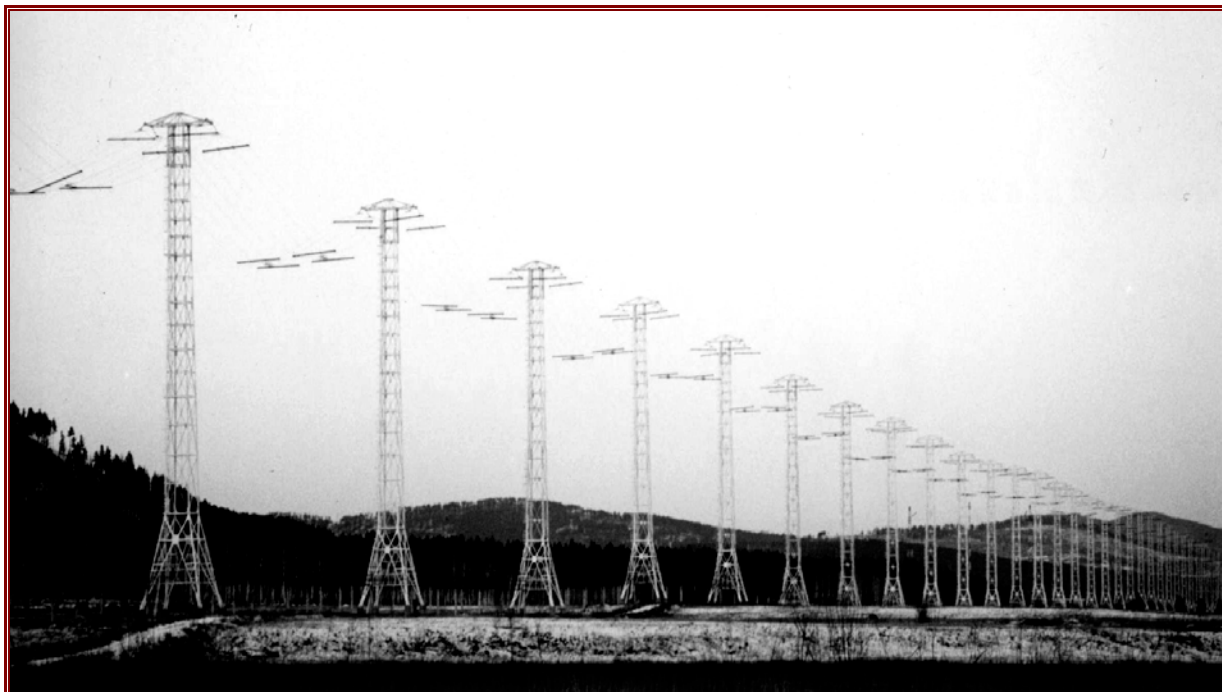
*Услуга связи по трансляции* — деятельность оператора связи по передаче сигнала телевизионного канала, радиоканала для его непосредственного приема пользователями, в том числе, абонентами.

Номенклатура радиопередающих устройств, действующих в сети государственного вещания, составляет более 30 единиц. Это передатчики как отечественного производства (Шторм, Снег, Буран, Тайфун и др.), так и зарубежные, изготовленные, например, фирмами Тесла (типа SRV), Электроимпекс и др. Большая часть этих передатчиков изготовлена 35–40 лет тому назад, по одному и тому же, устаревшему на настоящее время принципу, не позволяющему реализовать современные методы усиления, преобразования и передачи электрических сигналов на высоком уровне.

Для эксплуатируемых в сети государственного вещания РПДУ характерно следующее:

- отсутствие режима однополосной передачи;
- невозможность регулировки уровня несущей, позволяющей улучшить условия электромагнитной совместимости (ЭМС) и уменьшить энергопотребление РПДУ;
- отсутствие требуемого уровня устройств диагностики, автоматизации, автоматического обслуживания;
- большое число устаревших, различных по типу, электровакуумных приборов (ламп, как правило, триодов), многие из которых давно сняты с производства;
- низкий уровень надёжности;
- низкий коэффициент полезного действия, не превышающий 50% (по сравнению с величиной 75–80% у современных передатчиков);
- отсутствие режима передачи цифровых сигналов.

Из перечисленных характеристик следует сделать вывод о несоответствии парка радиопередающих устройств современным требованиям, т.е. состояние отечественной радиопередающей сети в настоящее время следует считать неудовлетворительным.



**Рис. 2.2. Антенна диапазона СВ “Большая заря”, состоящая из 36 секций и имеющая общую длину 3600 м**

Отдельное место в сети государственного вещания занимают антенно-фидерные устройства (рис. 2.2 и 2.3), разработанные в течение многих десятилетий учреждениями Академии Наук СССР, а также отраслевыми научно-исследовательскими институтами. Такие устройства, в ряде случаев не имеющие зарубежных аналогов, обладают высокой эффективностью излучения электромагнитных волн (ЭМВ). Однако из-за отсутствия финансирования на осуществление текущего и капитального ремонта технологического оборудования на настоящее время имеется существенный физический износ ряда узлов и систем. Так, стальные канаты, являющиеся основой несущих конструкций, достигли предельных величин износа и усталости металла. Антенные сооружения требуют незамедлительной покраски, а многие — капитального ремонта, включая антенные опоры и полотна.



**Рис. 2.3. Антенный комплекс для диапазонов СВ и КВ**

Неудовлетворительным, низкоэффективным на сегодняшний день является и принцип построения государственной вещательной сети, при котором практически полностью отсутствуют синхронные радиовещательные сети, позволяющие многократно сократить энергопотребление, увеличить напряжённость поля в густонаселённых местах, оптимально охватить качественным радиовещанием требуемые территории.

Следует отметить, что после распада СССР прекратилось вещание российских государственных программ на территории большинства стран, ранее входящих в состав СССР, где всё ещё проживает большое число русскоязычного населения. Расположенные там передающие средства либо сняты с вещания, либо работают на национальные вещательные программы.

По сравнению с ситуацией конца 1980-х годов, в настоящее время из эксплуатации выведены более 150 мощных РПДУ. Большинство мощных передатчиков работают с половинной и менее мощностью относительно номинала. Суммарная потеря аудитории государственного вещания составила более 25 млн. человек. В результате снижения загрузки и мощности радиовещательных передатчиков в настоящее время государственное вещание не может выполнять функции оповещения в чрезвычайных ситуациях, что прежде было одной из основных обязанностей станций “Радио России” и “Маяк”. При этом около 1,6 млн. человек, проживающих примерно в 10 тыс. населенных пунктах, не охвачено телевизионным вещанием, а более 3 млн. человек имеют возможность принимать лишь одну телевизионную программу.

Прекращение или уменьшение внутрироссийского радиовещания в диапазонах ДВ и СВ в приграничных районах России (Дальний Восток, Юг, Северо-Запад) вызвали повышенную вещательную активность сопредельных государств. Особенно это наблюдается в приграничных районах Дальневосточного Федерального округа, где устойчиво принимаются на русском языке многочисленные радиостанции Китая, Кореи, Японии, США.

Для сравнения рассмотрим состояние радиовещательных сетей в странах мирового сообщества.

Общее число передатчиков в мире работающих в диапазоне ДВ составляет около 1200 единиц, СВ — около 13800 единиц, КВ — около 2300 единиц. При этом мировой парк радиоприёмников различного назначения оценивается приблизительно в 2,5 млрд. единиц.

Более 25% от общего количества действующих передатчиков, мощностью от 50 кВт до 2 МВт, введено в эксплуатацию в течение прошедших 10 лет. Ряд радиостанций имеет межгосударственные договоры по организации иностранного вещания (иновещания) с территории других государств. Например, государственные вещательные службы США активно ведут трансляцию многих вещательных про-

грамм с территории Таджикистана (пос. Орзу), где ранее располагался один из крупнейших радиоцентров Советского Союза. Здесь ими задействованы более 50% антенных полей, построенных специалистами СССР в 80-е годы прошлого столетия, а мощности РПДУ составляют около 1 МВт. Взамен этого США поставляют Таджикистану практически бесплатно современные передатчики, которые также задействуют для обеспечения технологий иновещания.

Радиовещание в диапазонах ДВ и СВ наиболее распространено в США, Германии, Франции, Китае, Японии, Австралии, Великобритании, Индии, Италии.

На территорию Российской Федерации языке официально организуют русскоязычное радиовещание в диапазонах СВ и КВ более 50 зарубежных радиокompаний, использующих для вещания свыше 600 номиналов радиочастот с общим объёмом суточного вещания более 210 часов.

Анализ состояния радиовещания в диапазонах ДВ, СВ и КВ в странах мирового сообщества позволяет выявить следующие основные тенденции.

- Интерес государств к организации радиовещания в диапазонах ДВ, СВ и КВ в настоящее время не только не снижен, а и существенно увеличивается. Это подтверждается результатами работы Международной конференции 2006 г. в Женеве, на которой происходила жёсткая борьба между странами за частотный ресурс в этих диапазонах.

- Широкий выход на информационное поле международного и внутреннего радиовещания новых стран: Китая, Ирана, стран Ближнего Востока, Африки и др.

- Активное внедрение методов цифрового теле- и радиовещания в различных стандартах.

- Строительство во многих странах в диапазоне СВ синхронных сетей вещания;

- Разработка, изготовление и серийное производство multifunctional радиоприёмных устройств различных групп сложности и различной ценовой доступности.

Исходя из вышеизложенного, рассмотрим возможные методы повышения эффективности радиовещания, позволяющие в ближайшей перспективе радикально улучшить существующее положение дел в области отечественного радиовещания.

- Модернизация существующего парка действующих мощных РПДУ в диапазонах ДВ, СВ и КВ.

- Разработка и промышленное изготовление рядов унифицированных, необслуживаемых, автономных высокоэффективных совместимых передатчиков нового поколения, могущих функционировать в режимах гибридного аналого-цифрового вещания.

- Разработка и создание новых современных комплектующих изделий, и производство унифицированного ряда новейших электровакуумных приборов для РПДУ.

- Построение вещательных сетей, основанных на совместной работе, как одиночных радиостанций, так и радиостанций объединённых в синхронные сети радиовещания.

- Разработка законодательных и правовых аспектов, позволяющих экономически обоснованно и эффективно эксплуатировать общегосударственную сеть радиовещания.

Одним из наиболее перспективных способов повышения эффективности общегосударственной сети теле- и радиовещания является построение сетей синхронного вещания в различных диапазонах.

До определённого времени в области развития РПДУ проводилась политика всемерного увеличения их мощности — “умощнения”. Это привело к весьма полному (иногда даже излишнему в малонаселённых Восточных и Северных районах) охвату территории страны (тогда — СССР) телевизионным и радиовещанием. Однако с точки зрения экономических показателей (энергопотребление, эксплуатационные затраты и др.) содержать такую сеть мощных и сверхмощных

РПДУ затруднительно. Кроме того, такие передатчики создают значительные взаимные помехи.

В связи с этим возникла задача “разумощнения” РПДУ, решая которую необходимо оптимизировать площадь покрытия местности радиовещанием, организовав его так, чтобы излучением охватывались, в основном, территории, на которых находятся определённые населенные пункты.

В настоящее время основу государственной системы телерадиовещания составляют ФГУП “Всероссийская государственная телевизионная и радиовещательная компания (ВГТРК)”, ФГУП “Российская телевизионная и радиовещательная сеть” (государственный оператор связи), ОАО “Первый канал”, ОАО “Телерадиокомпания “Петербург”, ОАО “Телекомпания НТВ”, ФГУП “Космическая связь”, ФГУП “Телевизионный технический центр “Останкино”.

Наземный сегмент государственной телевизионной и радиовещательной сети составляют региональные, республиканские, краевые и областные радиотелевизионные передающие центры, входящие в состав государственного оператора связи, ответственного за наземную (эфирную) трансляцию российских общедоступных каналов, а также за создание и развертывание наземных сетей для цифрового вещания.

Результаты расчетов и функционирования опытных вещательных зон показывают, что наряду с установкой мощных РПДУ в определенных случаях более выгодным оказывается построение сети с большим числом относительно маломощных передатчиков. Например, в регионах Дальнего Востока, Крайнего Севера, Сибири, где население проживает в городах и поселках, удаленных друг от друга, целесообразно устанавливать маломощные автономные необслуживаемые передатчики в непосредственной близости к пунктам проживания. При этом сам канал подачи вещательных программ (услуг) может быть любой: волоконный, оптический, спутниковый.

Представляет также большой интерес идея создания в густонаселенных областях высокоэффективной системы синхронного радиовещания.

В обоих случаях при построении сетей необходимо решить ряд практических задач:

- обеспечить каналами подачи радиовещательной программы каждую радиостанцию;
- разработать новый частотный план на основе функционирования большого числа маломощных радиостанций;
- разработать семейство автономных, необслуживаемых, высоконадежных передающих устройств с низким энергопотреблением на различные уровни мощности.

Построение синхронных сетей радиовещания в конечном итоге позволит при меньших излучаемых мощностях обеспечить заданную напряженность поля в зонах вещания, т.е. провести “разумощнение” без ущерба для потребителя. Кроме того, наличие сети вещания обеспечивает лучшую надёжность покрытия, поскольку при выходе из строя отдельных передатчиков возможно компенсация потерь путём перераспределения общего сетевого ресурса.

Конечным результатом реализации Программы объявлено обеспечение 100% населения Российской Федерации многоканальным цифровым вещанием с гарантированным предоставлением российских общедоступных телевизионных и радиоканалов, принимаемых с заданным качеством. При этом, согласно решению Международной конференции 2006 г. в Женеве, срок окончательного перехода к цифровым технологиям вещания — 2015 г.

При подготовке Программы был проведен анализ различных вариантов решения проблемы развития телерадиовещания и перехода на цифровые технологии, а также дана оценка преимуществ и рисков, возникающих при различных вариантах решения этой проблемы.

В случае развития телерадиовещания на коммерческой основе без применения мер государственной поддержки на цифровое вещание в

первую очередь будут переведены крупные города из-за необходимости окупаемости инвестиционных вложений для реализации Программы, а в сельских и труднодоступных регионах этот процесс может растянуться на десятилетия. По этой же причине произойдет снижение объема (в некоторых регионах, возможно, ликвидация) бесплатно оказываемых вещательных услуг. В результате, в целях исключения диспропорций в охвате населения многопрограммным вещанием и снижения социальной напряженности сохранится на неопределенный срок необходимость содержания существующей аналоговой государственной инфраструктуры вещания, в том числе, за счет средств федерального бюджета. Помимо этого возникает опасность выхода за рамки установленного Международным союзом электросвязи срока перехода от аналогового к цифровому телевидению до 2015 г. даже в критически важных приграничных регионах.

Альтернативным является так называемый социально ориентированный вариант, основанный на применении мер государственной поддержки развития телерадиовещания. Это подразумевает, в частности, первоочередное выделение радиочастотного ресурса для целей наземной цифровой трансляции общедоступных телерадиоканалов, создание и развертывание во всех регионах Российской Федерации за счет средств федерального бюджета цифровых наземных сетей государственного оператора связи. При этом сохранится существующий порядок предоставления услуг телерадиовещания населению на бесплатной основе, что обеспечит создание единого информационного и культурного пространства, приемлемый баланс между социально значимыми и коммерческими общедоступными услугами вещания, а также равномерность развития субъектов Российской Федерации по уровню доступности услуг телерадиовещания.

При переходе на повсеместный прием цифровых телеканалов существенным фактором риска достижения целей Программы является степень насыщения цифровым приемным оборудованием абонентов как наземного, так и спутникового непосредственного телевизи-

онного вещания. Недостаточная степень насыщения цифровым приемным оборудованием в каком-либо регионе на момент завершения Программы не позволит проводить отключение аналоговых телеканалов, потребует дополнительного поддержания параллельного аналогового и цифрового вещания и ограничит эффективное использование радиочастотного спектра.

В целях минимизации риска планируется проведение массовой кампании среди населения по разъяснению всех вопросов внедрения цифрового телерадиовещания, информированию о сроках, этапах и о порядке перехода на цифровое вещание в каждом регионе. Помимо этого планируется разработка комплекса поощрительных мер для российских предприятий — производителей бытовых устройств для систем цифрового вещания, а также ввод ограничений в отношении производства российского телевизионного приемного оборудования, не оснащенного блоком приема цифровых каналов, и импорта такого оборудования.

Предполагается, что принятые решения позволят сократить срок перехода на цифровое вещание в стране до 4–5 лет и сэкономить значительные средства федерального бюджета на поддержание аналоговой сети вещания, а планомерное и повсеместное внедрение новых технологий на государственных сетях вещания создаст базу для интенсивного развития всей отрасли телерадиовещания.

Реализация Программы осуществляется в 2009–2015 гг. в два этапа.

На первом этапе (2009 г.), где предусматривается обеспечение условий для перехода на цифровой формат распространения программ, осуществляются следующие мероприятия.

- Разработка, экспертиза и утверждение системных проектов для первой очереди строительства сетей цифрового телевизионного вещания в российских регионах.

- Начало строительства сетей цифрового вещания в регионах с целью отработки планируемых к реализации технологических решений.

- Подготовка к проектированию и созданию космических аппаратов в целях их своевременного вывода на орбиту и обеспечения задач трансляции частотным ресурсом.

На втором этапе (2010–2015 гг.) осуществляются реализация запланированных мероприятий по развитию телерадиовещания, повсеместный переход на цифровое вещание, создание условий для последовательного отключения аналогового вещания в стране и завершение создания единого информационного пространства в Российской Федерации, в том числе:

- модернизация и расширение существующей инфраструктуры телерадиовещания (реконструкция, техническое перевооружение сети антенно-мачтовых сооружений, объектов инженерного обеспечения, замена аварийных сооружений и объектов);

- строительство цифровых наземных вещательных сетей для распространения обязательных телерадиоканалов и иных каналов свободного доступа;

- создание и запуск спутников связи и вещания;
- строительство сетей цифрового радиовещания;
- информационно-разъяснительные мероприятия по обеспечению успешного и планомерного внедрения цифрового вещания в Российской Федерации;

- создание системы цифровизации архивных материалов.

По завершении реализации Программы планируется достижение следующих значений *целевых индикаторов*.

- Численность населения Российской Федерации, не охваченного телевещанием, на конечном этапе реализации Программы должна быть меньше тысячи человек.

- Доля населения Российской Федерации, имеющего возможность приема обязательных телерадиоканалов, 100%.

- Площадь территории субъектов Российской Федерации, охваченных наземным цифровым вещанием обязательных телерадиоканалов, 17103 тыс. кв. километров.

- Доля населения Российской Федерации, имеющего возможность приема 20 телеканалов свободного доступа, 100%.

- Доля населения Российской Федерации, имеющего возможность приема наземных цифровых телеканалов, 98,8%.

- Количество субъектов Российской Федерации, охваченных цифровым телевещанием, 83.

- Доля населения Российской Федерации, не охваченного региональным телевещанием, 1,2%.

- Доля населения Российской Федерации, охваченного радиовещанием заданного качества, 100%.

- Доля населения Российской Федерации, охваченного телерадиооповещением о чрезвычайных ситуациях, 100%.

Для контроля за ходом реализации Программы применяется ряд показателей эффективности.

- Количество зарегистрированных сетей цифрового вещания первого мультиплекса.

- Количество введенных в эксплуатацию объектов по следующим мероприятиям:

- строительство объектов опытных зон цифрового вещания;
- строительство объектов сети цифрового вещания первого мультиплекса;

- реконструкция, техническое перевооружение, замена антенно-мачтовых сооружений и башен;

- строительство новых антенно-мачтовых сооружений;

- реконструкция и замена антенно-фидерных устройств;

- реконструкция и строительство объектов энергоснабжения инфраструктуры телерадиовещания;

- строительство центров формирования мультиплексов;

- строительство объектов сетей цифрового вещания второго и третьего мультиплексов;
- строительство объектов сетей цифрового вещания дополнительных мультиплексов;
- строительство объектов сетей цифрового вещания для телевидения высокой четкости и мобильного телевидения;
- строительство объектов сети мощного цифрового радиовещания;
- строительство объектов сети УКВ-ЧМ-вещания.

Значения индикаторов и показателей эффективности, соответствующие различным срокам реализации Программы, представлены в табл. П.2 (Приложение 2).

Концепция Программы базируется на приведенной ниже модели функционирования рынка электронных средств массовой информации (СМИ) в современных условиях, где под электронными СМИ понимаются электронное издание, телевизионный канал, радиоканал, теле- или радиопрограмма, иная форма распространения массовой информации, имеющая постоянное название и установленную периодичность распространения.

Все субъекты рынка телерадиовещания функционально разделяются на 4 основные группы:

- производители аудиовизуальной продукции, например зарегистрированные СМИ, авторы и правообладатели (далее — производители);
- телерадиовещательные организации (далее — вещатели);
- операторы связи (далее — операторы);
- потребители.

Отношения между указанными субъектами выстраиваются на основе рыночных принципов с соблюдением условий и правил, определяемых государством.

На основе собственной и (или) приобретаемой информации (аудиовизуальных сообщений, телепрограмм, текстов, изображений)

производители формируют их совокупность и передают вещателям телевизионных каналов и (или) радиоканалов.

Вещатель формирует аудиовизуальную продукцию в виде телевизионного и (или) радиоканала для дальнейшего распространения с использованием сетей связи. Финансирование формирования и распространения телевизионных и радиоканалов вещателями осуществляется за счет размещения рекламных материалов и (или) государственных дотаций (каналы свободного доступа) или взимания платы с потребителей (каналы условного доступа). При этом услуги операторов по доставке сигналов до потребителей вещатель оплачивает за счет собственных средств.

Операторы осуществляют доставку продукции электронных СМИ от вещателя до потребителей, состоящую из транзита сигнала по сетям связи и трансляции сигнала потребителям. Оператор может выступать агентом вещателя, выполняя часть функций последнего по взаимодействию с потребителем.

В отношениях с вещателем потребитель может выступать как:

- абонент — в случае если он оплачивает доступ к содержанию телевизионных каналов и (или) радиоканалов (каналов условного доступа) на основании заключенного с вещателем письменного договора;
- пользователь — в случае если он имеет бесплатный доступ к содержанию телевизионных каналов и (или) радиоканалов (каналов свободного доступа) вещателя.

В отношениях с оператором потребитель выступает как:

- абонент — в случае если он оплачивает доступ к сети связи оператора (например, кабельные сети, сети спутниковой непосредственной трансляции и пр.) на основании заключенного с оператором письменного договора;
- пользователь — в случае если он имеет бесплатный доступ к сети связи оператора (например, наземные аналоговые эфирные сети).

В Концепции предлагается сохранить существующие механизмы лицензирования вещания отдельно от лицензирования деятельности по оказанию услуг связи.

Лицензирование вещания остается основным инструментом государственного регулирования в сфере телевидения и радио.

Основным принципом регулирования медиаотрасли в условиях интенсивного развития рынка мультимедийных услуг является осуществление лицензирования деятельности по оказанию услуг связи и деятельности в сфере телерадиовещания единым лицензирующим органом.

Лицензирование деятельности в сфере телерадиовещания осуществляется путем выдачи универсальной лицензии, в которой указываются:

- наименование лицензиата;
- перечень распространяемых СМИ (необходима предварительная регистрация СМИ);
- форма распространения (телевизионный канал, радиоканал и т. п.);
- программная направленность СМИ (информационный, музыкальный, спортивный канал и др.);
- территория распространения (муниципальный, региональный, межрегиональный, федеральный и международный уровни).

Количество лицензий, выдаваемых одному вещателю, не ограничивается.

На основе полученной лицензии вещатель заключает договоры о трансляции с операторами, имеющими лицензию на этот вид деятельности.

Вещатель обязан проинформировать уполномоченный федеральный орган исполнительной власти в области надзора за вещанием о заключенных с операторами договорах о трансляции с указанием существенных условий заключенных им договоров (в том числе слота в транслируемом оператором мультиплексе).

В сетях стационарного эфирного цифрового телерадиовещания стандартной четкости трансляция телевизионных каналов и радиоканалов условного доступа будет осуществляться в порядке, определенном законодательством Российской Федерации.

Для телевизионных и радиоканалов, трансляция которых осуществляется в аналоговых сетях, сохраняется прежний порядок лицензирования. При этом должен быть разработан механизм ограничения приема и рассмотрения заявок на получение лицензии на аналоговое вещание после 31 декабря 2007 г.

Для осуществления трансляции операторы должны получить лицензию на трансляцию, в которой указываются:

- наименование лицензиата;
- среда трансляции (кабель, эфир);
- вид трансляции (спутниковая, наземная);
- технические параметры трансляции (частоты, модуляция, вид кодирования, скорость потока и т.д.);
- территория охвата трансляцией;
- дополнительные требования, установленные при выдаче лицензии.

Лицензионные условия осуществления деятельности операторов по трансляции должны обеспечивать обязательное распространение совокупности социально значимой информации (обязательных общедоступных телевизионных каналов и радиоканалов, сигналов оповещения населения о чрезвычайных ситуациях, природных и техногенных катастрофах и т. п.) на всей территории, указанной в лицензии оператора.

Оператор обязан проинформировать уполномоченный федеральный орган исполнительной власти по контролю и надзору в области связи о заключенных с вещателями договорах о трансляции и осуществить их регистрацию с указанием существенных условий заключенных им договоров.

Услуга по доставке сигналов телевизионных каналов и радиоканалов от вещателя до оператора, осуществляющего трансляцию, оказывается на основе лицензии на один из следующих видов деятельности в области связи:

- услуги связи по предоставлению каналов связи;
- услуги связи по передаче данных, за исключением передачи голосовой информации;
- телематические услуги связи.

### **2.3. СТРОИТЕЛЬСТВО НАЗЕМНЫХ СЕТЕЙ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ**

Базовым понятием, лежащим в основе реализации Программы, является мультиплекс, определяемый как пакет телевизионных каналов, радиоканалов, представляющий собой перечень телевизионных каналов и радиоканалов, телерадиотрансляция которых осуществляется с использованием одного радиочастотного канала. Программа предусматривает формирование трёх основных и нескольких дополнительных мультиплексов. Главный упор сделан на реализацию первого мультиплекса; предполагается, что реализация последующих мультиплексов будет происходить существенно проще.

#### **Развитие сети вещания.**

Создание цифровой сети 1-го мультиплекса осуществляется на основе действующих объектов государственной сети телерадиовещания. Прообразом цифровой сети распространения 1-го мультиплекса выступает действующая сеть распространения программ открытого акционерного общества (ОАО) “Первый канал”, обеспечивающая на сегодняшний день максимальный охват населения наземным эфирным вещанием. В этом случае количество объектов государственной сети, подлежащих дооснащению оборудованием цифрового вещания, составляет 6500 единиц. При этом создаваемая сеть имеет следующие основные технические и эксплуатационные характеристики:

- стандарт вещания DVB-T, цифровая компрессия MPEG-2, MPEG-4;
- оборудование позволяет использовать системы условного доступа в соответствии со стандартами, принятыми вещательными компаниями;
- исходя из требований и нормативов эксплуатационной надежности осуществляется резервирование оборудования, а также обеспечивается возможность дистанционного контроля и управления;
- оборудование работает в круглосуточном режиме; приемное и передающее цифровое оборудование и антенно-фидерные устройства размещаются на технических объектах с максимальным использованием существующих систем инженерных коммуникаций.

Строительство сети 1-го мультиплекса в регионах начинается в соответствии с частотно-территориальным и территориально-временным планом развертывания сетей цифрового вещания с приоритетом приграничных районов Российской Федерации, планы переходного периода в которых требуют незамедлительной координации с сопредельными странами.

Регионами 1-й очереди создания сетей цифрового телевизионного вещания (2010 г.) являются 12 регионов, включающих 2089 пунктов вещания, с общим объемом финансирования 2862 млн. рублей: Республика Алтай, Республика Бурятия, Республика Тыва, Республика Хакасия, Алтайский край, Забайкальский край, Камчатский край, Приморский край, Хабаровский край, Амурская область, Сахалинская область, Еврейская автономная область.

Регионами 2-й очереди создания сетей цифрового телевизионного вещания (2011–2012 гг.) являются 27 регионов, включающих 1554 пункта вещания, с общим объемом финансирования 3299 млн. рублей: Республика Адыгея, Республика Дагестан, Республика Ингушетия, Кабардино-Балкарская Республика, Республика Калмыкия, Карачаево-Черкесская Республика, Республика Карелия, Республика Северная Осетия - Алания, Чеченская Республика, Краснодарский край,

Астраханская область, Белгородская область, Брянская область, Волгоградская область, Воронежская область, Иркутская область, Калининградская область, Курская область, Ленинградская область, Мурманская область, Оренбургская область, Псковская область, Ростовская область, Смоленская область, Тюменская область, г. Санкт-Петербург, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра.

Регионами 3-й очереди создания сетей цифрового телевизионного вещания (2012–2013 гг.) являются 39 регионов, включающих 1582 пункта вещания, с общим объемом финансирования 4286 млн. рублей: Республика Коми, Республика Марий Эл, Республика Мордовия, Республика Татарстан, Удмуртская Республика, Чувашская Республика, Пермский край, Ставропольский край, Архангельская область, Владимирская область, Вологодская область, Ивановская область, Калужская область, Кемеровская область, Кировская область, Костромская область, Курганская область, Липецкая область, Магаданская область, Московская область, Нижегородская область, Новгородская область, Новосибирская область, Омская область, Орловская область, Пензенская область, Рязанская область, Самарская область, Саратовская область, Свердловская область, Тамбовская область, Тверская область, Томская область, Тульская область, Ульяновская область, Челябинская область, Ярославская область, г. Москва, Ненецкий автономный округ.

Наконец, регионами 4-й очереди создания сетей цифрового телевизионного вещания (2013 г.) являются 5 регионов, включающих 1275 пунктов вещания, с общим объемом финансирования - 1549 млн. рублей, в частности Республика Башкортостан, Республика Саха (Якутия), Красноярский край, Чукотский автономный округ, Ямало-Ненецкий автономный округ.

Подготовка к переходу на цифровое наземное вещание в каждом регионе содержит следующие мероприятия:

- разработка системного проекта сети цифрового телевизионного вещания в регионе;

- ввод оператором связи в эксплуатацию сети цифрового вещания 1-го мультиплекса с охватом вещания, эквивалентным зоне аналогового вещания в регионе;
- мониторинг обеспеченности абонентскими цифровыми приставками домохозяйств, принимающих телевизионный сигнал в регионе по эфиру.

### **Реконструкция и замена антенно-мачтовых сооружений.**

Модернизация и расширение существующей инфраструктуры телерадиовещания имеют первостепенное значение для перехода на цифровое эфирное вещание. В составе мероприятия предусматривается реконструкция и техническое перевооружение действующих антенно-мачтовых сооружений, а также замена аварийных сооружений и оборудования.

Парк антенно-мачтовых сооружений государственной сети вещания (объекты ФГУП “Российская телевизионная и радиовещательная сеть”) составляет более 7000 антенных опор. На сегодняшний день около 10% антенно-мачтовых сооружений по своему техническому состоянию требуют модернизации (реконструкции и технического перевооружения). В рамках мероприятия реконструкции подлежат 335 антенно-мачтовых сооружений сети телевизионного и УКВ-радиовещания общей стоимостью 4945 млн. рублей и 356 антенно-мачтовых сооружений мощного радиовещания (диапазоны ДВ, СВ, КВ) общей стоимостью 3181 млн. рублей.

Для доведения зоны охвата цифровым вещанием до уровня аналогового вещания и достижения целевых значений индикаторов Программы требуется строительство около 300 дополнительных объектов связи, оснащенных цифровыми телевизионными передатчиками малой мощности. Объем средств, выделяемых по данному мероприятию, составит 1250 млн. рублей.

Координация в рамках Программы процессов замены передатчиков, ввода цифрового вещательного оборудования с реконструкцией антенно-мачтовых сооружений и заменой антенно-фидерных уст-

ройств обеспечивает эффективность реализации Программы и последующего функционирования сети. Вследствие этого подлежат замене антенно-фидерные устройства телевизионных передатчиков мощностью от 0,1 до 50 кВт в количестве около 360 объектов на общую сумму 1041 млн. рублей, антенно-фидерные устройства радиовещательных передатчиков УКВ-диапазона в количестве 371 объекта на общую сумму 544 млн. рублей, а также устройства осушки антенных трактов телевизионных и радиовещательных передатчиков средней и большой мощности (более 1 кВт) в количестве около 370 комплектов на общую сумму 47 млн. рублей.

### **Реконструкция и замена объектов электроснабжения.**

С целью обеспечения устойчивого функционирования сети, в том числе, в чрезвычайных ситуациях, предусмотрен комплекс работ по реконструкции, техническому перевооружению и строительству объектов энергоснабжения филиалов ФГУП “Российская телевизионная и радиовещательная сеть”, включающий замену аварийных объектов, модернизацию оборудования и оснащение энергооборудованием новых объектов сети. Общая стоимость работ в рамках такого мероприятия составляет 522 млн. рублей.

### **Оснащение контрольно-измерительным оборудованием.**

Создание и последующая эксплуатация сетей цифрового телевизионного вещания требует оснащения эксплуатационных служб государственного оператора связи соответствующим контрольно-измерительным оборудованием. Типовой комплекс измерительного оборудования для систем DVB-T в минимальной комплектации включает генератор телевизионного сигнала и тестовый приемник (переносной комплект), а в полной комплектации — дополнительно к ним анализатор спектра и анализатор транспортного потока (стационарный комплект).

Первоначальное количество необходимых стационарных и переносных комплектов контрольно-измерительного оборудования планируется, исходя из распределения пунктов вещания по мощности и

количеству вещательного оборудования, примерно 300 комплектов на общую сумму 715 млн. рублей и 500 комплектов на сумму 531 млн. рублей. В последующем состав и количество контрольно-измерительного оборудования корректируется на базе опыта эксплуатации сети цифрового телевизионного вещания.

### **Формирование сетей телевизионного вещания 2-го и 3-го мультиплексов.**

В соответствии с частотно-территориальным планом, а также по мере отключения отдельных каналов аналогового вещания и высвобождения частотного ресурса государственным оператором связи или иными операторами связи в регионах предполагается последовательно вводить сети цифрового телевизионного вещания каналов 2-го и 3-го мультиплексов. Капитальные вложения для организации вещания 2-го или 3-го мультиплексов с зоной охвата более 98% населения, эквивалентной зоне охвата 1-го мультиплекса, приняты эквивалентными затратам на создание сети цифрового телевизионного вещания 1-го мультиплекса. Стоимость создания сетей цифрового телевизионного вещания 2-го и 3-го мультиплексов составляет 22860 млн. рублей.

Создаваемые сети цифрового вещания должны обеспечивать возможность модификации общероссийских каналов в соответствии с потребностями региона, а также распространения в каждом регионе местных каналов. По этому мероприятию на базе радиотелевизионных передающих центров государственного оператора связи создаются центры формирования мультиплексов, обеспечивающие прием телерадиоканалов со спутников и из местных студий, их обработку, включение местных врезок, формирование и последующую доставку пакета каналов на цифровые эфирные передатчики региона по спутниковым и (или) наземным линиям связи.

Реализация данного мероприятия позволит значительно сократить долю населения Российской Федерации, не охваченного региональным вещанием. Объем средств на создание центра формирования мультиплексов составляет в среднем 32 млн. рублей, что в целом по

Программе составит 2535 млн. рублей. Для обеспечения доставки формируемых пакетов каналов до пунктов эфирного вещания внутри региона планируется в ряде регионов создание наземных распределительных сетей протяженностью ориентировочно 3500 километром на общую сумму 550 млн. рублей.

### **Реализация временных дублей пакетов радиоканалов.**

Территория Российской Федерации по своей протяженности с востока на запад разделена на 5 вещательных зон в целях максимального учета поясного времени в регионе вещания. Поскольку не все телевизионные и радиоканалы, включенные в состав обязательных телерадиоканалов производятся в настоящее время с необходимым количеством временных дублей, предполагается провести дооснащение аппаратных студий ФГУП “Всероссийская государственная телевизионная и радиовещательная компания” и ФГУП “Телевизионный технический центр “Останкино” на сумму 125 млн. рублей и дооборудование наземных грузочных станций ФГУП “Космическая связь” на сумму 225 млн. рублей.

В соответствии с частотно-территориальным планом и по согласованию с вещателями-заказчиками, а также по мере отключения отдельных каналов аналогового вещания и высвобождения частотного ресурса в городах и крупных населенных пунктах операторами связи на конкурсной основе осуществляется строительство сетей цифрового эфирного вещания для трансляции 4-го и 5-го мультиплексов, а также цифровых каналов в стандартах телевидения высокой четкости (HDTV) и мобильного телевидения (DVB-H). В указанных сетях планируется возможность предоставления зрителям интерактивных услуг.

С точки зрения рекламного рынка и коммерческой привлекательности создание сетей цифрового вещания 4-го и 5-го мультиплексов предполагается в городах и населенных пунктах с численностью населения более 100 тыс. жителей. Объем средств на создание сети вещания одного мультиплекса составляет 1900 млн. рублей. Разверты-

вание сетей трансляции каналов телевидения высокой четкости и мобильного телевидения в период реализации Программы предполагается в первую очередь в крупных городах и населенных пунктах численностью населения более 100 тыс. жителей. Объем средств на строительство каждой из указанных сетей составит 2162 млн. рублей.

### **Модернизация мощного радиовещания.**

Анализ состояния мощного радиовещания в диапазонах ДВ, СВ и КВ в странах мирового сообщества подтверждает важность сохранения и развития радиовещания в этих диапазонах. Принципиально важным условием развития отрасли является постепенный переход на цифровое радиовещание в указанных диапазонах. Внедрение цифрового радиовещания позволит их эффективно использовать, обеспечить качество, сравнимое с УКВ-ЧМ-вещанием.

Цифровое радиовещание в диапазонах ДВ, СВ и КВ пригодно как для местного (регионального), так и для федерального и зарубежного вещания. Условия распространения радиоволн в этих диапазонах позволяют покрывать радиовещанием большие удаленные территории Российской Федерации с малой плотностью населения, где другие виды радиовещания, в частности УКВ-ЧМ-вещание, развивать экономически нецелесообразно.

Внедрение цифрового радиовещания в Российской Федерации проводится одновременно с оптимизацией и модернизацией государственной передающей сети мощного радиовещания. Как уже было сказано, имеющийся в настоящее время парк радиопередатчиков сети мощного радиовещания, состоящий из оборудования разработки 50–60 гг. прошлого века, имеющего в большинстве своем степень физического износа от 80 до 100 процентов, не пригоден для обеспечения вещания с современными требованиями. Действующее передающее оборудование не пригодно также для осуществления его реконструкции. В целях развития государственной сети мощного радиовещания предполагается замена передатчиков диапазонов ДВ, СВ и КВ раз-

личных уровней мощности в соответствии с топологическими решениями системного проекта.

Одно из серьезных преимуществ системы цифрового радиовещания в рассматриваемых диапазонах состоит в том, что ширина полосы цифрового сигнала эквивалентна ширине полосы аналогового сигнала, и не требуется выделения дополнительных участков частотного спектра для организации цифрового радиовещания. Переход на новый стандарт планируется при параллельной работе как в аналоговом, так и в цифровом формате с учетом постепенного наполнения рынка потребительскими приемниками в разных регионах мира и в Российской Федерации.

В рамках этого мероприятия необходимо осуществить разработку системного проекта, содержащего решения по оптимизации и модернизации государственной передающей сети мощного радиовещания, а также осуществить строительство и ввод в эксплуатацию объектов сети мощного радиовещания на основе инфраструктуры государственного оператора связи в соответствии с решениями системного проекта.

Реализация такого мероприятия предусматривает создание следующих сетей мощного цифрового радиовещания:

- 17 цифровых передатчиков ДВ-диапазона для вещания государственных программ;
- 79 цифровых передатчиков СВ-диапазона для вещания программ “Радио России”;
- 30 цифровых передатчиков КВ-диапазона для вещания программ “Радио России”;
- 82 цифровых передатчика СВ- и КВ-диапазонов и 12 полноповоротных антенн КВ-диапазона для вещания на зарубежные страны.

Общий объем финансирования в рамках данного мероприятия составляет 13684 млн. рублей.

**Сеть УКВ-ЧМ-вещания.**

В целях расширения охвата качественным государственным радиовещанием в УКВ-ЧМ-диапазоне в крупных городах и центрах субъектов Российской Федерации планируется создание и расширение многопрограммных сетей радиовещания государственного оператора связи.

Ввиду размещения радиовещательного оборудования, телевизионных передатчиков и совместных антенно-фидерных устройств, как правило, на одних и тех же антенно-мачтовых сооружениях, сроки и этапы замены и строительства новых объектов сети радиовещания в УКВ-ЧМ-диапазоне координируются с модернизацией объектов сети телевидения. По данному мероприятию планируется поставка и ввод в эксплуатацию около 370 радиовещательных передатчиков УКВ-ЧМ-диапазона мощностью до 2 кВт. Общий объем средств составляет 310 млн. рублей.

#### **Создание и запуск новых космических аппаратов.**

Планируемые к созданию в рамках Программы космические аппараты “Экспресс-АМ5”, “Экспресс-АМ6”, “Экспресс-АМ7” и “Экспресс-АМ8” должны стать основой для формирования современной орбитальной группировки, способной решать широкий спектр задач в области спутниковой связи и вещания. Работы по изготовлению ракет-носителей, разгонных блоков и обеспечение запусков предусмотрены Федеральной космической программой России на 2006–2015 гг., утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 22 октября 2005 г. № 635.

При определении технических характеристик космических аппаратов определяющими условиями является максимально полное использование заявленного Российской Федерацией орбитального частотного ресурса, преемственность существующих спутниковых сетей связи и своевременная замена космических аппаратов с заканчивающимся сроком активного существования. Срок активного существования космических аппаратов нового поколения составляет около 15 лет, что позволит обеспечить потребителей на территории Российской

Федерации надежными каналами связи с хорошими энергетическими характеристиками, в том числе, для организации спутникового непосредственного телевизионного вещания.

В составе космических аппаратов предусмотрены ретрансляторы перспективного частотного Ка-диапазона, эффективные при их использовании в организации сетей распределения телевизионных программ, широкополосной передачи данных, перегона телевизионных программ, а также организации трансляций с передвижных репортажных телевизионных студий.

Космический аппарат “Экспресс-АМ5” планируется к запуску на орбиту в 2012 г. в точку 140 градусов восточной долготы для обеспечения связи и вещания на дальневосточную зону; “Экспресс-АМ6” — в 2012 г. в точку 53 градуса восточной долготы для обеспечения связи и вещания на евразийскую зону; “Экспресс-АМ7” — в 2013 г. в точку 40 градусов восточной долготы для обеспечения связи и вещания на евразийскую зону; “Экспресс-АМ8” — в 2013 г. в точку 14 градусов западной долготы для обеспечения связи и вещания на европейскую зону.

Создание космических аппаратов “Экспресс-АМ5” и “Экспресс-АМ6” осуществляется за счет средств федерального бюджета в первые годы реализации Программы, что обеспечит создание космической инфраструктуры распределения телевизионных каналов 1-го мультиплекса по всем временным вещательным зонам телерадиовещания. Доходы от эксплуатации введенных в состав орбитальной группировки новых космических аппаратов позволят ФГУП “Космическая связь” привлечь средства внебюджетных источников и обеспечить дальнейшее развертывание спутниковой группировки в интересах развития телерадиовещания в рамках Программы, т.е. создание аппаратов “Экспресс-АМ7” и “Экспресс-АМ8” без привлечения средств федерального бюджета.

Стоимость создания каждого спутника, предназначенного для связи и телерадиовещания, составляет около 6500 млн. рублей.

### **Цифровизация архивных материалов.**

В целях обеспечения в соответствии с Федеральным законом “Об обязательном экземпляре документов” функции Федерального государственного учреждения (ФГУ) “Государственный фонд телевизионных и радиопрограмм” по переводу в цифровой формат, обеспечению доступа к фондовым материалам и комплектованию фондов обязательными экземплярами телерадиопроодукции в рамках Программы предполагается реализация инвестиционного проекта по созданию центра управления фондовыми материалами.

