

МСЭ-Т

СЕКТОР СТАНДАРТИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОСВЯЗИ МСЭ

J.83

(12/2007)

СЕРИЯ J: КАБЕЛЬНЫЕ СЕТИ И ПЕРЕДАЧА
СИГНАЛОВ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ И ЗВУКОВЫХ
ПРОГРАММ И ДРУГИХ МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ
СИГНАЛОВ

Цифровая передача телевизионных сигналов

**Цифровые многопрограммные системы для
кабельного распределения сигналов при
предоставлении услуг телевизионного,
звукового вещания и передачи данных**

Рекомендация МСЭ-Т J.83

Рекомендация МСЭ-Т J.83

Цифровые многопрограммные системы для кабельного распределения сигналов при предоставлении услуг телевизионного, звукового вещания и передачи данных

Резюме

В Рекомендации МСЭ-Т J.83 даны определения структуры формирования кадров, кодирования каналов и модуляции для цифровых многопрограммных сигналов, распределяемых по кабельным сетям, при предоставлении услуг телевизионного, звукового вещания и передачи данных.

Настоящая Рекомендация содержит четыре приложения (Приложения А, В, С и D), в которых приводятся технические данные для четырех цифровых телевизионных кабельных систем, представленных на рассмотрение МСЭ-Т. Это отражает тот факт, что ряд систем цифрового кабельного телевидения был разработан и временно введен в эксплуатацию до работ по стандартизации, проведенных МСЭ.

При развертывании новых цифровых многопрограммных услуг в существующих и будущих кабельных сетях данная Рекомендация предлагает использовать одну из систем, для которых информация по структуре формирования кадров, кодированию каналов и модуляции приведена в Приложениях А, В, С и D.

Хронологическая справка

Издание	Рекомендация	Утверждение	Исследовательская комиссия	Уникальный идентификатор*
1.0	МСЭ-Т J.83	24.10.1995 г.	9-я	11.1002/1000/1366
1.1	МСЭ-Т J.83 (1995) Попр. 1	18.10.1996 г.	9-я	11.1002/1000/3914
2.0	МСЭ-Т J.83	22.04.1997 г.	9-я	11.1002/1000/4012
2.1	МСЭ-Т J.83 (1997) Попр. 1	29.11.2006 г.	9-я	11.1002/1000/8928
3.0	МСЭ-Т J.83	14.12.2007 г.	9-я	11.1002/1000/9301

* Для получения доступа к Рекомендации наберите в адресном поле вашего браузера URL: <http://handle.itu.int/>, после которого следует уникальный идентификатор Рекомендации. Например, <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11830-en>.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Международный союз электросвязи (МСЭ) является специализированным учреждением Организации Объединенных Наций в области электросвязи и информационно-коммуникационных технологий (ИКТ). Сектор стандартизации электросвязи МСЭ (МСЭ-Т) – постоянный орган МСЭ. МСЭ-Т отвечает за изучение технических, эксплуатационных и тарифных вопросов и за выпуск Рекомендаций по ним в целях стандартизации электросвязи на всемирной основе.

На Всемирной ассамблее по стандартизации электросвязи (ВАСЭ), которая проводится каждые четыре года, определяются темы для изучения исследовательскими комиссиями МСЭ-Т, которые в свою очередь вырабатывают Рекомендации по этим темам.

Утверждение Рекомендаций МСЭ-Т осуществляется в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции 1 ВАСЭ.

В некоторых областях информационных технологий, которые входят в компетенцию МСЭ-Т, необходимые стандарты разрабатываются на основе сотрудничества с ИСО и МЭК.

ПРИМЕЧАНИЕ

В настоящей Рекомендации термин "администрация" используется для краткости и обозначает как администрацию электросвязи, так и признанную эксплуатационную организацию.

Соблюдение положений данной Рекомендации осуществляется на добровольной основе. Однако данная Рекомендация может содержать некоторые обязательные положения (например, для обеспечения функциональной совместимости или возможности применения), и в таком случае соблюдение Рекомендации достигается при выполнении всех указанных положений. Для выражения требований используются слова "следует", "должен" (shall) или некоторые другие обязывающие выражения, такие как "обязан" (must), а также их отрицательные формы. Употребление таких слов не означает, что от какой-либо стороны требуется соблюдение положений данной Рекомендации.

ПРАВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

МСЭ обращает внимание на вероятность того, что практическое применение или выполнение настоящей Рекомендации может включать использование заявленного права интеллектуальной собственности. МСЭ не занимает какую бы то ни было позицию относительно подтверждения, действительности или применимости заявленных прав интеллектуальной собственности независимо от того, доказываются ли такие права членами МСЭ или другими сторонами, не относящимися к процессу разработки Рекомендации.

На момент утверждения настоящей Рекомендации МСЭ не получил извещения об интеллектуальной собственности, защищенной патентами, которые могут потребоваться для выполнения настоящей Рекомендации. Однако те, кто будет применять Рекомендацию, должны иметь в виду, что вышесказанное может не отражать самую последнюю информацию, и поэтому им настоятельно рекомендуется обращаться к патентной базе данных БСЭ по адресу <http://www.itu.int/ITU-T/ipr/>.

© ITU 2019

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1 Сфера применения	1
2 Справочные документы	1
3 Термины и определения	2
4 Условные обозначения и сокращения.....	2
4.1 Условные обозначения.....	2
4.2 Сокращения.....	2
5 Цифровые многопрограммные системы для распределения по кабельным сетям.....	4
Приложение А – Цифровая многопрограммная система А.....	5
А.1 Введение	5
А.2 Спецификация.....	5
Приложение В – Цифровая многопрограммная система В.....	6
В.1 Введение	6
В.2 Концепция кабельной системы	6
В.3 Транспортный уровень MPEG-2	7
В.4 Формирование кадров транспортного потока MPEG-2	7
В.5 Упреждающая коррекция ошибок	11
В.6 Модуляция и демодуляция	24
Приложение С – Цифровая многопрограммная система С.....	26
С.1 Введение	26
С.2 Концепция кабельной системы	26
С.3 Транспортный уровень MPEG-2	27
С.4 Структура формирования кадров.....	27
С.5 Канальное кодирование	28
С.6 Модуляция.....	30
Приложение D – Цифровая многопрограммная система D.....	36
D.1 Введение	36
D.2 Концепция кабельной системы	36
D.3 Транспортный уровень MPEG-2	37
D.4 Структура формирования кадров.....	37
D.5 Канальное кодирование	39
D.6 Модуляция.....	44
D.7 Кабельный приемник 16-VSB	45
D.8 Другие режимы VSB	46
Библиография	53

Введение

Развитие новых цифровых технологий в настоящее время достигает момента, когда становится очевидным, что цифровые системы способны обеспечить значительные преимущества по сравнению с традиционными аналоговыми методами в отношении качества изображения и звука, эффективности использования спектра и мощности, гибкости обслуживания, конвергенции мультимедиа и потенциально более низких затрат на оборудование. Более того, интенсивность использования кабельного способа распределения видео- и аудиосигналов для их доставки отдельным зрителям и слушателям постоянно растет, и во многих странах данный способ уже стал доминирующим. Также очевидно, что эти потенциальные выгоды могут быть наилучшим образом достигнуты за счет эффекта масштаба, возникающего в результате широкого использования цифровых систем, которые легко внедряются в существующую инфраструктуру и используют преимущества многих возможных способов синергии с соответствующими аудиовизуальными системами.

Администрациям и частным операторам, планирующим внедрение услуг цифрового кабельного телевидения, рекомендуется рассмотреть вопрос об использовании одной из систем, описываемых в Приложениях А, В, С и D, и искать возможности для дальнейшей конвергенции, вместо того чтобы разрабатывать еще одну систему, основанную на тех же технологиях.

Во второе издание (1997 г.) настоящей Рекомендации вошла Поправка 1 (10/1996), которая внесла следующие изменения в первое издание:

- a) Приложение В содержит спецификацию системы 256-QAM;
- b) в Приложении В указываются два разных режима работы функции перемежения, называемые *уровень 1* и *уровень 2*. Уровень 1 определен только для передачи 64-QAM, и этот режим уже присутствовал в первом издании Приложения В. Уровень 2 охватывает передачу 64-QAM и 256-QAM и способен поддерживать переменное перемежение для обеих схем модуляции;
- c) в первом издании Приложения D были описаны 24 бита, определяющие режим VSB для данных в кадре, и были определены два таких режима: кабельный 16-VSB и наземный 8-VSB (с решетчатым кодированием). Во втором издании определяются еще три режима VSB: 2-VSB, 4-VSB и 8-VSB.

В третьем издании (2007 год) настоящей Рекомендации метод модуляции усовершенствован путем добавления режимов 128-QAM и 256-QAM в Приложении А и 256-QAM в Приложении С.