В настоящее время в состав архивных материалов ФГУ “Государственный фонд телевизионных и радиопрограмм” входят более 1,5 млн. единиц аудиовизуальных материалов, аудио- и фотоматериалов, активно использующихся при подготовке радио- и телепередач и программ различными средствами массовой информации, включая основные российские телеканалы. Носители, на которых записаны оригиналы произведений, как правило, не пригодны для долгосрочного хранения, и в настоящее время идет процесс их неизбежного разрушения.

В рамках Программы предусматривается создание центра управления фондовыми материалами с объемом хранилища 16 Пбайт и мощностью по реставрации, обработке и переводу в цифровой формат 12,5 тыс. часов фондовых материалов в год. Реализация проекта предусматривается в 2 очереди:

- 1-я очередь — реконструкция существующего производственного комплекса “Реутово”, принадлежащего ФГУ “Государственный фонд телевизионных и радиопрограмм” с оснащением необходимым технологическим и вспомогательным оборудованием с объемом хранилища 6 Пбайт и мощностью по реставрации, обработке и переводу в цифровой формат 6 тыс. часов фондовых материалов в год;

- 2-я очередь - строительство нового производственного корпуса с оснащением необходимым технологическим и вспомогательным оборудованием с объемом хранилища 10 Пбайт и мощностью по рес-

таврации, обработке и переводу в цифровой формат 6,5 тыс. часов фондовых материалов в год.

Общий объем финансирования реализации мероприятия составляет 1170 млн. рублей.

### **Обеспечение граждан социально значимой информацией**

Важнейшим вопросом, нуждающимся в решении на государственном уровне, является обеспечение равных прав граждан Российской Федерации на получение социально значимой информации.

В целях сохранения и обеспечения единого информационного пространства Российской Федерации и освещения государственной политики в сфере социально-экономического развития России, сохранения и развития культурного наследия страны необходимо сформировать пакет телевизионных каналов и радиоканалов, предоставляющих совокупность социально значимой информации, обязательный к трансляции на всей территории Российской Федерации.

В такой пакет телевизионных каналов необходимо включить:

- общероссийский информационный канал, освещающий основные события, происходящие в нашей стране и за рубежом;
- общероссийские информационно-развлекательные каналы;
- общероссийский канал, освещающий события культурной жизни общества;
- общероссийский детский канал;
- общероссийский спортивный канал;
- региональный канал, освещающий события, происходящие в каждом субъекте Российской Федерации.

Пакет обязательных общедоступных радиоканалов предлагается сформировать в составе радиоканалов “Радио России”, “Юность”, “Маяк” и одного регионального радиоканала в каждом субъекте Российской Федерации. Таким образом, в каждом субъекте пакет будет состоять из пяти или шести общероссийских, одного регионального телевизионных каналов и четырёх радиоканалов, которые будут рас-

пространяться на территории проживания 100% населения данного субъекта.

Перечень всех общероссийских обязательных общедоступных телевизионных каналов и радиоканалов должен быть сформирован Правительственной комиссией по развитию телерадиовещания и утвержден в соответствии с законодательством как пакет, обязательный для распространения на всей территории Российской Федерации.

Данные каналы должны быть доступны для населения в режиме свободного доступа и во всех средах трансляции (спутниковая, эфирная, кабельная, проводная), что предусматривается в лицензионных условиях операторов, осуществляющих трансляцию. При этом должна быть обеспечена предварительная настройка абонентских технических средств (включая пользовательское (оконечное) оборудование), при которой фиксируется позиция обязательных общедоступных телевизионных каналов и радиоканалов в приемном устройстве пользователей.

В качестве лицензионного условия для вещателя каждого обязательного общедоступного телевизионного канала или радиоканала должен быть указан срок, в течение которого будет обеспечено распространение трансляции такого канала на всей территории, указанной в лицензии вещателя.

Затраты вещателя обязательных общедоступных каналов на параллельную трансляцию в аналоговом и цифровом форматах сигналов финансируются с использованием средств федерального и региональных бюджетов.

Трансляция телевизионных и радиосигналов обязательных общедоступных каналов предусматривает:

- доставку таких сигналов до всего населения Российской Федерации;
- установление периода поддержания параллельной трансляции в аналоговом и цифровом форматах с момента охвата 95 процентов населения региона цифровым вещанием;

- финансирование затрат вещателей, связанных с трансляцией в населенных пунктах с населением менее 200 тыс. человек, с участием средств федерального и региональных бюджетов;

- трансляцию в населенных пунктах с количеством домохозяйств до 100, не попадающих в зону трансляции эфирных передатчиков, с использованием спутниковой непосредственной трансляции.

Финансирование распространения региональных каналов, входящих в обязательный общедоступный пакет, должно аналогичным образом осуществляться с участием бюджетов субъектов Российской Федерации.

Остальные каналы свободного и условного доступа распространяются на рыночных условиях.

### **Определение технической политики вещания**

Основными задачами технической политики в области развития телерадиовещания являются определение перспективных технологий для развития цифрового телерадиовещания исходя из мировых тенденций развития отрасли, принятие необходимых стандартов, определение правил построения сетей и требований к использованию оборудования в целях качественного удовлетворения потребностей населения в услугах телерадиовещания.

Анализ возможных направлений развития телерадиовещания в Российской Федерации проводится отдельно по двум направлениям: телевизионное вещание и радиовещание.

Международным союзом электросвязи разрабатываются специальные межгосударственные соглашения и радиочастотные планы использования радиочастотного спектра различными службами.

С появлением цифрового телерадиовещания возникла необходимость регламентировать работу передающих средств нового вида телерадиовещания и обеспечить их электромагнитную совместимость.

Разработанным в 2006 г. МСЭ планом цифрового телерадиовещания для Района 1, в который входит Российская Федерация, утверждено планирование наземной цифровой радиовещательной службы в

полосах частот 174...230 МГц и 470...862 МГц. Этот план должен обеспечивать эффективное использование радиочастотного спектра как на международном, так и на национальном уровне. Однако более 30% спектра в данном диапазоне используется совместно радиоэлектронными средствами гражданского и военного назначения, а 35% — преимущественно радиоэлектронными средствами военного назначения. В связи с этим одной из важнейших задач государственной технической политики является конверсия радиочастотного спектра, которая позволит значительно расширить используемый диапазон для целей телерадиовещания.

Для обеспечения радиочастотным ресурсом цифровых наземных сетей эфирного вещания необходимо:

- разработать и принять частотно-территориальный план цифровых наземных сетей эфирного вещания, включая радиочастотное присвоение для пакета обязательных общедоступных каналов и для других пакетов телевизионных каналов, с учетом освобождения частот после прекращения аналогового вещания;
- проведение мероприятий по конверсии радиочастотного спектра в полосах радиочастот 174...230 МГц и 470...862 МГц;
- проведение мероприятий по согласованию радиочастотных каналов в цифровом плане в указанных полосах с администрациями связи Соединенных Штатов Америки, Китайской Народной Республики, Японии, Монголии, Корейской Народно-Демократической Республики и Республики Корея.

Радиочастотный ресурс в ФМ-диапазоне (80...108 МГц) для организации радиовещания в крупных городах Российской Федерации в настоящее время практически исчерпан, и для дальнейшего развития сетей радиовещания в ФМ-диапазоне целесообразно рассмотреть возможность использования высвобождаемых после прекращения аналогового телевизионного вещания полос радиочастот.

## **Совершенствование нормативной правовой базы**

Для реализации модели функционирования рынка телерадиовещания необходимо принятие срочных мер государственного регулирования отношений между субъектами рынка, а также обеспечение экономически взвешенных и обоснованных действий участников рынка.

При этом на первом этапе внедрения цифрового телевидения необходимо обеспечить принятие следующих актов:

- внесение изменений в федеральные законы “О лицензировании отдельных видов деятельности”, “О связи” и Закон Российской Федерации “О средствах массовой информации”;
- корректировка установленного порядка лицензирования телерадиовещания и лицензирования деятельности по оказанию услуг связи для целей телерадиовещания;
- определение принципов тарифной политики для операторов связи, осуществляющих трансляцию обязательных общедоступных телерадиоканалов;
- завершение формирования национальных стандартов цифрового передающего и приемного оборудования, являющихся основой для развития рынка производства такого оборудования в стране.

## Вопросы и задания

1. Перечислите государства, которые, согласно Регламенту радиосвязи, отнесены к Району 1.
2. Какие виды искажений имеют место при преобразовании и усилении колебаний метрового и дециметрового диапазонов?
3. Перечислите целевые индикаторы и показатели эффективности развития цифрового телевидения на территории Российской Федерации. Каковы их значения?
4. Перечислите основные мероприятия по реализации Федеральной программы развития российского цифрового телевизионного вещания.
5. Какие организации в настоящее время образуют государственную систему телерадиовещания?
6. Проведите анализ выпускаемого отечественного радиопередающего оборудования и выявите основные технико-экономические характеристики. Сравните эти характеристики с зарубежными аналогами.
7. Проведите анализ отечественных антенных систем, предназначенных для излучения электромагнитных волн большой мощности в диапазонах ДВ, СВ и КВ в целях телевизионного и радиовещания. Определите основные технико-экономические характеристики таких антенных систем.

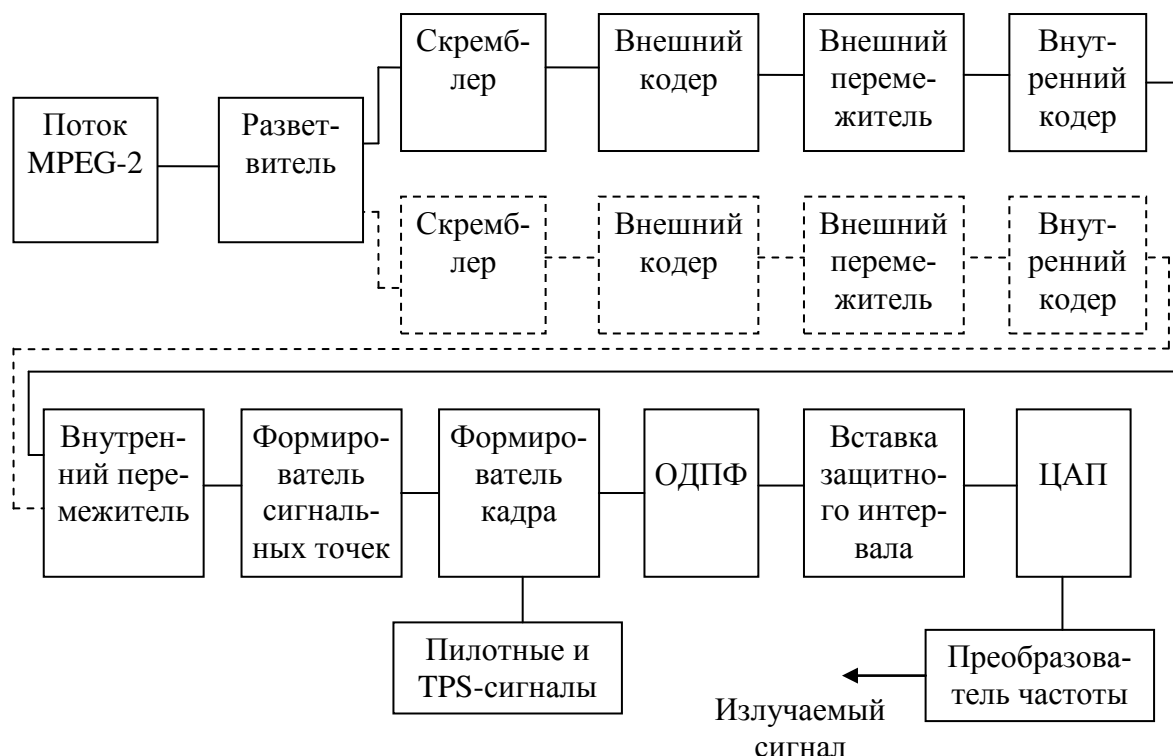
### 3. МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ДАННЫХ

В данной главе рассматриваются общие принципы формирования сигналов в системе DVB, используемые интерфейсы и конструкции мультимплексированных потоков данных.

Большое внимание уделено особенностям формирования программного и транспортного потоков, в том числе, синтаксическим структурам, ориентированным на программную реализацию. При этом, несмотря на достаточную подробность изложения материала, соответствующие разделы не должны служить заменой оригинальных спецификаций.

#### 3.1. СТРУКТУРА ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ DVB-T

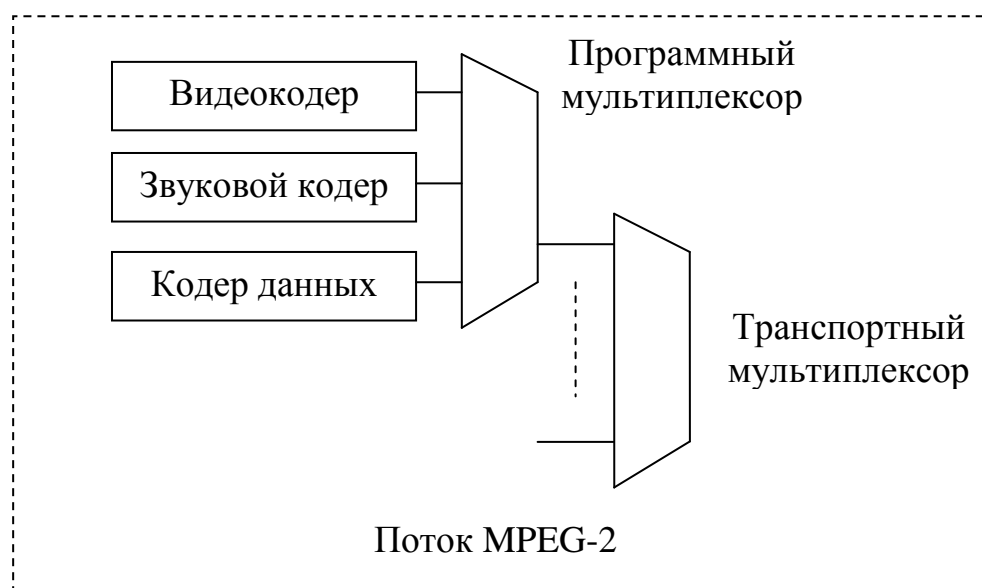
Обобщенная структурная схема передающей части системы DVB-T показана на рис. 3.1 [1].



**Рис. 3.1. Обобщенная структурная схема передающей части системы DVB-T**

Исходной информацией, подлежащей передаче, является *мультиплексированный транспортный поток компрессированных данных*. Компрессия осуществляется на основе протоколов стандарта MPEG-2, причем в одном мультиплексированном потоке могут присутствовать данные различной природы: видео, звук, текст и др., передаваемых в одной программе (рис. 3.2). Эти данные мультиплексируются сначала в одном программном потоке, а затем — посредством объединения нескольких программ — в одном транспортном потоке.

Физически передача выходных мультиплексированных данных осуществляется пакетами из 188 байт через определенный *интерфейс*. Логическим интерфейсом, или *стыком*, называется точка соединения двух аппаратных узлов, в которой данные передаются от одного узла к другому. Чтобы обеспечить быстрое и надежное соединение без какой-либо дальнейшей подстройки параметров, оба узла должны соответствовать одинаковым требованиям к точке стыка.



**Рис. 3.2. Формирование мультиплексированного потока MPEG-2**

Соединение может быть однонаправленным — *симплексным*, когда данные передаются только в одном направлении, двунаправлен-

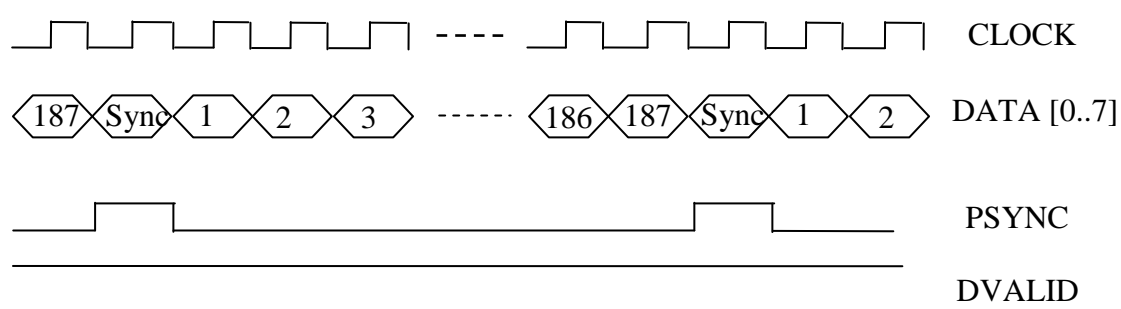
ным — *дуплексным*, когда передача данных осуществляется в обоих направлениях, а также возможен *полудуплексный режим*, при котором возможна передача данных в обоих направлениях, но не одновременно, а с разделением во времени.

Для описания любого интерфейса необходимо указать:

- протокол обмена данными;
- электрические сигналы (напряжения, токи, входные и выходные сопротивления);
- физическое соединение (вид соединителя, тип кабеля, механические параметры крепления и др.).

Кратко рассмотрим некоторые интерфейсы, наиболее часто используемые в цифровом телевидении.

В документах на систему DVB специфицированы три вида интерфейсов [10]: *асинхронный последовательный интерфейс ASI* (Asynchronous Serial Interface), *синхронный последовательный интерфейс SSI* (Synchronous Serial Interface) и *синхронный параллельный интерфейс SPI* (Synchronous Parallel Interface). При этом первые два интерфейса существуют в разновидностях для коаксиального (C) и оптического (O) кабелей.



**Рис. 3.3. Синхронный параллельный интерфейс SPI**

Интерфейс SPI рекомендован к использованию для коротких и средних расстояний, он соответствует спецификации EN 50083-9 [2] при использовании пакетов размером 188 байт (рис. 3.3). Данные пе-

передаются по 8-разрядной шине DATA; передача каждого байта осуществляется с приходом прямого (с положительным перепадом) тактового импульса по линии CLOCK. Линия PSYNC обеспечивает передачу специального синхронизирующего импульса, соответствующего одноименному синхробайту. Назначение синхробайта будет рассмотрено далее. Кроме того, в интерфейсе имеется еще линия DVALID, используемая в целях подтверждения действительности (так называемой *валидности*) передаваемых данных.

Интерфейс SPI, как и остальные два, поддерживает три режима передачи данных:

- 1) передача транспортных пакетов длиной 188 байт;
- 2) передача транспортных пакетов длиной 204 байта без помехоустойчивого кодирования (с 16 “пустыми” байтами);
- 3) передача транспортных пакетов длиной 204 байта с помехоустойчивым кодированием.

В первом режиме на линии DVALID устанавливается логическая единица 1, на линии PSYNC — состояние логического нуля 0, переходящее в 1 в момент передачи синхробайта (как на рис. 3.3). Таким образом, тактовый сигнал представляет собой последовательность прямоугольных импульсов, для которых момент перехода  $0 \rightarrow 1$  соответствует моменту отсчета сигнала.

Во втором режиме сигнал DVALID устанавливается в 1 при прохождении байт данных и в 0 — при прохождении пустых байт, а сигнал PSYNC по-прежнему принимает единичное значение в момент появления синхробайта.

В третьем режиме сигнал DVALID устанавливается в 1 в течение всего пакета данных.

Тактовая частота интерфейса  $f_i$  зависит от скорости передачи данных и равна  $f_d/8$  при 188-байтных пакетах и  $(204/188)f_d/8$  при 204-байтных пакетах, где  $f_d$  — частота следования бит в транспортном потоке. При этом ширина тактового импульса может изменяться в пределах

$$\left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{10}\right) \frac{1}{f_i},$$

а  $f_i$  не должна превышать 13,5 МГц.

Для передачи логических уровней используется формат LVDS (Low Voltage Differential Signaling — низкоуровневое дифференциальное представление сигналов), когда для представления информации используется разница напряжений на проводниках пары. Передающая сторона устанавливает на различные проводники дифференциальной пары разные уровни напряжения и направляет небольшой ток (около 3,5 мА) в один из сигнальных проводников, в зависимости от того, какой логический уровень надо передать. На приёмной стороне ток проходит через резистор сопротивлением 100–120 Ом (в зависимости от волнового сопротивления кабеля) и возвращается к отправителю по другому проводнику. В соответствии с законом Ома напряжение на резисторе будет составлять около 350 мВ. Логический уровень (0 или 1) определяется полярностью этого напряжения.

Интерфейс SSI предъявляет повышенные требования к стабильности генераторов тактовых частот и поэтому применяется редко, только для однонаправленной передачи транспортного потока. Для цикловой синхронизации в поток вводят синхробайты, совпадающие с синхробайтами потока MPEG-2.

Скорость передачи данных определяется тактовой частотой следования бит в транспортном потоке, которая, в свою очередь, зависит от частоты байтовой синхронизации в исходном параллельном потоке:

$$f_d = 8f_i$$

для 188-байтных пакетов и

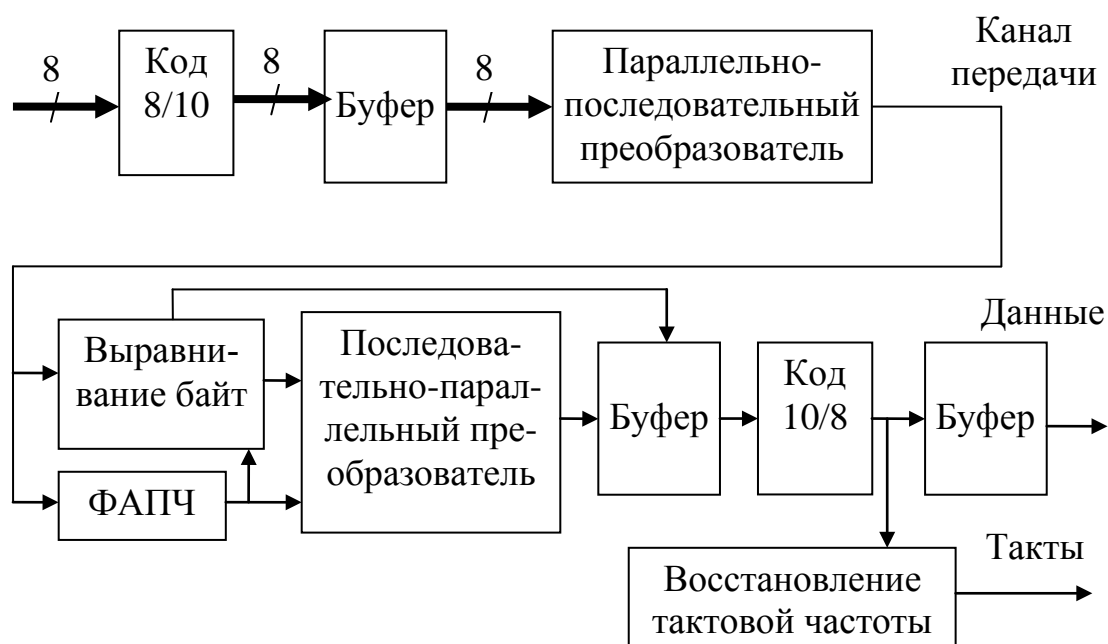
$$f_d = 8 \frac{204}{188} f_i$$

для 204-байтных пакетов.

Электрически сигнал интерфейса SSI передается по радиочастотному коаксиальному кабелю такой длины, чтобы его затухание на

частоте 70 МГц не превышало 12 дБ. Это соответствует расстоянию 200...600 м в зависимости от погонного затухания кабеля. Кроме того, для передачи может использоваться оптическое волокно на волне 1310 нм: перекрываемое расстояние в одномодовом волокне при мощности излучателя  $-7,5$  дБм и чувствительности приемника, равной  $-20$  дБм, составляет около 40 км.

Все же, наиболее распространенным интерфейсом для передачи транспортного потока на сегодняшний день следует признать асинхронный последовательный интерфейс ASI (рис. 3.4), обеспечивающий постоянную скорость передачи данных 270 Мбит/с в достаточно жестких пределах:  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ . Поддержка постоянства скорости обеспечивается введением (при необходимости) уплотняющих, или *стаффинговых* байт.



**Рис. 3.4. Структурная схема кодера и декодера интерфейса DVB-ASI**

Интерфейсный кодер использует табличный код 8/10, по которому каждые 8 бит полезных данных размещаются в 10-битном кодовом слове, подобранном так, чтобы минимизировать постоянную составляющую, т. е. число нулей и единиц в одном слове должно быть оди-

наковым или отличаться незначительно. Чтобы повысить эффективность кодирования для каждого входного байта подбираются два 10-битных слова с различным соотношением нулей и единиц. В процессе кодирования кодер ведет подсчет 0 или 1 и при необходимости заменяет кодовое слово другим, с более подходящим соотношением символов.

Кодовые слова содержат повышенное число переходов, что облегчает битовую синхронизацию в приемнике; время захвата при битовой синхронизации в системе ФАПЧ должно быть не более 1 мс.

Интерфейс ASI не инвариантен к логическому инвертированию передаваемых данных, поэтому изменение полярности сигналов недопустимо — этим сигналы ASI отличаются от передаваемых через те же физические интерфейсы с той же тактовой частотой сигналов SDI.

Цикловая синхронизация обеспечивается передачей специального 10-битного кода, содержащегося в кодовой таблице и не совпадающего не с одним из возможных кодов при кодировании данных. Этот код посылается в канал при получении от источника синхробайта. Признаком начала пакета служит появление, по крайней мере, двух таких кодов в пределах окна из пяти байт.

Протокол приема-передачи по интерфейсу ASI может использовать стандартный четырехсигнальный интерфейс RS-422A LVDS. Электрические параметры сигналов цифрового интерфейса приема-передачи транспортного потока — симметричные (парафазные) и соответствуют стандартам EIA/TIA SP3357 LVDS, IEEE 1596.3 SCI LVDS и ANSI/TIA/EIA 644 LVDS:

- выходное дифференциальное напряжение  $\pm 47... \pm 454$  В на нагрузке 100 Ом (номинальное значение  $\pm 345$  мВ);
- выходное сопротивление — не более 100 Ом;
- постоянная составляющая источника:  $+ 1,125... + 1,375$  В (номинальное значение  $+ 1,25$  В);
- входное дифференциальное напряжение  $\pm 100... \pm 2000$  мВ на нагрузке 100 Ом;

- входное сопротивление 90...132 Ом;
- постоянная составляющая на входе + 0,2...+ 2,2 В (номинальное значение + 1,2 В).

Коаксиальный вариант интерфейса ASI работает по коаксиальному кабелю сопротивлением 75 Ом с соединителями типа BNC. Номинальное выходное напряжение передатчика составляет 800 мВ  $\pm$  10%, а на входе приемника амплитуда сигнала должна поддерживаться в пределах 200...880 мВ.

В оптическом варианте интерфейса ASI рекомендовано использовать волокно диаметром 62,5/125 мкм по стандарту IEC 793-2 с соединителями типа SC, работающего в диапазоне длин волн 1280...1380 нм. Максимальное перекрываемое расстояние определяется мощностью оптического передатчика, чувствительностью приемника, погонным затуханием кабеля. Как и для SDI, использование интерфейса ASI позволяет без дополнительной регенерации перекрывать расстояние около 40 км.

Итак, транспортные мультиплексированные пакеты MPEG-2 через интерфейс поступают собственно на вход системы телевизионного вещания. Как видно из рис. 3.1, дальнейшая обработка данных предполагает выполнения ряда процедур канального кодирования и модуляции.

Собственно канальный кодер образуют блоки *скремблирования*, *кодирования* и *перемежения*, причем кодирование и перемежение выполнено по каскадной схеме: сначала внешний (байтовый) кодер и внешний (байтовый) перемежитель, а затем внутренний (битовый) кодер и внутренний (битовый) перемежитель. В качестве внешнего кодера выбран блочный кодер Рида — Соломона с фиксированными параметрами, а в качестве внутреннего — сверточный кодер со скоростью 1/2, допускающий, посредством набора выкалывателей, изменение кодовой скорости до значений 2/3, 3/4, 5/6 и 7/8.

Идея каскадного кодирования состоит в объединении преимуществ (и, следовательно, нивелировании недостатков) различных ти-

пов кодов. Сверточные коды, как известно [8], эффективно работают в канале с аддитивным шумом, но плохо справляются с пачками ошибок. Более того, если декодер сверточного кода ошибается, то на его выходе всегда возникает пачка ошибок. В противоположность этому, блочные коды хорошо справляются с редкими, но длинными пачками ошибок, а их эффективность при исправлении частых, но коротких пачек ошибок заметно меньше. Дополнительное повышение эффективности борьбы с ошибками обеспечивается многоуровневым перемежением. Оценка работы каскадного кода в виде связи кода Рида — Соломона и сверточного кода со скоростью 1/2 показывает, что при отношении сигнал-шум 3 дБ возможно достичь значение вероятности ошибки порядка  $10^{-10}$ .

Вслед за функциональными блоками канального кода структурная схема содержит блоки модулятора: *формирователь сигнальных точек, формирователь кадра*, обеспечивающий вставку в излучаемый сигнал служебной информации (пилотных и TPS-сигналов), а также устройство, осуществляющее *обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ) и вставку защитного интервала*.

В системе предусмотрено достаточно гибкое регулирование сигнального созвездия и его параметров. Возможно использование трех видов квадратурной модуляции: 4-позиционной квадратурной фазовой модуляции (КФМ-4), 16-позиционной квадратурной амплитудной модуляции (КАМ-16) и 64-позиционной квадратурной амплитудной модуляции (КАМ-64).

Сигнальные точки передаются на различных поднесущих, формируя, тем самым, многочастотный сигнал. Количество поднесущих выбирается равным 1 704 или 6 816. Специальный выбор частотного сдвига между соседними поднесущими обеспечивает *свойство ортогональности* между отдельными сигналами. Таким образом, структура сигнала представляет собой набор поднесущих с ортогональным частотным разнесением. Эффективная реализация такой структуры возможна при использовании процедуры обратного дискретного пре-

образования Фурье (ОДПФ), которая, в свою очередь, реализуется на основе различных *алгоритмов быстрого преобразования Фурье* (БПФ). Для того, чтобы реализовать ортогональный сигнал с 1 704 поднесущими, необходимо иметь блок БПФ с

$$2\,048 = 2 \cdot 2^{10} = 2K$$

точками, а чтобы реализовать ортогональный сигнал с 6 816 поднесущими — блок БПФ с

$$8\,192 = 8 \cdot 2^{10} = 8K$$

точками. Поэтому режим с 1 704 поднесущими называется режим 2К, а режим с 6 816 — режимом 8К.

Сформированный на низкой частоте цифровой сигнал подвергается цифроаналоговому преобразованию (ЦАП), после чего переносится на радиочастоту и по соответствующим фидерам подается в излучающую антенную систему.

Спецификация на систему DVB-T предопределяет возможность выбора *иерархических* или *неиерархических* режимов модуляции, что, в свою очередь, определяется текущим состоянием канала передачи и, следовательно, качеством принимаемого сигнала.

Использование неиерархических режимов модуляции обусловлено хорошими условиями распространения радиосигналов от передатчика к приемнику, когда имеется один, достаточно ярко выраженный луч. В этих условиях целесообразно подвергнуть все транспортные пакеты одинаковым процедурам обработки, не выделяя более или менее приоритетные компоненты.

Типичным для неиерархических режимов является разделение вещания на одно- и многопрограммный режимы. Однопрограммный режим чаще всего выделяется под те приложения, для которых посредством выбора полной полосы частот требуется обеспечить высокое качество на заданной территории покрытия. Вещание в многопрограммном (обычно до четырех программ) режиме позволяет на той же территории покрытия доставлять большее количество информации, но с меньшим качеством.

Работа системы телевизионного вещания в иерархических режимах может рассматриваться как передача мультимплексированной услуги в двух независимых каналах, которые с различной степенью защищены от внешнего воздействия. При этом вещание может быть дублирующим (simulcast) или разнопрограммным.

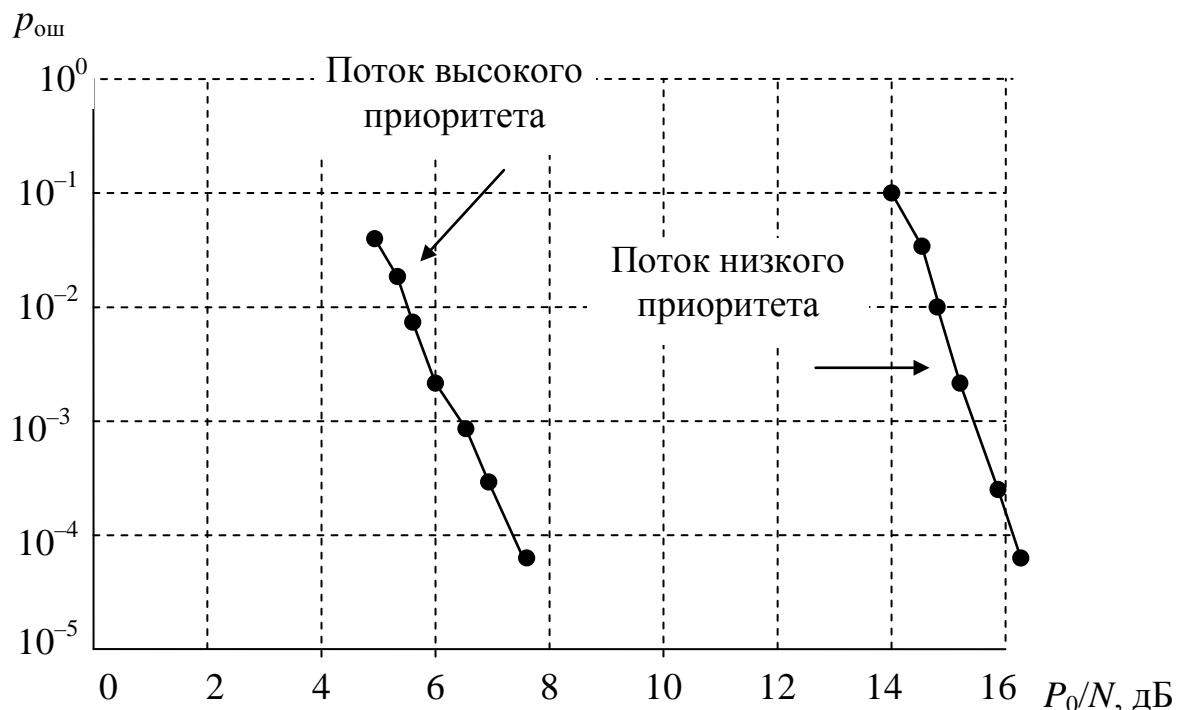
Дублирующее вещание предполагает передачу одной и той же программы (или нескольких мультимплексированных программ) по двум полностью разделенным транспортным потокам, один из которых высокоскоростной, а другой — низкоскоростной. Низкоскоростной поток кодируется с большей избыточностью и затем отображается на точки неравномерного сигнального созвездия, обладающие наибольшей помехоустойчивостью. Исходя из этого, низкоскоростной поток называют *потокom высокого приоритета*, и в нем передаются те данные, которые должны быть приняты приемником даже при плохих условиях (например, прием на границе зоны вещания).

Другой — высокоскоростной — поток содержит данные, возможно, полученные из MPEG-пакетов, к которым применены различные процедуры кодирования, и поток из таких пакетов называется *потокom низкого приоритета*. Восстановление низкоприоритетного потока в приемнике приводит, в конечном итоге, к более высокому качеству результирующего изображения, но требует лучших условий приема для безошибочного декодирования.

На рис. 3.5 показан [5] примерный вид вероятности ошибки  $p_{\text{ош}}$  для потоков обоих приоритетов, когда в низкоприоритетном потоке используется модуляция КАМ-16 и скорость 3/4 сверточного кодера, а в высокоприоритетном потоке — модуляция КФМ и скорость 2/3 сверточного кодера.

Под отношением сигнал/шум здесь понимается отношение средней мощности  $P_0$  немодулированной несущей к средней мощности шумов  $N$  на входе приемника. Видно, что поток высокого приоритета имеет значительно лучшую помехоустойчивость. В спецификациях на систему DVB-T нижние точки на обеих кривых, т. е. вероятности

ошибок  $p_{\text{ош}} = 2 \cdot 10^{-4}$  определяют условие дальнейшей обработки данных после того, как совершено сверточное декодирование.



**Рис. 3.5. Вероятности ошибок для потоков с различными приоритетами**

Прежде, чем обратиться к детальному изучению блоков кодирования и модуляции, рассмотрим основные принципы организации мультимплексированных транспортных потоков.

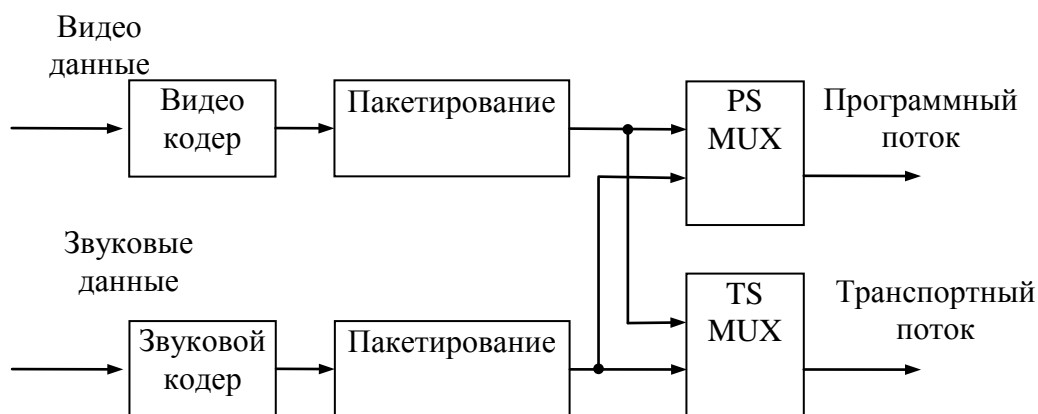
### 3.2. ПЕРЕДАЧА СЛУЖЕБНЫХ ДАННЫХ В ТРАНСПОРТНОМ ПОТОКЕ

Цифровой сигнал, поступающий непосредственно с выхода кодека MPEG-2, называется “сырым” элементарным потоком и представляет собой весьма протяженную во времени последовательность звуковых или видеоданных, следующих в том порядке, в котором они появились на выходе в процессе кодирования. Он не содержит в себе специфической информации, необходимой для задач идентификации, синхронизации и воспроизведения, и, следовательно, не может непо-

средственно использоваться для организации вещания или в каких-либо иных целях.

Для организации полноценного многопрограммного вещания необходимо объединить в общий поток программы, которые могут быть сформированы в разных местах и в разное время. В стандарте MPEG-2 предлагаются две возможных конструкции: *программный поток* и *транспортный поток*, структура каждого из которых оптимизирована под соответствующий набор приложений.

На рис. 3.6 показана схема простейшего мультиплексирования, когда смешиваются единичные кодированные и пакетированные видео- и звуковой потоки, к ним добавляется необходимая служебная информация, и в результате — на выходе мультиплексоров PS MUX и TS MUX — образуются соответственно программные и/или транспортные потоки.

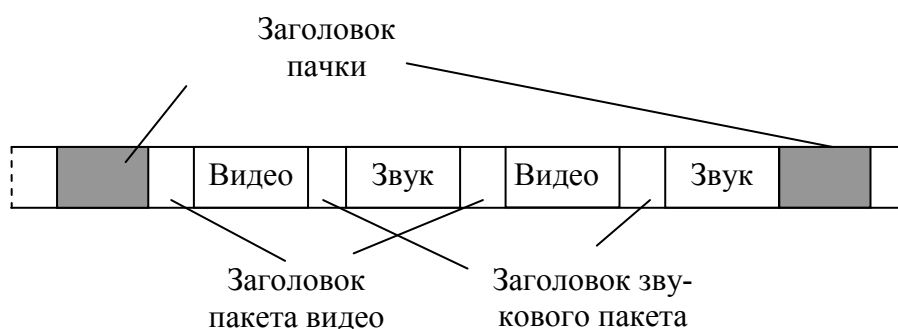


**Рис. 3.6. Простейшая схема мультиплексирования элементарных потоков**

Более простой программный поток (он является аналогом потока, стандартизованного как ISO/ IEC 11172) используется для передачи набора программ с переменной скоростью в среде, свободной от ошибок, например, передача по внутренним шинам какого-либо студийного устройства. В основе программного потока лежат *пакетирован-*

ные элементарные потоки (PES, Packetized Elementary Stream), в которых данные разбиты на *программные пакеты* и снабжены заголовками. В зависимости от приложений дина программа пакета, включающие как заголовок, так и полезные данные (полезную нагрузку — payload) может составлять единицы или десятки килобайт, составляющие единицу воспроизведения: один видеокادر или один звуковой кадр.

Кроме того, один заголовок содержит ссылку на системные часы, по которой декодер подстраивает свои внутренние часы, осуществляя привязку данных потока к абсолютному времени. Для выравнивания задержки во времени отдельных программных пакетов в их заголовки введены *временные метки воспроизведения* и *временные метки декодирования*, указывающие, в какие моменты абсолютного времени декодер должен вывести на экран элемент изображения или озвучить звуковой фрагмент. В программном потоке (рис. 3.7) может содержаться до 16 видео и до 32 звуковых элементарных пакетированных потоков, но все они считаются компонентами одной программы, поскольку имеют общую временную базу (единую синхронизацию).



**Рис. 3.7. Структура программного потока**

Транспортный поток предназначен для использования в условиях, когда допускается появление достаточно большого числа ошибок, что влечёт появление ошибочных комбинаций и/или потерю отдельных пакетов. В нём могут быть скомбинированы пакеты, относящиеся к разным пользовательским программам и, следовательно, иметь раз-

личную временную привязку, а также различную, в том числе, переменную скорость — это создаёт определённые трудности с доставкой содержимого транспортных пакетов, прежде всего, связанные с переменным значением общей скорости передачи данных. Одним из способов преодоления указанных трудностей является наличие *распределённых опорных часов* (PCR, Program Clock Reference), в виде отдельных полей которые, расположенных, в общем случае, в разных местах потока.

Структура транспортного потока разработана для выполнения с минимальными затратами следующих операций.

- Получение кодированных данных, относящихся к одной программе, их декодирование и представление результата.
- Извлечение пакетов, относящихся к одной или более программ из одного транспортного потока и их вывод.
- Извлечение пакетов, относящихся к одной или более программ из одного или более транспортных потоков и их вывод.
- Извлечение из транспортного потока содержимого одной программы и его вывод.
- Преобразование программного потока в транспортный поток, с целью передачи в среде с ошибками, и обратное восстановление исходного программного потока.

И транспортный, и программный поток сконструированы как двухуровневая структура: первый уровень — системный — упакован во второй уровень — уровень сжатия. В свою очередь, системный уровень разделён на два подуровня: подуровень мультиплексирования

На системный уровень возложено выполнения пяти базовых функций:

1. Синхронизация мультиплексированных потоков для их декодирования.
2. Перемежение набора мультиплексированных потоков в общем едином потоке.

3. Инициализация процедуры буферизации, необходимая для начала декодирования.

4. Управление процессом непрерывной буферизации.

5. Временная идентификация.

Прежде, чем обратиться к рассмотрению содержимого программного и транспортного потоков, рассмотрим терминологию, основные понятия и определения, касающиеся программного и транспортного потока, а также общие требования, предъявляемые к их структуре и параметрам.