Цифровые многопрограммные системы для кабельного распределения сигналов при предоставлении услуг телевизионного, звукового вещания и передачи данных

1 Сфера применения

Сфера применения настоящей Рекомендации – определение структуры формирования кадров, канального кодирования и модуляции для сигналов цифрового многопрограммного телевизионного, звукового вещания и передачи данных, распределяемых по кабельным сетям (например, в системах CATV), возможно, в мультиплексе с частотным разделением сигналов. Характеристики передачи цифровых многопрограммных сигналов, распределяемых по сетям SMATV, определены в отдельной Рекомендации.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Сигнал на входе системы соответствует транспортному уровню MPEG-2; это обеспечивает некоторую емкость для вспомогательных данных в прямом канале, которую можно использовать для удовлетворения потребностей интерактивных услуг (описание процесса предоставления обратного канала и его характеристик выходит за рамки настоящей Рекомендации).

Будучи чрезвычайно гибким, транспортный уровень MPEG-2 может быть настроен для доставки любого желаемого сочетания телевизионных, звуковых сигналов и сигналов данных (звук может быть связан или не связан с содержанием видеосигналов и передаваться с различными возможными уровнями качества). Транспортный уровень даже можно полностью выделить для доставки звуковых программ, хотя он не обязательно должен быть оптимизирован для этого приложения.

Конкретный случай доставки мультиплекса, содержащего только звуковые сигналы, может быть рассмотрен в будущей Рекомендации.

Настоящая Рекомендация призвана обеспечить разработчиков и операторов кабельных распределительных сетей (например, CATV), по которым передаются многопрограммные сигналы, информацией, необходимой им для создания и эксплуатации сетей, полностью удовлетворяющих надлежащим требованиям. В ней также содержится информация, необходимая разработчикам и производителям оборудования (включая приемники) для обработки цифровых многопрограммных сигналов, распределяемых по кабельным сетям.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Структура и содержание этой Рекомендации построены таким образом, чтобы упростить использование документа лицам, знакомым с оригинальным исходным материалом; по этой причине обычный стиль Рекомендаций МСЭ-Т не соблюдается.

2 Справочные документы

Указанные ниже Рекомендации МСЭ-Т и другие справочные документы содержат положения, которые путем ссылки на них в данном тексте составляют положения настоящей Рекомендации. На момент публикации указанные издания были действующими. Все Рекомендации и другие справочные документы могут подвергаться пересмотру; поэтому пользователям данной Рекомендации предлагается изучить возможность применения последнего издания Рекомендаций и других справочных документов, перечисленных ниже. Список действующих в настоящее время Рекомендаций МСЭ-Т регулярно публикуется. Ссылка на документ, приведенный в настоящей Рекомендации, не придает ему как отдельному документу статус Рекомендации.

- [1] Recommendation ITU-R BO.1211 (1995), *Digital multi-programme emission systems for television, sound and data services for satellites operating in the 11/12 GHz frequency range*.
- [2] Recommendation ITU-T H.222.0 (1995) | ISO/IEC 13818-1:1996, *Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems*.
- [3] European Telecommunications Standards Institute (ETSI) EN 300 429 V1.2.1 (1998-04), *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for cable systems*.

3 Термины и определения

В этой Рекомендации не используются какие-либо нетрадиционные термины или определения.

4 Условные обозначения и сокращения

4.1 Условные обозначения

В настоящей Рекомендации используются следующие условные обозначения.

α	Коэффициент спада
A_k, B_k	Старшие значащие биты на выходе преобразователя байтов в m -разрядные кортежи
Байт	Восемь битов
f_0	Центральная частота канала
f_N	Частота Найквиста
$g(x)$	Порождающий многочлен RS-кода
$G_{(256)}$	Порождающий многочлен примитивных элементов поля RS-кода
$G_{(16)}$	Порождающий многочлен генератора случайных чисел
I	Глубина перемежения (байты)
I, Q	Синфазные, квадратурные фазовые составляющие модулированного сигнала
j	Коэффициент ветвления
k	Количество байтов, преобразуемых в n символов
m	Степень 2^m уровня модуляции QAM: 4, 5, 6 соответственно для 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM
M	Глубина ветви сверточного перемежителя для $j = 1, M = N/I$
ms	Миллисекунда
n	Количество символов, преобразуемых из k байтов
N	Длина кадра, защищенного от ошибок (байты)
$p(x)$	Порождающий многочлен поля RS-кода
PN(x)	Псевдослучайная последовательность, идентифицируемая числом после символа
q	Количество битов: 2, 3, 4 соответственно для 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM
R	Случайная последовательность
r_m	Внутриполосная пульсация (дБ)
R_s	Скорость передачи символов, соответствующая двусторонней полосе частот Найквиста для модулированного сигнала
R_u	Полезная скорость передачи битов после транспортного мультиплексора MPEG-2
R_u'	Скорость передачи битов после внешнего кодера RS
T	Количество байтов, которые можно исправить в защищенном от ошибок пакете RS
T_s	Период следования символов

4.2 Сокращения

В настоящей Рекомендации используются следующие сокращения.

ATM	Asynchronous Transfer Mode	Асинхронный режим передачи
BB	BaseBand	Основная полоса частот
BER	Bit Error Ratio	Коэффициент ошибок по битам

bps	Bits per second	бит/с	Биты в секунду
CATV	Community Antenna Television		Телевидение с использованием коллективной антенны
<i>C/N</i>	Carrier to Noise ratio		Отношение несущая/шум
DTVC	Digital Television by Cable		Цифровое телевидение по кабельным сетям
FEC	Forward Error Correction		Упреждающая коррекция ошибок
FIFO	First In First Out		Обслуживание в порядке поступления
HEC	Header Error Control		Контроль ошибок заголовка
HEX	Hexadecimal		Шестнадцатеричный
IF	Intermediate Frequency	ПЧ	Промежуточная частота
IRD	Integrated Receiver Decoder		Интегрированный приемник-декодер
LSB	Least Significant Bit		Младший значащий бит
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution System		Многоканальная система распределения на многие пункты
MPEG	Moving Picture Experts Group		Группа экспертов по кинематографии
MSB	Most Significant Bit		Старший значащий бит
MUX	Multiplex		Мультиплексор
P	Parity		Четность
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy		Плещиохронная цифровая иерархия
PN	Pseudorandom Noise		Псевдослучайный шум
ppm	Parts per million		Частей на миллион
PRBS	PseudoRandom Binary Sequence		Псевдослучайная двоичная последовательность
QAM	Quadrature Amplitude Modulation		Квадратурная амплитудная модуляция
QEF	Quasi Error Free		Квазибезошибочный прием
RF	Radio Frequency	РЧ	Радиочастота
RS	Reed-Solomon		Рид–Соломон
SMATV	Satellite Master Antenna Television		Спутниковое телевидение с приемом на коллективную антенну
SNR	Signal-to-Noise Ratio		Отношение сигнал/шум
sps	Symbols per second	символ/с	Символов в секунду
Sync	Synchronizing signal		Синхронизирующий сигнал
TBD	To Be Determined		Подлежит определению
TDM	Time Division Multiplex		Мультиплексирование с временным разделением каналов
TS	Transport Stream		Транспортный поток
VLSI	Very Large Scale Integration	СБИС	Сверхбольшая интегральная схема
VSБ	Vestigial SideBand		Частично подавленная боковая полоса
XOR	Exclusive OR		Исключающее ИЛИ
2-VSB	2 level VSB		2-уровневая модуляция VSB
4-VSB	4 level VSB		4-уровневая модуляция VSB
8-VSB	8 level VSB		8-уровневая модуляция VSB
16-VSB	16 level VSB		16-уровневая модуляция VSB

5 Цифровые многопрограммные системы для распределения по кабельным сетям

При развертывании новых цифровых многопрограммных услуг в существующих и будущих кабельных сетях рекомендуется использовать одну из систем, для которых информация по структуре формирования кадров, кодированию каналов и модуляции приведена в Приложениях А, В, С и D. Их технические характеристики сравниваются в таблице 1 с указанием общих особенностей.

Таблица 1 – Сравнение технических характеристик в сжатой форме с указанием общих данных