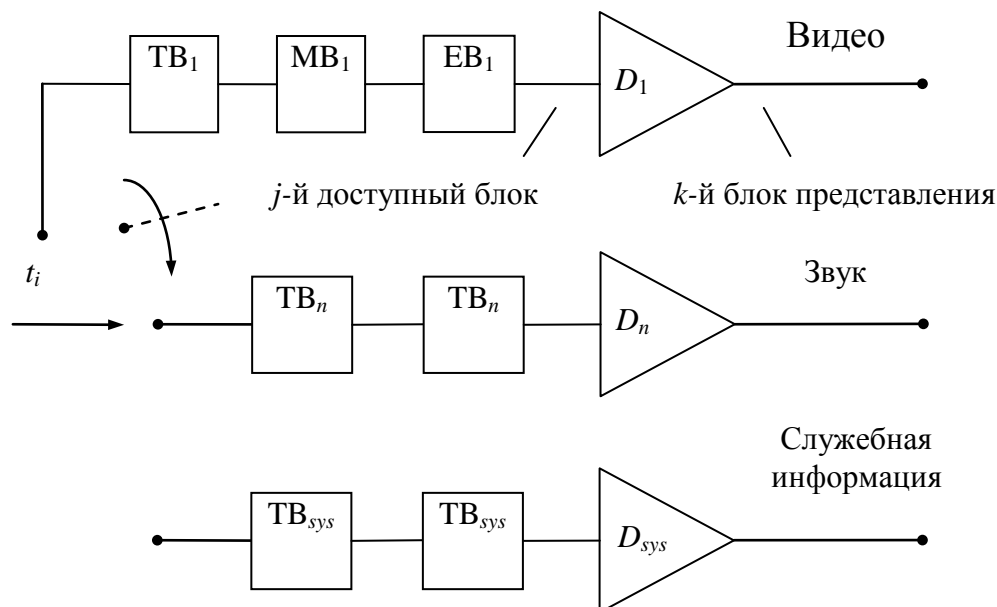
*Доступный блок* (access unit) — кодированное представление блока пользовательских данных, в дальнейшем часто называемый просто блоком данных. Когда в качестве данных выступают звуковые программы, доступный блок — это кодированный звуковой кадр. Когда же в качестве данных выступают видеопрограммы, доступный блок содержит кодированные элементы изображения, а также, возможно, следующие за ними пустые стаффинговые (наполнительные) данные, расположенные вплоть до начала следующего блока.

Если элементу изображения не предшествует код начала группы **group\_start\_code** или код заголовка последовательности **sequence\_header\_code**, то блок начинается с начального кода изображения. Если же упомянутые коды предшествуют элементу изображению, то такой блок начинается с первого байта кодов **group\_start\_code** или **sequence\_header\_code**. В том случае, когда последнему элементу изображения предшествует код окончания **sequence\_end\_code**, все байты, находящиеся между последним байтом кодированного изображения и кодом **sequence\_end\_code** (включая и сам код), относятся к доступному блоку.

*Блок представления* (presentation unit) — декодированный блок звуковых данных или изображения.

В стандарте ISO/IEC 13818-1 описана общая структурная схема (прототип) декодера программного и транспортного потока — так называемый *системный целевой декодер* T-STD (Transport Stream Sys-

tem Target Decoder), согласно которой должны реализовываться практические схемы декодирования для трёх типов информации: видео, звуковой и управляющей (рис. 3.8).



**Рис. 3.8. Системный целевой декодер T-STD**

Как следует из структурной схемы, в  $i$ -й момент времени  $t_i$  на вход декодера поступает соответствующий  $i$ -й байт программного или транспортного потока. При этом нумерация байт начинается с нуля, а физическое время измеряется в секундах.

В целях обеспечения непрерывности и плавности процесса декодирования предусмотрены буферные элементы памяти ТВ (time buffer). Если буфер предназначен для обработки  $n$ -го транспортного (программного) потока, то он помечается нижним индексом  $n$ ; при обработке потока служебной информации соответствующий буфер обозначается как  $TB_{sys}$ . В декодере видеопотока дополнительно присутствуют буфер мультиплексирования МВ (multiplexing buffer) и буфер элементарного потока ЕВ (elementary stream buffer), расположенные следом за первичным временным буфером. В декодерах звуково-

го потока и служебной информации дополнительно присутствует так называемый главный буфер В или  $V_{sys}$ .

Уже говорилось о том, что транспортный поток может содержать набор различных программ с независимым временным базисом, поэтому необходимо наличие опорных временных меток PCR, позволяющих обеспечить общую синхронизацию. Такие метки расположены в различных полях транспортного (программного) потока и содержат информацию, представляющую собой кодированные отсчёты единого системного времени. Значение **system\_clock\_frequency** частоты системного времени примерно равно 27 МГц. Более точное значение даётся следующими границами:

$$27\,000\,000 - 810 \leq \text{system\_clock\_frequency} [\text{Гц}] \leq 27\,000\,000 + 810.$$

При этом скорость изменения частоты не должна превосходить значения  $75 \cdot 10^{-3}$  Гц/с.

Временные метки указываются в единицах значения

$$\frac{300 \cdot 2^{33}}{\text{system\_clock\_frequency}} [\text{сек}]$$

с целью обеспечить представление временной информации в 33-битном поле (кроме того, имеется ещё 9-битное поле для представления остатка). Другими словами, в 33-х битах кодируется  $1/300$  значения частоты системного времени. Таким образом, моменту времени  $t_i$  поступления  $i$ -го байта соответствует значение временной метки

$$\text{PCR}(i) = 300 \times \text{PCR\_base}(i) + \text{PCR\_ext}(i), \quad (3.1)$$

где базовая часть значения временной метки

$$\text{PCR\_base}(i) = (\text{system\_clock\_frequency} \times t_i \text{ div } 300) \bmod 2^{33}, \quad (3.2)$$

обозначаемая согласно стандарту как **program\_clock\_reference\_base**, представлена по модулю  $2^{33}$ , а расширенная часть

$$\text{PCR\_ext}(i) = (\text{system\_clock\_frequency} \times t_i \text{ div } 1) \bmod 300 \quad (3.3)$$

обозначаемая как **program\_clock\_reference\_extention** представлена по модулю 300.

Отметим, что практически реализованная точность единого системного времени может оказаться выше требуемой. В этом случае

информация о повышенной точности может быть передана в декодер через соответствующий временной дескриптор

Значения битовой скорости в различных точках декодера измеряются (указываются) в единицах частоты системного времени. Например, значение 27 000 000 бит/с означает, что один байт данных передаётся каждые 8 периодов системного времени.

Рассмотрим более подробно структуру программных потоков.

### 3.3. СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ПОТОКА

Программный пакет начинается с 24-битного префикса

**packet\_start\_code\_prefix**,

представляющего собой строку символов (стринг), имеющую предопределённое значение '0000 0000 0000 0000 0000 0001'. Далее следует 8-битный идентификатор потока **stream\_id**, определяющий тип и номер элементарного потока согласно данным, представленным в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Назначение идентификаторов потока stream\_id**

<b>stream_id</b>	<b>Описание / кодирование потока</b>
1011 1100	program_stream_map (PSM), обеспечивает описание и взаимоотношение отдельных элементарных потоков в общем программном потоке
1011 1101	private_stream_1, первый отдельный поток
1011 1110	padding_stream, пустой поток
1011 1111	private_stream_2, второй отдельный поток
110x xxxx	Звуковой поток с номером xxxxx, представленный по стандартам ISO/IEC 13818-3, ISO/IEC 13818-7, ISO/IEC 11172-3, ISO/IEC 14496-3
1110 xxxx	Видеопоток с номером xxxx, представленный по стандартам ISO/IEC 13818-2, ISO/IEC 11172-2, ISO/IEC 14496-2

Продолжение таблицы 3.1

stream_id	Описание / кодирование потока
1111 0000	ECM_stream. ECM (Entitlement Control Messages) — приватная информация условного доступа, определяющая контрольные слова и другие управляющие параметры
1111 0001	EMM_stream. EMM (Entitlement Management Messages) — приватная информация условного доступа, определяющая уровни авторизации или определённые услуги
1111 0010	DSMCC_stream. DSM-CC (Digital Storage Media Command and Control) — команды хранения и управления информацией, представленные в формате стандарта ISO/IEC 13818-6
1111 0011	ISO/IEC_13522_stream, поток по стандарту ISO/IEC_13522
1111 0100	ITU-T Rec. H.222.1 тип A
1111 0101	ITU-T Rec. H.222.1 тип B
1111 0110	ITU-T Rec. H.222.1 тип C
1111 0111	ITU-T Rec. H.222.1 тип D
1111 1000	ITU-T Rec. H.222.1 тип E
1111 1001	ancillary_stream, вспомогательный поток
1111 1010	ISO/IEC14496-1_SL-packetized_stream
1111 1011	ISO/IEC14496-1_FlexMux_stream
от 1111 1100 до 1111 1110	зарезервировано
1111 1111	program_stream_directory, директория программного потока

16-битное поле **PES\_packet\_lehgh** определяет длину (в байтах) программного пакета, начиная от последнего бита данного поля. Нулевое значение указывает, что длина либо не определена, либо неограничена, и разрешены только те программные пакеты, у которых полезные данные состоят из байт элементарного видеопотока.

Вслед за полем, определяющим длину программного пакета, следуют два разделительных бита '10'.

2-битное поле **PES\_scrambling\_control** отображает режим скремблирования полезных данных, согласно табл. 3.2. Когда скремблирование выполняется на уровне всего программного потока, заголовки пакетов, включая опциональные поля, не должны подвергаться скремблированию.

Таблица 3.2

**Режимы скремблирования программного потока**

PES_scrambling_control	Режим скремблирования
00	Скремблирование отсутствует
01	Скремблирование определяется пользователем
10	Скремблирование определяется пользователем
11	Скремблирование определяется пользователем

Однобитный индикатор **PES\_priority** отображает приоритет полезных данных: единичное значение сигнализирует более высокий приоритет. Данное поле не должно изменяться какими-либо механизмами передачи программного потока.

Однобитный флаг **data\_alignment\_indicator** используется в целях выравнивания потока данных совместно с *дескриптором выравнивания потока данных*. Последний программно представляет собой трёхбайтовую синтаксическую конструкцию

```
data_stream_alignment_descriptor() {
    descriptor_tag
    descriptor_length
    alignment_type
},
```

в которой первые два байта — это метка **descriptor\_tag** и длина дескриптора **descriptor\_length** соответственно, а третий байт определяет тип выравнивания звукового или видеопотока, когда индикатор **data\_alignment\_indicator** установлен в единичное значение.

Однобитное поле **copyright** отражает наличие (при значении '1') защиты авторским правом содержащейся в пакете пользовательской

информации. Значение '0' означает, что вещателю неизвестно о наличии такой защиты. Дескриптор защиты авторского права имеет следующую структуру:

```
copyright_descriptor() {  
    descriptor_tag  
    descriptor_length  
    copyright_identifier  
        for (i = 0; i < N; i++){  
            additional_copyright_info  
        }  
    },
```

в которую помимо традиционных двух байт метки и длины входит 32-битный идентификатор авторского права **copyright\_identifier**, а также байт дополнительной информации **additional\_copyright\_info**.

Однобитное поле **original\_or\_copy** показывает, является ли содержащаяся в пакете информация оригиналом ('1') или копией ('0').

Двухбитное поле **PTS\_DTS\_flags** относится к меткам времени представления PTS (Presentation Time Stamp) и времени декодирования DTS (Decoding Time Stamp), которые вставляются в заголовок транспортного пакета после поля **PES\_header\_data\_length**.

Однобитный флаг **ESCR\_flag** отражает (при единичном значении), что в заголовке программного пакета присутствуют базовое **ESCR\_base** и расширенное **ESCR\_extension** поля опорного времени.

Однобитный флаг **ES\_rate\_flag** отражает (при единичном значении), что в заголовке программного пакета присутствует 22-битное поле **ES\_rate**, показывающее скорость, с которой декодер получает байты программного пакета.

Установленный в '1' однобитный флаг **DSM\_trick\_mode\_flag** указывает на наличие в заголовке программного пакета 3-битного поля **trick\_mode\_control**, при использовании которого к соответствующему видеопотоку применяются так называемые “хитрые” режимы (trick mode).

Единичное значение однобитного флага **additional\_copy\_info\_flag** указывает на наличие в заголовке программного пакета поля **additional\_copy\_info**, предназначенного для дополнительной информации, относящейся к копированию данных.

Установленный в '1' однобитный флаг **PES\_CRC\_flag** указывает на то, что в заголовке программного пакета содержится поле контрольной суммы.

Однобитный флаг **PES\_extention\_flag** отражает наличие ('1'), либо отсутствие ('0') в заголовке программного пакета поля расширения.

8-битное поле **PES\_header\_data\_length** указывает общее количество байт, входящие во все опциональные поля, а также всех стаффинговых байт.

Как уже было сказано, после поля **PES\_header\_data\_length** в заголовках пакета вставляются метки времени представления PTS и декодирования DTS, определяемые флагом **PTS\_DTS\_flags**. Когда флаг равен '10', это означает, что в заголовке программного пакета присутствует метка PTS.

Время представления PT (Presentation Time) — это время появления  $tp_n(k)$  в декодере  $k$ -го блока из  $n$ -го элементарного потока. 33-разрядная метка времени представления измеряется в единицах частоты системного времени **system\_clock\_frequency**, делённой целочисленно на 300 (что должно давать 90 кГц), и результат указывается по модулю  $2^{33}$ :

$$PTS(k) = (\text{system\_clock\_frequency} \times tp_n(k) \text{ div } 300) \bmod 2^{33}. \quad (3.4)$$

Значение PTS кодируется в трёх различных полях, разделённых единичными маркерными битами **marker\_bit**. В первом поле указываются три старших бита **PTS[32..30]**, во втором 15-битном поле — биты **PTS[29..15]** и в третьем 15-битном поле — биты **PTS[14..0]**. При этом полям метки PTS предшествует 4-битная предопределённая последовательность '0010'.

Когда флаг **PTS\_DTS\_flags** имеет значение '11', это означает, что в заголовке программного пакета присутствует и метка PTS, и метка DTS.

Время декодирования DT (Decoding Time) — это время декодирования  $td_n(k)$   $k$ -го блока из  $n$ -го элементарного потока. Аналогично метке времени представления, метка времени декодирования также указывается в единицах системного времени:

$$DTS(k) = (\text{system\_clock\_frequency} \times td_n(k) \div 300) \bmod 2^{33}. \quad (3.5)$$

Значение DTS также кодируется в трёх различных полях, разделённых единичными маркерными битами **marker\_bit**. В первом поле указываются три старших бита **DTS[32..30]**, во втором 15-битном поле — биты **DTS[29..15]** и в третьем 15-битном поле — биты **DTS[14..0]**.

Метке PTS предшествует предопределённая последовательность '0011'; метке DTS — последовательность '0001'.

Значение '00' флага **PTS\_DTS\_flags** означает, что в заголовке программного пакета обе метки отсутствуют; значение '01' является запрещённым.

Вслед за метками времён представления и декодирования в заголовке программного пакета следуют базовое и расширенное поля меток опорного времени, наличие которых, как уже было сказано выше, отражено единичным значением флага **ESCR\_flag**.

ESCR (Elementary Stream Clock Reference) — временная метка, по которой декодер определяет необходимые временные соотношения, а именно, намеченное время  $t(i)$  (в секундах) поступления  $i$ -го байта, в котором содержится последний бит поля **ESCR\_base**. Она представляет собой 42-битное поле, состоящее из двух частей: 33-битного базового поля **ESCR\_base** и 9-битного расширенного поля **ESCR\_extension**, значения которых, аналогично, меткам PTS и DTS, вычисляются в единицах системного времени:

$$ESCR(i) \_ \text{base} = (\text{system\_clock\_frequency} \times t(i) \div 300) \bmod 2^{33} \quad (3.6)$$

и

$$\text{ESCR}(i) \_ \text{extention} = (\text{system\_clock\_frequency} \times t(i) \text{ div } 1) \bmod 300, \quad (3.7)$$

так что совокупное временное значение равно

$$\text{ESCR}(i) = 300 \times \text{ESCR}(i) \_ \text{base} + \text{ESCR}(i) \_ \text{extention}. \quad (3.8)$$

Запись значений полей временных меток осуществляется следующим образом. Вначале следует зарезервированное 2-битовое поле. Далее представляется значение базового поля, разбитого на три подполя, относящихся к соответствующим разрядам: **ESCR\_base[32..30]**, **ESCR\_base[29..15]** и **ESCR\_base[14..0]**, разделённых единичными маркерными битами; после этого записывается значение расширенного поля, вслед за которым вновь следует маркерный бит.

Поле **ES\_rate** (Elementary Stream Rate), наличие которого отражено соответствующим флагом **ES\_rate\_flag**, представляет собой 22-разрядное число, показывающее, с какой скоростью декодер принимает на обработку байты программного потока. Скорость измеряется в единицах значения 50 байт/с, и это значение действительно для всех пакетов одного потока, до тех пор, пока в данное поле не будет установлено другое значение.

3-битное поле **trick\_mode\_control**, наличие которого отражено флагом **DSM\_trick\_mode\_flag**, показывает, что к соответствующему видеопотоку применяются “хитрые” режимы. В случае других типов потоков, например, звуковых, значения данного поля, а также следующих пяти бит неопределенны и игнорируются.

В табл. 3.3 показана языковая (к примеру, на языке C) конструкция программного пакета, в которой тип **uimbsf** (unsigned integer, most significant bit first) — это целое число без знака, подаваемое старшим разрядом вперёд; **bslbf** (bit string, left bit first) — строка символов (стринг), в которой первым следует самый левый символ. Символами **&&** обозначается операция логического И, последовательность символов **!=** обозначает отношение неравенства (not equal), а последовательность **==** обозначает отношение равенства (equal).

Таблица 3.3

## Языковая конструкция программного пакета

Синтаксис	Число бит	Тип элемента
PES_packet() {		
<b>packet_start_code_prefix</b>	24	bslbf
<b>stream_id</b>	8	uimsbf
<b>PES_packet_lehgth</b>	16	uimsbf
if (stream_id != program_stream_map		
&& stream_id != padding_stream		
&& stream_id != private_stream_2		
&& stream_id != ECM		
&& stream_id != EMM		
&& stream_id != program_stream_directory		
&& stream_id != DSMCC_stream		
&& stream_id != ITU-T Rec. H.222.1 type E stream) {		
'10'	2	bslbf
<b>PES_scrambling_control</b>	2	bslbf
<b>PES_priority</b>	1	bslbf
<b>data_alignment_indicator</b>	1	bslbf
<b>copyright</b>	1	bslbf
<b>original_or_copy</b>	1	bslbf
<b>PTS_DTS_flags</b>	2	bslbf
<b>ESCR_flag</b>	1	bslbf
<b>ES_rate_flag</b>	1	bslbf
<b>DSM_trick_mode_flag</b>	1	bslbf
<b>additional_copy_info_flag</b>	1	bslbf
<b>PES_CRC_flag</b>	1	bslbf
<b>PES_extention_flag</b>	1	bslbf
<b>PES_header_data_length</b>	8	uimsbf
if (PTS_DTS_flags == '10') {		
'0010'	4	bslbf
<b>PTS [32..30]</b>	3	bslbf
<b>marker_bit '1'</b>	1	bslbf
<b>PTS [29..15]</b>	15	bslbf
<b>marker_bit '1'</b>	1	bslbf

<b>PTS [14..0]</b>	15	bslbf
<b>marker_bit '1'</b>	1	bslbf
}		
if (PTS_DTS_flags == '11') {		
'0011'	4	bslbf
<b>PTS [32..30]</b>	3	bslbf
<b>marker_bit '1'</b>	1	bslbf
<b>PTS [29..15]</b>	15	bslbf
<b>marker_bit '1'</b>	1	bslbf
<b>PTS [14..0]</b>	15	bslbf
<b>marker_bit '1'</b>	1	bslbf
'0001'	4	bslbf
<b>PTS [32..30]</b>	3	bslbf
<b>marker_bit '1'</b>	1	bslbf
<b>PTS [29..15]</b>	15	bslbf
<b>marker_bit '1'</b>	1	bslbf
<b>PTS [14..0]</b>	15	bslbf
<b>marker_bit '1'</b>	1	bslbf
}		
if (ESCR_flag == '1') {		
<b>reserved</b>	2	bslbf
<b>ESCR_base[32..30]</b>	3	bslbf
<b>marker_bit</b>	1	bslbf
<b>ESCR_base[29..15]</b>	15	bslbf
<b>marker_bit</b>	1	bslbf
<b>ESCR_base[14..0]</b>	15	bslbf
<b>marker_bit</b>	1	bslbf
<b>ESCR_extension</b>	9	uimbsbf
<b>marker_bit</b>	1	bslbf
}		
if (ES_rate_flag == '1') {		
<b>marker_bit</b>	1	bslbf
<b>ES_rate</b>	22	uimbsbf
<b>marker_bit</b>	1	bslbf
}		

Обратимся теперь к рассмотрению особенностей структуры транспортного потока.

### 3.4. СТРУКТУРА ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Транспортный поток, стандартизованный согласно Международному стандарту ISO/IEC 13818-1, позволяет комбинировать в едином потоке одну или несколько пользовательских программ вместе с дополнительной служебной информацией, обеспечивающей синхронизацию отдельных пакетов. Таким образом, транспортный поток состоит из транспортных пакетов, каждый из которых, в свою очередь, состоит из служебного заголовка и полезных данных.

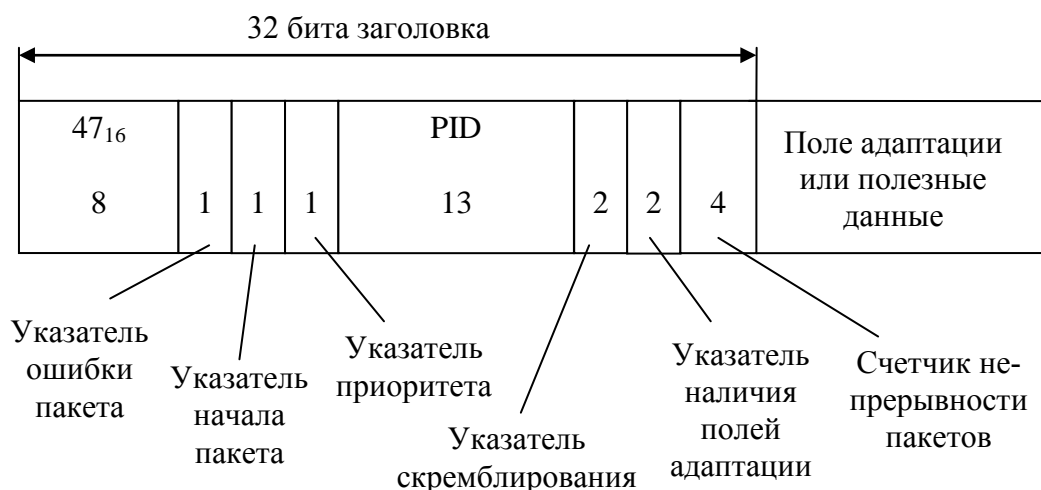


Рис. 3.9. Структура транспортного пакета

Пакеты имеют фиксированную длину 188 байт<sup>1</sup>, из которых четыре байта (32 бита) составляют заголовок, а 184 — полезные данные, в том числе, уплотнительные пустые байты  $11111111_2 = FF_{16}$ , называемые *стаффингом*. Как и в случае программного пакета, каждый транспортный пакет переносит данные только одного вида.

<sup>1</sup> Размер пакета в 188 байт выбран для совместимости со стандартом АТМ асинхронной передачи данных, чтобы один транспортный пакет MPEG-2 упаковывался в четыре пакета АТМ.

Первый байт — *байт синхронизации* — содержит зарезервированное число  $47_{16} = 1000111_2 = 71_{10}$ .

Два следующих байта включают в себя три одноразрядных флага: *указатель ошибки пакета*, *указатель начала пакета*, *указатель приоритета* и 13-разрядный *пакетный идентификатор* PID (Packet Identity), указывающий на принадлежность пакета определенному потоку данных. Пакетный идентификатор является основным признаком, по которому приемник сортирует приходящие пакеты. Из общего числа  $2^{13} = 8192$  возможных значений пакетного идентификатора 16 значений назначены для общесистемных целей, значение  $1FFF_{16}$  предназначено для указания на наличие стаффинговых байт, а остальные могут назначаться поставщиками и пользователями услуг для отдельных компонент своих программ.

Четвертый байт содержит двухразрядный *указатель скремблирования*, *указатель наличия полей адаптации* и *счетчик непрерывности*.

Указатель скремблирования свидетельствует о наличии или отсутствии скремблирования, которому подвергается транспортный поток.

Поле адаптации может занимать часть полезных данных и служит для ввода управляющей и вспомогательной информации, передаваемой не в каждом пакете. В частности, в полях адаптации передаются *таблицы программно-зависимой информации* (см. далее) и сигналы синхронизации. Кроме того, поле адаптации может также использоваться для передачи пользовательских данных — в этом случае оно разбивается на разделы. Значения указателя наличия поля адаптации и соответствующий вид нагрузки пакета приведены в табл. 3.4. Заметим, что заголовок пакета, и поле адаптации не скремблируются.

Счетчик непрерывности пакета увеличивает свое значение на единицу при поступлении очередного транспортного пакета с данным пакетным идентификатором (после 15-го пакета происходит обнуление), что позволяет обнаруживать потерю пакета.

Таблица 3.4

**Значения указателя наличия полей адаптации**

Значение указателя	Нагрузка пакета
00	Зарезервировано
01	Поле адаптации отсутствует, пакет полностью занят полезными данными
10	Поле адаптации присутствует, но вместо полезных данных передается стаффинг
11	Поле адаптации присутствует, и передаются полезные данные

Как правило, длина пакетированного элементарного потока значительно превышает поле, предоставляемое для размещения полезных данных, что влечет за собой необходимость фрагментации потока. В стандарте определено, что первый байт пакетированного элементарного потока должен совпадать с первым байтом области полезных данных, а конец потока — с концом одного из транспортных пакетов. При этом, если оказывается, что этот транспортный пакет заполнен не до конца, то соответствующие байты устанавливаются в пустое состояние.

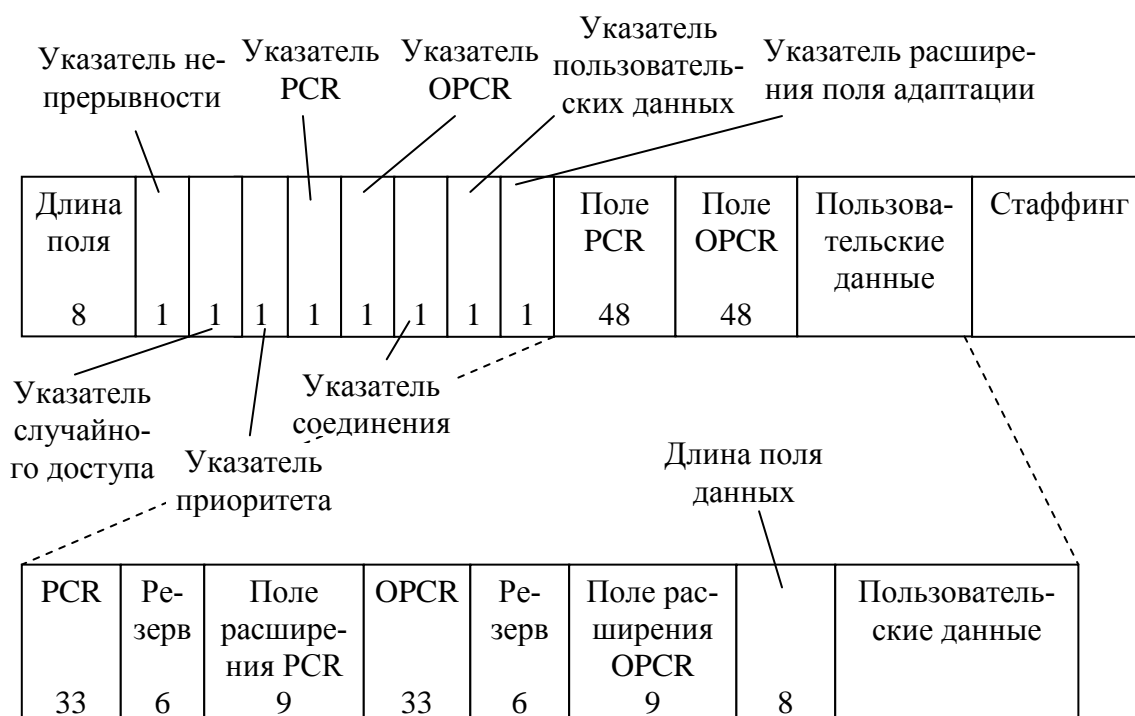
Поле адаптации имеет структуру, представленную на рис. 3.10.

Первый байт указывает длину (в байтах) поля адаптации.

Второй байт содержит восемь одноразрядных флагов:

- указатель непрерывности;
- указатель случайного доступа;
- указатель приоритета случайного потока;
- указатель ссылки на программные часы PCR (Program Clock Reference);
- указатель исходной ссылки на программные часы OPCR (Original PCR);
- указатель соединения;
- указатель пользовательских данных;

- указатель расширения поля адаптации.



**Рис. 3.10. Структура поля адаптации**

Указатель непрерывности свидетельствует о непрерывности счета времени во временных метках. Он устанавливается в 1, если на передающей стороне изменена база отсчета времени, например, при введении другой программы.

Если в текущем поле адаптации присутствует ссылка на программные часы, то об этом свидетельствует установленный в 1 соответствующий указатель PCR. Само поле PCR занимает шесть байт (48 бит), из которых 33 бита предназначены непосредственно для передачи метки времени, шесть бит зарезервировано, а девять бит занимает поле расширения PCR. Аналогичный формат (33 + 6 + 9 бит) имеет поле OPCR, где передается временная метка для программы, которая была взята из другого потока, но в отличие от “собственной” метки времени OPCR не может изменяться в процессе передачи.

Указатель соединения определяет число пакетов в транспортном потоке с таким же значением пакетного идентификатора PID, оставшихся до точки “гладкого” входа в поток.

Если в поле адаптации будут находиться какие-либо расширения, то об этом будет указывать соответствующий указатель расширения, установленный в 1. Это же касается и пользовательских данных, наличие которых показывает своим единичным значением указатель пользовательских данных.

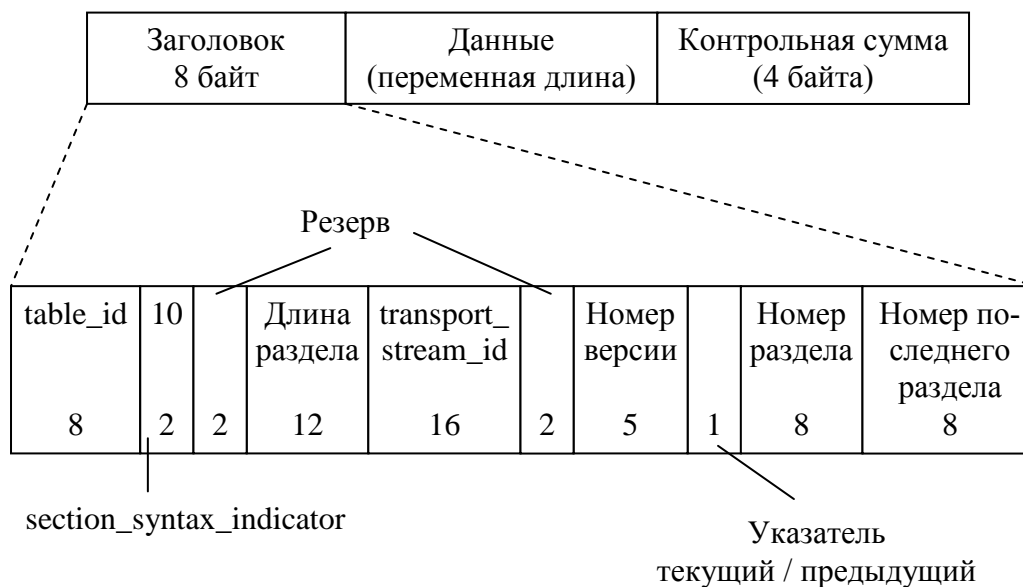
Начиная с 15-го байта поле адаптации занимают либо служебные данные, либо пользовательские данные, либо расширение поля адаптации.

Вся необходимая для обработки цифрового потока информация сосредоточена в управляющей информации, передаваемой в составе транспортного потока. Базовым понятием является *мультиплекс* — поток цифровых данных, переносящий одну или более услуг в одном физическом канале. Спецификация [4], ссылаясь на международный стандарт [11] представления кодированной видео- и звуковой информации, определяют информацию об услугах как программные данные, использование которых позволяет проводить автоматическую конфигурацию приемника в целях демультимплексирования и декодирования различных потоков. Эти данные организованы в виде так называемых *таблиц программно зависимой информации* PSI (Program Specific Information).

Рассмотрим типы таблиц, используемых в системе DVB для формирования и передачи различной информации.

*Таблица объединения программ* ТОП (PAT, Program Association Table) определена для каждой услуги в мультиплексе и предназначена для отображения значений пакетных идентификаторов PID. Данная таблица (совместно с таблицей сетевой информации) также предоставляет сетевую информацию в том случае, когда организована сеть вещания. Таблица ТОП — первая, пакеты которой декодер должен найти в потоке, она имеет по умолчанию идентификатор PID = 0 для

своих пакетов. Формат таблицы ТОП, содержащей 8-байтовый заголовок, поле данных переменной длины и 4-байтовое поле контрольной суммы, представлен на рис. 3.11.



**Рис. 3.11. Формат таблицы ТОП**

В заголовке таблицы первым находится однобайтовый *табличный идентификатор* **table\_id**, определяющий тип таблицы (заметим, что различные по типу таблицы могут иметь один и тот же пакетный идентификатор PID). Далее следуют два поля, одно из которых — двухбитовый *синтаксический индикатор раздела* **section\_syntax\_indicator** — всегда установлено в значение  $10_2$ , а другое двухбитовое поле зарезервировано.

Два старших бита 12-байтового поля *длины раздела* (длина измеряется в байтах) установлены в 0, так что общая длина раздела не может превышать  $2^{10} = 1024$  байта.

*Идентификатор транспортного потока* **transport\_stream\_id** размером два байта указывает условный номер транспортного потока, в котором передается таблица ТОП.

*Указатель номера версии*, состоящий из пяти бит, увеличивается на единицу каждый раз, когда в таблицу вносятся изменения. При

этом, если таблица разбита на несколько разделов, то *однобайтовый указатель номера раздела* сообщает номер текущего раздела. *Указатель номера последнего раздела* необходим для подтверждения того, что вся таблица успешно декодирована.

В поле данных таблицы ТОП содержатся сведения о программах, передаваемых в транспортном потоке (на рис. 3.11 не показаны): *двухбайтовый номер программы*, затем следует зарезервированный промежуток из трех бит, а далее — 13-битовый пакетный идентификатор PID.

Состоящее из 32 бит поле контрольной суммы определяется многочленом

$$P(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1.$$

В табл. 3.5 показана языковая (к примеру, на языке C) конструкция таблицы объединения программ.

Таблица 3.5

**Языковая конструкция таблицы объединения программ**

Синтаксис	Число бит	Тип элемента
<code>program_association_section() {</code>		
<b>table_id</b>	8	uimsbf
<b>section_syntax_indicator</b>	1	bslbf
'0'	1	bslbf
<b>reserved</b>	2	bslbf
<b>section_length</b>	12	uimsbf
<b>transport_stream_id</b>	16	uimsbf
<b>reserved</b>	2	bslbf
<b>version_number</b>	5	uimsbf
<b>current_next_indicator</b>	1	bslbf
<b>section_number</b>	8	uimsbf
<b>last_section_number</b>	8	uimsbf
for (i = 0; i < N; i++) {		
<b>program_number</b>	16	uimsbf

<b>reserved</b>	3	bslbf
if (program_number == '0') {		
<b>network_PID</b>	13	uimsbf
}		
else {		
<b>program_map_PID</b>	13	uimsbf
}		
}		
<b>CRC_32</b>	32	rpchbf
}		

*Таблица условного доступа* ТУД (CAT, Conditional Access Table) обеспечивает информацией о методе доступа к услугам данного мультиплекса, если программа платная. Пакеты с ТУД имеют идентификатор PID = 1.

*Таблица программной карты* ТПК (PMT, Program Map Table) определяет и отображает положение потоков, составляющих каждую услугу, а также содержит поля опорного системного времени.

*Таблица сетевой информации* ТСИ (NIT, Network Information Table) предназначена для обеспечения информацией о физических параметрах сети. Она содержит зарегистрированный в ETSI сетевой идентификатор (имя сети) **network\_id** и сведения обо всех передаваемых транспортных потоках, по которым можно настроиться на прием: номер частотного канала, центральная частота, символьная скорость и др. Данная таблица является необязательной.

Структуры таблиц ТУД, ТПК и ТСИ идентичны рассмотренной на рис. 3.5 структуре таблице ТОП.

Частота повторения пакетов, относящихся к таблицам ТОП и ТПК, должна быть не менее 10 Гц; частота повторения пакетов таблицы ТУД определяется конкретными условиями предоставления платных услуг.

Наряду с программными данными, которые предоставляют информацию только для мультиплекса, в котором они содержатся, так-

же определены дополнительные данные, обеспечивающие информацию об услугах и событиях, относящихся к различным мультиплексам и даже к другим сетям. Дополнительные данные структурированы в девять таблиц.

*Таблица объединения пакетов программ* ТОПП (BAT, Bouquet Association Table) обеспечивает информацией, касающейся программных пакетов, в частности, имени пакета и списка содержащихся в каждом пакете услуг. Аналогично всем другим таблицам, таблица ТОПМ содержит табличный идентификатор, а в качестве его расширения — идентификатор данного пакета программ.

*Таблица описания услуги* ТОУ (SDT, Service Description Table) содержит данные, описывающие возможные в данной системе услуги: наименования услуг, провайдера услуг и др. В качестве расширения табличный идентификатор таблицы ТОУ содержит важный параметр: идентификатор транспортного потока **transport\_stream\_id**.

*Таблица информации о событиях* ТИС (EIT, Event Information Table) содержит данные, касающиеся параметров событий, таких, как имя события, время начала и конца событий и т. д. *Событие* определяется как группа элементарных потоков, относящихся к одной услуге и имеющих определенное время начала и окончания. Описание событий включает следующие данные:

- идентификатор события **event\_id**,
- время начала,
- длительность,
- код языка,
- индикатор скремблирования,
- имя события,
- краткое описание события.

Таблица ТИС может существовать в двух вариантах: полном и укороченном. В полном варианте прописаны события вплоть до восьми суток; в укороченном — только текущее и последующее события. Укороченная таблица является обязательной, она передается в

двух разделах с номерами 0 (для текущего события) и 1 (для последующего события). Полная таблица данного потока не является обязательной.

*Таблица статуса выполнения* TCB (RST, Running Status Table) отображает статус событий (выполнено / невыполнено), что позволяет автоматически переключаться между событиями. Таблица TCB передается только при изменении событий, посылаемые после нее таблицы ТИС должны содержать уже уточненные данные.

*Таблица времени и дат* ТВД (TDT, Time and Data Table) предоставляет информацию, касающуюся текущих времени и даты в формате всемирного координированного времени (UTC, Universal Time Coordinated). Таблица укладывается в один раздел длиной 66 байт.

*Таблица временного сдвига* TBC (TOT, Time Offset Table) содержит информацию о текущих времени и дате, а также о локальном временном сдвиге.

*Стаффинговая (пустая) таблица* СТ (ST, Stuffing Table) используется для того, чтобы объявить недействительными существующие таблицы ТСИ, ТОПМ, ТИС, ТОУ, TCB, например, при их достижении границ системы. Данные, содержащиеся в таблице СТ, передаются с пакетными идентификаторами от  $10_{16}$  до  $14_{16}$ .

*Таблица выбора информации* ТВИ (SIT, Selection Information Table) содержит в кратком виде информацию, требуемую, чтобы описать отдельные подпотоки в едином потоке.

*Таблица прерываний* ТП (DIT, Discontinuity Information Table) указывает, в каком месте информация об услугах может быть прервана.

Установлена следующая периодичность передачи дополнительных таблиц:

- таблица ТОУ и укороченная таблица ТИС для данного потока передаются не реже одного раза в 2 с;

- таблица ТСИ (как дополнительная), ТОПМ, ТОУ и укороченная ТИС для других потоков, а также полная таблица ТИС на ближайшие восемь дней должны передаваться не реже одного раза в 10 с;

- таблицы ТВД и ТВС должны передаваться не реже одного раза в 30 с.

В табл. 3.6 приведены значения пакетных идентификаторов PID пакетов транспортного уровня для различных типов таблиц.

Таблица 3.6

**Значения идентификаторов PID для различных типов таблиц**

Тип таблицы	PID <sub>16</sub>
Таблица объединения программ	0000
Таблица условного доступа	0001
Таблица программной карты	0002
Таблица сетевой информации	0010
Таблица объединения пакетов программ	0011
Таблица описания услуги	0011
Таблица информации о событиях	0012
Таблица статуса выполнения	0013
Таблица времени и дат	0014
Таблица временного сдвига	0014
Стаффинговая (пустая) таблица	0010
	0011
	0012
	0013
	0014
Таблица выбора информации	001F
Таблица прерываний	001E
Зарезервированные значения для других типов таблиц	0003–000F

Таблицы программно-зависимой информации передаются в *разделах* — синтаксических структурах, используемых для отображения информации об услугах на пакеты транспортного потока. Размер раз-

дела для передачи служебной информации не превышает 1 024 байта, за исключением раздела, содержащего таблицу ТИС информации о событиях, для которого установлено ограничение в 4 096 байт. Возможна передача как нескольких коротких разделов, так и одного длинного раздела в поле адаптации одного транспортного пакета.

Каждый раздел однозначно идентифицируется комбинацией из пяти элементов.

- 8-битный табличный идентификатор **table\_id** определяет, какой таблице соответствует данный раздел. Некоторые из значений табличного идентификатора заранее предопределены решениями ISO или ETSI, другие — распределяются между пользователями для их частных целей.

- 16-битный идентификатор табличного расширения **table\_id\_extension**, используемый для составления и идентификации подтаблиц, т.е. данное поле существует в “длинной” версии раздела. В таблице ТОП идентификатор табличного расширения используется, чтобы определить идентификатор транспортного потока **transport\_stream\_id**, который позволяет отделять различные транспортные потоки. В таблице ТУД данное поле не имеет определённого значения и трактуется как зарезервированное со значением FFFF<sub>16</sub>. В таблице ТПК это поле содержит в себе идентификатор **program\_number**, позволяющий указать программу, к которой относится передаваемая информация.

- номер раздела **section\_number**, по которому отдельные подтаблицы восстанавливаются декодером в исходном порядке следования, поскольку рекомендуется некоторые разделы передавать чаще других, т.е. порядок следования таблиц носит квазислучайный характер.

- номер версии **version\_number**, сигнализирующего о том, что в структуре передаваемой информации произошли изменения (начало нового события, перестройка комбинации элементарных потоков и др.), и об этом необходимо оповестить декодер. Идентификатор номера версии применяется ко всем разделам подтаблиц;

- индикатор “текущий / следующий” **current\_next\_indicator**, показывающего время достоверности информации в разделе, т. е. в текущий (current) или в последующий (next) момент времени, что позволяет более эффективно использовать ресурсы декодера.

Таблица 3.7

**Распределение значений table\_id по различным разделам**

table_id <sub>16</sub>	Назначение
00	Объединение программ
01	Условный доступ
02	Выбор программной карты
03	Описание транспортного потока
04...3F	Зарезервированы
40	Сетевая информация, касающаяся действующей сети
41	Сетевая информация, касающаяся других сетей
42	Описание услуги в действующем транспортном потоке
43...45	Зарезервированы
46	Описание услуги в других транспортных потоках
47...49	Зарезервированы
4A	Объединение пакетов программ
4B...4D	Зарезервированы
4E	Наступление события в действующем транспортном потоке (текущий / следующий)
4F	Наступление события в других транспортных потоках (текущий / следующий)
50...5F	Наступление события в действующем транспортном потоке (расписание)
60...6F	Наступление события в других транспортных потоках (расписание)
70	Время / дата
71	Статус выполнения
72	Стаффинг
73	Временной сдвиг

Окончание таблицы 3.7

table_id <sub>16</sub>	Назначение
74...7D	Зарезервированы
7E	Передача прерываний
7F	Выбор информации
80...FE	В пользовательских целях
FF	Зарезервировано

Использование соответствующих дескрипторов позволяет создать гибкие структуры для описания таблиц, имеющие, к тому же, возможности для последующего расширения.

## Вопросы и задания

1. Изучите подробно формат LVDS представления сигналов.
2. В чём сравнительные преимущества и недостатки использования синхронного последовательного и синхронного параллельного интерфейсов?
3. Чем обеспечивается цикловая синхронизация в интерфейсе ASI?
4. С какой целью и каким образом формируется поток высокого приоритета?
5. Чем отличаются программный и транспортный потоки?
6. Какова возможная длина программного пакета?
7. Для чего необходимо поле адаптации в транспортном потоке?
8. Перечислите виды таблиц программно зависимой информации, используемых в системы DVB.
9. Исследуйте корректирующую способность контрольной суммы, используемой в транспортном потоке.
10. Опишите содержимое таблицы ТИС информации о событиях.

## 4. КАНАЛЬНЫЙ КОДЕР И МОДУЛЯТОР СИСТЕМЫ DVB-T

Данная глава посвящена изучению передающей части системы DVB-T. Последовательно рассматриваются операции формирования результирующего радиосигнала: от мультиплексора, реализующего транспортный поток, до канального модулятора, на выходе которого формируется OFDM-сигнал, содержащий как полезную нагрузку, трак и служебную информацию.

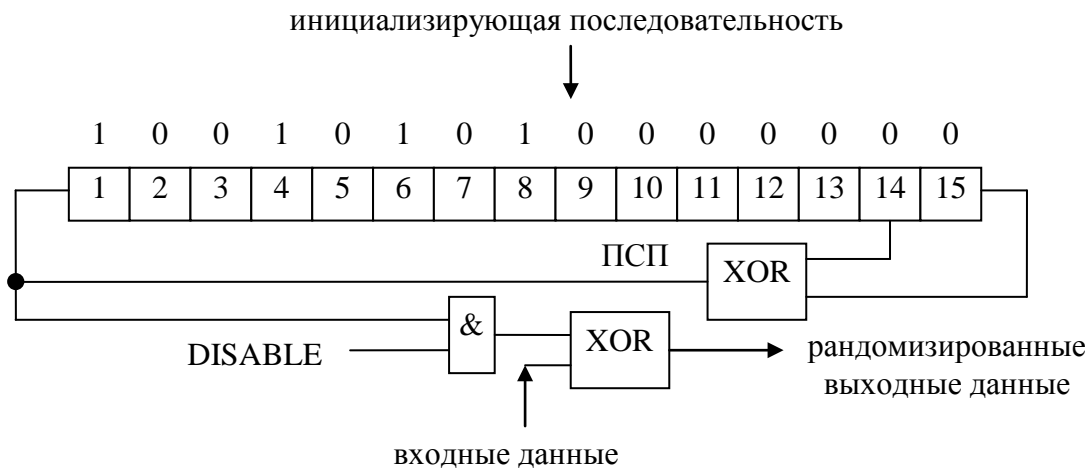
Наряду с рассмотрением стандартизованных операций формирования сигнала системы DVB-T, в данной главе также отражены некоторые вопросы, связанные с общими свойствами ортогональных многочастотных сигналов.

### 4.1. КАНАЛЬНЫЙ КОДЕР

Как было рассмотрено выше, транспортный поток MPEG-2, поступающий от мультиплексора, состоит из пакетов по 188 байт. Каждый пакет начинается с синхробайта  $47_{16}$  ( $71_{10}$ ,  $01000111_2$ ), байты поступают на канальный кодер, начиная со старшего разряда, например, синхробайт  $47_{16}$  поступает в канальный кодер, начиная с 0. Каждые восемь пакетов образуют *группу пакетов*. Синхробайт первого пакета группы должен быть проинвертирован, в результате чего его значение оказывается равным  $B8_{16}$  ( $184_{10}$ ,  $10111000_2$ ). Это делается в целях обеспечения инициализации работы дескремблера в приемнике (см. далее).

Первым устройством канального кодера является *рандомизатор (скремблер)*, представляющий собой (рис. 4.1) совокупность генератора псевдослучайной последовательности (ПСП), двоичного сумматора (логический элемент XOR — “исключающее ИЛИ”), а также логического элемента умножения  $\&$ . На один вход сумматора поступает ПСП, на второй — входные данные мультиплексированных пакетов. Порождающий полином ПСП имеет вид

$$P_{PRBS}(x) = 1 + x^{14} + x^{15}. \quad (4.1)$$



**Рис. 4.1. Рандомизатор мультиплексированного пакета**

С приходом первого синхробайта  $B_{8_{16}}$  группы пакетов производится инициализация скремблера посредством загрузки в ячейки регистра последовательности

1001010100000000

(старший разряд — слева). При этом сам синхробайт  $B_{8_{16}}$  проходит транзитом на выход рандомизатора. Начиная со следующего байта входных данных генератор ПСП работает с частотой поступления бит, которые подаются на двоичный сумматор старшим разрядом вперед. Во время поступления синхробайтов  $47_{16}$  оставшихся семи пакетов группы генератор ПСП продолжает работать, но выход генератора ПСП блокируется сигналом DISABLE на входе логического элемента И, расположенного на выходе рандомизатора (давая на выходе элемента И нулевой логический уровень). Таким образом, синхробайты и  $B_{8_{16}}$ , и  $47_{16}$  не подвергаются скремблированию, а период работы скремблера равен  $8 \cdot 188 - 1 = 1503$  байта (–1 соответствует учету синхробайта  $B_{8_{16}}$ ).

Следующим функциональным блоком канального кодера (рис. 2.1) является блочный кодер Риды — Соломона RS(204, 188, 8), способный исправлять восемь любых ошибочных байт в 188-

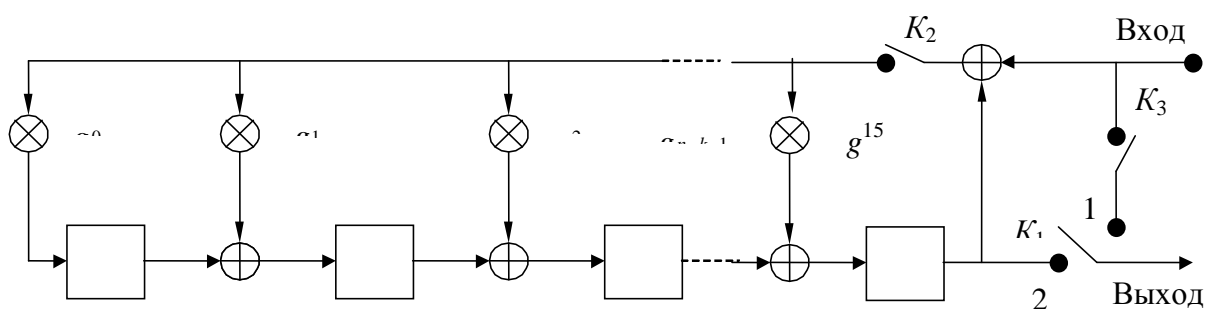
байтовом входном пакете на основании анализа выходного 204-байтового пакета. Данный кодер реализует укороченный (на 51 байт) вариант полного кода Рида — Соломона RS(255, 239, 8) применительно к транспортному пакету.

Порождающий полином кода равен

$$G(x) = (x + \lambda^0)(x + \lambda^1)(x + \lambda^2) \cdots (x + \lambda^{15}), \quad (4.2)$$

где  $\lambda = 2_{16}$ .

Укорочение кода может быть осуществлено путем добавления 51 нулевого байта перед информационными байтами транспортного пакета с последующим отбрасыванием нулевых байт после выполнения процедуры кодирования в полном коде RS(255, 239, 8).



**Рис. 4.2. Кодер Рида — Соломона (внешний кодер)**

Рассмотрим более подробно работу и возможную реализацию внешнего кодера Рида — Соломона.

Таблица 4.1

**Коэффициенты умножения для кодера Рида — Соломона**

Коэффициент	$g_0$	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	$g_6$	$g_7$
Значение	59	36	50	98	229	41	65	163
Коэффициент	$g_9$	$g_{10}$	$g_{11}$	$g_{12}$	$g_{13}$	$g_{14}$	$g_{15}$	$g_{16}$
Значение	8	30	209	68	189	104	13	59

Обозначим байты пакета  $B_1, B_2, \dots, B_{188}$ ; старший байт  $B_1$  первым поступает в кодер. Задача кодера — сформировать 16 проверочных байт  $B_{189}, B_{190}, \dots, B_{204}$ .

Кодирующее устройство может быть реализовано с помощью регистра сдвига с 16-ю байтовыми ячейками памяти, сумматоров и умножителей в поле Галуа GF(256), а также трёх ключей  $K_1, K_2, K_3$  на входе регистра сдвига (рис. 4.2). Коэффициенты умножения приведены в табл. 4.1

На основании представленной на рис. 4.2 схемы можно выделить следующие этапы кодирования.

1. Ячейки сдвигового регистра сдвига обнуляются.
2. Ключ  $K_1$  находится в положении 1, ключи  $K_2$  и  $K_3$  замкнуты. 188 байт пакета, начиная со старшего  $B_1$ , поступают в кодирующее устройство, а также непосредственно подаются на выход кодера.
3. Ключ  $K_3$  отключает вход от выхода, и на вход кодера поступает 51 нулевой байт.
4. Ключ  $K_1$  переводится в положение 2, соединяя регистр с выходом кодера. Ключ  $K_2$  в цепи обратной связи размыкается. Сдвиговый регистр совершает 16 тактов работы, выдавая на выход 16 проверочных байт  $B_{189}, \dots, B_{204}$  (байт  $B_{189}$  — старший). Таким образом, на выходе регистра формируется последовательность

$$B_1, B_2, \dots, B_{188}, B_{189}, B_{190}, \dots, B_{204}.$$

Отметим, что при аппаратной реализации описанных этапов кодирования на входе кодера должно быть предусмотрено 2 блока памяти (FIFO) размером 188 байтов: во время записи пакета байт в один блок должно производиться кодирование пакета из другого блока памяти. Кроме того, для кодирования в реальном времени должно быть соблюдено условие, что время кодирования не должно превосходить время заполнения пакетом блока памяти.

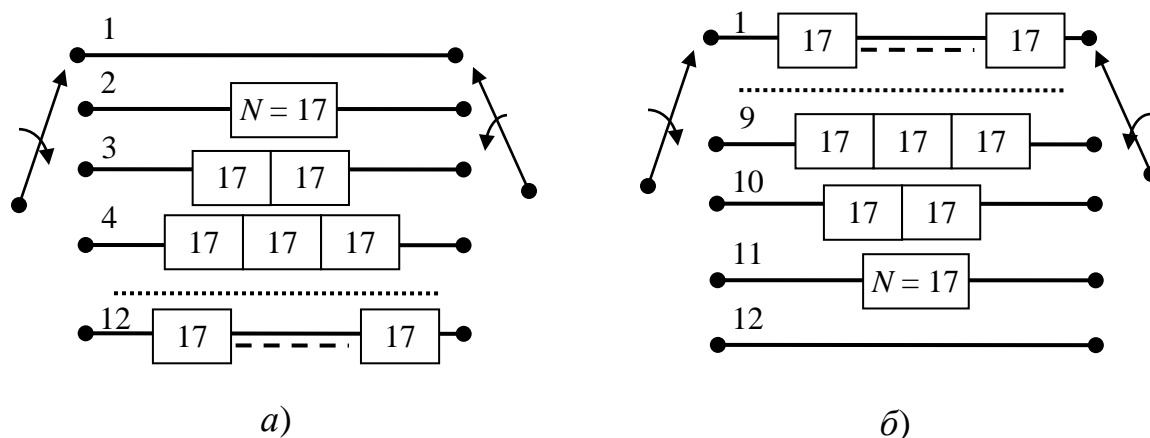
Итак, рандомизированные 188 байт транспортных пакетов, подвергнутые блочному кодированию, образуют 204-байтные помехозащищенные блоки, и следующей операцией канального кодирования

является *байтовое перемежение*, результатом которого является рас-  
сеяние байт одного блока по 12-ти последовательным блокам.

Используемое в системе DVB-T устройство перемежения клас-  
сифицируется как *сверточный  $(J, N)$ -перемежитель Рамси третьего  
типа*, и он построен по схеме Форни [6], содержащей набор из  $J = 12$   
сдвиговых регистров и пары ключей, синхронно, с частотой следова-  
ния байт, подключающих регистры к входному и выходному потокам.  
При этом каждый последующий регистр хранит на  $N = 17$  байт боль-  
ше, чем предыдущий.

При выполнении прямой операции — в перемежителе — первый  
регистр является вырожденным<sup>1</sup>: он не предназначен для хранения, и  
подаваемый на него байт сразу же передается на выход (рис. 4.3, а).  
Далее с приходом каждого очередного байта ключи циклически пере-  
ключаются на следующий регистр, причем после  $J$ -го регистра ключ  
возвращается в исходное состояние — к первому регистру, и все опе-  
рации начинаются заново.

На приемной стороне — в деперемежителе — операции выпол-  
няются в обратном порядке (рис. 4.3, б).



**Рис. 4.3. Принцип работы байтового перемежителя (а) и  
деперемежителя (б)**

<sup>1</sup> Фактически это не регистр, а проводник с тактируемой задержкой.

Очевидно, что в процессе перемежения данных в выходной последовательности появляются “нулевые” байты, которыми в момент инициализации были заполнены ячейки сдвиговых регистров. Рассмотрим, к примеру, 12 тестовых блоков, байты которых имеют последовательные значения от 1 до 204. Тогда после обработки первого блока в выходной последовательности имеем:

$1_1 \quad 0^{11} \quad 13_1 \quad 0^{11} \quad 25_1 \quad 0^{11} \quad 37_1 \quad 0^{11} \quad 49_1 \quad 0^{11} \quad 61_1 \quad 0^{11}$   
 $73_1 \quad 0^{11} \quad 85_1 \quad 0^{11} \quad 97_1 \quad 0^{11} \quad 109_1 \quad 0^{11} \quad 121_1 \quad 0^{11} \quad 133_1 \quad 0^{11}$   
 $145_1 \quad 0^{11} \quad 157_1 \quad 0^{11} \quad 169_1 \quad 0^{11} \quad 181_1 \quad 0^{11} \quad 193_1 \quad 0^{11} ,$

где нижний индекс показывает привязку к соответствующему блоку, а  $0^k$  обозначает  $k$  подряд идущих нулевых байт.

После обработки второго блока в выходной последовательности появляются байты как первого, так и второго блоков:

$1_2 \quad 2_1 \quad 0^{10} \quad 13_2 \quad 14_1 \quad 0^{10} \quad 25_2 \quad 26_1 \quad 0^{10} \quad 37_2 \quad 38_1 \quad 0^{10}$   
 $49_2 \quad 50_1 \quad 0^{10} \quad 61_2 \quad 62_1 \quad 0^{10} \quad 73_2 \quad 74_1 \quad 0^{10} \quad 85_2 \quad 86_1 \quad 0^{10}$   
 $97_2 \quad 98_1 \quad 0^{10} \quad 109_2 \quad 110_1 \quad 0^{10} \quad 121_2 \quad 122_1 \quad 0^{10} \quad 133_2 \quad 134_1 \quad 0^{10}$   
 $145_2 \quad 146_1 \quad 0^{10} \quad 157_2 \quad 158_1 \quad 0^{10} \quad 169_2 \quad 170_1 \quad 0^{10} \quad 181_2 \quad 182_1 \quad 0^{10}$   
 $193_2 \quad 194_1 \quad 0^{10} .$

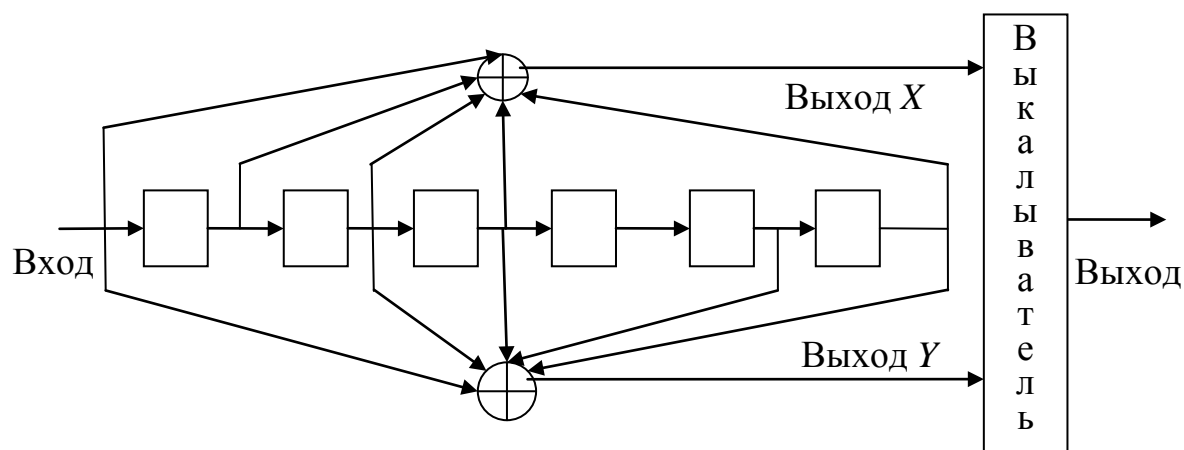
Видно, что в выходной последовательности присутствует по 17 байт каждого из блоков. В конечном итоге после обработки 12-го блока выходная последовательность имеет следующий вид:

$1_{12} \quad 2_{11} \quad 3_{10} \quad 4_9 \quad 5_8 \quad 6_7 \quad 7_6 \quad 8_5 \quad 9_4 \quad 10_3 \quad 11_2 \quad 12_1$   
 $13_{12} \quad 14_{11} \quad 15_{10} \quad 16_9 \quad 17_8 \quad 18_7 \quad 19_6 \quad 20_5 \quad 21_4 \quad 22_3 \quad 23_2 \quad 24_1$   
 $25_{12} \quad 26_{11} \quad 27_{10} \quad 28_9 \quad 29_8 \quad 30_7 \quad 31_6 \quad 32_5 \quad 33_4 \quad 34_3 \quad 35_2 \quad 36_1$   
 $37_{12} \quad 38_{11} \quad 39_{10} \quad 40_9 \quad 41_8 \quad 42_7 \quad 43_6 \quad 44_5 \quad 45_4 \quad 46_3 \quad 47_2 \quad 48_1$   
 $49_{12} \quad 50_{11} \quad 51_{10} \quad 52_9 \quad 53_8 \quad 54_7 \quad 55_6 \quad 56_5 \quad 57_4 \quad 58_3 \quad 59_2 \quad 60_1$   
 $61_{12} \quad 62_{11} \quad 63_{10} \quad 64_9 \quad 65_8 \quad 66_7 \quad 67_6 \quad 68_5 \quad 69_4 \quad 70_3 \quad 71_2 \quad 72_1$   
 $73_{12} \quad 74_{11} \quad 75_{10} \quad 76_9 \quad 77_8 \quad 78_7 \quad 79_6 \quad 80_5 \quad 81_4 \quad 82_3 \quad 83_2 \quad 84_1$   
 $85_{12} \quad 86_{11} \quad 87_{10} \quad 88_9 \quad 89_8 \quad 90_7 \quad 91_6 \quad 92_5 \quad 93_4 \quad 94_3 \quad 95_2 \quad 96_1$   
 $97_{12} \quad 98_{11} \quad 99_{10} \quad 100_9 \quad 101_8 \quad 102_7 \quad 103_6 \quad 104_5 \quad 105_4 \quad 106_3 \quad 107_2 \quad 108_1$   
 $109_{12} \quad 110_{11} \quad 111_{10} \quad 112_9 \quad 113_8 \quad 114_7 \quad 115_6 \quad 116_5 \quad 117_4 \quad 118_3 \quad 119_2 \quad 120_1$   
 $121_{12} \quad 122_{11} \quad 123_{10} \quad 124_9 \quad 125_8 \quad 126_7 \quad 127_6 \quad 128_5 \quad 129_4 \quad 130_3 \quad 131_2 \quad 132_1$   
 $133_{12} \quad 134_{11} \quad 135_{10} \quad 136_9 \quad 137_8 \quad 138_7 \quad 139_6 \quad 140_{54} \quad 141_4 \quad 142_3 \quad 143_2 \quad 144_1$

145<sub>12</sub> 146<sub>11</sub> 147<sub>10</sub> 148<sub>9</sub> 149<sub>8</sub> 150<sub>7</sub> 151<sub>6</sub> 152<sub>5</sub> 153<sub>4</sub> 154<sub>3</sub> 155<sub>2</sub> 156<sub>1</sub>  
 157<sub>12</sub> 158<sub>11</sub> 159<sub>10</sub> 160<sub>9</sub> 161<sub>8</sub> 162<sub>7</sub> 163<sub>6</sub> 164<sub>5</sub> 165<sub>4</sub> 166<sub>3</sub> 167<sub>2</sub> 168<sub>1</sub>  
 169<sub>12</sub> 170<sub>11</sub> 171<sub>10</sub> 172<sub>9</sub> 173<sub>8</sub> 174<sub>7</sub> 175<sub>6</sub> 176<sub>5</sub> 177<sub>4</sub> 178<sub>3</sub> 179<sub>2</sub> 180<sub>1</sub>  
 181<sub>12</sub> 182<sub>11</sub> 183<sub>10</sub> 184<sub>9</sub> 185<sub>8</sub> 186<sub>7</sub> 187<sub>6</sub> 188<sub>5</sub> 189<sub>4</sub> 190<sub>3</sub> 191<sub>2</sub> 192<sub>1</sub>  
 193<sub>12</sub> 194<sub>11</sub> 195<sub>10</sub> 196<sub>9</sub> 197<sub>8</sub> 198<sub>7</sub> 199<sub>6</sub> 200<sub>5</sub> 201<sub>4</sub> 202<sub>3</sub> 203<sub>2</sub> 204<sub>1</sub>.

В общем случае при использовании  $(J, N)$ -перемежитель Рамси третьего типа имеет место временная задержка в  $JN(J - 1)$  тактов, а требуемые ресурсы для хранения данных составляют  $JN(J - 1)/2$  байт и в перемежителе, и в деперемежителе. Применительно к системе DVB-T задержка равна 2244 тактов, а ресурсы для хранения перемежаемых данных составляют 1122 байт на обеих, как передающей, так и приемной сторонах.

Следует обратить внимание на тот замечательный факт, что в перемеженных блоках синхробайты (прямые и инверсные) остаются на своих позициях.



**Рис. 4.4. Сверточный материнский кодер со скоростью 1/2**

Следующим за байтовым перемежителем функциональным блоком канального кодера является *внутренний сверточный кодер*, рассчитанный на пять скоростей: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 и 7/8. Реализация требуемых скоростей осуществляется на основе базового, “материнско-

го” кодера, скорость которого равна  $1/2$ , а формирование выходных последовательностей описывается в восьмеричной системе порождающими полиномами  $G_1 = 171_8$  и  $G_2 = 133_8$  (рис. 4.4), а также набором шаблонов выкалывания (табл. 4.2).

Представленный на рис. 4.4 материнский кодер состоит из ячеек памяти, задерживающих последовательные входные данные (биты) на один битовый тактовый интервал (на рисунке изображены прямоугольниками) и сумматоров по модулю два, входами которых являются часть выходов ячеек памяти. Наличие или отсутствие соединения ячейки памяти с двоичным сумматором описывается порождающими полиномами  $G_1$  и  $G_2$ . Так, значение  $171_8$  в двоичной системе равно  $1111001$ , где единица означает наличие, а ноль — отсутствие связи с двоичным сумматором, и это описывает формирование выходных значений  $X$ . Аналогично значение  $133_8$  в двоичной системе равно  $1011011$ , и это описывает формирование выходных значений  $Y$ .

Каждому входному биту кодер ставит в соответствие два бита на выходах  $X$  и  $Y$ , образуя таким образом два параллельных потока, которые затем подвергаются параллельно-последовательному преобразованию. Для скоростей, больших, чем  $1/2$  в выходном потоке часть битов изымается — “выкалывается”. В общем случае, когда скорость сверточного кодирования равна

$$R_{\text{вых. св. код}} = n/m,$$

блоку из  $n$  входных бит ставится в соответствие блок из  $m$  выходных бит

Рассмотрим, например, случай  $R_{\text{вых. св. код}} = 5/6$ . При поступлении на вход материнского кодера очередного блока из  $n = 5$  бит выходная последовательность, состоящая изначально из  $2n = 10$  бит

$$X_1 Y_1 X_2 Y_2 X_3 Y_3 X_4 Y_4 X_5 Y_5,$$

путём выкалывания бит  $X_2, Y_3, X_4, Y_5$  преобразуется в последовательность из  $m = 6$  бит

$$X_1 Y_1 Y_2 X_3 Y_4 X_5$$

в соответствии с табл. 4.2.

Таблица 4.2

**Шаблоны выкалывания для сверточного кодера**

Кодовая скорость $R_{\text{вых. св. код}}$	Шаблон выкалывания	Передаваемая последовательность
1/2	X: 1 Y: 1	$X_1 Y_1$
2/3	X: 1 0 Y: 1 1	$X_1 Y_1 Y_2$
3/4	X: 1 0 1 Y: 1 1 0	$X_1 Y_1 Y_2 X_3$
5/6	X: 1 0 1 0 1 Y: 1 1 0 1 0	$X_1 Y_1 Y_2 X_3 Y_4 X_5$
7/8	X: 1 0 0 0 1 0 1 Y: 1 1 1 1 0 1 0	$X_1 Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 X_5 Y_6 X_7$

При практической реализации сверточного кодера следует предусмотреть:

1) возможность инициализации, т. е. обнуления ячеек памяти на момент включения питания, а также от внешнего сигнала синхронизации;

2) реализацию сетки тактовых частот, обеспечивающих постоянство скорости передачи данных.

Скорость битового потока  $R_{\text{вх св. код}}$  на входе сверточного кодера, равная скорости потока  $R_{\text{РС}}$  на выходе кодера Рида — Соломона и скорости  $R_{\text{внеш. перем.}}$  внешнего байтового перемежителя, связана со скоростью  $R_{\text{МPEG2}}$  мультиплексированного битового MPEG2-потока соотношением

$$R_{\text{вх св. код}} = (188/204) R_{\text{МPEG2}} = 0,92157 R_{\text{МPEG2}}.$$

Далее, скорость потока  $R_{\text{вых св. код}}$  данных на выходе сверточного кодера зависит от используемого шаблона выкалывания, и для обеспечения постоянства скорости передачи данных в модулятор, т. е. постоянства скорости  $R_{\text{симб}}$  формирования модуляционных символов, необходимо, чтобы битовый поток поступал на вход сверточного ко-

дера со скоростью, обратной величине  $R_{\text{вых св. код}}$ . Таким образом, при заданной скорости  $R_{\text{МPEG2}}$  следования байт транспортного MPEG2-потока (или, что эквивалентно, частоте следования  $F_{\text{МPEG2}}$ ) должно быть предусмотрена реализация сетки частот (табл. 4.3).

Таблица 4.3

**Сетка частот для блоков канального кодера**

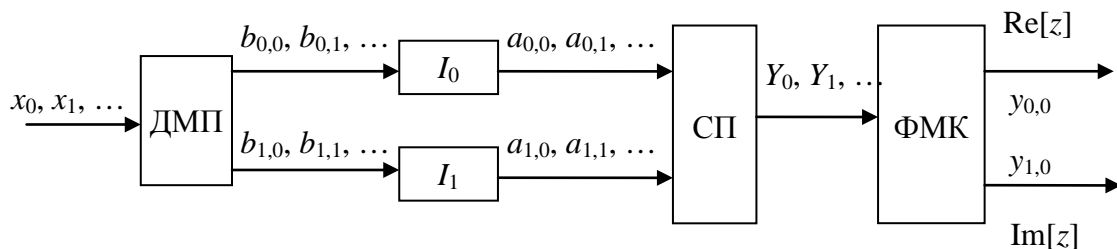
Байтовая частота потока MPEG2	$F_1 = F_{\text{МPEG2}}$
Битовая частота на входе и выходе скремблера	$F_2 = 8F_1$
Байтовая частота на выходе кодера Рида — Соломона	$F_3 = (204/188) F_1$
Битовая частота на выходе байтового перемежителя	$F_4 = 8F_3$
Битовая частота на выходе выкалывателя свёрточного кодера при скорости свёрточного кодера:	
1/2	$F_5 = 2F_4$
2/3	$F_6 = (2/3)F_4$
3/4	$F_7 = (4/3)F_4$
5/6	$F_8 = (6/5)F_4$
7/8	$F_9 = (8/7)F_4$

Поток данных с выхода свёрточного кодера поступает на вход *внутреннего перемежителя*, предназначенного для перемежения информационных бит по поднесущим частотам внутри OFDM-символа. Внутренний перемежитель состоит из трех блоков: *демультиплексора*, *блока битовых перемежителей* и *символьного перемежителя*. Алгоритмы работы этих блоков в общем случае зависят от числа поднесущих (2К или 8К), от метода модуляции (КФМ, КАМ-16 или КАМ-64), а также от того, какой используется режим модуляции: иерархический или неиерархический. Рассмотрим, прежде всего, алгоритм работы демультиплексора внутреннего перемежителя.

На вход демультиплексора поступает последовательный битовый поток<sup>1</sup>  $\{x\}$  от выкалывателя, а на выходе мультиплексора формируются  $v = 2$  (КФМ),  $v = 4$  (КАМ-16) или  $v = 6$  (КАМ-64) битовых подпотоков  $\{b_{i,j}\}$  где  $i$  — номер демультиплексированного битового потока (от 0 до  $v - 1$ ), а  $j$  — номер бита на выходе демультиплексора в данном подпотоке, согласно следующим правилам.

При модуляции КФМ (рис. 4.5), где нет деления на иерархический и неиерархический режимы, биты с чётными номерами<sup>2</sup> на выходе демультиплексора ДМП образуют подпоток  $b_{0,j}$ , поступающий в битовый перемежитель  $I_0$ , биты с нечётными номерами — подпоток  $b_{1,j}$ , поступающий в битовый перемежитель  $I_1$ :

$$\begin{aligned} x_0 &\rightarrow b_{0,0}; x_1 \rightarrow b_{1,0}; \\ x_2 &\rightarrow b_{0,1}; x_3 \rightarrow b_{1,1}; \\ x_4 &\rightarrow b_{0,2}; x_5 \rightarrow b_{1,2}; \\ &\text{и т. д.} \end{aligned}$$



**Рис. 4.5. Битовое и символьное перемежение для КФМ**

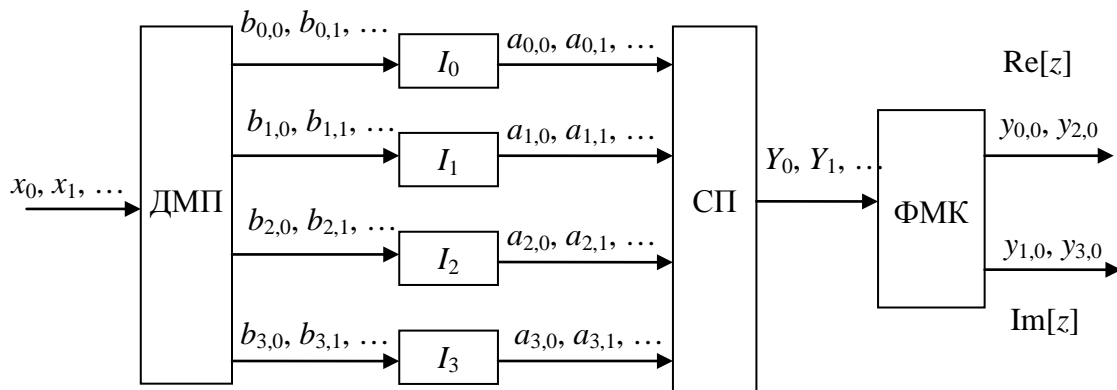
При модуляции КАМ-16 биты разбиваются на четыре подпотока. В неиерархическом режиме (рис. 4.6) биты с четными номерами на выходе демультиплексора образуют подпотоки  $b_{0,j}$  и  $b_{1,j}$ , поступаю-

<sup>1</sup> Не путать символы  $x$  последовательного битового потока после выкалывания с символами  $X$  на одном из выходов сверточного кодера до выкалывания.

<sup>2</sup> Напомним, что в стандарте на систему DVB-T принята нумерация элементов в последовательности, начинающаяся с нуля; нулевой элемент (по счету — первый) считается четным элементом.

щие в битовые перемежители  $I_0$  и  $I_1$ , с нечётными — подпотоки  $b_{2,j}$  и  $b_{3,j}$ , поступающие в битовые перемежители  $I_2$  и  $I_3$ :

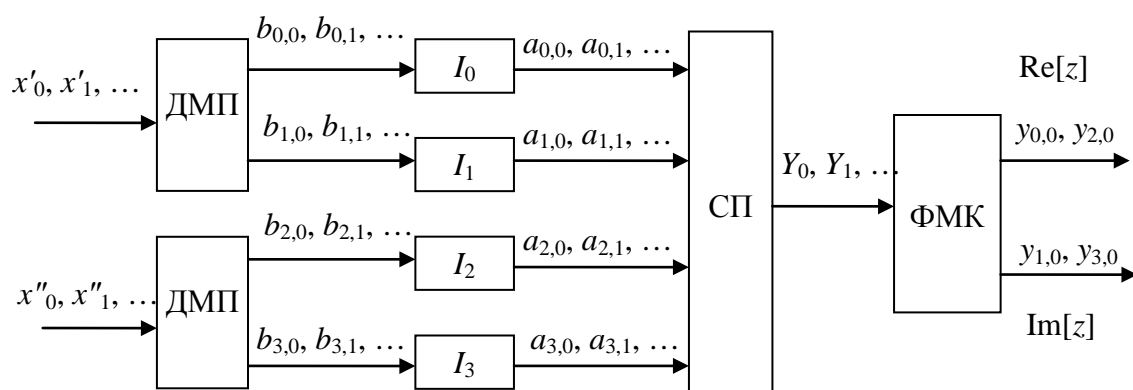
$$\begin{aligned}x_0 &\rightarrow b_{0,0}; x_1 \rightarrow b_{2,0}; x_2 \rightarrow b_{1,0}; x_3 \rightarrow b_{3,0}; \\x_4 &\rightarrow b_{0,1}; x_5 \rightarrow b_{2,1}; x_6 \rightarrow b_{1,1}; x_7 \rightarrow b_{3,1}; \\x_8 &\rightarrow b_{0,2}; x_9 \rightarrow b_{2,2}; x_{10} \rightarrow b_{1,2}; x_{11} \rightarrow b_{3,2}; \\&\text{и т. д.}\end{aligned}$$



**Рис. 4.6. Битовое и символьное перемежение для неиерархической КАМ-16**

В иерархическом режиме, как уже было сказано, существует два транспортных потока MPEG-2, которые образуют на входе битового перемежителя два подпотока: подпоток  $\{x'\}$  с высоким приоритетом и подпоток  $\{x''\}$  с низким приоритетом (рис. 4.7). При этом биты с четными номерами и различными приоритетами образуют подпотоки  $b_{0,j}$  и  $b_{2,j}$ , поступающие в битовые перемежители  $I_0$  и  $I_2$ , а биты с нечетными номерами и различными приоритетами — подпотоки  $b_{1,j}$  и  $b_{3,j}$ , поступающие в битовые перемежители  $I_1$  и  $I_3$ :

$$\begin{aligned}x'_0 &\rightarrow b_{0,0}; & x''_0 &\rightarrow b_{2,0}; & x'_1 &\rightarrow b_{1,0}; & x''_1 &\rightarrow b_{3,0}; \\x'_2 &\rightarrow b_{0,1}; & x''_2 &\rightarrow b_{2,1}; & x'_3 &\rightarrow b_{1,1}; & x''_3 &\rightarrow b_{3,1}; \\x'_4 &\rightarrow b_{0,2}; & x''_4 &\rightarrow b_{2,2}; & x'_5 &\rightarrow b_{1,2}; & x''_5 &\rightarrow b_{3,2}; \\&\text{и т. д.}\end{aligned}$$

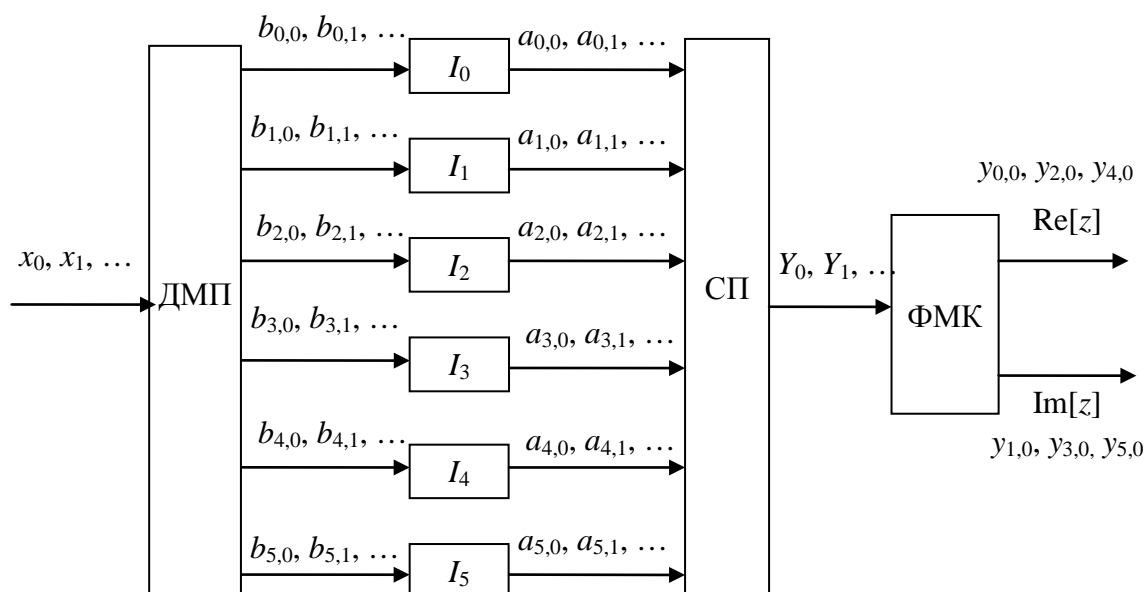


**Рис. 4.7. Битовое и символьное перемежение для иерархической КАМ-16**

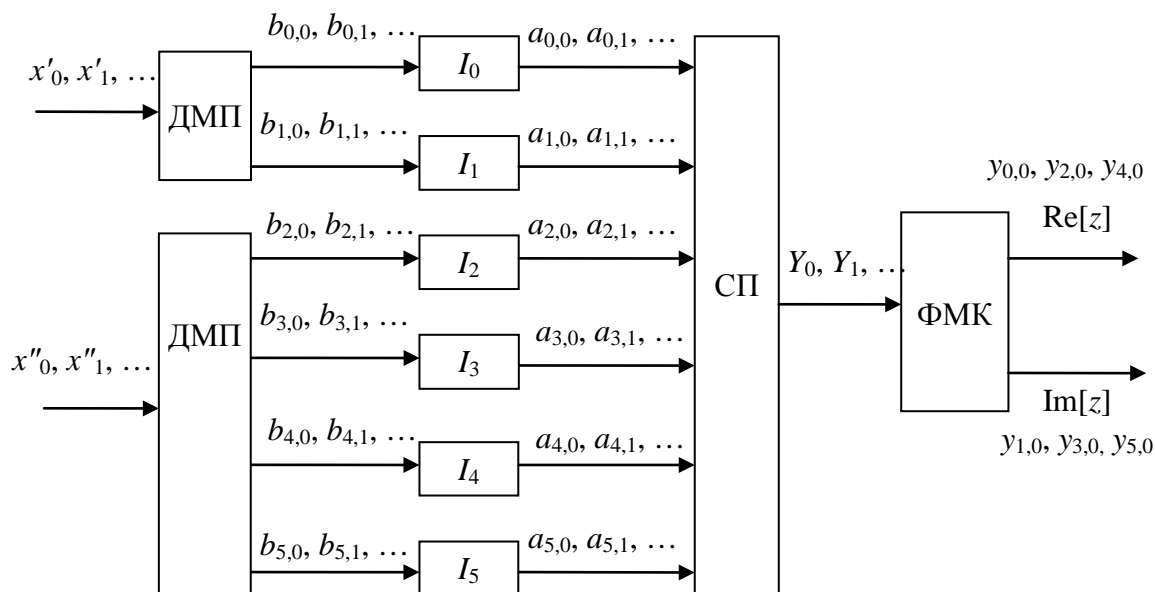
При модуляции КАМ-64 в неиерархическом режиме (рис. 4.8) биты с четными номерами образуют подпотоки  $b_{0,j}$ ,  $b_{3,j}$  и  $b_{4,j}$  с нечётными — подпотоки  $b_{1,j}$ ,  $b_{2,j}$  и  $b_{5,j}$ :

$$\begin{aligned}
 x_0 &\rightarrow b_{0,0}; & x_1 &\rightarrow b_{2,0}; & x_2 &\rightarrow b_{4,0}; & x_3 &\rightarrow b_{1,0}; & x_4 &\rightarrow b_{3,0}; & x_5 &\rightarrow b_{5,0}; \\
 x_6 &\rightarrow b_{0,1}; & x_7 &\rightarrow b_{2,1}; & x_8 &\rightarrow b_{4,1}; & x_9 &\rightarrow b_{1,1}; & x_{10} &\rightarrow b_{3,1}; & x_{11} &\rightarrow b_{5,1}; \\
 x_{12} &\rightarrow b_{0,2}; & x_{13} &\rightarrow b_{2,2}; & x_{14} &\rightarrow b_{4,2}; & x_{15} &\rightarrow b_{1,2}; & x_{16} &\rightarrow b_{3,2}; & x_{17} &\rightarrow b_{5,2};
 \end{aligned}$$

и т. д.



**Рис. 4.8. Битовое и символьное перемежение для неиерархической КАМ-64**



**Рис 4.9. Битовое и символьное перемежение для иерархической КАМ-16**

В иерархическом режиме (рис. 4.9) правила демультиплексирования следующие:

$$\begin{aligned}
 x'_0 &\rightarrow b_{0,0}; & x''_0 &\rightarrow b_{2,0} & x'_1 &\rightarrow b_{1,0}; & x''_1 &\rightarrow b_{4,0}; & x'_2 &\rightarrow b_{3,0}; & x''_2 &\rightarrow b_{5,0}; \\
 x'_3 &\rightarrow b_{0,1}; & x''_3 &\rightarrow b_{2,1}; & x'_4 &\rightarrow b_{1,1}; & x''_4 &\rightarrow b_{4,1}; & x'_5 &\rightarrow b_{3,1}; & x''_5 &\rightarrow b_{5,1}; \\
 x'_6 &\rightarrow b_{0,2}; & x''_6 &\rightarrow b_{2,3}; & x'_7 &\rightarrow b_{1,2}; & x''_7 &\rightarrow b_{4,2}; & x'_8 &\rightarrow b_{3,2}; & x''_8 &\rightarrow b_{5,2};
 \end{aligned}$$

и т. д.

После разбиения последовательного потока  $\{x\}$  или потоков  $\{x'\}$  и  $\{x''\}$  на совокупность подпотоков  $\{b_{ij}\}$  эти подпотоки с выхода демультиплексора поступают на блок битовых перемежителей. Из шести ( $I_0, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$ ) перемежителей для модуляции КАМ-64 первые четыре ( $I_0, I_1, I_2, I_3$ ) используются также и для модуляции КАМ-16, а первые два — ( $I_0, I_1$ ) — для КФМ.

Каждый из перемежителей производит перестановку бит внутри блока  $B_i = (b_{i,0}, b_{i,1}, b_{i,2}, \dots, b_{i,125})$ ,

состоящего из 126 бит, в результате чего формируется перемеженный блок

$$A_i = (a_{i,0}, a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,125}),$$

где правила перестановки  $a_{i,w} = b_{i,H_i(w)}$  ( $w = 0, 1, \dots, 125$ ), по которым производится вычисление индекса бита в блоке  $B$  по индексу  $w$  в блоке  $A$ , являются своими для каждого перемежителя и имеют следующий вид:

$$I_0: H_0(w) = w;$$

$$I_1: H_1(w) = (w + 63) \bmod 126;$$

$$I_2: H_2(w) = (w + 105) \bmod 126;$$

$$I_3: H_3(w) = (w + 42) \bmod 126;$$

$$I_4: H_4(w) = (w + 41) \bmod 126;$$

$$I_5: H_5(w) = (w + 84) \bmod 126,$$

где  $\bmod 126$  означает, что данная целочисленная операция совершается по модулю 126.