Пункт		Приложение В	Приложение А	Приложение С	Приложение D	
Входные сигналы		Модифицированный транспортный поток MPEG-2. Вместо байта синхронизации используется контрольная сумма по четности, что улучшает функцию разграничения пакетов и обеспечивает возможность обнаружения ошибок независимо от уровня FEC (См. В.4)	Транспортный поток MPEG-2 (См. раздел 5 в [3], С.3, D.3)			
Структура формирования кадров		Кадр FEC состоит из 42- или 40-битовой синхронизирующей концевой части после 60 или 88 блоков RS, причем каждый блок содержит по 128 символов. Символ RS состоит из 7 битов. Таким образом, в кадре FEC содержится всего 53 802 или 78 888 битов соответственно для модуляции 64- или 256-QAM (См. В.5.3)	Порядок формирования кадров основан на структуре транспортных пакетов MPEG-2 (См. раздел 6 в [3], С.4, D.4)			
Кодирование каналов	Рандомизация	Многочлен из трех слов для PRS $x^3 + x + \alpha^3$ над полем GF 128 (См. В.5.4)	15-битовый многочлен для PRBS $1 + x^{14} + x^{15}$ (См. раздел 7.1 в [3], С.5.1)	16-битовый многочлен для PRBS $1 + x + x^3 + x^6 + x^7 + x^{11} + x^{12} + x^{13} + x^{16}$ (См. D.5.1)		
	FEC	Каскадное кодирование, RS (128, 122) GF 128 со сверточным кодированием (См. В.5.1)	RS (204, 188) GF 256 (См. раздел 7.2 в [3], С.5.2)	RS (207, 187) GF 256 (См. D.5.2)		
	Переमेжение	Глубина сверточного перемежения: $I = 128, 64, 32, 16, 8$ $J = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 16$ (См. В.5.2)	Глубина сверточного перемежения $I = 12$ (См. раздел 7.3 в [3], С.5.3)	Глубина сверточного перемежения $I = 52$ (См. D.5.3)		
Модуляция	Преобразование байтов в символы	См. В.5.5	См. раздел 8 в [3], С.6.1		См. D.6.1	
	Дифференциальное кодирование	См. В.5.5	См. раздел 8 в [3], С.6.2		Отсутствует	
	Решетчатое кодирование	См. В.5.5	Отсутствует			
	Полоса пропускания	6 МГц	8 МГц	6 МГц		
	Созвездие	64- или 256-QAM Рисунок В.18 или В.19	16-, 32-, 64- 128-, 256-QAM (См. раздел 9 в [3])	64-, 256-QAM Рисунок С.7	2-, 4-, 8-, 16-VSB	
	Коэффициент спада	18% или 12% соответственно для 64- или 256-QAM См. В.6.1	15% (См. раздел 9 в [3])	13% См. С.6.4	11,5% См. D.6.3	
	Характеристики фильтра основной полосы	Таблица В.2	См. Приложение А в [3]	Рисунок С.8	Рисунок D.11	

Приложение А

Цифровая многопрограммная система А

(Данное Приложение является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации.)

А.1 Введение

Данное Приложение – результат работы, проделанной в рамках Проекта цифрового телевизионного вещания (DVB), ведущего отраслевого консорциума, объединяющего более 260 радиовещательных компаний, производителей оборудования, сетевых операторов, разработчиков программного обеспечения, регуляторных органов и других организаций более чем в 35 странах, участвующих в разработке международных стандартов доставки услуг цифрового телевидения и передачи данных во всем мире. Это Приложение принято Объединенным техническим комитетом (JTC) Европейского радиовещательного союза (ERC), Европейским комитетом по стандартизации в области электротехники (CENELEC) и Европейским институтом стандартов электросвязи (ETSI) в качестве европейской нормы (EN) 300 429 [3].

В нем описывается структура формирования кадров, способы кодирования каналов и методы модуляции (все это в данном Приложении называется "система") для целей распределения цифрового многопрограммного телевидения по кабельным сетям. Эта система может прозрачно использоваться с системой модуляции/кодирования каналов, применяемой для цифрового многопрограммного спутникового телевидения.

Данная система базируется на стандарте MPEG-2 (см. [2] в разделе "Справочные документы") в отношении кодирования источника и транспортного мультиплексирования с добавлением подходящей схемы упреждающей коррекции ошибок (FEC). Она основана на квадратурной амплитудной модуляции (QAM). Допускаются созвездия 16-, 32-, 64-, 128- и 256-QAM.

Система FEC рассчитана на уменьшение коэффициента ошибок по битам (BER) с 10^{-4} до диапазона от 10^{-10} до 10^{-11} , что обеспечивает квазибезошибочную (QEF) работу приблизительно с одним событием неисправленной ошибки за час передачи.

А.2 Спецификация

В этом Приложении А приводится текст ETSI EN 300 429 [3] с указанными ниже изменениями.

А.2.1 Ненумерованный раздел "Предисловие"

Вступительный раздел "Предисловие" в контексте этого приложения отсутствует.

Приложение В

Цифровая многопрограммная система В

(Данное Приложение является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации.)