Например, в пятом перемежителе ( $I_4$ ) 120-й бит блока  $A$  берется из блока  $B$  с позиции

$$H_4(w) = (w + 21) \bmod 126 = (120 + 21) \bmod 126 = 15.$$

Для реализации одного перемежителя требуется три области памяти размером по 126 бит: в первой области формируется очередной блок  $B$ , во второй — производится формирование блока  $A$  из предыдущего блока  $B$ , расположенного, в свою очередь, в третьей области. Таким образом, общий объем памяти, требуемый для реализации всех битовых перемежителей, составляет

$$6 \cdot 126 \cdot 3 = 2\,268 \text{ бит}$$

(примерно 284 байта).

Наконец, заключительным блоком внутреннего перемежителя является символьный перемежитель. Под символами в данном случае понимаются  $\nu$ -разрядные битовые последовательности  $y'$  — так называемые *слова* —, образованные битами подпотоков после битовых перемежителей: двух-, четырех- и шестизрядные для КФМ, КАМ-16 и

КАМ-64 соответственно. При этом бит на выходе перемежителя  $I_0$  является старшим разрядом слова:

$$y'_w = (a_{0,w}, a_{1,w}, \dots, a_{v-1,w}).$$

Символьный перемежитель производит по определенному правилу перестановку слов внутри блока

$$Y' = (y'_{0'}, y'_{1'}, y'_{2'}, \dots, y'_{N_{\max}-1'}),$$

состоящего из  $N_{\max} = 12 \cdot 126 = 1\,512$  (при работе в режиме 2К) или из  $N_{\max} = 48 \cdot 126 = 6\,048$  (при работе в режиме 8К) входных слов, в результате чего формируется перемеженный блок

$$Y = (y_0, y_1, y_2, \dots, y_{N_{\max}-1}).$$

Для OFDM-символа (см. далее) с четным номером слово  $y'_q$  из блока  $Y'$  помещается в блок  $Y$  на позицию с номером  $H(q)$  ( $q = 0, \dots, N_{\max} - 1$ ), а для нечетного OFDM-символа слово  $y'_{H(q)}$  — на позицию с номером  $q$ :

$$y_{H(q)} = y'_q \text{ для четных OFDM-символов;}$$

$$y_q = y_{H(q)} \text{ для нечетных слов OFDM-символов.}$$

Алгоритм вычисления последовательности  $H(q)$  достаточно сложен, и его можно условно разбить на три этапа.

Прежде всего, введем положительное число  $m = \log_2 M_{\max}$ , где значение  $M_{\max}$  равно 2 048 или 8 192 для режима 2К и 8К соответственно, т. е. для указанных режимов  $m = 11$  или  $m = 13$ . Тогда для различных значений  $k$  ( $k = 0, \dots, M_{\max}$ ) определим  $(m - 1)$ -элементный вектор  $\mathbf{R}'_k$  следующим рекуррентным способом:

$$k = 0, 1: \quad \mathbf{R}'_k [m - 2, m - 3, \dots, 1, 0] = [0, 0, \dots, 0];$$

$$k = 2: \quad \mathbf{R}'_k [m - 2, m - 3, \dots, 1, 0] = [0, 0, \dots, 1];$$

$$k = 3, \dots, M_{\max} - 1 \quad \mathbf{R}'_k [m - 3, m - 4, \dots, 1, 0] = \mathbf{R}'_{k-1} [m - 2, m - 3, \dots, 2, 1];$$

$$\text{режим 2К:} \quad \mathbf{R}'_k [9] = \mathbf{R}'_{k-1} [0] + \mathbf{R}'_{k-1} [3];$$

$$\text{режим 8К:} \quad \mathbf{R}'_k [11] = \mathbf{R}'_{k-1} [0] + \mathbf{R}'_{k-1} [1] + \mathbf{R}'_{k-1} [4] + \mathbf{R}'_{k-1} [6].$$

Здесь в квадратных скобках указаны индексы элементов вектора  $\mathbf{R}'_k$ , а все операции сложения производятся по модулю два.

Далее, из вектора  $\mathbf{R}'_k$  получим вектор  $\mathbf{R}_k$  на основе прямой табличной перестановки (табл. 4.4 и 4.5).

Таблица 4.4

**Перестановка индексов в режиме 2К**

Индексы вектора $\mathbf{R}'_k$	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Индексы вектора $\mathbf{R}_k$	0	7	5	1	8	2	6	9	3	4

Таблица 4.5

**Перестановка индексов в режиме 8К**

Индексы вектора $\mathbf{R}'_k$	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Индексы вектора $\mathbf{R}_k$	5	11	3	0	10	8	6	9	2	4	1	7

Наконец, вычисление  $H(q)$  осуществляется с использованием следующей цикловой процедуры.

$q = 0$ ;

цикл по  $i$  от 0 до  $M_{\max} - 1$  с единичным шагом

$$\{ H(q) = (i \bmod 2)2^{m-1} + \sum_{j=0}^{m-2} R_k[j]2^j ;$$

если  $H(q) < N_{\max}$ , то  $q = q + 1$  }

конец цикла по  $i$ .

Обратим внимание, что данный цикл предполагает выполнение  $M_{\max}$  итераций, хотя поднесущих  $N_{\max} < M_{\max}$ . Тем не менее, “лишних” номеров не образуется, поскольку существует условие  $H(q) < N_{\max}$ , выполнение которого обеспечивает переход к следующему значению  $q$ . Если же на каком-то шаге  $H(q)$  сравнивается или превышает  $N_{\max}$ , то такое  $H(q)$  “забывается”, и для данного  $q$  значение  $H(q)$  будет найдено при другом  $i$ .

Прежде чем обратиться к непосредственному изучению структуры и параметров модулятора системы DVB-T представляется целесо-

образным рассмотреть сами принципы построения тех сигнальных конструкций и их характеристик, которые лежат в основе реализованных системных решений.

## **4.2. СИГНАЛЫ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ РАЗНЕСЕНИЕМ (OFDM)**

Физический уровень системы цифрового телевизионного вещания стандарта DVB-T базируется на технологии использования многочастотных сигналов, считающейся (наряду с технологиями множественного доступа с частотным разделением CDMA (Code Division Multiple Access), параллельной обработки со множественным входом и множественным выходом MIMO (Multiple Input / Multiple Output) и др.) одной из перспективных в ближайшем будущем. На основе этой технологии реализованы не только системы цифрового телевизионного и радиовещания, но также большое число других телекоммуникационных систем, например, сети беспроводного доступа Wi-Fi и WiMAX.

Использование традиционных одночастотных видов модуляции, когда на одной, ярко выраженной несущей частоте  $\omega_0 = 2\pi f_0$  осуществляется передача данных с применением многоуровневых сигналов, является вполне оправданным в условиях, при которых можно пренебречь интерференционными эффектами, вызванными, главным образом, многолучевым распространением.

Если длительность, соответствующая передаче одного элементарного сигнала, равна  $T_s$ , то скорость передачи информации  $R$  (измеряемая в битах в секунду) составляет

$$R = \frac{\log_2 M}{T_s}, \quad (4.3)$$

где  $M$  — показатель, определяющий многопозиционность используемого ансамбля сигналов, т. е. сколько бит данных передается на одном тактовом интервале  $T_s$ .

Наличие в реальных условиях распространения радиосигналов разнообразных препятствий приводит к переотражению радиоволн и возникновению многолучевого распространения, когда в точке приема оказываются несколько копий одного сигнала, пришедших разными путями и, следовательно, приобретших различные коэффициенты ослабления и фазовые набегі. В результате в приемнике оказывается смесь таких сигналов, которая, накладываясь на текущий, а также, возможно, и на соседние сигналы, способна существенно исказить передаваемые данные — это явление называют *межсимвольной интерференцией* (МСИ).

Простейшим способом борьбы с МСИ является увеличение длительности  $T_s$  до тех пор, пока не станет выполняться условие

$$T_s \gg \tau_s,$$

где  $\tau_s$  — максимальное время задержки распространения при переотражении. Тогда возможные искажения затронут лишь небольшую часть полезного сигнала (например, не более четверти), что вполне может оказаться допустимым с точки зрения снижения помехоустойчивости. Однако при таком прямом подходе оказываются ограниченными возможности по повышению скорости передачи: при фиксированном времени  $\tau_s$  увеличение значения  $T_s$  в (4.3) приводит к снижению  $R$ .

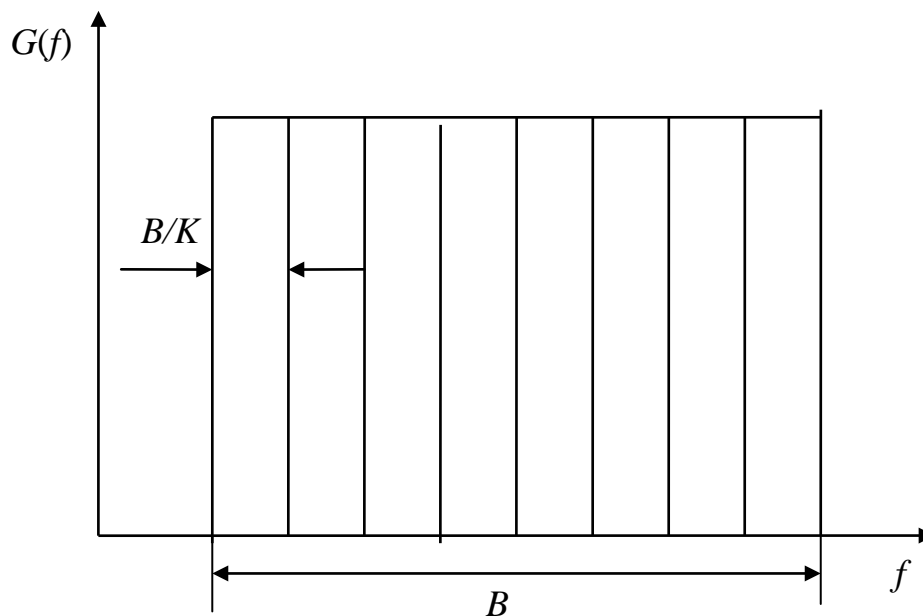
Гораздо более перспективным способом борьбы с МСИ, вызванной многолучевым распространением, является отказ от использования сигналов с одной ярко выраженной несущей и использование конструкций на основе *многочастотных сигналов*. Наглядной иллюстрацией к построению таких конструкций служит концепция параллеливания сравнительно высокоскоростного потока данных на совокупность нескольких сравнительно низкоскоростных потоков.

Пусть  $B$  — полоса частот, занимаемая вещественным спектром  $G(f)$  одночастотного сигнала, и по порядку величины это значение составляет  $1/T_s$ . Для определенности положим

$$B = \frac{1 + \alpha}{T_s}, \quad (4.4)$$

где  $\alpha$  — сравнимый с единицей параметр, значение которого зависит от формы огибающей элементарного сигнала. Например, для сигналов с прямоугольной формой огибающей и при определении ширины спектра по первому нулю  $\alpha = 0$ . Выбор сигналов с непостоянной (скругленной) формой огибающей позволяет обеспечить  $\alpha < 0$  [7].

Будем считать, что вся полоса частот  $B$  разделена на совокупность из  $K$  непересекающихся частотных интервалов (рис. 4.10, где  $K = 8$ ), ширина каждого из которых составляет  $B/K$ , а каждый интервал соответствует отдельному каналу передачи.



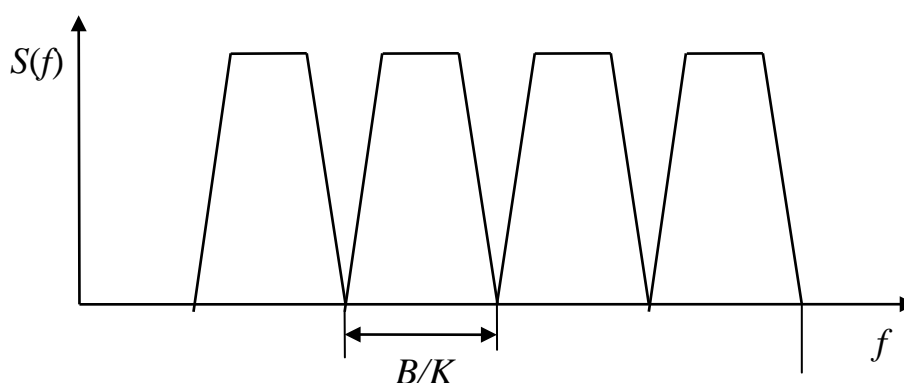
**Рис. 4.10. Разделение спектра сигнала на частотные интервалы**

Поскольку сужение спектра эквивалентно увеличению длительности во временной области сигнала, можно сделать вывод, что получен набор сигналов длительностью  $KT_s$ , спектры которых локализованы в частотных интервалах шириной  $B/K$ . При этом увеличение длительности происходит без влияния на ограничение скорости передачи

информации, так как снижение скорости передачи в отдельном канале компенсируется увеличением числа этих каналов.

Для реализации и практического использования описанной концепции требуется удовлетворить еще одному требованию, заключающемуся в том, что отдельные каналы либо вообще не перекрывались (как на рис. 4.10), либо чтобы имеющееся перекрывание каким-то образом компенсировалось — в противном случае возникнут межканальные помехи, приводящие к искажению информации.

В первом случае добиться того, чтобы спектры в различных каналах не перекрывались<sup>1</sup> в принципе можно, еще более увеличив длительность сигналов, соответствующих отдельным каналам, добиваясь того, чтобы уровень спектра спадал к границам интервала до заданного значения (рис. 4.11). Однако возникающие при этом потери в скорости передачи информации уже не будут компенсироваться пропорциональным увеличением числа отдельных каналов.



**Рис. 4.11. Формирование неперекрывающихся спектров**

В этой связи целесообразно пойти по другому пути, пытаясь удовлетворить требованию компенсации перекрывающихся спектров, работая с *ортogonalным ансамблем сигналов*. В терминах теории сигналов [9] это означает, что скалярное произведение  $(s_k(t), s_l(t))$  ме-

---

<sup>1</sup> Точнее — практически не перекрывались, ибо при использовании финитных, т. е. ограниченных во времени сигналов возникает неограниченный во времени спектр, так что теоретически наложение будет всегда.

жду двумя любыми различными сигналами  $s_k(t)$  и  $s_l(t)$  из этого ансамбля равно нулю:

$$(s_k(t), s_l(t)) = \int_0^T s_k(t) s_l(t) dt = 0, k \neq l, \quad (4.5)$$

где  $T$  — длительность сигналов.

Простейшим (и, как будет показано далее, очень просто реализуемым) ансамблем ортогональных сигналов  $s_1(t), \dots, s_K(t)$  является набор отрезков гармонических колебаний с заданными значениями амплитуды  $A_k$ , начальной фазы  $\varphi_k$  и отличающихся друг от друга определенным частотным сдвигом:

$$s_k(t) = A_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k), 0 \leq t \leq T_s, k = 1, \dots, K. \quad (4.6)$$

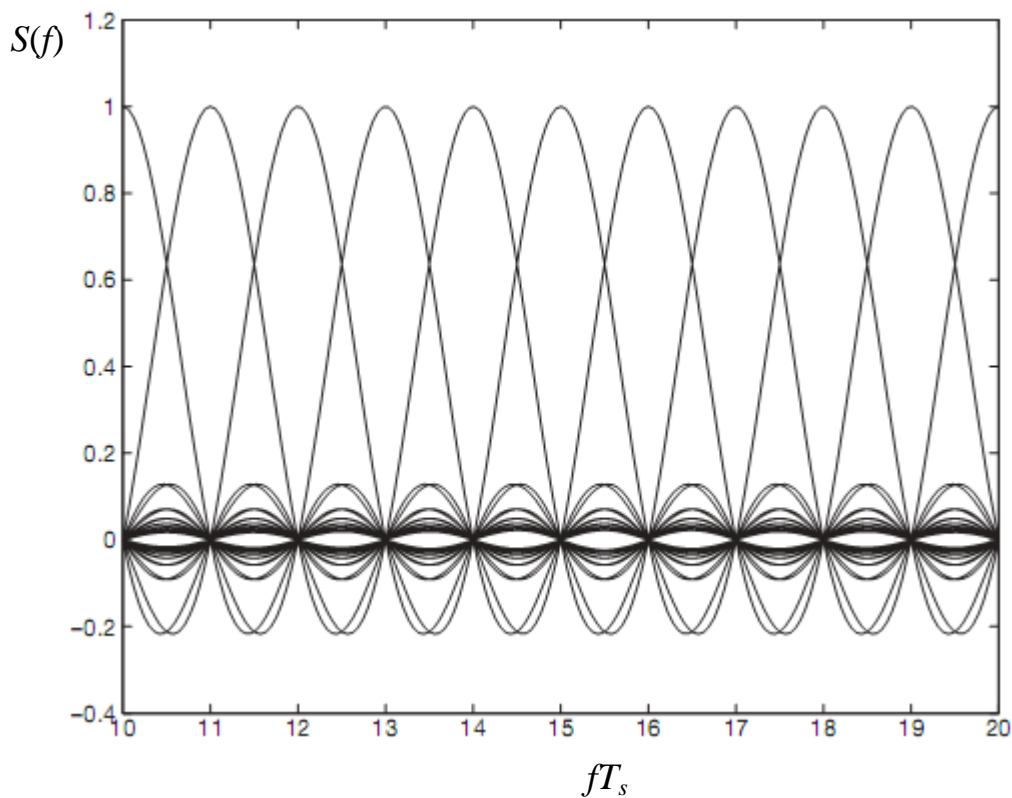
Для таких сигналов (4.5) имеет вид

$$\begin{aligned} (s_k(t), s_l(t)) &= \int_0^{T_s} A_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k) A_l \cos(2\pi f_l t + \varphi_l) dt = \\ &= \frac{A_k A_l}{2} \left[ \frac{\sin(2\pi(f_k + f_l)T_s + \varphi_k + \varphi_l) - \sin(\varphi_k + \varphi_l)}{2\pi(f_k + f_l)} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sin(2\pi(f_k - f_l)T_s + \varphi_k - \varphi_l) - \sin(\varphi_k - \varphi_l)}{2\pi(f_k - f_l)} \right], \end{aligned}$$

и если сумма и разность частот представляют собой целое кратное значению  $1/T_s$ , то скалярное произведение сигналов  $s_k(t)$  и  $s_l(t)$  равно нулю. Выберем  $f_k = k/T_s$  тогда получим ансамбль

$$s_k(t) = A_k \cos(2\pi k t / T_s + \varphi_k), 0 \leq t \leq T_s, k = 1, \dots, K. \quad (4.7)$$

*сигналов с ортогональным частотным разнесением*, которые принято называть OFDM-сигналами (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing).



**Рис. 4.12. Спектр последовательности сигналов с ортогональным разнесением**

На рис. 4.12 показана “тонкая структура” спектра  $S(f)$  всей последовательности OFDM-сигналов

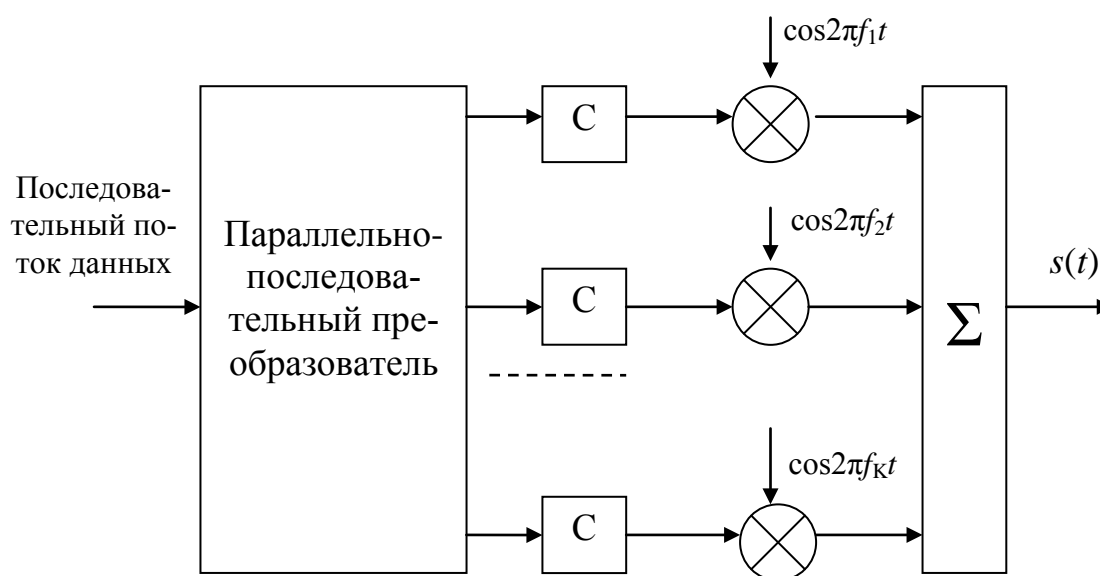
$$s(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t), \quad 0 \leq t \leq T_s.$$

Видно, что в точках  $f_k = k/T_s$  спектр  $k$ -го сигнала имеет максимум, в то время как “хвосты” спектров соседних сигналов имеют нулевые значения. Подчеркнем, что значение частотного интервала  $\Delta f = 1/T_s$  обеспечивает ортогональность сигналов только для прямоугольной формы огибающей. Выбор сигналов скругленной формы огибающей с таким же значением частотного интервала хотя и дает возможность получить более компактный спектр, но влечет за собой нарушение

условия ортогональности и, как следствие, ухудшение помехоустойчивости.

Обратимся теперь к вопросу о практической реализации ансамбля ортогональных многочастотных сигналов.

Прямой способ формирования, вытекающий непосредственно из описания сигналов, представлен на рис. 4.13.



**Рис. 4.13. Структурная схема прямого формирования OFDM-сигналов**

Формирователь состоит из преобразователя последовательного потока данных в параллельный, синтезаторов  $C$  формы сигналов, обеспечивающих заданный вид огибающей, совокупности умножителей (преобразователей частоты), позволяющих перенести спектр сигналов на заданные частоты  $f_1, \dots, f_K$ , и, наконец, сумматора  $\Sigma$ , на выходе которого и формируется многочастотный сигнал  $s(t)$ .

При всей очевидности представленного на рис. 4.13 метода формирования OFDM-сигналов следует признать его непрактичность, поскольку он предполагает одновременную работу  $K$  сфазированных генераторов, что при достаточно больших значениях  $K$  представляется бесперспективным.

Другой подход, нашедший свое практическое воплощение в современных устройствах формирования и приема сигналов, основан на использовании специальной операции цифровой обработки сигналов — *дискретного преобразования Фурье* (ДПФ).

Запишем (4.7) в комплексной форме. Для этого введем комплексный модуляционный символ  $\delta_k = A_k \exp(j\varphi_k)$ . Тогда OFDM-символ, построенный на основе сигналов с прямоугольной формой огибающей можно записать в следующем виде:

$$s_{sym}(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=1}^K \delta_k \exp[j2\pi kt / T_s] \right\}, \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad (4.8)$$

или, вводя комплексный OFDM-сигнал

$$\xi_{sym}(t) = \sum_{k=1}^K \delta_k \exp[j2\pi kt / T_s], \quad 0 \leq t \leq T_s. \quad (4.9)$$

Таким образом, осуществляя дискретизацию OFDM-сигнала на интервале времени  $[0; T_s]$  с некоторым шагом  $T_0$ , получим в отсчетные моменты времени  $t_n = nT_0$  представление OFDM-символа в виде (обратного) дискретного преобразования Фурье  $K$ -элементной последовательности комплексных значений  $\delta_k$ :

$$\xi_{sym}(t_n) = \sum_{k=1}^K \delta_k \exp \left[ \frac{j2\pi knT_0}{KT_0} \right] = \sum_{k=1}^K \delta_k \exp \left[ \frac{j2\pi kn}{K} \right], \quad (4.10)$$

которое может быть эффективно вычислено с помощью разнообразных алгоритмов *быстрого преобразования Фурье* (БПФ).

Теперь, после того, как рассмотрены базовые принципы формирования многочастотных ортогональных сигналов вернемся к вопросу о влиянии МСИ, вызванной многолучевым распространением радиосигналов.

Как уже было сказано выше, основной идеей, лежащей в основе борьбы с МСИ, является введение защитного интервала, являющегося частью той длительности, в пределах которой передаются данные. Применительно к рассматриваемому случаю это означает разделение длительности  $T_s$  OFDM-символа на *полезную часть*  $T_u$  и *защитный*

интервал  $\Delta$ . При этом, с одной стороны, в целях малых потерь в скорости передачи информации, желательно, чтобы  $T_u$  существенно превосходил  $\Delta$  (например, на порядок), а с другой — защитный интервал должен быть достаточно протяженным, чтобы противодействовать МСИ.

На первый взгляд реализация такой идеи наталкивается на большие сложности ввиду того, что наличие защитного интервала может привести к искажению ортогональности элементарных сигналов. Действительно, если изначально ортогональный частотный разнос составлял  $\Delta f = 1/T_s$ , то после разделения  $T_s$  на  $T_u$  и  $\Delta$  необходимо выбрать  $\Delta f = 1/T_u$ , и, например, на интервале  $[-\Delta; T_s - \Delta]$  соотношение ортогональности перестает выполняться.

Преодоление указанного затруднения основано на том, что часть сигнала, передаваемая на длительности защитного интервала, является *циклическим префиксом* OFDM-символа т. е. на интервале  $\Delta$  передается копия части OFDM-символа, взятая “с конца” полезного интервала (на рис. 4.13 заштрихованы части, соответствующие циклическому префиксу и той части OFDM-символа, из которой этот префикс получен). При этом временное окно анализа составляет  $T_u$ , так что анализируется либо непосредственно полезная часть OFDM-символа (при идеальной синхронизации), либо полезная часть OFDM-символа, восстановленная с учетом циклического префикса.

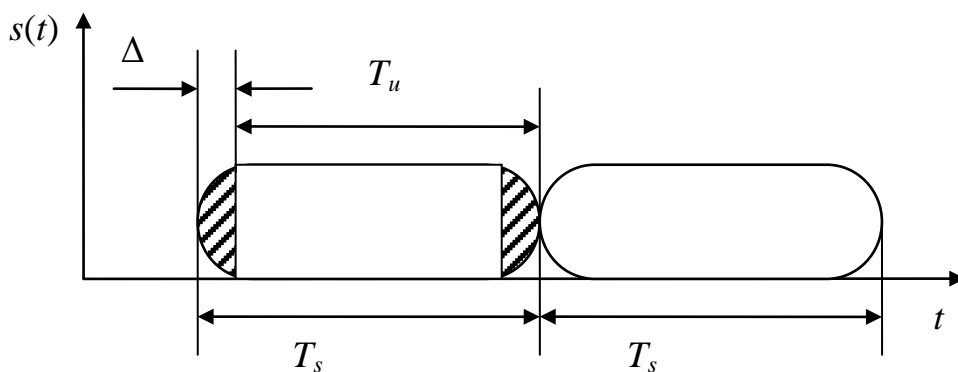


Рис. 4.13. Формирование циклического префикса

То, что вставка защитного интервала в виде циклического префикса не приводит к потере ортогональности нетрудно показать и аналитически. Действительно, для любого временного сдвига, лежащего в диапазоне от 0 до  $\Delta$ , аналогично (5.3) имеем:

$$\begin{aligned} (s_k(t), s_l(t)) &= \int_{-\tau}^{T_u - \tau} A_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k) A_l \cos(2\pi f_l t + \varphi_l) dt = \\ &= \frac{A_k A_l}{2} \left[ \frac{\sin(2\pi(f_k + f_l)(T_u - \tau) + \varphi_k + \varphi_l) - \sin(\varphi_k + \varphi_l)(-\tau)}{2\pi(f_k + f_l)} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sin(2\pi(f_k - f_l)(T_u - \tau) + \varphi_k - \varphi_l) - \sin(\varphi_k - \varphi_l)(-\tau)}{2\pi(f_k - f_l)} \right], \end{aligned}$$

и если на всем временном интервале  $[-\tau; T_u - \tau]$  выполняется условие частотного разнеса  $f_k - f_l = 1/T_u$ , то скалярное произведение по-прежнему имеет нулевое значение.

### 4.3. МОДУЛЯТОР В СИСТЕМЕ DVB-T

В предыдущем разделе был сделан краткий обзор принципов построения многочастотных сигналов с ортогональным частотным разнесением. Рассмотрим применение этих принципов к построению модулятора системы цифрового телевизионного вещания стандарта DVB-T.

Элементарным сигналом  $s_0^{(k)}(t)$ , или *ячейкой* (cell) является отрезок гармонического колебания длительностью  $T_s$ , характеризуемый определенными значениями амплитуды  $A_k$  и начальной фазы  $\varphi_k$ :

$$s_0^{(k)}(t) = A_k \cos(\omega_0 t + 2\pi k t / T_u + \varphi_k), \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad (4.11)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$  — несущая частота радиосигнала, а число  $k$  определяет номер (позицию) этого сигнала в упорядоченном наборе из  $K_{\max} = 1\,705$  (режим 2K) или  $K_{\max} = 6\,817$  (режим 8K) таких сигналов.

Длительность  $T_s$  (и, следовательно, длительность OFDM-символа) зависит от используемых режимов работы, а также от раз-

личных соотношений между полезной частью OFDM-символа и защитным интервалом. Далее будет приведен полный перечень возможных значений  $T_s$ .

Номинальное значение  $f_0$ , трактуемое как некоторое среднее значение спектральных составляющих OFDM-сигнала, определяется (в мегагерцах) сеткой частот стандартных телевизионных каналов с шириной полосы 8 МГц:

$$f_0 = 474 + 8p, p = 0, 1, 2, \dots \quad (4.12)$$

Реальное значение  $f_0$ , измеряемое как середина спектра сигнала, может несколько отличаться от данных значений.

В системе используется ортогональное частотное разделение сигналов, при котором данные передаются на различных поднесущих, отстоящих друг от друга на частотный интервал  $1/T_u$ , равный 4,464 кГц (в режиме 2К) или 1,116 кГц (в режиме 8К).

OFDM-символ образуется совокупностью элементарных сигналов, передаваемых на  $K_{\max}$  различных поднесущих на длительности  $T_s$ :

$$s_{\text{sym}}(t) = \sum_{k=0}^{K_{\max}-1} s_0^{(k)}(t) = \sum_{k=0}^{K_{\max}-1} A_k \cos(\omega_0 t + 2\pi k t / T_u + \varphi_k), 0 \leq t \leq T_s. \quad (4.13)$$

Поскольку поднесущие разделены расстоянием (в частотной области)  $1/T_u$ , которое можно принять за условную ширину спектра элементарного сигнала, при заданном числе  $K_{\max}$  поднесущих, оценкой ширины спектра OFDM-символа можно считать расстояние между первой и последней поднесущей. Для режима 2К и 8К это значение составляет<sup>1</sup>

$$(1\,705 - 1) \cdot 4\,464 \text{ Гц} = (6\,817 - 1) \cdot 1\,116 \text{ Гц} = 7\,607\,143 \text{ Гц}.$$

---

<sup>1</sup> Значение 7,61 МГц как оценка ширины спектра сигнала определено для систем телевизионного вещания, работающих со стандартными телевизионными каналами шириной 8 МГц. Если система работает с каналами шириной 7 МГц, то ширина спектра сигнала принимается равным 6,66 МГц

Ввиду того, что функционирование системы телевизионного вещания должно быть обеспечено для различных условий распространения радиосигналов, стандарт DVB-T предполагает возможность использования четырех различных соотношений между защитным интервалом и полезной частью OFDM-символа: 1/4, 1/8, 1/16 и 1/32. В табл. 4.6 представлены соответствующие значения  $T_u$ ,  $\Delta$  и  $T_s$  для различных режимов работы.

Таблица 4.6

**Значения  $T_u$ ,  $\Delta$  и  $T_s$  для различных режимов работы**

Режим 2К				
$\Delta / T_u$	1/4	1/8	1/16	1/32
$T_u$ , мкс	2048 $T_0$ , 224			
$\Delta$ , мкс	512 $T_0$ , 56	256 $T_0$ , 28	128 $T_0$ , 14	64 $T_0$ , 7
$T_s$ , мкс	2560 $T_0$ , 280	2304 $T_0$ , 252	2176 $T_0$ , 238	2112 $T_0$ , 231
Режим 8К				
$\Delta / T_u$	1/4	1/8	1/16	1/32
$T_u$ , мкс	8192 $T_0$ , 896			
$\Delta$ , мкс	2048 $T_0$ , 224	1024 $T_0$ , 112	512 $T_0$ , 56	256 $T_0$ , 28

Длительность различных интервалов определяется как кратное некоторому “элементарному” временному значению  $T_0 = 7/64$  мкс, являющемуся тактовым временем работы всей системы. Обратите внимание на то, что меняется длительность защитного интервала, в то время как длительность полезной части остается неизменной.

Теперь OFDM-символ можно записать с учетом защитного интервала:

$$s_{sym}(t) = \sum_{k=0}^{K_{max}-1} A_k \cos(\omega_0 t + 2\pi k(t - \Delta)/T_u + \phi_k), 0 \leq t \leq T_s. \quad (4.14)$$

Запишем (6.4) в комплексной форме, введя комплексный модуляционный символ  $\delta_k = A_k \exp(j\phi_k)$ :

$$s_{sym}(t) = \operatorname{Re} \left\{ \exp[j\omega_0 t] \sum_{k=0}^{K_{max}-1} \delta_k \exp[j2\pi k(t - \Delta)/T_u] \right\}, 0 \leq t \leq T_s. \quad (4.15)$$

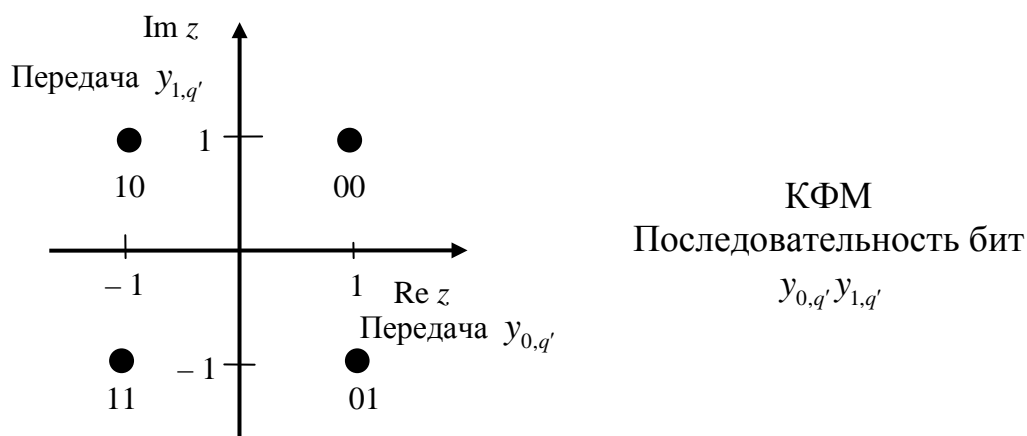
Значения амплитуд  $A_k$  и фаз  $\phi_k$ , и, соответственно, всего комплексного символа  $\delta_k$  зависит от используемого метода модуляции. В системе DVB-T в зависимости от типа передаваемой информации используются различные формы фазовой и квадратурной амплитудной манипуляции. Так, для передачи служебной информации используется относительная двоичная фазовая манипуляция (ОФМ-2). Для передачи пользовательской информации используется квадратурная фазовая манипуляция (КФМ)<sup>1</sup>, 16-позиционная квадратурная амплитудная манипуляция (КАМ-16) и 64-позиционная квадратурная амплитудная манипуляция (КАМ-64).

Формирование текущих значений  $A_k$  и  $\phi_k$  в OFDM-символе осуществляется на основе *модуляционных карт сигнального созвездия* (mapping), отражающих преобразование в комплексный модуляционный символ  $z$  каждого  $\nu$ -битового слова из набора  $u$ .

На рис. 4.14 представлены модуляционные карты для различных методов модуляции с учетом возможных режимов модуляции: равномерный или неравномерный, иерархический или неиерархический.

---

<sup>1</sup> Заметим, что квадратурную фазовую манипуляцию можно трактовать и как четырехпозиционную квадратурную амплитудную манипуляцию, так что можно считать, что для передачи пользовательской информации в системе DVB-T используется только модуляция КАМ.



**Рис. 4.11. Модуляционная карта для КФМ**

В основе представленных модуляционных карт лежит код Грея, при котором соседние точки сигнального созвездия соответствуют входным двоичным последовательностям, различающимся в одном символе. Все точки созвездия располагаются в узлах квадратной решетки (отсюда, собственно, и название — квадратурная амплитудная манипуляция).

Созвездие КФМ, содержащее всего четыре точки, расположенные в вершинах квадрата, обеспечивает наименьшую скорость передачи данных, но при этом является наиболее помехоустойчивым.

Многопозиционные созвездия КАМ-16 и КАМ-64 могут иметь различную конфигурацию в зависимости от используемого режима, что отражается значением соответствующего параметра  $\alpha$ , которое, в свою очередь, означает выбор нормирующего множителя  $c$  (табл. 4.7).

Таблица 4.7

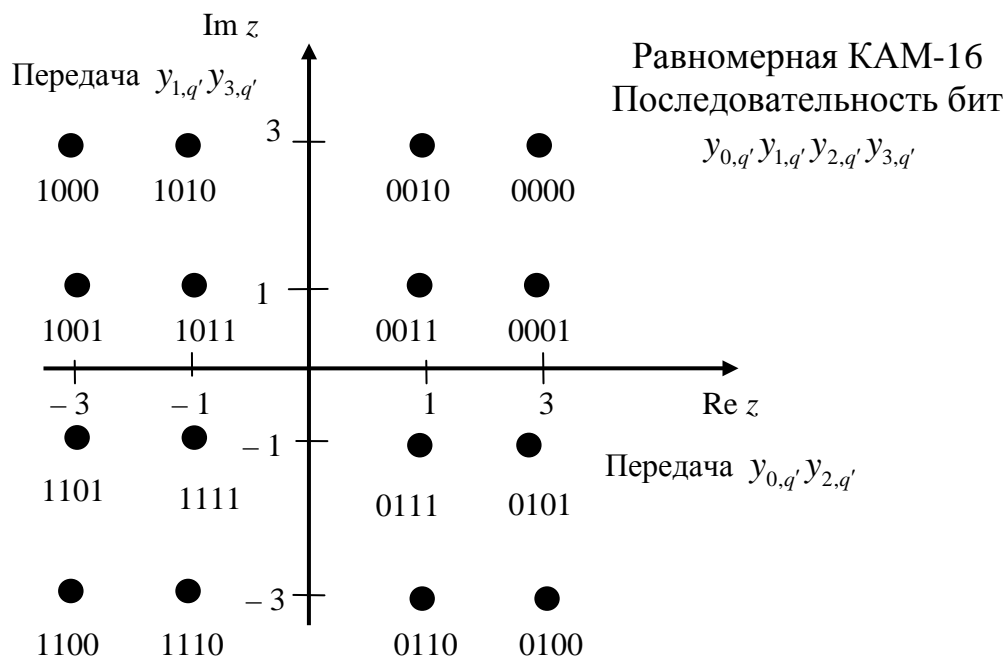
**Нормировочный множитель для различных режимов**

Вид модуляции	Параметр режима	Множитель
КФМ	$\alpha = 1$	$c = 1 / \sqrt{2}$
КАМ-16	$\alpha = 1$	$c = 1 / \sqrt{10}$

Окончание таблицы 4.7

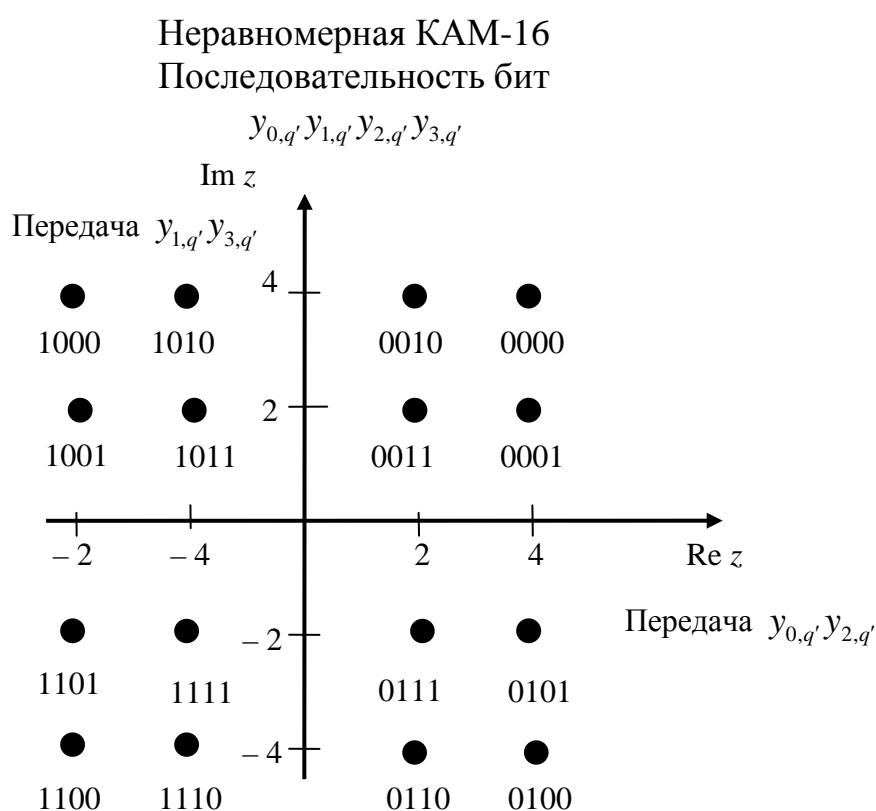
Вид модуляции	Параметр режима	Множитель
КАМ-16	$\alpha = 2$	$c = 1 / \sqrt{20}$
КАМ-16	$\alpha = 4$	$c = 1 / \sqrt{52}$
КАМ-64	$\alpha = 1$	$c = 1 / \sqrt{42}$
КАМ-64	$\alpha = 2$	$c = 1 / \sqrt{60}$
КАМ-64	$\alpha = 4$	$c = 1 / \sqrt{108}$

В режиме равномерной КАМ-16 при значении  $\alpha = 1$  все точки созвездия располагаются в вершинах примыкающих друг к другу одинаковых квадратов со стороной, равной двум (рис. 4.12). При формировании OFDM-символа координаты точек для КФМ делятся на  $\sqrt{2}$ ; для КАМ-16 — на  $\sqrt{10}$ ; для КАМ-64 — на  $\sqrt{42}$ .



**Рис. 4.12. Модуляционная карта для равномерной КАМ-16 в иерархическом и неиерархическом режимах;  $\alpha = 1$**

В режиме неравномерной КАМ-16 при значении  $\alpha = 2$  осуществлено симметричное удаление точек, лежащих в различных квадрантах. В пределах каждого квадранта точки по-прежнему располагаются в вершинах квадрата со стороной, равной двум; минимальное расстояние между точками каждого квадранта составляет четыре (рис. 4.13). При формировании OFDM-символа координаты точек делятся для КАМ-16 — на  $\sqrt{20}$ ; для КАМ-64 — на  $\sqrt{60}$ .

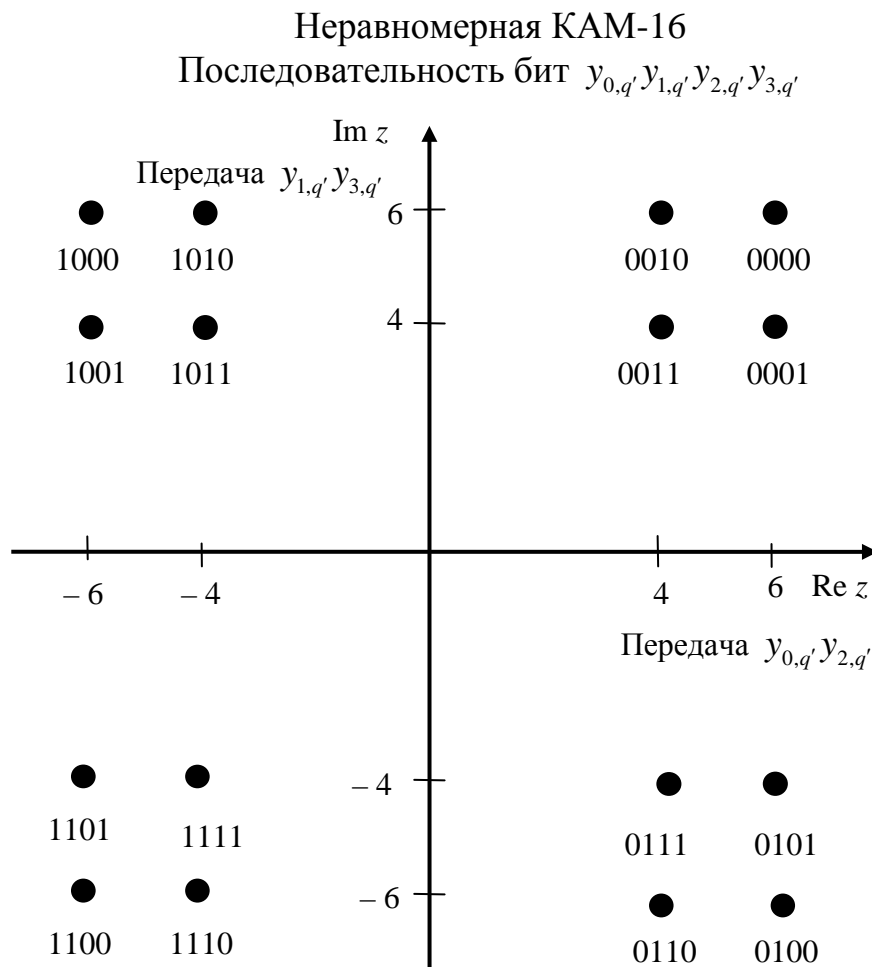


**Рис. 4.13. Модуляционная карта для неравномерной КАМ-16 в иерархическом и неиерархическом режимах;  $\alpha = 2$**

В режиме неравномерной КАМ при значении  $\alpha = 4$  также осуществлено симметричное удаление точек, лежащих в различных квадрантах аналогично предыдущему случаю, однако минимальное расстояние между точками каждого квадранта еще более увеличено и

равно восьми (рис. 4.14). При формировании OFDM-символа координаты точек делятся для КАМ-16 — на  $\sqrt{52}$ ; для КАМ-64 — на  $\sqrt{108}$ .

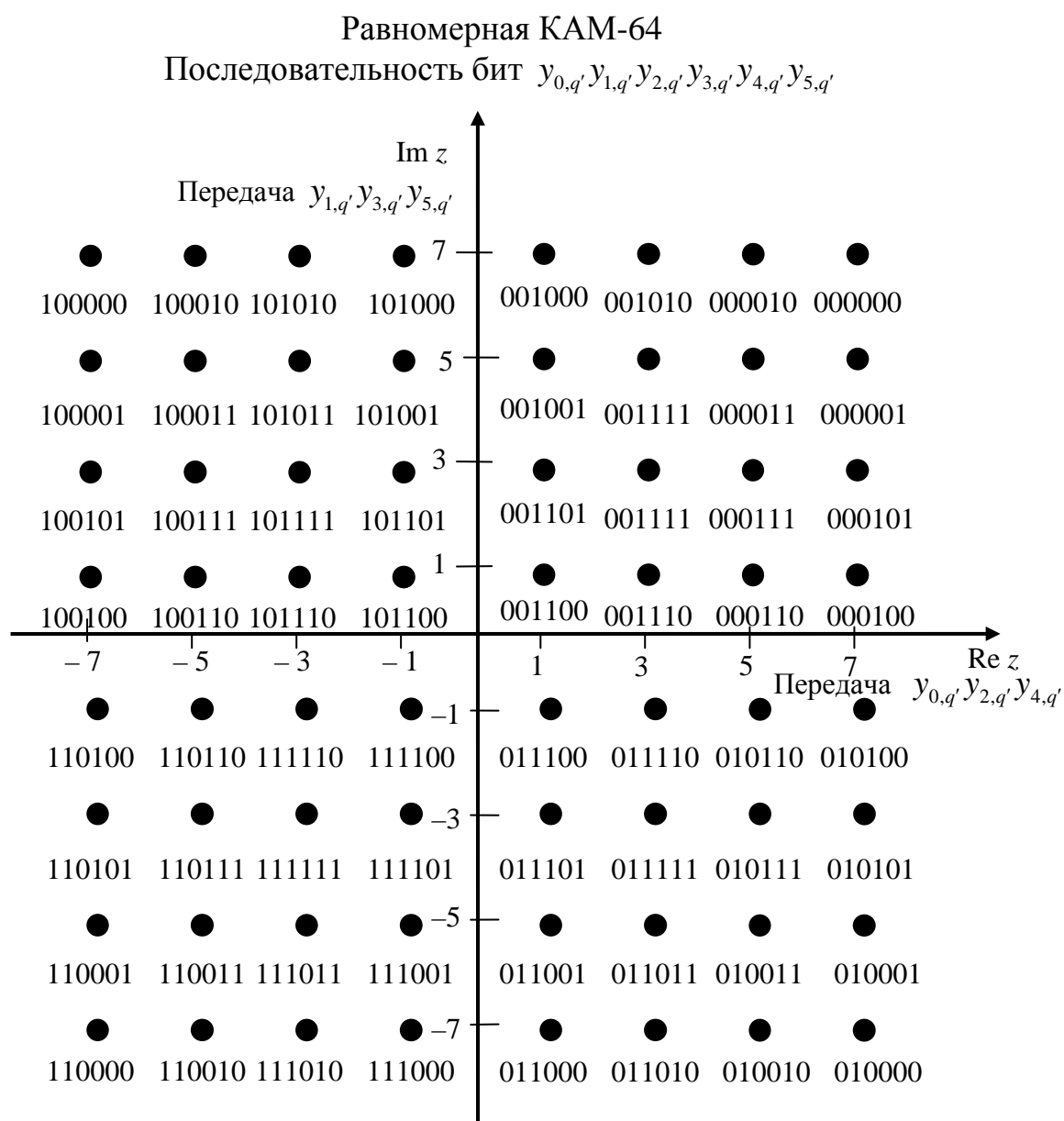
В неиерархических режимах поток данных, поступающий с выхода внутреннего перемежителя, состоит из  $\nu$ -битовых слов, каждое из которых отображается в соответствующую точку сигнального созвездия.



**Рис. 4.14. Модуляционная карта для неравномерной КАМ-16 в иерархическом и неиерархическом режимах;  $\alpha = 4$**

В тех случаях, когда используется иерархический режим, модуляционные карты применяются к потокам данных, подвергнутым во внутреннем перемежителе расчленению на потоки с более высоким и

более низким приоритетом. Так, для иерархической модуляции КАМ-16 в выходных словах внутреннего перемежителя битами высокого приоритета являются биты  $y_{0,q'}$  и  $y_{1,q'}$ , а низкого приоритета — биты  $y_{2,q'}$  и  $y_{3,q'}$ , и в этом случае применяется какая-либо из модуляционных карт, представленных на рис. 4.12–4.14.

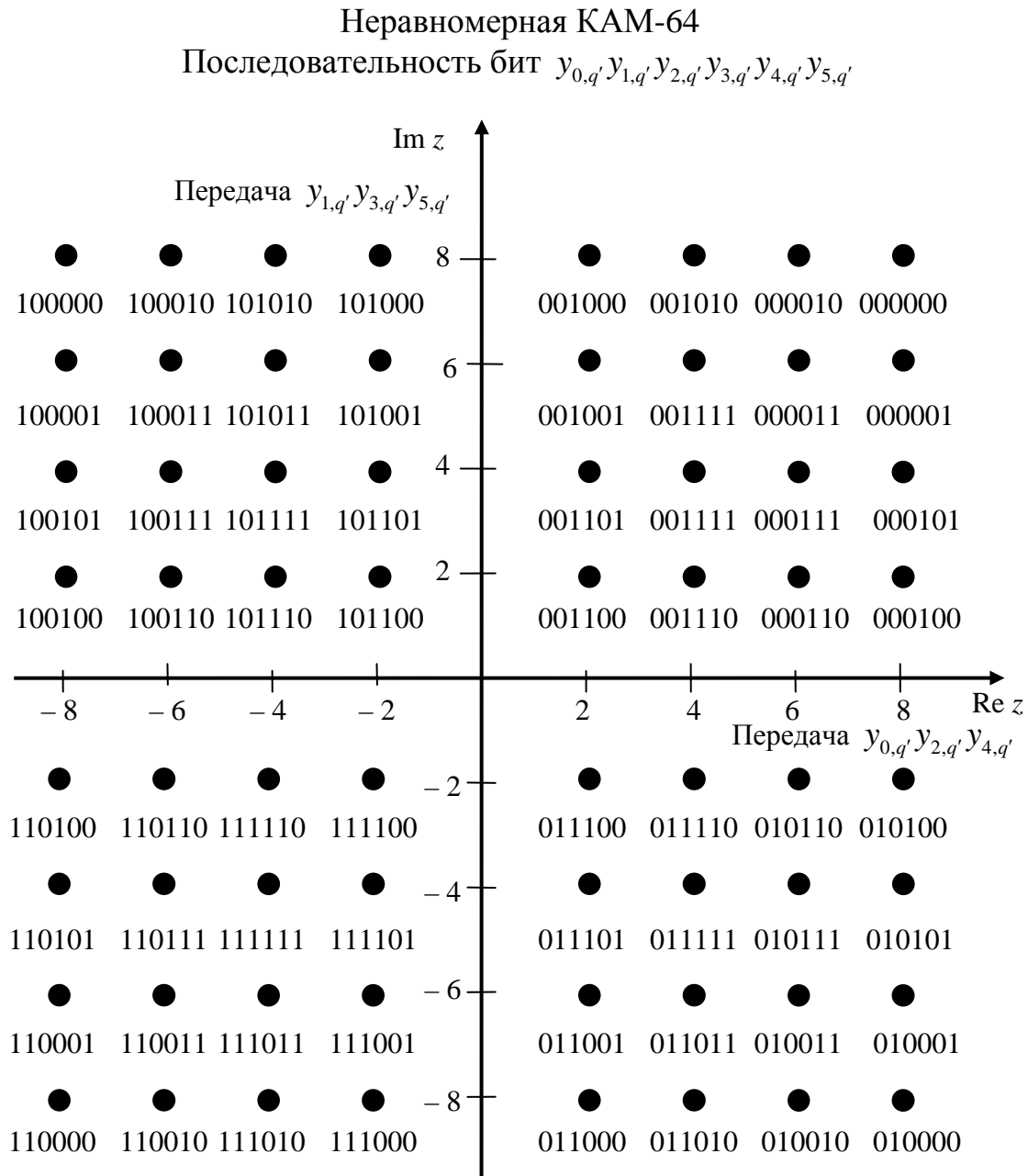


**Рис. 4.15. Модуляционная карта для равномерной КАМ-64 в иерархическом и неиерархическом режимах;  $\alpha = 1$**

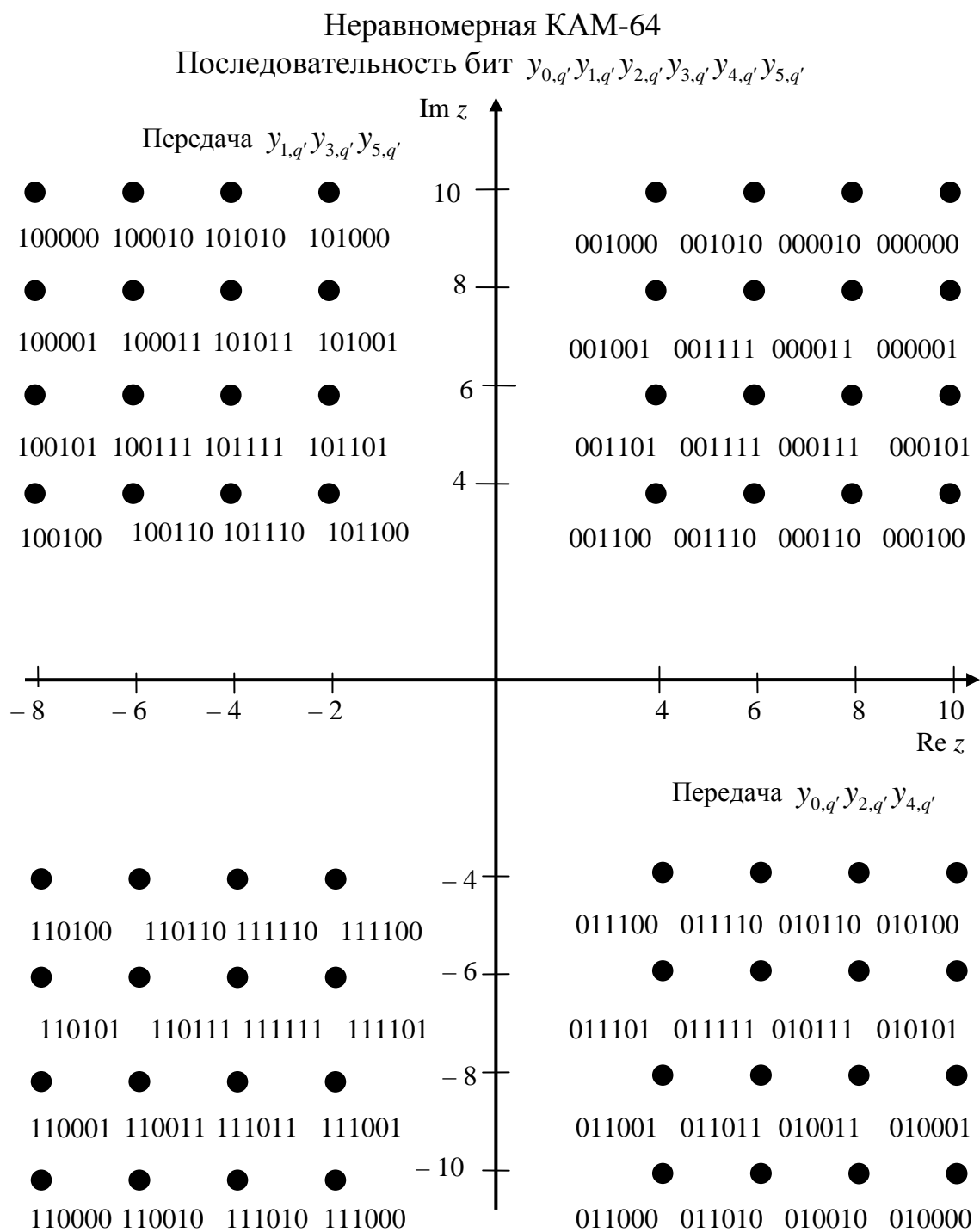
Например, последовательности бит

$$y_{0,q'} = 1, y_{1,q'} = 0, y_{2,q'} = 0, y_{3,q'} = 0$$

ставится в соответствие верхняя левая точка сигнального созвездия.



**Рис. 4.16. Модуляционная карта для неравномерной КАМ-64 в иерархическом и неиерархическом режимах;  $\alpha = 2$**



**Рис. 4.17. Модуляционная карта для неравномерной КАМ-64 в иерархическом и неиерархическом режимах;  $\alpha = 4$**

Если используется иерархическая модуляция КАМ-64, то битами высокого приоритета по-прежнему являются биты  $y_{0,q'}$  и  $y_{1,q'}$ , а битами низкого приоритета —  $y_{2,q'}$ ,  $y_{3,q'}$ ,  $y_{4,q'}$  и  $y_{5,q'}$ ; в этом случае применяется какая-либо из модуляционных карт, представленных на рис. 4.15–4.17.

Обратим внимание на то, что сигнальные созвездия КФМ, КАМ-16 и КАМ-64 в некотором смысле вложены друг в друга. Любая точка созвездия КФМ является общей (с точки зрения одинаковости старших бит) для всех точек созвездия КАМ-16, расположенных в том же квадранте; в свою очередь, любая точка созвездия КАМ-16 является общей для точек созвездия КАМ-64, расположенных в соответствующем подквадранте. Это дает возможность при необходимости трактовать и демодулировать точки многопозиционных созвездий КАМ-16 и КАМ-64 как точки созвездия КФМ, вынося с большей достоверностью решения по битам высокого приоритета  $y_{0,q'}$  и  $y_{1,q'}$ , а затем уже пытаться демодулировать биты низкого приоритета на основе анализа всей  $v$ -элементной последовательности.

Итак, для передачи пользовательской и служебной информации формируется OFDM-символ, представляющий собой, по сути, набор сигнальных точек, передаваемых на различных поднесущих. Набор из 68 последовательных OFDM-символов образует OFDM-кадр. Поскольку каждый OFDM-символ существует на тактовом интервале  $[0; T_s]$ , OFDM-кадр определен на временном интервале длительностью  $T_{fr} = 68T_s$ .

Для того чтобы записать выражение, определяющее OFDM-кадр, введем в обозначении модуляционного символа второй индекс  $l$ , показывающий привязку к  $l$ -му, по порядку следования в OFDM-кадре<sup>1</sup>,

---

<sup>1</sup>Исходя из смысла обозначений индекс  $k$  называют частотным индексом, а индекс  $l$  — временным индексом.

OFDM-символу: значение  $\delta_{kl}$  отражает позицию сигнальной точки, передаваемой на  $k$ -й поднесущей в  $l$ -м OFDM-символе;  $s_{sym}^{(l)}(t)$  — это  $l$ -й OFDM-символ в OFDM-кадре. Тогда OFDM-кадр  $s_{fr}(t)$  можно описать как

$$\begin{aligned} s_{fr}(t) &= \sum_{l=0}^{67} \sum_{k=0}^{K_{\max}-1} s_{sym}^{(l)}(t) = \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \exp[j\omega_0 t] \sum_{l=0}^{67} \sum_{k=0}^{K_{\max}-1} \delta_{kl} \exp[j2\pi k(t - \Delta - lT_s)/T_u] \right\}, \\ (68 + l)T_s &\leq t \leq (68 + l + 1)T_s. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Все же “автономной” единицей системы DVB-T, содержащей в себе самодостаточную порцию данных, является, не OFDM-кадр, а OFDM-суперкадр, представляющий собой четыре последовательных OFDM-кадра. Вводя, аналогично тому, как это делалось выше, третий индекс  $m$ , показывающий привязку к  $m$ -му, по порядку следования в OFDM-кадре, OFDM-суперкадру, запишем OFDM-суперкадр в следующем виде:

$$\begin{aligned} s_{fr}(t) &= \sum_{m=0}^3 \sum_{l=0}^{67} \sum_{k=0}^{K_{\max}-1} s_{sym}^{(l,m)}(t) = \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \exp[j\omega_0 t] \sum_{m=0}^3 \sum_{l=0}^{67} \sum_{k=0}^{K_{\max}-1} \delta_{klm} \exp[j2\pi k(t - \Delta - lT_s - 68mT_s)/T_u] \right\}, \\ (68m + l)T_s &\leq t \leq (68m + l + 1)T_s. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Содержащиеся в OFDM-суперкадре данные можно разделить на две категории: пользовательские данные и служебные данные. В свою очередь, служебные данные также можно подразделить на три группы, различающиеся по типу решаемых задач:

- группа рассредоточенных пилотных сигналов;
- группа непрерывных пилотных сигналов;

- группа сигналов, содержащих информацию о параметрах передачи — так называемые TPS-сигналы (Transmission Parameter Signaling).

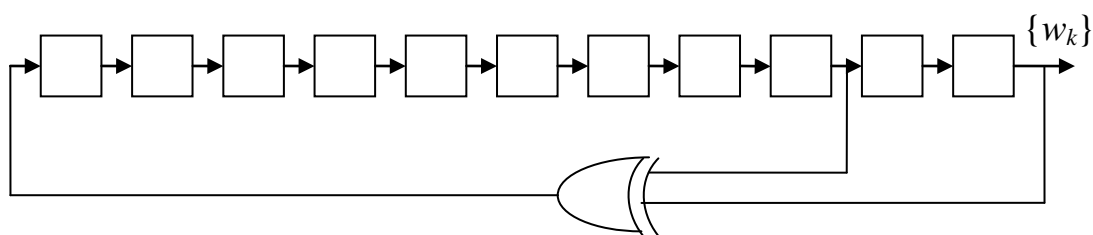
Пилотные, или опорные сигналы предназначены для выполнения кадровой, частотной и временной синхронизации, канального оценивания, идентификации режима передачи, а также для отслеживания фазового шума. TPS-сигналы, как следует из их названия, используются в целях отображения текущих значений параметров схем кодирования и модуляции.

Рассмотрим более подробно расположения и характеристики сигналов, предназначенных для передачи служебных данных

Опорные сигналы характеризуются тем, что они передаются с повышенным уровнем мощности. Модуляция таких сигналов осуществляется по правилу, получающемуся на основе работы генератора псевдослучайной последовательности  $\{w_k\}$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) (ПСП), описываемого полиномом

$$P(x) = x^{11} + x^2 + 1, \quad (4.18)$$

схема которого представлена на рис. 4.18.



**Рис. 4.18. Генератор псевдослучайной последовательности**

Генератор ПСП представляет собой набор из 11 последовательно соединенных элементов задержки. Выходы 9-го и 11-го элементов, образуют цепь обратной связи

Генератор инициализируется 11-элементной последовательностью, в которой все биты установлены в 1. Тогда первые 13 выходных бит имеют следующие значения:

$$1111111111100\dots$$

Инициализация осуществляется таким образом, что первый выходной бит совпадает с первой активной (задействованной) поднесущей, и каждое новое значение генерируется для следующей поднесущей, независимо от ее содержимого. Кроме того, формируемая ПСП также управляет инициализацией начальной фазы TPS-сигналов (см. далее).

Значения комплексных модуляционных символов пилотных сигналов определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}\operatorname{Re}\{\delta_{klm}\} &= \frac{4}{3}(1 - 2w_k), \\ \operatorname{Im}\{\delta_{klm}\} &= 0\end{aligned}\tag{4.19}$$

где каждое из  $w_k$  в соответствии с генерируемой ПСП принимает числовое значение либо 0, либо 1, а индекс  $k$ , как и выше, указывает порядковый номер поднесущей в OFDM-символе.

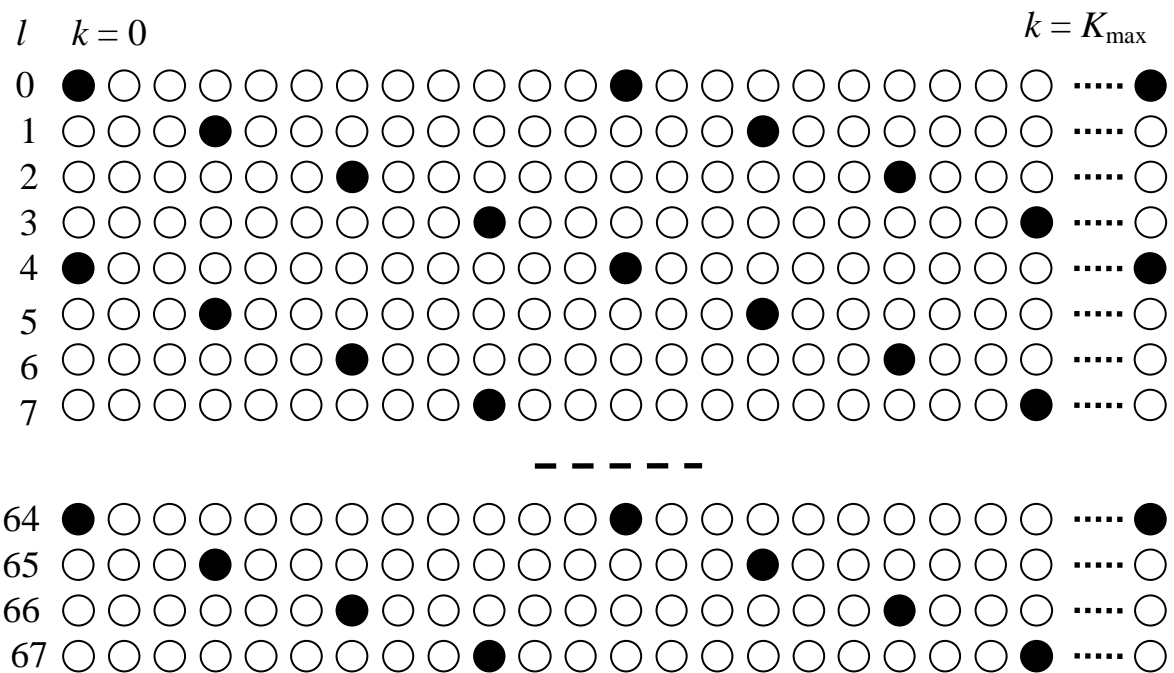
Видно, что модуляционные символы для пилотных сигналов являются вещественными, и, таким образом, определяют двоичную фазовую модуляцию.

Для любого  $l$ -го ( $l = 0, \dots, 67$ ) OFDM-символа рассредоточенные пилотные сигналы передаются на поднесущих, порядковые номера которых определяются соотношением

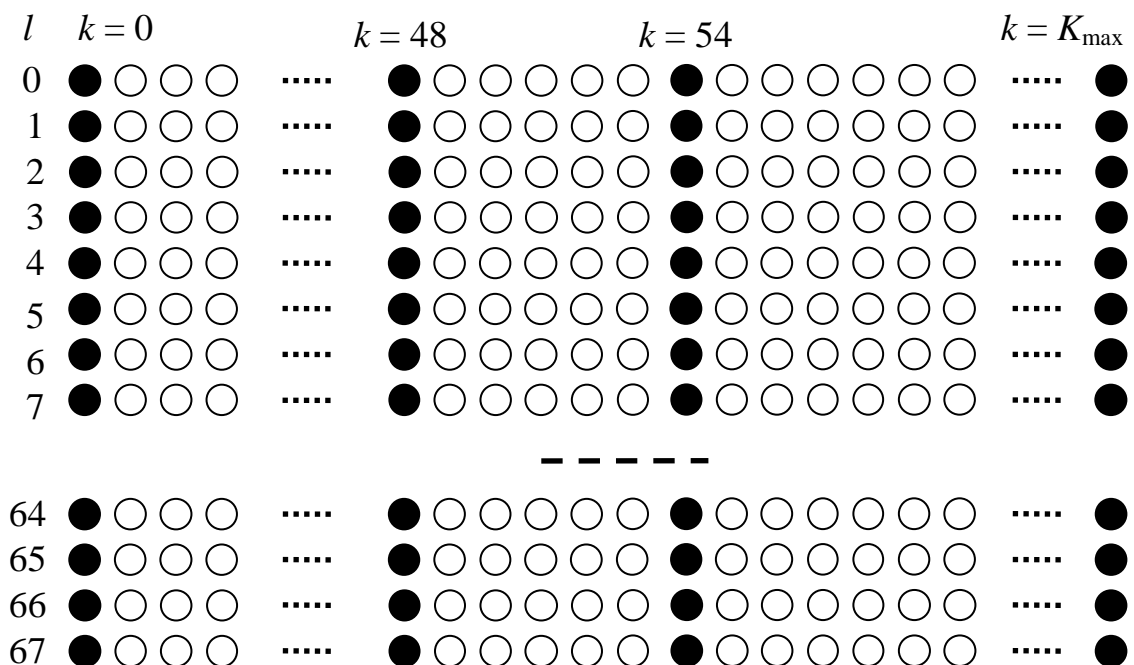
$$k = 3(l \bmod 4) + 12p, \quad 0 \leq k \leq K_{\max},\tag{4.20}$$

где  $p$  — неотрицательное целое ( $p = 0, 1, 2, \dots$ ), а  $\bmod$  — операция взятия остатка от деления двух целых чисел.

Из (4.20) следует, что в одном OFDM-символе присутствует 142 рассредоточенных пилотных сигнала, которые расположены через каждые 12 поднесущих друг относительно друга. Это иллюстрируется на рис. 4.19, где сигналы, соответствующие пользовательским данным, обозначены белыми кружками, а пилотные сигналы — темными.



**Рис. 4.19.** Расположение поднесущих с рассредоточенными пилотными сигналами в OFDM-кадре



**Рис. 4.20.** Расположение поднесущих с непрерывными пилотными сигналами в OFDM-кадре

Непрерывные пилотные сигналы характеризуются тем, что передаются во всех OFDM-символах на заданных поднесущих (рис. 4.20), исходя из чего их часто называют *параллельными*, или *блочными* пилотными сигналами.

Количество таких пилотных сигналов составляет 45 в режиме 2К и 177 в режиме 8К, и в табл. 4.8 представлены номера соответствующих поднесущих.

Таблица 4.8

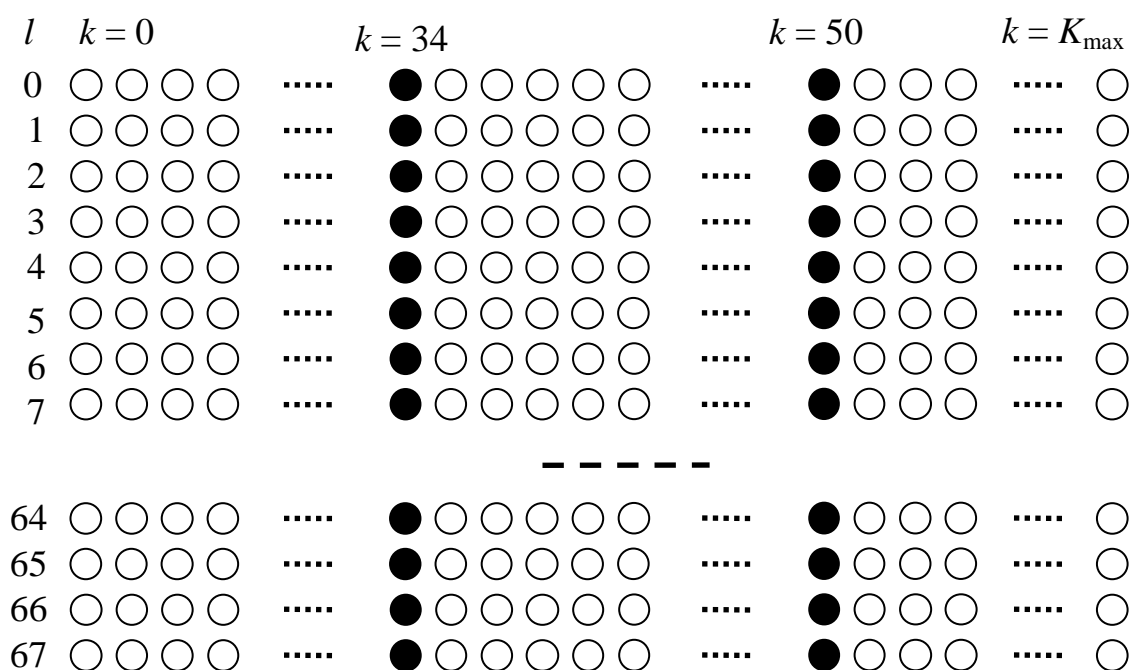
**Номера поднесущих, содержащих непрерывные пилотные сигналы**

Режим 2К
0, 48, 54, 87, 141, 156, 192, 201, 255, 279, 282, 333, 432, 450, 483, 525, 531, 618, 636, 714, 759, 765, 780, 804, 873, 888, 918, 939, 942, 969, 984, 1050, 1101, 1107, 1110, 1137, 1140, 1146, 1206, 1269, 1323, 1377, 1491, 1683, 1704
Режим 8К
0, 48, 54, 87, 141, 156, 192, 201, 255, 279, 282, 333, 432, 450, 483, 525, 531, 618, 636, 714, 759, 765, 780, 804, 873, 888, 918, 939, 942, 969, 984, 1050, 1101, 1107, 1110, 1137, 1140, 1146, 1206, 1269, 1323, 1377, 1491, 1683, 1704, 1752, 1758, 1791, 1845, 1860, 1896, 1905, 1959, 1983, 1986, 2037, 2136, 2184, 2187, 2229, 2235, 2322, 2340, 2418, 2468, 2469, 2484, 2508, 2577, 2592, 2622, 2643, 2646, 2673, 2688, 2754, 2805, 2811, 2814, 2841, 2844, 2850, 2910, 2973, 3027, 3081, 3195, 3387, 3408, 3456, 3462, 3495, 3549, 3600, 3609, 3663, 3687, 3690, 3741, 3840, 3858, 3891, 3933, 3939, 4026, 4044, 4122, 4167, 4173, 4188, 4212, 4281, 4296, 4326, 4347, 4350, 4377, 4392, 4458, 4509, 4515, 4518, 4545, 4548, 4554, 4614, 4677, 4731, 4785, 4899, 5091, 5112, 5160, 5166, 5199, 5253, 5268, 5304, 5313, 5367, 5391, 5394, 5445, 5544, 5562, 5595, 5637, 5730, 5748, 5826, 5871, 5877, 5892, 5916, 5985, 6000, 6030, 6051, 6054, 6081, 6096, 6162, 6213, 6219, 6222, 6249, 6252, 6258, 6318, 6435, 6489, 6603, 6795, 6816

Анализ представленных в табл. 4.8 значений показывает, что на некоторых поднесущих рассредоточенные и непрерывные пилотные сигналы совпадают.

Совпадение пилотных сигналов не приводит к каким-либо коллизиям, поскольку правило модуляции для обеих групп сигналов одинаково.

TPS-сигналы, предназначенные, как уже говорилось выше, для передачи значений параметров модуляции и кодирования, также являются параллельными (рис. 4.21) и передаются на 17 (режим 2К) или 68 (режим 8К) поднесущих.



**Рис. 4.21. Расположение поднесущих, содержащих TPS-сигналы, в OFDM-кадре**

В TPS-сигналах содержится следующая информация, необходимая для начала работы приемника OFDM-сигналов:

- параметр  $\alpha$  сигнального созвездия;
- иерархичность режима;
- защитный интервал  $\Delta$ ;
- кодовые скорости внутреннего кодера;
- число поднесущих (режим 2К или 8К);
- порядковый номер кадра в суперкадре.

Порядковые номера поднесущих, содержащих TPS-сигналы, представлены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

**Номера поднесущих, содержащих TPS-сигналы**

Режим 2К
34, 50, 209, 346, 413, 569, 595, 688, 790, 901, 1073, 1219, 1262, 1286, 1469, 1594, 1687
Режим 8К
34, 50, 209, 346, 413, 569, 595, 688, 790, 901, 1073, 1219, 1262, 1286, 1469, 1594, 1687, 1738, 1754, 1913, 2050, 2117, 273, 2299, 2392, 2494, 2605, 2777, 2923, 2966, 2990, 3173, 3298, 3391, 3442, 3458, 3617, 3754, 3821, 3977, 4003, 4096, 4198, 4309, 4481, 4627, 4670, 4694, 4877, 5002, 5095, 5146, 5162, 5321, 5458, 5525, 5681, 5707, 5800, 5902, 6013, 6185, 6331, 6374, 6398, 6581, 6706, 6799

Несмотря на то, что в каждом OFDM-символе имеется много поднесущих, предназначенных для передачи TPS-сигналов, все они, тем не менее, содержат один и тот же TPS-сигнал, передаваемый на различных поднесущих для повышения вероятности правильного приема служебной информации. Поскольку для формирования TPS-сигналов используется двоичная модуляция, можно считать, что каждый OFDM-символ содержит один бит информации, а каждый TPS-блок OFDM-кадра (выделенный на рис. 4.21 темными кружками) — 68 бит  $s_1, \dots, s_{68}$ . Формат и назначение каждого из бит представлены в табл. 4.10.

Таблица 4.10

**Формат и назначение бит TPS-сигналов**

Биты	Формат	Содержание / назначение
$s_0$	Выход генератора ПСП	Бит инициализации
$s_1-s_{16}$	0011010111101110 или 1100101000010001	Синхрослово

Продолжение таблицы 4.10

Биты	Формат	Содержание / назначение
$s_{17}-s_{22}$	010111	Индикатор длины
$s_{23}-s_{24}$	00: $m = 0$ 01: $m = 1$ 10: $m = 2$ 11: $m = 3$	Номер OFDM-кадра в OFDM-суперкадре
$s_{25}-s_{26}$	00: КФМ 01: КАМ-16 10: КАМ-64 11: зарезервировано	Тип сигнального созвездия для передачи пользователь- ских данных
$s_{27}-s_{29}$	000: неиерархический режим 001: $\alpha = 1$ 010: $\alpha = 2$ 011: $\alpha = 4$ 100: зарезервировано 101: зарезервировано 110: зарезервировано 111: зарезервировано	Иерархичность режима и па- раметр $\alpha$
$s_{30}-s_{32}$	000: 1/2 001: 2/3 010: 3/4 011: 5/6 100: 7/8 101: зарезервировано 110: зарезервировано 111: зарезервировано	Кодовая скорость в высоко- приоритетном потоке

Окончание таблицы 4.10

Биты	Формат	Содержание / назначение
$s_{33}–s_{35}$	000: 1/2 001: 2/3 010: 3/4 011: 5/6 100: 7/8 101: зарезервировано 110: зарезервировано 111: зарезервировано	Кодовая скорость в низко- приоритетном потоке
$s_{36}–s_{37}$	00: 1/32 01: 1/16 10: 1/8 11: 1/32	Защитный интервал ( $\Delta/T_u$ )
$s_{38}–s_{39}$	00: 2К 01: 8К 10: зарезервировано 11: зарезервировано	Режим передачи (число под- несущих)
$s_{40}–s_{53}$	0000000000000000	Зарезервированы для буду- щего использования
$s_{54}–s_{67}$	Код БЧХ	Помехоустойчивое кодиро- вание

Содержащиеся в TPS-блоке данные можно условно разделить на преамбулу (биты  $s_1–s_{16}$ ), информационную часть (биты  $s_{17}–s_{53}$ ) и контрольную сумму (биты  $s_{54}–s_{67}$ ).

Первый бит  $s_0$  преамбулы — инициализационный, необходимый для применения относительной фазовой модуляции. Значение данного бита берется с выхода генератора ПСП аналогично пилотным сигналам.

Биты  $s_1–s_{16}$  преамбулы образуют синхрослово, значение которого есть

0011010111101110

для первого и третьего TPS-блока в каждом OFDM-суперкадре или

1100101000010001

для второго и четвертого TPS-блока в каждом OFDM-суперкадре.

Информационная часть начинается с двоичного счетчика, образованного битами  $s_{17}–s_{22}$ , который служит индикатором длины, показывая число используемых информационных бит в TPS-блоке.

Биты  $s_{23}–s_{24}$  отражают порядковый номер OFDM-кадра, в котором передается данный TPS-блок, в четырехкадровом OFDM-кадре.

Для передачи информации о применяемом методе модуляции используются биты  $s_{25}–s_{26}$  в совокупности с битами  $s_{27}–s_{29}$ , отображающими выбор режима: либо неиерархичный, либо иерархичный с соответствующим значением параметра  $\alpha$ .

Биты  $s_{30}–s_{32}$ , а также  $s_{33}–s_{35}$  служат для указания кодовой скорости в высокоприоритетном и низкоприоритетном потоках соответственно.

Значение защитного интервала (точнее — отношение длительности защитного интервала к полезной части OFDM-символа) указывается в битах  $s_{36}–s_{37}$ .

Фактически завершают информационную часть биты  $s_{38}–s_{39}$ , несущие информацию об используемом режиме числа поднесущих (2K или 8K).

Оставшиеся биты  $s_{40}–s_{53}$  информационной части стандартом описываются как зарезервированные для будущего использования и, вообще говоря, должны быть установлены в ноль. Однако, как показывает практика, в действующих системах вещания данные биты, как правило, оказываются задействованными, что отражается соответствующим значением счетчика длины<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Зарезервированные биты, по сути, образуют возможный дополнительный канал передачи информации, по которому, как показывают оценки, можно передавать данные со скоростями порядка мегабит в секунду.

Содержащаяся в TPS-блоке информация о параметрах кодирования и модуляции совместно с синхрословом подвергаются помехоустойчивому кодированию, для чего служат 14 бит  $s_{54}-s_{67}$ .

Помехоустойчивым кодом является *укороченный БЧХ-код* (67, 53, 2), получаемый из исходного систематического БЧХ-кода (127, 113, 2), описываемого порождающим многочленом

$$h(x) = x^{14} + x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1. \quad (4.21)$$

Процесс укорочения может быть осуществлен путем добавления в кодере 60 нулевых бит перед входными информационными битами перед началом кодирования и отбрасывания нулевых бит после кодирования, пропуская сформированное 67-битное кодовое слово.

Рассмотрим правила формирования модуляционных символов для TPS-сигналов.

В отличие от рассредоточенных и непрерывных пилотных сигналов, TPS-сигналы передаются с обычным, а не повышенным уровнем мощности при использовании абсолютной (ФМ-2) или относительной (ОФМ-2) двоичной фазовой манипуляции.

В первом (т. е. при  $l = 0$ ) OFDM-символе модуляционные символы TPS-сигналов однозначно определяются следующим образом (формируя абсолютную фазовую манипуляцию):

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{\delta_{klm}\} &= (1 - 2w_k) \\ \operatorname{Im}\{\delta_{klm}\} &= 0 \end{aligned}, \quad (4.22)$$

где, по-прежнему,  $k$  — порядковый номер поднесущей, а значения  $w_k$  берутся с выхода генератора ПСП (6.8).

Во всех последующих  $l$ -х OFDM-символах ( $l = 1, \dots, 67$ )  $m$ -го ( $m = 0, \dots, 3$ ) OFDM-кадра значения модуляционных символов TPS-сигналов зависят от значения бита  $s_l$  TPS-блока (формируя относительную фазовую манипуляцию):

если  $s_l = 0$ , то

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{\delta_{k,l,m}\} &= \operatorname{Re}\{\delta_{k,l-1,m}\}, \\ \operatorname{Im}\{\delta_{klm}\} &= 0 \end{aligned}, \quad (4.23)$$

если  $s_l = 1$ , то

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{\delta_{k,l,m}\} &= -\operatorname{Re}\{\delta_{k,l-1,m}\} \\ \operatorname{Im}\{\delta_{klm}\} &= 0 \end{aligned} \quad (4.24)$$

В заключение данного раздела рассмотрим, каким образом кодированные 204-байтовые пакеты (т. е. пакеты, образующиеся на выходе кодера Рида — Соломона) располагаются в OFDM-суперкадре.

Как показывает анализ, структура OFDM-суперкадра позволяет передавать в нем целое число 204-байтовых пакетов, т. е. отсутствует необходимость в каком-либо стаффинге.

Первым передаваемым байтом данных в OFDM-суперкадре всегда является синхробайт, в прямом или инверсном виде. Далее, в табл. 4.11 представлены числа, показывающие количество 204-байтовых пакетов, содержащихся в одном OFDM-суперкадре при различных режимах, схем кодирования и модуляции.

Таблица 4.11

**Число 204-байтовых пакетов в одном OFDM-суперкадре**

Кодовая скорость	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8
КФМ					
Режим 2К	252	336	378	420	441
Режим 8К	1008	1344	1512	1680	1764
КАМ-16					
Режим 2К	504	672	756	840	882
Режим 8К	2016	2688	3024	3360	3528
КАМ-64					
Режим 2К	756	1008	1134	1260	1323
Режим 8К	3024	4032	4536	5040	5292

Представленные в табл. 4.11 данные позволяют оценить полезную скорость передачи данные для различных конфигураций системы. К примеру, в режиме 8К при относительной длительности защитного интервала 1/8, когда используется КАМ-64 с кодовой скоростью

сверточного кода  $1/2$  количество полезных бит, содержащихся в суперкадре, есть

$$N_{sf} = 204 \cdot 8 \cdot 3024 \cdot \frac{188}{204} = 4\,548\,096,$$

длительность OFDM-суперкадра равна

$$T_{sf} = 4 \cdot 68 \cdot 1000 \text{ мкс} = 274\,176 \text{ мкс},$$

и, таким образом полезная скорость  $V_{sf}$  передачи данных в одном суперкадре составляет

$$V_{sf} = 4\,548\,096 \text{ бит} / 274\,176 \text{ мкс} \approx 16,5882 \text{ Мбит/с}.$$

В табл. 4.12 приведены значения  $V_{sf}$  (с точностью до двух значащих цифр) для неиерархических режимов.

Таблица 4.12

**Полезная скорость передачи данных (в Мбит/с) для  
неиерархических режимов 2К и 8К**

Вид модуляции	Кодовая скорость	Защитный интервал			
		1/4	1/8	1/16	1/32
КФМ	1/2	4,98	5,53	5,85	6,03
	2/3	6,64	7,37	7,81	8,04
	3/4	7,46	8,29	8,78	9,05
	5/6	8,29	9,22	9,76	10,05
	7/8	8,71	9,68	10,25	10,56
КАМ-16	1/2	9,95	11,06	11,71	12,06
	2/3	13,27	14,75	15,61	16,09
	3/4	14,93	16,59	17,56	18,10
	5/6	16,59	18,43	19,52	20,11
	7/8	17,42	19,35	20,49	21,11
КАМ-64	1/2	14,93	16,59	17,56	18,10
	2/3	19,91	22,12	23,42	24,13
	3/4	22,39	24,88	26,35	27,14
	5/6	24,88	27,65	29,27	30,16
	7/8	26,13	29,03	30,74	31,67

Оценка скорости передачи данных для иерархического режима также может быть получена из табл. 4.12: для высокоприоритетного потока искомые значения находятся в строках, относящихся к КФМ; для низкоприоритетного потока при КАМ-16 — в строках, относящихся к КФМ; для низкоприоритетного потока при КАМ-64 — в строках, относящихся к КАМ-16.

#### **4.4. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ OFDM-СИГНАЛОВ И СПЕКТРАЛЬНАЯ МАСКА ДЛЯ СИСТЕМЫ DVB-T**

В предыдущих разделах речь шла, главным образом, о временных характеристиках сигналов, формируемых для передачи вещательных данных. Целью данного раздела является изучение спектральных свойств сигналов, используемых в системе DVB-T, а также требований, налагаемых на внеполосные излучения в заданном телевизионном канале, когда организуются сети телевизионного вещания.

Понятие спектра сигнала, несмотря на многолетние дискуссии и обилие научной и учебной литературы на данную тему, до сих пор вызывает ряд сложностей, касающихся и методик измерения различных спектральных параметров, и интерпретации требований и рекомендаций, налагаемых на спектральные параметры отечественными и международными контролирующими организациями (Государственная комиссия по радиочастотам, Международный союз электросвязи и др.). Во многом это связано с тем, что в реальной аппаратуре измеряются спектральные характеристики *отдельных реализаций* сигнала, в то время как в теоретических исследованиях, как правило, рассматривается *энергетический спектр* сигнала — характеристика, получаемая усреднением по всем реализациям. Разумеется, можно так подобрать и специальные тестовые сигналы, и параметры измерительного устройства (длительность реализации, время усреднения, форму и параметры окна усреднения и др.), чтобы спектральные характеристики, полученные по анализу отдельных реализаций, были бы близ-

ки к теоретическим. Однако в реальной работе ситуация далека от этого, и приходится предпринимать специальные меры, обеспечивающие удовлетворение заданным спектральным показателям.

Совокупность заданных значений спектральных составляющих в контрольных точках образует так называемую *спектральную маску*, и одной из задач разработчиков передающей аппаратуры является гарантированный *не выход* спектральных составляющих вещательного сигнала за пределы спектральной маски.

Рассмотрим, прежде всего, теоретические характеристики много-частотных сигналов.

Как известно [9], энергетический спектр  $G(\omega)$  сигнала определяется как предельное соотношение (по времени наблюдения) средней спектральной плотности мощности отдельных усеченных реализаций:

$$G(\omega) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \left\{ \mathbf{E} \left[ |S_{\tau}(\omega)|^2 \right] \right\}, \quad (4.25)$$

где  $S_{\tau}(\omega)$  — преобразование Фурье усеченной, рассматриваемой на интервале времени  $[0; \tau]$  реализации  $s_{\tau}(t)$ , а символ  $\mathbf{E}$  обозначает операцию математического ожидания, т. е. усреднения по ансамблю реализаций.

Понятно, что величина  $G(\omega)$ , определяемая соотношением (4.25), является идеализированной, поскольку в реальных условиях невозможно обеспечить полное усреднение по ансамблю реализаций. Приближением к  $G(\omega)$  служит характеристика  $G^*(\omega)$ , получаемая посредством замены усреднения по ансамблю усреднением во времени одной (достаточно длительной) реализации. В пределе, при бесконечно большом времени усреднения  $G(\omega)$  и  $G^*(\omega)$  совпадают<sup>1</sup>.

Найдем вид энергетического спектра многочастотных сигналов. При этом, для общности, будем предполагать произвольный (не обя-

---

<sup>1</sup> Строго говоря, для того, чтобы  $G(\omega)$  и  $G^*(\omega)$  совпадали при бесконечном времени усреднения, на сигнал требуется наложить условия *стационарности* и *эргодичности* [9]. Как правило, физические свойства используемых радиосигналов позволяют считать, что требуемые условия выполняются.

зательно прямоугольный) вид огибающей  $A(t)$  элементарного сигнала. В качестве усеченной реализации сигнала выберем  $N$ -элементную последовательность OFDM-символов<sup>1</sup> на интервале наблюдения  $[0; NT_s]$ :

$$s_N(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_{sym}^{(n)}(t - nT_s) = \sum_{n=0}^{N-1} \operatorname{Re} \left\{ \exp[j\omega_0(t - nT_s)] \times \right. \\ \left. \times \sum_{l=0}^{K_{\max}-1} \delta_{ln} \exp[j2\pi l(t - nT_s - \Delta)/T_u] \right\} A(t - nT_s), \quad 0 \leq t \leq NT_s.$$

Поскольку длительность символа  $T_s$  фиксирована, обеспечить сколь угодно большое время наблюдения  $= NT_s$  можно лишь при  $N \rightarrow \infty$  (при этом последующий предельный переход будет осуществляться по дискретным значениям, что не принципиально).

Спектр (преобразование Фурье) усеченной реализации имеет следующий вид:

$$S_{\tau}(\omega) \equiv S_N(\omega) = \int_0^{NT_s} s_N(t) \exp(-j\omega t) dt = \\ = \int_0^{NT_s} \sum_{n=0}^{N-1} s_{sym}^{(n)}(t - nT_s) \exp(-j\omega t) dt = S_{N+}(\omega) + S_{N-}(\omega),$$

где

$$S_{N+}(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{K_{\max}-1} \delta_{ln} \exp\{-j[(\omega - \omega_0)nT_s]\} \exp\{-j2\pi l(nT_s + \Delta)/T_u\} \times \\ \times \int_0^{NT_s} A(t - nT_s) \exp[j2\pi lt/T_u] \exp[-j(\omega - \omega_0)t] dt, \\ S_{N-}(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{K_{\max}-1} \delta_{ln}^* \exp\{-j[(\omega + \omega_0)nT_s]\} \exp\{j2\pi l(nT_s + \Delta)/T_u\} \times$$

---

<sup>1</sup> В данном случае кадровая структура OFDM-символов игнорируется, ибо она не влияет на спектральные характеристики.

$$\times \int_0^{NT_s} A(t - nT_s) \exp[-j2\pi lt / T_u] \exp[-j(\omega + \omega_0)t] dt.$$

Здесь символ “\*” означает знак комплексного сопряжения.

Обозначая через

$$F_A(\omega) = \int_0^{T_s} A(t) \exp(-j\omega t) dt$$

преобразование Фурье заданной функции  $A(t)$ , определяющей огибающую элементарного сигнала, предыдущие соотношения можно записать как

$$S_{N+}(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{K_{\max}-1} \delta_{ln} \exp\{-j[(\omega - \omega_0)nT_s]\} \exp\{-j2\pi l(nT_s + \Delta)/T_u\} \times \\ \times F_A(\omega - \omega_0 - 2\pi lt / T_u)$$

и

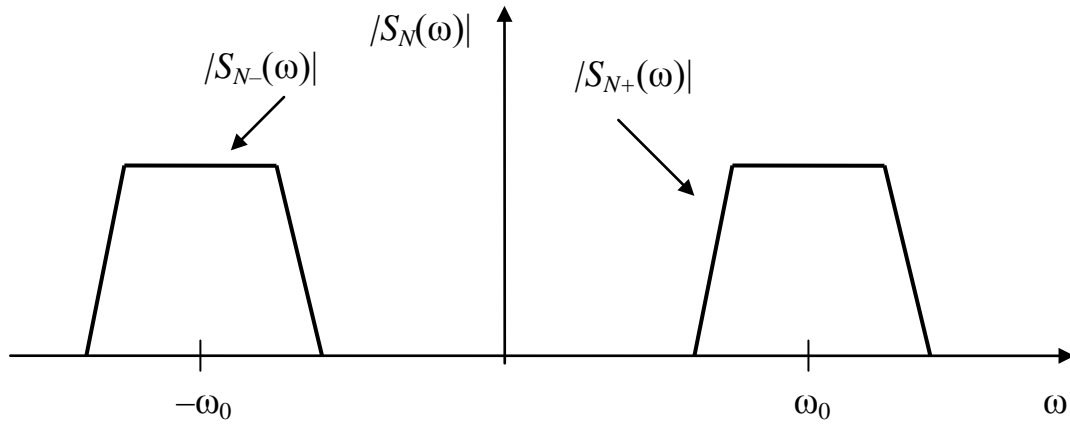
$$S_{N-}(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{K_{\max}-1} \delta_{ln}^* \exp\{-j[(\omega + \omega_0)nT_s]\} \exp\{j2\pi l(nT_s + \Delta)/T_u\} \times \\ \times F_A(\omega + \omega_0 + 2\pi lt / T_u).$$

Теперь, при вычислении квадрата модуля комплексной функции  $S_N(\omega)$  учтем свойство относительной узкополосности сигнала  $s_N(t)$ , из которого следует, что спектральные компоненты  $S_{N+}(\omega)$  и  $S_{N-}(\omega)$  локализованы вблизи значений  $\omega_0$  и  $-\omega_0$  соответственно (рис. 4.22). Это означает, что при вычислении квадрата модуля

$$\begin{aligned} & |S_{N+}(\omega) + S_{N-}(\omega)|^2 = \\ & = |S_{N+}(\omega)|^2 + S_{N+}(\omega)S_{N-}^*(\omega) + S_{N+}^*(\omega)S_{N-}(\omega) + |S_{N-}(\omega)|^2 \end{aligned}$$

перекрестными членами можно пренебречь, и

$$|S_{N+}(\omega) + S_{N-}(\omega)|^2 \approx |S_{N+}(\omega)|^2 + |S_{N-}(\omega)|^2.$$



**Рис. 4.22. К вычислению энергетического спектра**

Математическое ожидание вычисляется посредством усреднения по всем возможным значениям модуляционных символов. Используя линейность математического ожидания, имеем:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}[|S_N(\omega)|^2] &= \mathbf{E}[|S_{N+}(\omega)|^2] + \mathbf{E}[|S_{N-}(\omega)|^2] = \\
 &= \frac{1}{4} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n'=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{K_{\max}-1} \sum_{l'=0}^{K_{\max}-1} \mathbf{E}[\delta_{ln} \delta_{l'n'}^*] \exp\{-j[(\omega - \omega_0)(n - n')T_s]\} \times \\
 &\quad \times F_A(\omega - \omega_0 - 2\pi lt / T_u) F_A^*(\omega - \omega_0 - 2\pi l't / T_u) \times \\
 &\quad \times \exp\{-j2\pi(l - l')(nT_s + \Delta) / T_u\} + \\
 &+ \frac{1}{4} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n'=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{K_{\max}-1} \sum_{l'=0}^{K_{\max}-1} \mathbf{E}[\delta_{ln} \delta_{l'n'}^*] \exp\{-j[(\omega + \omega_0)(n - n')T_s]\} \times \\
 &\quad \times F_A(\omega + \omega_0 + 2\pi lt / T_u) F_A^*(\omega + \omega_0 + 2\pi l't / T_u) \times \\
 &\quad \times \exp\{-j2\pi(l - l')(nT_s + \Delta) / T_u\}. \tag{4.26}
 \end{aligned}$$

При вычислении математического ожидания от произведения модуляционных символов необходимо учесть, что если  $n = n'$  и  $l = l'$ , то позиции символов совпадают (фактически — это один и тот же символ на  $l$ -й поднесущей). В противном случае символы  $\delta_{kn}$  и  $\delta_{k'n'}^*$  различны, и, в предположении, что их значения формируются независимо (физически так оно и есть), математическое ожидание произве-

дения значений символов можно рассматривать как произведение математических ожиданий соответствующих сомножителей:

$$\mathbf{E}[\delta_{ln} \delta_{l'n'}^*] = \begin{cases} \mathbf{E}[\delta^2], & n = n', l = l' \\ \mathbf{E}^2[\delta], & l \neq l' \end{cases}.$$

В силу симметричности используемых сигнальных созвездий нетрудно показать равенство нулю математического ожидания  $\mathbf{E}[\delta_l]$  (графически это очевидно). Таким образом, из  $N^2 K_{\max}^2$  слагаемых, входящих в четверную сумму в (4.26), ненулевыми остаются только те  $N$  элементов, в которых  $n = n'$  и  $l = l'$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[|S_N(\omega)|^2] &= \frac{N\mathbf{E}[\delta^2]}{4} \sum_{l=0}^{K_{\max}-1} |F_A(\omega - \omega_0 - 2\pi l t / T_u)|^2 + \\ &+ \frac{\mathbf{E}[\delta^2]}{4} \sum_{l=0}^{K_{\max}-1} |F_A(\omega + \omega_0 + 2\pi l t / T_u)|^2. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Теперь остается лишь совершить предельный переход, который в силу независимости от  $N$  оказывается тривиальным:

$$G(\omega) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{NT_s} \left\{ \mathbf{E}[|S_N(\omega)|^2] \right\} = G_+(\omega) + G_-(\omega), \quad (4.28)$$

где

$$\begin{aligned} G_+(\omega) &= \frac{\mathbf{E}[\delta^2]}{4T_s} \sum_{l=0}^{K_{\max}-1} |F_A(\omega - \omega_0 - 2\pi l t / T_u)|^2, \\ G_-(\omega) &= \frac{\mathbf{E}[\delta^2]}{4T_s} \sum_{l=0}^{K_{\max}-1} |F_A(\omega + \omega_0 + 2\pi l t / T_u)|^2. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Итак, энергетический спектр многочастотного сигнала состоит из двух симметричных компонент, локализованных вблизи  $\omega_0$  и  $-\omega_0$ . Отрицательные спектральные составляющие, конечно, не имеют физического смысла, однако учет их (фактически — удвоение результата) необходим при вычислении энергетических характеристик сигналов, поскольку средняя мощность (дисперсия) сигнала  $P_{\text{ср}}$ , согласно теореме Винера — Хинчина, вычисляется как

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) d\omega. \quad (4.30)$$

(Из соотношения (4.30) и проявляется физический смысл  $G(\omega)$  как спектральной плотности средней мощности сигнала.)

Математические ожидания  $\mathbf{E}[\delta^2]$  для различных сигнальных созвездий могут быть сосчитаны, например, для созвездия КФМ  $\mathbf{E}[\delta^2] = 1$ , однако это не имеет большого смысла, поскольку для практических целей спектральные компоненты измеряются и представляются в нормированном виде.

Обратимся к виду энергетического спектра для сигналов системы DVB-T, когда используются OFDM-сигналы с прямоугольной формой огибающей

$$A(t) = \begin{cases} A_0, & t \in [0; T_u] \\ 0, & t \notin [0; T_u] \end{cases}.$$

В этом случае спектральная функция огибающей  $F_A(\omega)$  равна

$$F_A(f) = A_0 T_s \frac{\sin(\pi f T_s)}{\pi f T_s},$$

и энергетический спектр представляет собой последовательность спектральных составляющих вида

$$G_l(f) = \frac{\sin^2[\pi(f - l/T_u)T_s]}{[\pi(f - l/T_u)T_s]^2}, \quad l = 0, \dots, K_{\text{max}} - 1, \quad (4.31)$$

расположенных вблизи несущей  $\omega_0 = 2\pi f_0$ .

Для удобства обычно производят перенумерацию поднесущих:

$$l' = l - K_{\text{max}} / 2,$$

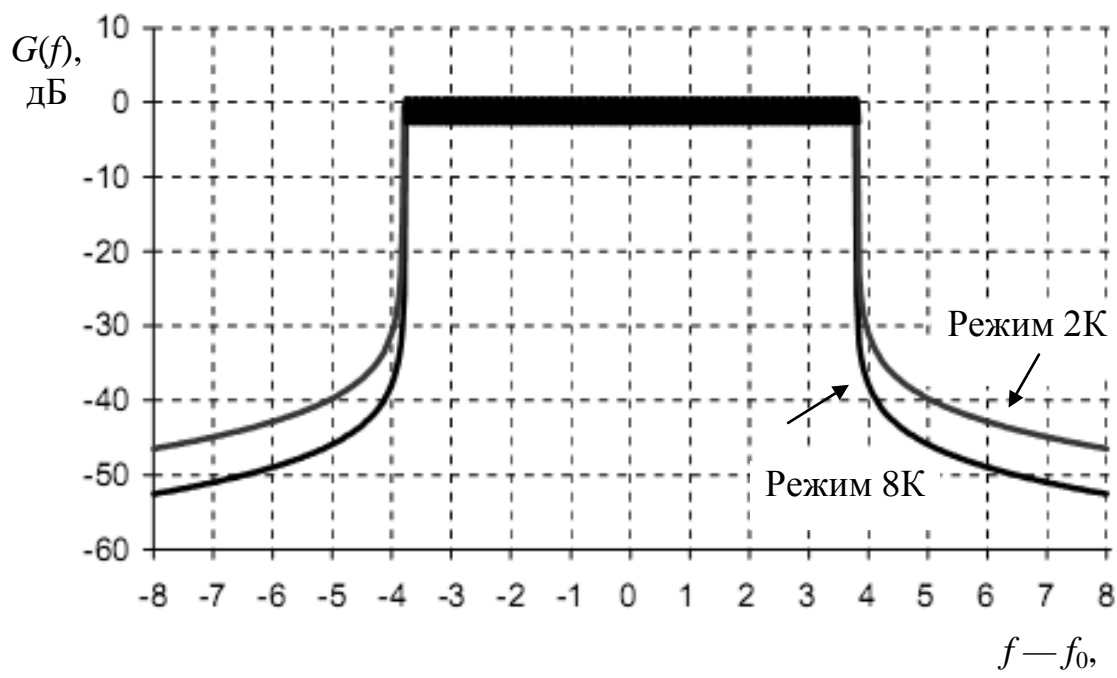
помещая  $f_0$  в центр спектра.

На рис. 4.23 показан вид энергетического спектра OFDM-сигнала в режимах 2К и 8К, т. е. при числе поднесущих 1 704 и 6 816 соответственно. Значения спектральных компонент представлены в нормированном виде, в децибелах:

$$G_{\text{дБ}}(f) = 10 \lg \frac{G(f)}{G_{\text{max}}(f)}.$$

В основной полосе частот, когда  $|f - f_0| \leq 4$  МГц, наблюдается некоторая неравномерность спектра, вызванная (ортогональным) наложением слагаемых. Эта неравномерность, видимая на рис. 4.23 как темная полоса, составляет около 3 дБ.

Уровень внеполосных излучений, т. е. спектральных компонент, находящихся за пределами полосы  $|f - f_0| \leq 4$  МГц, весьма высок и составляет всего лишь около –50 дБ при отстройках на величину, соизмеримую с шириной основной полосы частот. Это обусловлено прямоугольным видом огибающей  $A(t)$ , имеющей, как известно, наихудшие характеристики спектральной эффективности.



**Рис. 4.23. Энергетический спектр OFDM-сигнала**

В целях обеспечения возможности передачи сигналов систем телевизионного вещания (как цифровых, так и аналоговых) в рамках существующей сетки телевизионных каналов на уровень внеполосных

излучений налагаются достаточно жесткие требования, определяемые соответствующей спектральной маской (рис. 4.24, табл. 4.13).

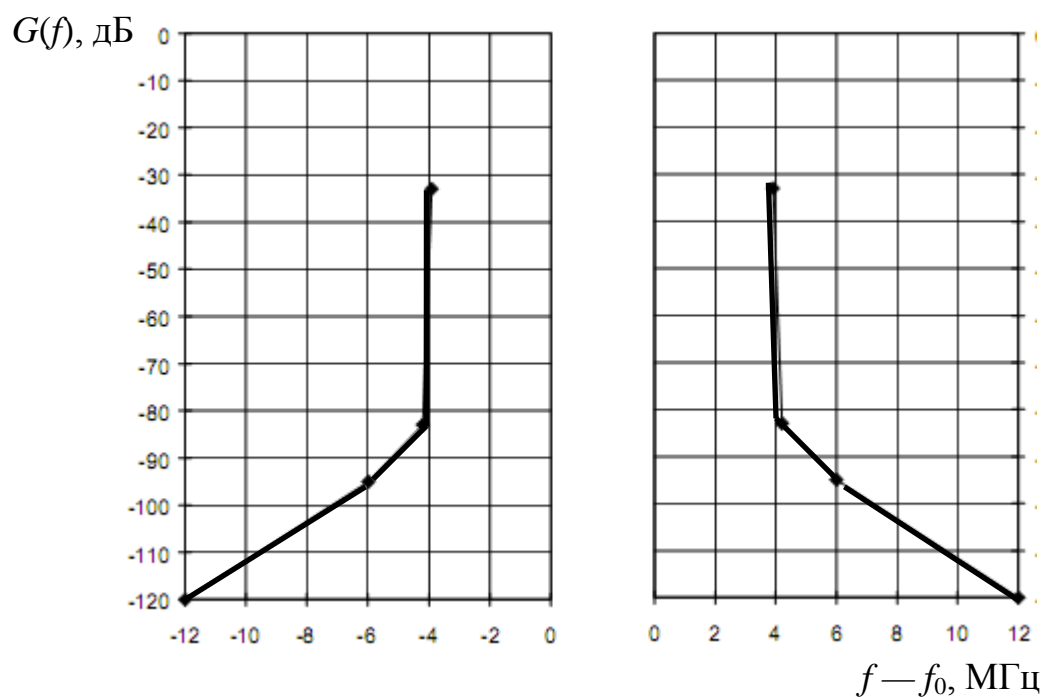


Рис. 4.24. Спектральная маска для сигнала DVB-T

Таблица 4.13

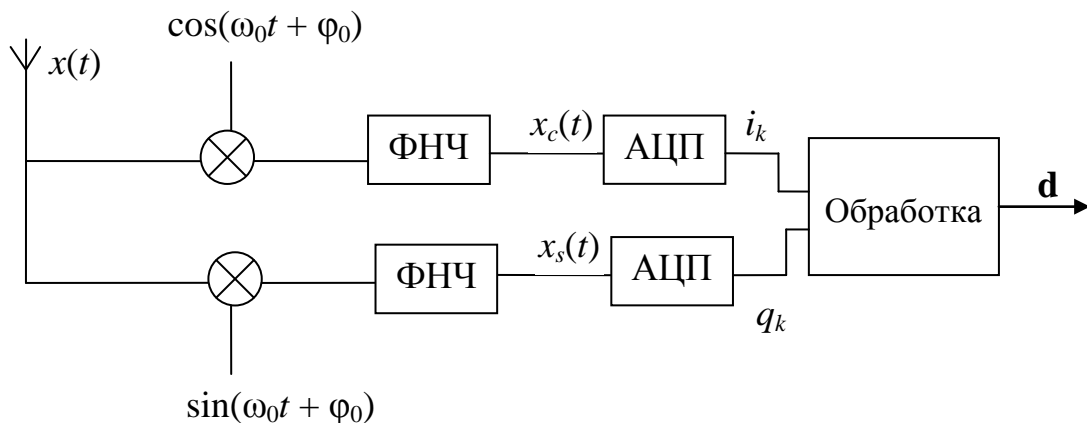
Контрольные точки спектральной маски DVB-T

Расстройка от несущей $f - f_0$ , МГц	Относительный уровень спектра $G(f)$ , дБ
- 12,0	- 120,0
- 6,0	- 95,0
- 4,2	- 83,0
- 3,8	- 32,8
+ 3,8	- 32,8
+ 4,2	- 83,0
+ 6,0	- 95,0
+ 12,0	- 120,0

## 4.5. ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ DVB-T

Прием и обработку сигналов системы телевизионного вещания можно условно рассматривать как совокупность действий, обратных тем, что представлены на рис. 3.1. Однако добавляются и новые этапы обработки сигнала, вызванные необходимостью синхронизации и эквалайзинга сигнала.

Упрощенная структурная схема приема и обработки вещательных сигналов системы DVB-T показана на рис. 4.25.



**Рис. 4.25. Упрощенная структурная схема приема и обработки сигналов**

Принятый из эфира сигнал  $x(t)$  преобразуется на нулевую частоту (на рис. 4.25 показана только одна пара преобразователей частоты; реально таких преобразователей может быть несколько), фильтрами нижних частот ФНЧ выделяются низкочастотные синфазная и квадратурная компоненты  $x_c(t)$  и  $x_s(t)$ . Далее в аналого-цифровых преобразователях АЦП происходит их дискретизация и квантование на заданное количество уровней. Оцифрованные отсчеты подаются на специализированный вычислитель (программно-аппаратный комплекс), осуществляющий цифровую обработку сигналов. Результатом такой обработки является байтовая последовательность

$$\mathbf{d} = (d^{(1)}, d^{(2)}, \dots),$$

представляющая собой рассмотренный в разд. 3.1 и 3.2 транспортный поток MPEG-2.

В данном разделе рассмотрены алгоритмы и процедуры первичной обработки вещательных сигналов, направленные на осуществление символьной и кадровой синхронизации. Дальнейшая обработка, целью которой, в конечном итоге, является получение кадров изображения и/или звука (а также, возможно, дополнительной служебной информации), требует достаточно объёмного изложения как особенностей используемых в настоящее время транспортных (программных) потоков, так и процедур демодуляции-декодирования сложных сигнально-кодовых конструкций и, поэтому, далеко выходит за рамки данного учебного пособия.

Для определенности будем считать, что частота дискретизации квадратур  $f_d$  равна, согласно стандарту, 64/7 МГц, а квантование производится 16-разрядным АЦП, обеспечивающим представление данных в виде целого числа со знаком. Таким образом, далее можно говорить о разработке такого алгоритма обработки, входными данными которого являются поступающие раз в 7/64 мкс значения отсчетов  $I$  и  $Q$  квадратур в виде 16-битных слов со знаком, а выходными данными 188-байтные MPEG-2 пакеты.

Процедура синхронизации предполагает выполнение следующих операций (рис. 4.26):

- 1) синхронизация принятых отсчетов с началом OFDM-символа и определение защитного интервала;
- 2) чтение служебной информации, содержащейся в TPS-сигналах, и синхронизация с началом OFDM-суперкадра;
- 3) чтение полезных данных, содержащихся в одном OFDM-суперкадре, определение служебной информации для следующего OFDM-суперкадра.

Отметим, что выполнение первых двух операций осуществляется один раз, и фактически они определяют инициализацию работы алгоритма. Третья операция — основная для всего алгоритма, она цикли-

чески повторяется с обработкой каждого нового OFDM-суперкадра. Кроме того, неотъемлемой частью операций 2) и 3) является последовательная оценка текущего состояния канала.



**Рис. 4.26. Алгоритм обработки сигнала DVB-T**

Рассмотрим подробнее каждую из представленных на рис. 4.26 операций.

Прежде всего, преобразуем две вещественные квадратурные последовательности  $\{i_k\}$  и  $\{q_k\}$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) в одну комплексную последовательность  $\{c_k\}$ , в которой

$$c_k = i_k + jq_k.$$

Первичной задачей при построении алгоритма обработки является синхронизация по времени с началом OFDM-символа.

Нетрудно видеть, что при выбранной частоте дискретизации на длительности OFDM-символа укладывается 8192 отсчета  $c_k$ . Тогда возможные длительности (в отсчетах  $c_k$ ) защитного интервала:

$$\Delta_1 = 8192/4 = 1024;$$

$$\Delta_2 = 8192/8 = 512;$$

$$\Delta_3 = 8192/16 = 256;$$

$$\Delta_4 = 8192/32 = 128.$$

Наличие защитного интервала, в котором циклически повторяется часть OFDM-символа, позволяет построить семейство корреляционных кривых для всех возможных длительностей защитного интервала. В этом случае, анализируя полученные кривые, можно сделать вывод о значении длительности используемого защитного интервала и моменте начала OFDM-символа.

Построим набор корреляционных кривых  $B_n[k]$  ( $n = 1, 2, 3, 4$ ) для каждого защитного интервала следующим образом:

$$B_n[k] = \left| \sum_{l=1}^{\Delta_n} c_{l+k} c_{l+8192+k}^* \right|, \quad (4.32)$$

где

$$k = 1, 2, \dots, 8192 + \Delta_1.$$

Смысл выражения (4.32) можно пояснить следующим образом. Для заданного значения защитного интервала выбирается множество  $A_1$  подряд идущих отсчетов исходного сигнала, начиная с первого отсчета, таким образом, чтобы временной интервал между первым и последним отсчетом равнялся длительности рассматриваемого защитного интервала. Далее выбирается второе множество  $A_2$  того же размера, но начинающееся с отсчета, для которого временной интервал от первого отсчета множества  $A_1$  до первого отсчета множества  $A_2$  равен длительности одного OFDM-символа, т. е. 8192 отсчета.

Поэлементное умножение с последующим суммированием этих множеств и определяет первое значение корреляционной функции  $B_n[1]$ ; последующие значения функции  $B_n$  определяются путем сдвига на один отсчет  $A_1$  и  $A_2$ .

Легко понять, что если истинный защитный интервал  $\Delta$  совпадает с предполагаемым при построении корреляционной кривой  $\Delta_n$  ( $n = 1, 2, 3, 4$ ), то в момент начала OFDM-символа получим пик кривой

$$B_n^{\max} = B_0,$$

а при смещении вправо или влево от пика — линейное убывание до некоторого шумового уровня. Причем ширина основания  $D$  получаемого равнобедренного треугольника окажется равной удвоенной длительности защитного интервала:

$$D = 2\Delta.$$

Если же  $\Delta \neq \Delta_n$ , то вместо треугольника получим равнобедренную трапецию с длиной верхнего основания

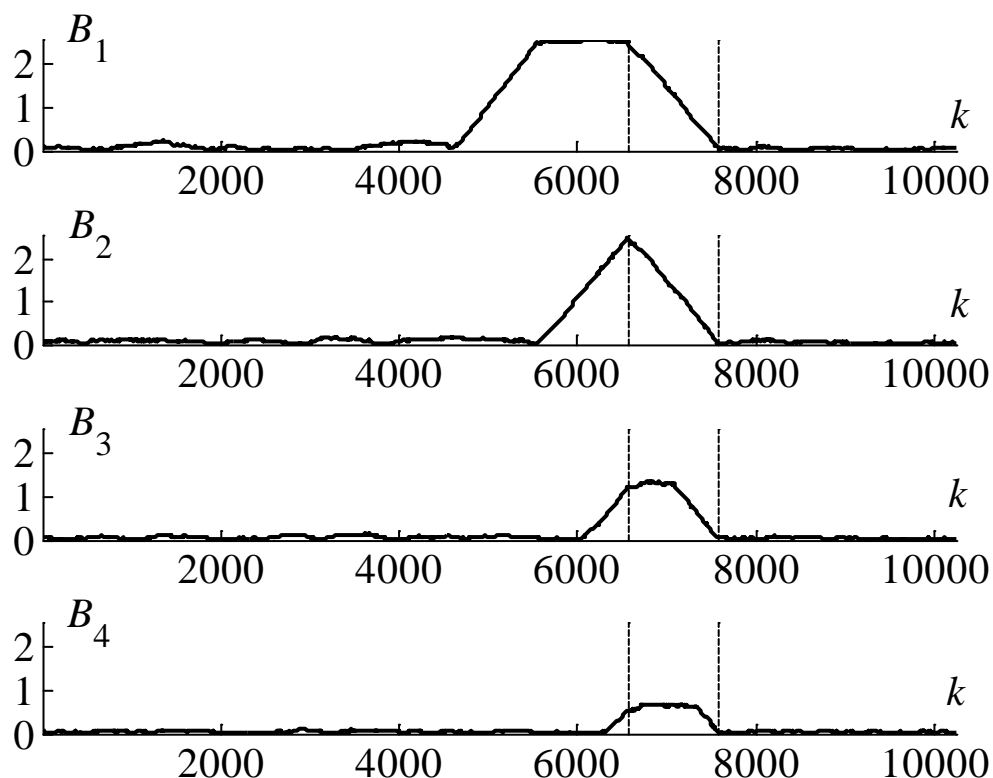
$$D = |\Delta - \Delta_n|,$$

равной разности длительностей истинного и используемого при построении защитных интервалов. При этом, когда  $\Delta < \Delta_n$ , уровень верхнего основания окажется равным  $B_0$ , а когда  $\Delta > \Delta_n$  — равным

$$B_n^{\max} = B_0 (\Delta_n / \Delta),$$

т. е. во столько раз меньше высоты треугольника, во сколько раз отличаются длительности защитных интервалов. Ясно, что в первом случае — момент окончания, а во втором случае — момент начала верхнего основания трапеции совпадет с моментом начала OFDM-символа, а наклон боковых сторон трапеций и треугольника во всех случаях окажется одинаковым.

На основе представленных заключений можно предложить ряд критериев для определения длительности защитного интервала и момента начала OFDM-символа. Для определенности будем считать, что корреляционные кривые расположены друг под другом в порядке убывания  $\Delta_n$  (рис. 4.27).



**Рис. 4.27. Семейство корреляционных кривых**

1. Корреляционная кривая, имеющая острые вершины (треугольный вид в окрестности пиков) по отношению к пологим вершинам остальных кривых, определяет защитный интервал.

2. Корреляционная кривая, для которой ее пиковые значения и пиковые значения расположенных выше кривых одинаковы, а пиковые значения кривых расположенных ниже убывают пропорционально уменьшению длительности защитного интервала, то выделенная кривая определяет защитный интервал.

3. Корреляционная кривая, для которой пологие участки всех кривых, расположенных ниже, начинаются с момента окончания соответствующих пологих участков выделенной кривой, а пологие участки всех кривых, расположенных выше, заканчиваются в момент начала соответствующих пологих участков, то эта кривая определяет защитный интервал.

4. Если составить последовательность чисел  $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ , состоящую из значений ширины пологого участка в единицах длительности символа для каждой из кривых ( $a_1$  — длительность пологого участка верхней кривой и т. д.), и сравнить получившуюся последовательность с тестовыми последовательностями  $\{b_1, b_2, b_3, b_4\}$ , представленными в табл. 4.14, то наиболее близкая по определенному критерию (например, минимальному среднеквадратическому отклонению) тестовая последовательность и определит защитный интервал.

Таблица 4.14

**Определение защитного интервала**

Защитный интервал	Тестовые последовательности			
	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
1/4	0	4/32	6/32	7/32
1/8	4/32	0	2/32	3/32
1/16	6/32	2/32	0	1/32
1/32	7/32	3/32	1/32	0

Подчеркнем, что период повторения корреляционных кривых составляет сумму длительности OFDM-символа и используемого защитного интервала.

Синхронизация по времени в любом случае проводится по положению пика корреляционной кривой, определяющей защитный интервал. Однако, как правило, реальный вид корреляционных кривых оказывается весьма далеким от идеального (треугольника и трапеций), что затрудняет применение описанных критериев. Существенно улучшить точность определения длительности защитного интервала и момента начала OFDM-символа можно за счет интегрирования нормированных корреляционных кривых на некотором интервале.

В этом случае соотношение (4.32) видоизменяется и принимает следующий вид:

$$B_n^{(p)}[k] = 2 \sum_{m=0}^{p-1} \frac{\left| \sum_{l=1}^{\Delta_n} c_{l+k+(8192+\Delta_n)m} c_{l+8192+k+(8192+\Delta_n)m}^* \right|}{\sum_{l=1}^{\Delta_n} |c_{l+k+(8192+\Delta_n)m}|^2 + \sum_{l=1}^{\Delta_n} |c_{l+8192+k+(8192+\Delta_n)m}|^2}, \quad (4.33)$$

где  $p$  — количество периодов накопления, выбираемое, исходя из дополнительных рассуждений.

При данном способе определения, на корреляционной кривой, для которой  $\Delta = \Delta_n$ , произойдет накопление треугольника: его основание  $D$  останется неизменным, а высота  $B_n^{\max} = B_0$  окажется равной  $p$ . В то же время, для остальных кривых будет иметь место накопление трапеций, сдвинутых друг относительно друга, что приведет к образованию квазишумового уровня  $N_{qn}$ , заметно меньшего, чем  $B_0$ .

Теперь становится ясным, что увеличение  $p$ , с одной стороны, приводит ко все большей разнице между  $B_0$  и уровнем  $N_{qn}$ , а с другой — как показывает практика — к некоторому расплыванию вершины треугольника и, следовательно, ухудшению точности определения начала OFDM-символа. Причиной расплывания вершины, по-видимому, является неточность подстройки частоты опорных генераторов.

Сформулируем пятый критерий определения защитного интервала и момента начала OFDM-символа на основе анализа корреляционных функций вида (4.33).

Выбираются два пороговых значения: высокое  $B_H$  и низкое  $B_L$ . Если удастся отыскать кривую, для которой пиковое значение

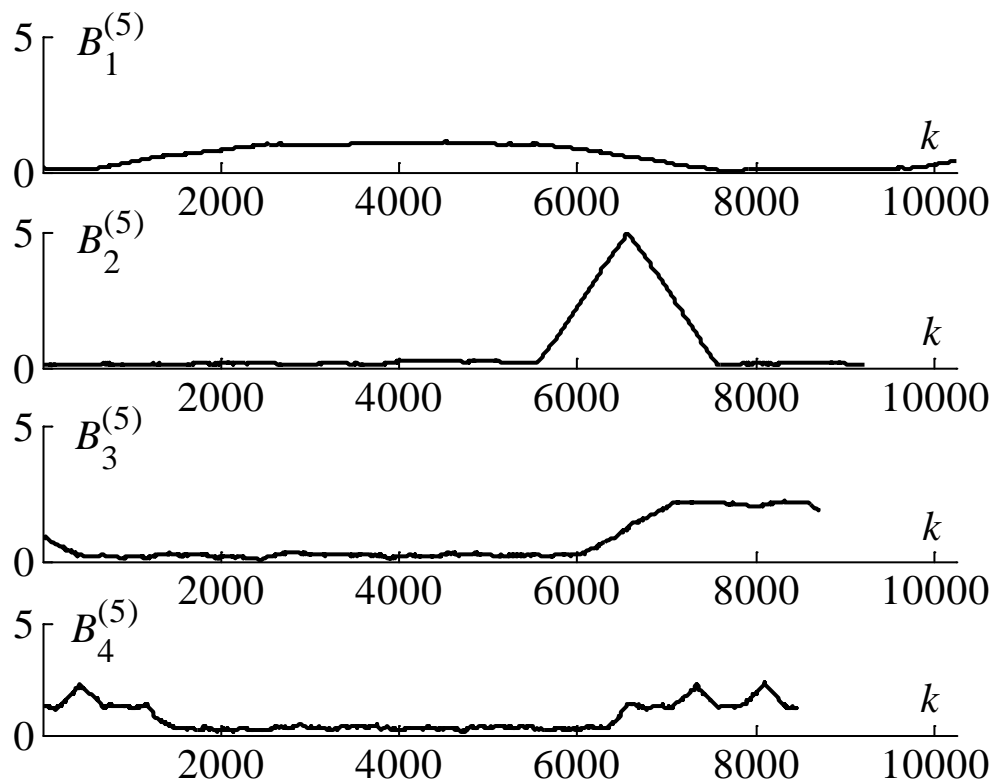
$$B_n^{(p)\max} > B_H, \quad (4.34a)$$

а для всех остальных кривых

$$B_n^{(p)\max} < B_L, \quad (4.33b)$$

то кривая, удовлетворяющая (4.34a), определяет искомое значение  $\Delta$ , а положение ее пика — начало OFDM-символа  $T_0$ .

На рис. 4.28 показано семейство корреляционных кривых, найденных из выражения (4.33) для  $p = 5$ .



**Рис. 4.28.** Семейство корреляционных кривых (4.33) для  $p = 5$

Итак, имея в распоряжении предложенные критерии, можно определить начало OFDM-символа и длительность защитного интервала. Однако при всех подходах определение  $T_0$  носит все же приближенный (грубый) характер, что связано с медленным спадом корреляционной кривой ( $p / \Delta$  на один отсчет), и, следовательно, расплыванием вершины реальной корреляционной кривой. Иными словами, положения пиков идеальной и реальной корреляционных кривых могут не совпадать. В этой связи становится понятным необходимость уточнения значения  $T_0$  путем использования дополнительной информации, содержащейся в OFDM-символе.

Будем учитывать расположение и значение непрерывных пилотных сигналов. Положим, что истинное значение максимума корреляционной функции, определяющее начало OFDM-символа, находится в пределах  $\pm N$  отсчетов. Рассмотрим  $(2N + 1)$ -элементный набор по-

последовательностей из 8 192 отсчетов каждая (что соответствует длительности OFDM-символа). Понятно, что только одна из таких последовательностей обеспечивает наилучшую (но не обязательно абсолютно точную) синхронизацию.

Произведем преобразование Фурье каждой из рассматриваемых последовательностей и построим корреляционную функцию вида

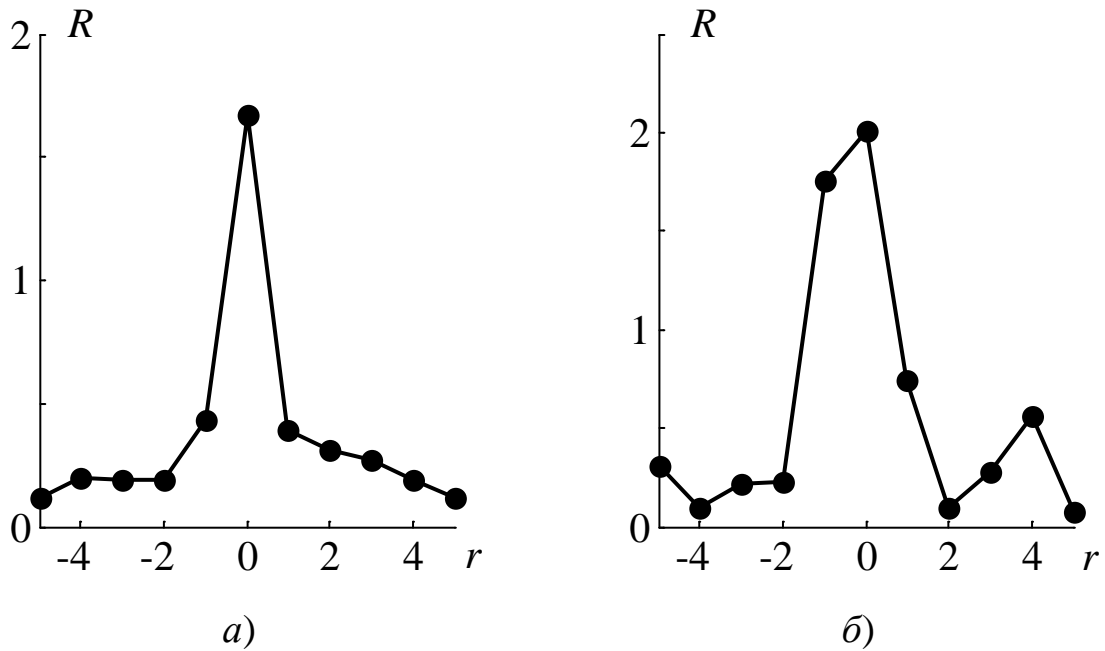
$$R[r] = \left| \sum_{k=1}^{177} \tilde{\delta}_{n_k}^{(r)} \delta_{n_k}^* \right|, \quad r = 1, \dots, 2N + 1, \quad (4.34)$$

где  $\delta_{n_k}$  — комплексное значение непрерывного пилотного сигнала на  $n_k$ -й поднесущей (выбираемой из 177-элементного набора), а  $\tilde{\delta}_{n_k}^{(r)}$  — комплексное значение соответствующей спектральной компоненты  $r$ -й последовательности.

Пик корреляционной функции (4.34) определяет последовательность с наилучшей синхронизацией и, значит,  $T_0$ . Однако, нетрудно понять, что наилучшая синхронизация не обязательно будет идеальной в силу того, что возможно частотное рассогласование работы передающего и приемного тактовых генераторов а также наличие доплеровского сдвига (очевидно, что решающим в данном случае будет доплеровский сдвиг, поэтому далее будем упоминать лишь о нем) вплоть до случая разноса равного  $1/T (0,5 + k)$ , где  $k$  — произвольное целое, когда корреляционная функция будет иметь два близких по уровню соседних пика (рис. 4.29).

Таким образом, предварять выполнение точной синхронизации с началом OFDM-символа должна процедура частотной подстройки.

Будем определять доплеровский сдвиг на основе защитного интервала в виде циклического префикса. Для этого вычислим набег фазы между защитным интервалом и его повторением в конце OFDM-символа. Тогда можно оценить доплеровский сдвиг частоты как набег фазы, отнесенный к длительности OFDM-символа, и компенсировать его.



**Рис. 4.29. Вид корреляционных функций  $R[r]$  в случае малого (а) и большого (б) фазового рассогласования тактовых генераторов**

Пусть  $u_k$  ( $k = 1, \dots, 8192$ ) — временные отсчеты анализируемого OFDM-символа, а  $g_p$  ( $p = 1, \dots, \Delta$ ) — отсчеты защитного интервала, предшествующего этому OFDM-символу. Тогда фаза комплексного числа

$$\zeta = \sum_{k=8192-\Delta+1}^{8192} u_k / \sum_{p=1}^{\Delta} g_p \quad (4.35)$$

и будет оценкой набегу фазы  $\psi$ .

Доплеровский сдвиг частоты  $f_d$  вычисляется как

$$f_d = \frac{\psi}{T_u},$$

где  $T_u$  — длительность (в секундах) полезной части OFDM-символа.

В целях компенсации доплеровского сдвига необходимо с временными отсчетами OFDM-символа произвести следующее очевидное преобразование:

$$u'_k = u_k \exp(j2\pi f_d k \Delta t),$$

где  $\Delta t = 1/f_d = 7/64$  мкс — интервал дискретизации.

Заметим, что предложенный способ позволяет определить доплеровский сдвиг с точностью до разности между поднесущими, т. е. в пределах от  $-1/(2T_u)$  до  $1/(2T_u)$ . По аналогии с временной синхронизацией можно это условно назвать “точным” определением доплеровского сдвига. Однако, в противоположность временной синхронизации, грубая оценка доплеровского сдвига ( $q/T_u$ ,  $q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) должна проводиться после точной.

Таким образом, можно описать комплексную процедуру совместного определения доплеровского сдвига и точной временной синхронизации.

Исходным предположением является грубая временная синхронизация анализируемого OFDM-символа, которая получена либо из процедуры определения защитного интервала (для первого обрабатываемого OFDM-символа), либо путем сдвига от конца предыдущего OFDM-символа на величину  $\Delta$  защитного интервала (для всех последующих OFDM-символов).

По-прежнему будем рассматривать  $(2N + 1)$ -элементный набор последовательностей из 8 192 отсчетов. Для каждой последовательности, прежде всего, необходимо произвести “точную” оценку доплеровского сдвига с последующей компенсацией.

Далее зададимся максимальным возможным значением  $q_{\max} = Q$  и введем матрицу OFDM-символов

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{-N,-Q} & S_{-N+1,-Q} & \cdots & S_{0,-Q} & \cdots & S_{N,-Q} \\ S_{-N,-Q+1} & S_{-N+1,-Q+1} & \cdots & S_{0,-Q+1} & \cdots & S_{N,-Q+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{-N,0} & S_{-N+1,0} & \cdots & S_{0,0} & \cdots & S_{N,0} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{-N,Q} & S_{-N+1,Q} & \cdots & S_{0,Q} & \cdots & S_{N,Q} \end{pmatrix} \quad (4.36)$$

Центральная строка  $S_{-N,0}, \dots, S_{N,0}$  этой матрицы совпадает с рассматриваемым  $(2N + 1)$ -элементным набором, подвергнутым компенсации “точного” доплеровского сдвига, а элементы каждого столбца образованы из соответствующего элемента центральной строки посредством

дополнительного сдвига по частоте на  $(k - Q - 1)/T_u$ , где  $k$  — номер строки, т. е. числа  $1, \dots, 2Q + 1$  за исключением центрального значения  $Q + 1$ .

Матрице  $\mathbf{S}$  сопоставим матрицу  $\mathbf{F}$ , элементы которой представляют собой преобразование Фурье соответствующих элементов матрицы  $\mathbf{S}$ , т. е.  $\mathbf{F}$  — это матрица спектров OFDM-символов.

Для каждого элемента матрицы  $\mathbf{F}$  вычислим корреляцию в частотной области шаблона непрерывных пилотных сигналов:

$$R[t, v] = \left| \sum_{k=1}^{177} \tilde{\delta}_{n_k}^{(t,v)} \delta_{n_k}^* \right|, \quad t = 1, \dots, 2N + 1, \quad v = 1, \dots, 2Q + 1, \quad (4.37)$$

где, как и раньше,  $\delta_{n_k}$  — комплексное значение непрерывного пилотного сигнала на  $n_k$ -й поднесущей (выбираемой из 177-элементного набора), а  $\tilde{\delta}_{n_k}^{(t,v)}$  — комплексное значение соответствующей спектральной компоненты OFDM-символа  $S_{t,v}$ .

На рис. 4.30 показана корреляционная функция  $R[t, v]$ , построенная на прямоугольной дискретной области  $\times 5$ , соответствующей матрице  $\mathbf{F}$  с параметрами  $N = 2, Q = 2$ .

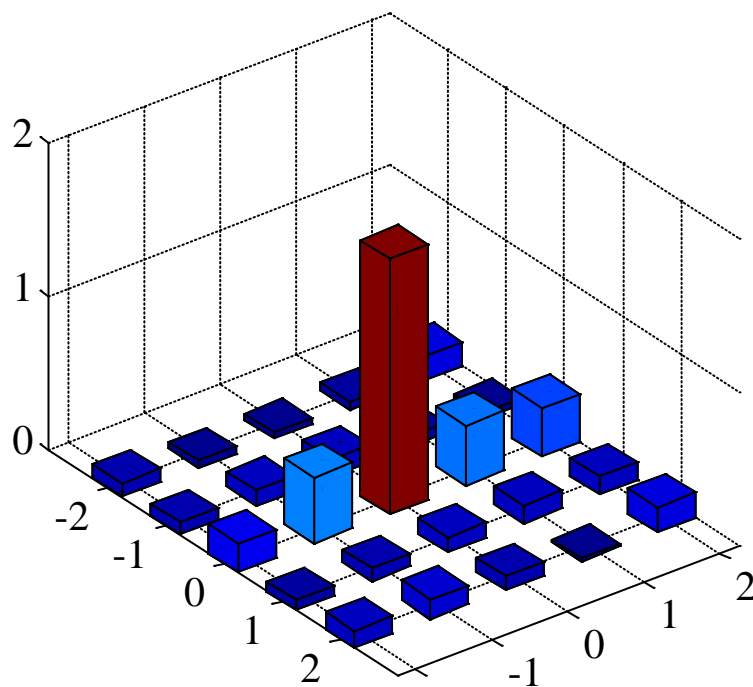


Рис. 4.30. Корреляционная функция  $R[t, v]$  для  $N = 2, Q = 2$

Координаты  $(t_0, \nu_0)$  максимального значения  $R$  определяют точную временную синхронизацию:  $T_0 \rightarrow T_0 + (t_0 - N - 1)$ , и “грубый” доплеровский сдвиг:  $q = \nu_0 - Q - 1$ .

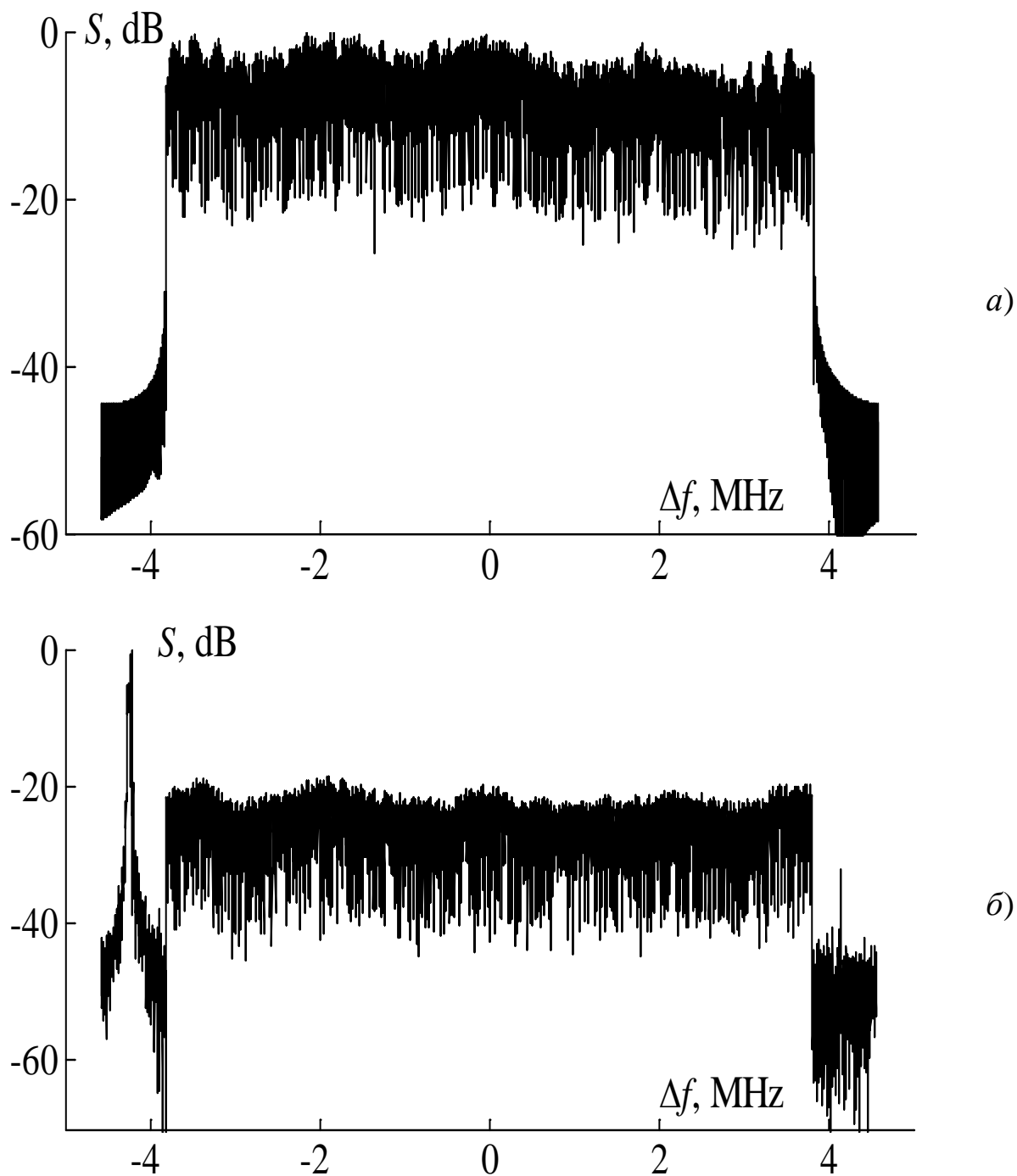
Очевидно, для последующей работы алгоритма приема сигналов DVB-T необходима также информация о том, какой шаблон рассредоточенных пилотов используется в данном OFDM-символе. Учитывая, что в DVB-T предусмотрено 4 циклически повторяющихся с каждым OFDM-символом шаблона рассредоточенных пилотов, достаточно определить номер шаблона в первом исследуемом OFDM-символе. Для этого можно построить корреляционную функцию вида:

$$H[h] = \left| \sum_{k=1}^{524} \tilde{\delta}_{n_k}^{(h)} \delta_{n_k}^* \right|, \quad h = 0, \dots, 3, \quad (4.38)$$

где  $\delta_{n_k}$  — комплексное значение распределенного пилотного сигнала на  $n_k$ -й поднесущей (выбираемой из 524-элементного набора), а  $\tilde{\delta}_{n_k}^{(h)}$  — комплексное значение соответствующей спектральной компоненты OFDM-символа. В последующих процедурах точной синхронизации с началом OFDM-символа можно использовать шаблон распределенных пилотов для повышения пика корреляции (4.37).

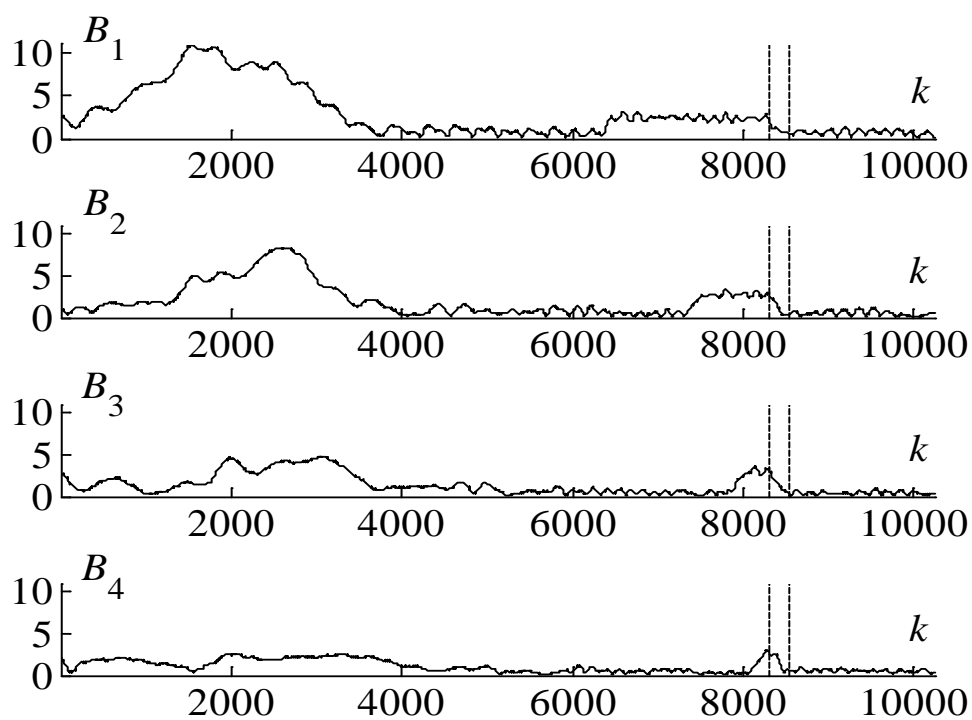
Получение точной временной синхронизации всех последующих OFDM-символов производится на основе лишь последнего этапа (т. е. без процедуры грубой синхронизации), причем значение  $N$ , как показывает опыт, достаточно положить равным единице.

Завершая обсуждение методов решения задачи синхронизации, обратим внимание на необходимость предварительной фильтрации всей последовательности  $\{c_k\}$ . Это обусловлено ухудшением свойств корреляционных функций  $B_n$  и  $B_n^{(5)}$  при наличии достаточно сильных помех, попадающих в полосу частот приемника.

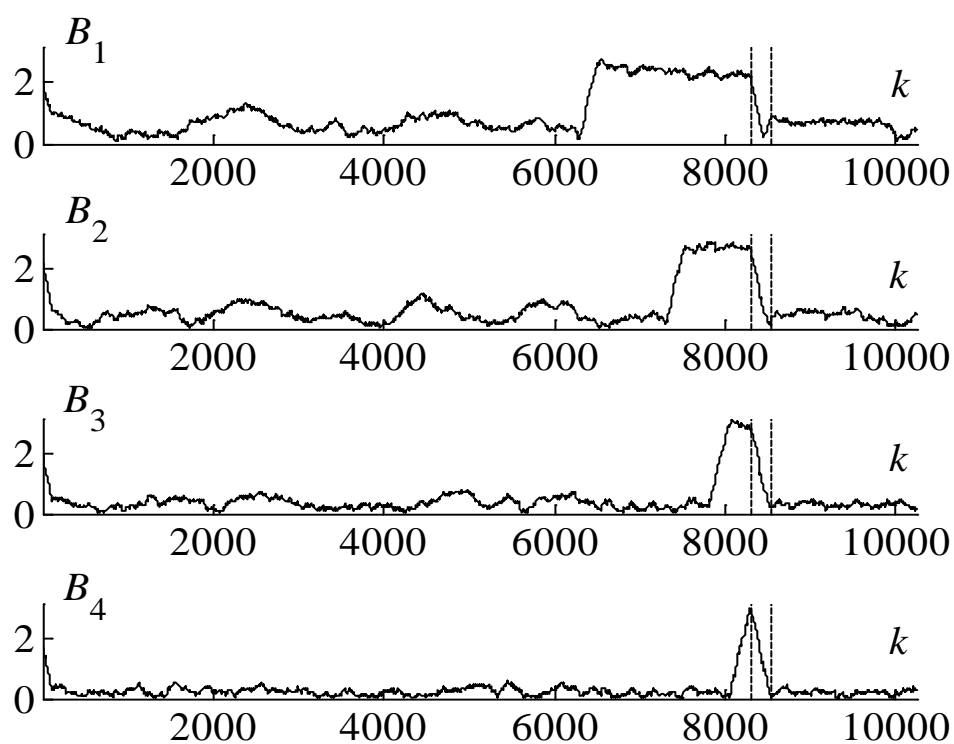


**Рис. 4.31. Спектры сигнала без помехи (а) и с помехой (б)**

На рис. 4.31 показаны спектры двух различных сигналов, в одном из которых присутствует сравнимая по мощности помеха, а на рис. 4.32 приведен соответствующий вид корреляционных функций  $B_n$  для сигнала с помехой без фильтрации а) и с фильтрацией б).



a)



б)

**Рис. 4.31. Вид корреляционных функций  $B_n$  для сигнала с помехой без фильтрации (а) и с фильтрацией (б)**

Следующим блоком алгоритма обработки сигналов DVB-T (рис. 4.26) является оценка текущего состояния канала, называемая термином *эквалайзинг*. Эквалайзер (equalizer) — это устройство, позволяющее осуществить оценку текущей частотной характеристики канала на основе известных значений пилотных сигналов. Система DVB-T располагает двумя типами пилотных сигналов: непрерывные и рассредоточенные, причем независимо от номера OFDM-символа в OFDM-кадре общее количество пилотных сигналов постоянно и равно 701. Несмотря на то, что по отдельности непрерывные и рассредоточенные пилотные сигналы могут использоваться для разных целей, при построении эквалайзера они должны использоваться совместно. Следует лишь учесть четыре возможных варианта расположения рассредоточенных пилотных сигналов в зависимости от номера OFDM-символа. Существует множество алгоритмов построения эквалайзера, которые рассчитаны на работу с теми или иными сигналами в разных условиях. Чем сложнее условия распространения сигнала (наличие межсимвольной интерференции в исходном сигнале, многолучевости в канале и др.), тем сложнее эквалайзеры и их реализация более трудоемка.

Как показывают расчеты, благодаря тому, что сигналы системы DVB-T сформированы таким образом, чтобы противостоять многолучевости, даже использование линейного эквалайзера позволяет получать приемлемые результаты. В этом случае считается, что частотная характеристика канала меняется линейно от одной пилотной поднесущей до ближайшей следующей, причем сами пилоты искажены лишь частотной характеристикой канала, т. е. отсутствует шумовая составляющая. Тогда опорный сигнал для любой информационной поднесущей можно получить, основываясь лишь на значении двух ближайших пилотов (напомним, что первая и последняя поднесущие сигнала — пилотные):

$$s_m = [(m - n)s_k + (k - m)s_n] / (k - n),$$

где  $s_m$  — вычисляемый опорный сигнал поднесущей с номером  $m$ ;  $n$  и  $k$  — номера ближайших пилотных поднесущих соответственно слева и справа (т. е.  $n < m < k$ );  $s_n$  и  $s_k$  — значения соответствующих пилотов.

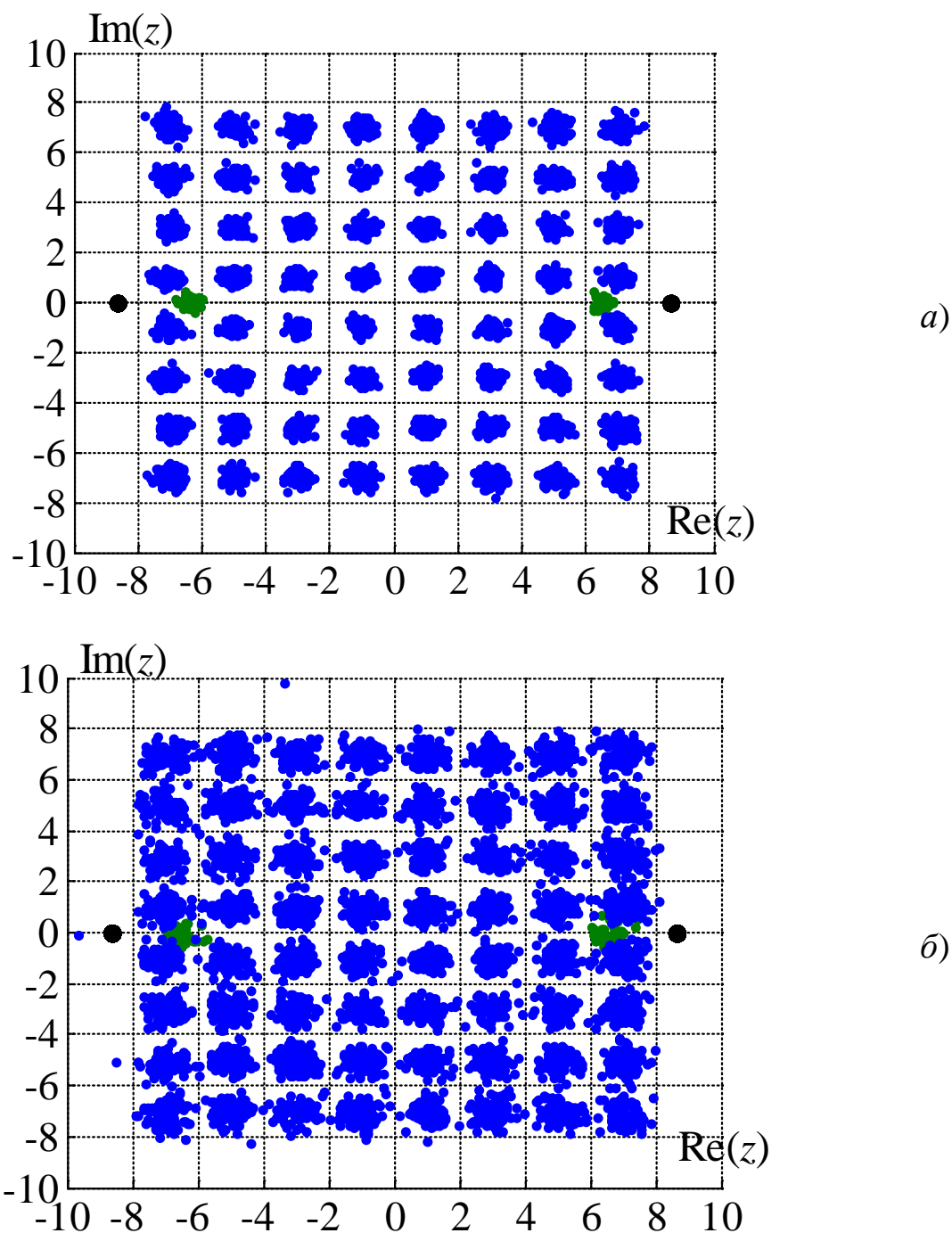


Рис. 4.32. Спектры OFDM-символов для неиерархической модуляции КАМ-64 с высоким (а) и низким (б) отношениями сигнал/шум

Очевидно, такой эквалайзер не учитывает возможность доплеровского смещения частоты и неточности настройки на центральную частоту. Поэтому необходимо для каждого OFDM-символа повторять процедуры синхронизации, описанные выше.

В качестве иллюстрации работоспособности описанного линейного эквалайзера на рис. 4.32 показаны комплексные значения спектральных отсчетов OFDM-символов после эквалайзинга для неиерархической модуляции КАМ-64 для сигналов с различным отношением сигнал/шум. При этом отчетливо видны 64 облака полезных данных, два облака TPS-данных, наконец, две жирные точки — пилоты.

## Вопросы и задания

1. Какой смысл имеют понятия внутреннего и внешнего кодирования?
2. Перечислите функциональные блоки, входящие в состав канального кодера системы DVB-T.
3. Почему используемые в системе DVB-T сигналы называются ортогональными?
4. Что такое модуляционная карта?
5. Каково реальное количество поднесущих, используемых в режимах 2К и 8К? Сколько из них используется для передачи полезной и служебной информации?
6. Сравните спектральную маску, применяемую в системе DVB-T, с масками, применяемыми в других системах цифрового телевидения, в частности, ATSC.
7. В чём сравнительные преимущества и недостатки свёрточного и блочного кодирования?
8. Какая служебная информация содержится в TPS-сигналах?
9. Для чего служит циклический префикс, вставляемый в OFDM-символ? Какова его относительная величина и чем она обусловлена?
10. Что такое иерархический режим модуляции? Каким образом он формируется?
11. Каковы преимущества и недостатки неравномерного сигнального созвездия?
12. Для чего необходимо выкалывание? Как оно реализуется?
13. На чём основана возможность символьной синхронизации OFDM-сигналов?
14. В чём различие точной и грубой синхронизации OFDM-сигналов?
15. Проведите поиск схем эквалайзинга, учитывающих возможность доплеровского смещения частоты.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. EN 300 744: “Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television”. DVB Document, June, 2004.
2. EN 50083-9 CENELEC: Cabled Distribution System for Television, Sound and Interactive Multimedia Signals; Part 9: Interfaces for CATV/SMATV Headends and similar Professional Equipment.
3. User Requirements for Terrestrial Digital Broadcasting Services. DVB document A004, Dec. 1994.
4. EN 300 468: Digital Video Broadcasting (DVB); Specification for Service Information (SI) in DVB systems.
5. *Локшин Б. А.* Цифровое вещание: от студии к телезрителю / Б. А. Локшин. — М. : Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001. — 447 с.
6. *Скляр Б.* Цифровая связь / Б. Скляр. — М. : Вильямс, 2003. — 1104 с.
7. *Макаров С. Б.* Передача дискретных сообщений по радиоканалам с ограниченной полосой пропускания / С. Б. Макаров, И. А. Цикин. — М. : Радио и связь, 1988. — 304 с.
8. *Прокис Дж.* Цифровая связь / Дж. Прокис. — М. : Радио и связь, 2000. — 800 с.
9. *Биккенин Р. Р.* Теория электрической связи : учеб. пособие для студ. высших учебных заведений / Р. Р. Биккенин, М. Н. Чесноков. — М. : Академия, 2010. — 336 с.
10. Interfaces for CATV / SMATV Headends and Similar Professional Equipment. Document A010.
11. ISO / IEC 13818-1. Information technology — Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information: Systems.
12. *Долуханов М.П.* Распространение радиоволн / М.П. Долуханов. — М. : Связь, 1972. — 336 с.
13. Регламент радиосвязи. Международный союз электросвязи. 2004.
14. Постановление Правительства РФ № 985 от 13.12.2009 “О Федеральной целевой программе “Развитие телерадиовещания в 2009–2015 гг.”

## Приложение 1

В табл. П.1 представлен краткий перечень стандартов и других существующих нормативных документов, касающихся организации услуг цифрового вещания в стандарте DVB.

Таблица. П.1

### Перечень нормативных документов DVB

Раздел	Сокращение	Номер и название	Описание
Цифровое спутниковое телевидение	DVB-S	EN 300 421 “Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services”	Канальное кодирование, модуляция и формирование кадровой структуры для услуг спутникового вещания, передаваемых в диапазоне 11/12 ГГц
Цифровое спутниковое телевидение	DVB-S2	TR 101 198 “Implementation of Binary Phase Shift Keying (BPSK) modulation in DVB satellite transmission systems”	Руководство по внедрению модуляции ФМ-2 (BPSK) для системы спутникового вещания
Цифровое спутниковое телевидение	DVB-S2	EN 302 307 “Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications”	Цифровое спутниковое телевидение второго поколения: канальное кодирование и модуляция для вещательных, интерактивных услуг, сбора новостей и иных приложений
Цифровое спутниковое телевидение	DVB-S2	TR 102 376 “User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Ga-	Руководство по реализации системы спутникового вещания второго поколения: вещательные, интерактивные услуги, сбор новостей и иные

		thering and other broadband satellite applications”	приложения
Цифровое спутниковое телевидение	DVB-S2	TS 102 441 “DVB-S2 Adaptive Coding and Modulation for Broadband Hybrid Satellite Dialup Applications”	Спецификация по адаптивному кодированию и модуляции для вещательных приложений системы DVB-S2
Цифровое кабельное вещание	DVB-C	EN 300 429 “Framing structure, channel coding and modulation for cable systems”	Структура кадра, канальное кодирование и модуляция для системы кабельного цифрового телевидения
Цифровое кабельное вещание	DVB-C2	DVB BlueBook A138 “Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital transmission system for cable systems (DVB-C2)”	Цифровое кабельное телевидение второго поколения (система DVB-C2): структура кадра, канальное кодирование и модуляция.
Цифровое спутниковое телевидение	DVB-CS	EN 300 473 “DVB Satellite Master Antenna Television (SMATV) distribution systems”	Антенны коллективного спутникового приема (SMATV) для систем DVB
Цифровое спутниковое телевидение	DVB-CS	TS 101 964 “Control Channel for SMATV/MATV distribution systems; Baseline Specification”	Базовая спецификация по использованию управляющего канала для антенн коллективного приема (SMATV / MATV)
Цифровое спутниковое телевидение	DVB-CS	TR 102 252 “Guidelines for Implementation and Use of the Control Channel for	Руководство по внедрению управляющего канала для антенн коллективного приема SMATV /

		SMATV / MATV distribution systems”	MATV
Цифровое наземное телевидение	DVB-T	EN 300 744 “Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television”	Структура кадра, канальное кодирование и модуляция для системы цифрового наземного вещания (основной стандарт DVB-T)
Цифровое наземное телевидение	DVB-T	TR 101 190 “Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects”	Руководство по реализации сетей цифрового наземного телевидения: аспекты, связанные с передачей данных
Цифровое наземное телевидение	DVB-T	TS 101 191 “Megafame for Single Frequency Network (SFN) synchronization”	Стандарт по структуре мегакадра, необходимого для синхронизации единых одночастотных сетей
Цифровое наземное телевидение	DVB-T2	DVB BlueBook A122 “Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)”	Система наземного цифрового телевидения второго поколения (DVB-T2): структура кадра, канальное кодирование и модуляция.
Цифровое наземное телевидение	DVB-T2	DVB BlueBook A133 “Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)”	Руководство по реализации системы наземного цифрового телевидения второго поколения (DVB-T2)
Цифровое наземное теле-	DVB-T2	DVB BlueBook A136 “Modulator	Интерфейс T2-MI для модулятора системы на-

вещание		Interface (T2-MI) for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)”	земного цифрового теле-вещания второго поколения (DVB-T2)
Цифровое мобильное телевещание	DVB-H	EN 302 304 “Transmission system for handheld terminals”	Система передачи для мобильных терминалов
Цифровое мобильное телевещание	DVB-H	TR 102 377 “Implementation guidelines for DVB handheld services”	Руководство по реализации системы мобильного телевещания
Транспортные функции	DVB-SI	EN 300 468 “Specification for Service Information (SI) in DVB systems”	Спецификация по организации пользовательской информации (SI) для системы DVB
Транспортные функции	DVB-SI	TR 101 211 “Guidelines on implementation and usage of Service Information (SI)”	Руководство по реализации и использованию пользовательской информации (SI)
Транспортные функции	DVB-SI	EN 300 472 “Specification for conveying ITU-R System B Teletext in DVB bitstreams”	Спецификация по системе телетекста в потоках данных системы DVB
Транспортные функции	DVB-SI	EN 301 775 “Standard for conveying VBI data in DVB bitstreams”	Стандарт по передаче информации VBI в потоках данных системы DVB
Транспортные функции	DVB-SI	TS 102 823 “Carriage of synchronized auxiliary data in DVB transport streams”	Передача дополнительных синхронизированных данных в транспортном потоке системы DVB

Передача данных		DVB-DATA	EN 301 192 “Specification for data broadcasting”	Спецификация по передаче данных в системе цифрового телевидения
Передача данных		DVB-DATA	TR 101 202 “Specification for data broadcasting; Guidelines for the use of EN 301 192”	Руководство (дополнительно к документу EN 301 192) по передаче данных в системе цифрового телевидения
Общие вопросы	во-	DVB-SSU	TS 102 006 “Specification for System Software Update in DVB Systems”	Спецификация по улучшению программной составляющей пользовательского оборудования в системе DVB
Общие вопросы	во-	DVB-GSE	TS 102 606 “Generic Stream Encapsulation (GSE) Protocol”	Описание протокола GSE инкапсулирования групповых потоков
Общие вопросы	во-	DVB-GSE	DVB BlueBook A134 “Generic Stream Encapsulation (GSE) Implementation Guidelines”	Руководство по использованию протокола GSE инкапсулирования групповых потоков
Передача данных		DVB-MPEG	TS 102 005 “Implementation Guidelines for the use of Audio Visual Content in DVB services delivered over IP”	Руководство по передаче видео- и звуковой информации по сетям IP
Общие вопросы	во-	DVB-SUB	EN 300 743 “Subtitling systems”	Стандарт по субтитрам
Общие вопросы	во-	DVB-NIP	ETS 300 802 “Network-independent protocols for DVB interactive services”	Независимые протоколы для интерактивных услуг системы DVB
Общие вопросы	во-	DVB-NIP	TR 101 194 “Guidelines for implemen-	Руководство по разработке и использованию

		tation and usage of the specification of network independent protocols for DVB interactive services”	независимых протоколов для интерактивных услуг системы DVB
Цифровое кабельное телевидение	DVB-RCC	ES 200 800 “Interaction channel for Cable TV distribution systems (CATV)”	Интерактивный канал для системы распределённого кабельного цифрового телевидения
Цифровое кабельное телевидение	DVB-RCC	TR 101 196 “Interaction channel for Cable TV distribution systems (CATV). Guidelines for the use of ETS 300 800”	Интерактивный канал для системы распределённого кабельного цифрового телевидения. Руководство по использованию документа ETS 300 800
Общие вопросы	DVB-RCG	EN 301 195 “Interaction channel through the Global System for Mobile Communications (GSM)”	Построение интерактивного канала при помощи системы мобильной связи стандарта GSM
Цифровое наземное телевидение	DVB-RCT	EN 301 958 “Digital Video Broadcasting (DVB); Specification of interaction channel for digital terrestrial TV including multiple access OFDM”	Спецификация для интерактивного канала системы наземного цифрового телевидения, включая системы OFDM с многопользовательским доступом
Общие вопросы	DVB-RCGPRS	DVB BlueBook A073r1 “Interaction channel through General Packet Radio System (GPRS)”	Создание интерактивного канала при помощи системы GPRS

Обеспечение информации безопасности	DVB-CPCM	TS 102 825-1 “Content Protection and Copy Management Specification; Part 1: CPCM Abbreviations, Definitions and Terms”	Первый из большой группы стандартов, посвященных защите информации и доступу в сетях DVB, объединенных общим названием DVB-CPCM
Обеспечение информации безопасности	DVB-CI	EN 50221 “Common Interface Specification for Conditional Access and other Digital Video Broadcasting Decoder Applications”	Спецификация общего интерфейса (CI) для систем условного доступа, а также других приложений цифрового телевидения
Обеспечение информации безопасности	DVB-CI	TR 206 001 “Guidelines for implementation & use of the Common Interface for DVB Decoder Applications”	Руководство по использованию общего интерфейса для приложений цифрового телевидения
Обеспечение информации безопасности	DVB-CI	TS 101 699 “Extensions to the Common Interface Specification”	Расширение к спецификации общего интерфейса
Общие вопросы	DVB-PI	TR 101 891 “Digital Video Broadcasting (DVB) Professional Interfaces: Guidelines for the implementation and usage of the DVB Asynchronous Serial Interface (ASI)”	Руководство по использованию асинхронного последовательного интерфейса ASI для системы DVB
Общие вопросы	DVB-IRDI	TS 102 201 “Interfaces for DVB IRDs”	Интерфейсы абонентских устройств для системы цифрового телевидения
Передача	DVB-IPTV	TR 102 033 “Archi-	Описание механизмов

данных		tectural Framework for the Delivery of DVB Services over IP-based Networks”	доставки вещательных услуг по IP-сетям
Передача данных	DVB-IPDC	TR 102 469 “IP Datacast over DVB H: Architecture»	Архитектура системы DVB-H с передачей данных по IP-сетям
Передача данных	DVB-IPDC	TS 102 470-1 “IP Datacast over DVB-H: PSI/SI”	Пользовательская информация (PSI/SI) для системы DVB-H с передачей данных по IP-сетям
Передача данных	DVB-IPDC	TS 102 471 “IP Datacast over DVB-H: Electronic Service Guide (ESG)”	Электронный гид услуг (ESG) для системы DVB-H с передачей данных по IP-сетям (спецификация)
Передача данных	DVB-IPDC	DVB Bluebook A099 “IP Datacast over DVB-H: Electronic Service Guide (ESG)”	Электронный гид услуг (ESG) для системы DVB-H с передачей данных по IP-сетям (“голубая книга”)
Передача данных	DVB-IPDC	TS 102 592 “IP Datacast over DVB-H: Electronic Service Guide (ESG) Implementation Guidelines”	Руководство по реализации электронного гида услуг (ESG) для системы DVB-H с передачей данных по IP-сетям (спецификация)
Передача данных	DVB-IPDC	DVB Bluebook A112-1 “IP Datacast over DVB-H: Electronic Service Guide (ESG) Implementation Guidelines”	Руководство по реализации электронного гида услуг (ESG) для системы DVB-H с передачей данных по IP-сетям (“голубая книга”)
Передача данных	DVB-IPDC	TR 102 824 “Remote Management and Firmware Update System for DVB IP Services”	Удаленное управление и обновление устройств, работающих в системе DVB, совмещённой с IP-сетью

Передача данных	DVB-IPDC	TS 102 472 “IP Datacast over DVB-H: Content Delivery Protocols”	Протокол CDP доставки контента для системы DVB-H (спецификация)
Передача данных	DVB-IPDC	TS 102 591 “IP Datacast over DVB-H: Content Delivery Protocols (CDP) Implementation Guidelines»	Протокол CDP доставки контента для системы DVB-H (руководство пользователя)
Передача данных	DVB-IPDC	TS 102 474 “IP Datacast over DVB-H: Service Purchase and Protection”	Услуги покупок при передаче данных в системе DVB-H, совмещённой с IP-сетью
Передача данных	DVB-IPDC	TS 102 611 “IP Datacast over DVB-H: Implementation Guidelines for Mobility”	Руководство по обеспечению мобильности в системе DVB-H, совмещённой с IP-сетью
Передача данных	DVB-IPDC	TS 102 832 “IP Datacast over DVB-H: Notification Framework”	Уведомления в системе DVB-H, совмещённой с IP-сетью
Обеспечение информационной безопасности	DVB-CSA	ETR 289 “Support for use of scrambling and Conditional Access (CA) within digital broadcasting system”	Поддержка использования системы условного доступа и скремблирования в цифровом телевидении
Обеспечение информационной безопасности	DVB-SIM	TS 101 197 “DVB SimulCrypt; Part 1: Head-end architecture and synchronization”	Система DVB SimulCrypt: архитектура центрального адаптера и синхронизации
Обеспечение информационной безо-	DVB-SIM	TS 103 197 “Head-end implementation of SimulCrypt”	Руководство по реализации центрального адаптера в системе DVB Si-

пасности			mulCrypt
Обеспечение информационной безопасности	DVB-SIM	TR 102 035 “Implementation Guidelines of the DVB SimulCrypt Standard”	Руководство по использованию нескольких систем условного доступа по технологии SimulCrypt
Измерения	DVB-M	TR 101 290 “Measurement guidelines for DVB systems”	Руководство по проведению измерений в сетях цифрового телевидения
Измерения	DVB-M	TR 101 291 “Usage of DVB test and measurement signaling channel (PID 0x001D) embedded in an MPEG-2 Transport Stream (TS)”	Использование специального потока (PID 0x001D) для проведения тестов и измерений в транспортном потоке MPEG-2
Измерения	DVB-M	TS 102 032 “SNMP MIB for test and measurement applications in DVB systems”	MIB SNMP для проведения тестов и измерений в системе DVB

## Приложение 2

В табл. представлены значения индикаторов и показателей эффективности, соответствующие различным срокам реализации Федеральной программы развития цифрового телевизионного вещания в Российской Федерации

Таблица П.2

### Целевые индикаторы и показатели эффективности развития Программы

Индикаторы и показатели	Количественные значения по годам							
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015.
Численность населения Российской Федерации, не охваченного телевещанием, тыс. чел.	1 600	1 600	1 600	1 200	1 200	600	–	–
Доля населения Российской Федерации, имеющего возможность приема обязательных телерадиоканалов, %	33	40	60	80	99	99,5	100	100
Площадь территории субъектов Российской Федерации, охваченных наземным цифровым вещанием обязательных телерадиоканалов, тыс. кв. км	–	–	3189	5848	9768	17103	17103	17103
Доля населения Российской Федерации, имеющего возможность приёма 20 телевизионных каналов свободного доступа, %	–	–	–	–	25	50	75	100
Доля населения Российской Федерации,	–	–	15	30	75	98,8	98,8	98,8

имеющего возможность приёма цифровых эфирных телевизионных каналов, %								
Количество субъектов Российской Федерации, охваченных цифровым телевизионным вещанием	–	–	12	32	69	83	83	83
Доля населения Российской Федерации, не охваченного региональным телевизионным вещанием, %	15	13	10	6	3	1,2	1,2	1,2
Доля населения Российской Федерации, охваченного радиовещанием заданного качества, %	70	70	70	75	80	90	95	100
Доля населения Российской Федерации, охваченного телерадиооповещением о чрезвычайных ситуациях, %	85	87	90	94	97	98,8	98,8	100
Количество зарегистрированных сетей цифрового вещания первого мультиплекса	–	–	–	12	32	69	83	83
Количество введённых в эксплуатацию:								
а) объектов опытных зон цифрового вещания	–	73	–	–	–	–	–	–
б) объектов сети цифрового вещания первого мультиплекса	–	–	2089	1220	1721	1470	–	–
в) объектов инфраструктуры (реконструкция, техническое перевооружение, замена ан-	–	–	–	–	216	223	151	101

тенно-мачтовых сооружений и башен)								
г) объектов инфраструктуры (строительство новых антенно-мачтовых сооружений)	–	–	–	–	75	115	60	50
д) объектов инфраструктуры (реконструкция и замена антенно-фидерных устройств)	–	–	–	–	268	256	127	80
е) объектов энергоснабжения инфраструктуры телерадиовещания	–	–	–	–	199	209	110	106
ж) центров формирования мультиплексов	–	–	21	17	26	15	–	–
з) объектов сети цифрового вещания второго и третьего мультиплексов	–	–	–	–	–	4520	5180	3300
и) объектов сети цифрового вещания дополнительных мультиплексов	–	–	–	–	–	28	168	44
к) объектов сети цифрового вещания для телевидения высокой чёткости и мобильного телевидения	–	–	2	4	16	28	150	40
л) объектов сети мощного цифрового радиовещания	–	–	–	–	60	63	57	40
м) объектов сети УКВ-ЧМ-вещания	–	–	–	–	–	84	168	118

Гельгор Александр Леонидович  
Попов Евгений Александрович

## СИСТЕМА ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ СТАНДАРТА DVB-T

Учебное пособие

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2; 953005 – учебная литература

---

Подписано к печати	Формат 60x84/16.	Печать цифровая.
Усл. печ. л. 12,94	. Уч.-изд. л.	. Тираж экз. Заказ

---

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,  
в Цифровом типографском центре  
Издательства Политехнического университета.  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
Тел.: (812) 550-40-14.  
Тел./факс: (812) 297-57-76.