В.1 Введение

В данном Приложении описываются структура формирования кадров, а также методы кодирования и модуляции каналов для мультисервисной системы распределения цифровых телевизионных программ по конкретным кабельным каналам. Эта система может прозрачно использоваться с системой распределения по спутниковым каналам, так как многие кабельные системы получают сигнал непосредственно по спутниковым линиям. Соответствующая спецификация охватывает модуляцию как 64-, так и 256-QAM. В отношении большинства функций эти схемы модуляции одинаковы. В тех случаях, когда есть различия, рассматриваются конкретные особенности каждой схемы.

Методы модуляции, перемежения и кодирования основаны на результатах испытаний и характеристиках кабельных систем в Северной Америке. Схемой модуляции является квадратурная амплитудная модуляция с 64-точечным созвездием сигналов (64-QAM) или 256-точечным созвездием сигналов (256-QAM) в зависимости от выбранного передатчика. Упреждающая коррекция ошибок (FEC) основана на подходе каскадного кодирования, который обеспечивает высокую эффективность кодирования при умеренных накладных расходах и степени сложности. Каскадное кодирование обеспечивает повышенную производительность по сравнению с блочным кодом при аналогичной общей сложности. Функция FEC системы оптимизирована для квазибезошибочной работы с пороговой частотой появления ошибок на выходе в одно событие ошибки за 15 минут.

Предполагается, что формат входных данных для модуляции и кодирования соответствует транспортному потоку MPEG-2. Однако метод, используемый для синхронизации MPEG, не связан с синхронизацией FEC. Это позволяет системе, например, легко переносить пакеты ATM, не нарушая синхронизацию ATM. Фактически, синхронизация ATM может выполняться определенными механизмами синхронизации ATM.

Поддерживаются два режима: режим 1 обеспечивает скорость передачи символов 5,057 Мсимвол/с, а режим 2 – 5,361 Мсимвол/с. Как правило, режим 1 используется для 64-QAM, а режим 2 – для 256-QAM. Эта система совместима с будущими реализациями схем с более высокой скоростью передачи данных, использующими расширения QAM более высокого порядка.

В.2 Концепция кабельной системы

Канальное кодирование и параметры передачи соответствуют конкретной среде передачи или каналу связи. Решающее значение при определении подходящего метода коррекции ошибок и демодуляции имеют ожидаемая статистика ошибок канала и характеристики искажения. Кабельный канал, включая оптоволокно, в основном рассматривается как линейный канал с ограниченной полосой пропускания и сбалансированной комбинацией белого шума, помех и многолучевого искажения. Используемый метод квадратурной амплитудной модуляции (QAM) вместе с адаптивным выравниванием и каскадным кодированием хорошо подходит для этого применения и канала.

Базовая многоуровневая структурная схема обработки сигналов в системе кабельной передачи показана на рисунке В.1. В следующих подразделах приводится описание этих уровней, начиная с наружного, если смотреть со стороны передачи.

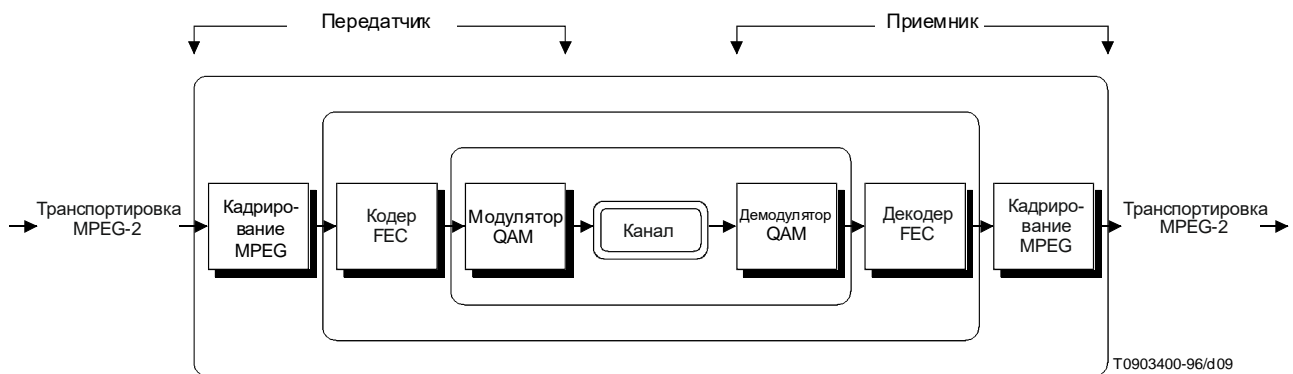


Рисунок В.1 – Блок-схема системы кабельной передачи

В.3 Транспортный уровень MPEG-2

Транспортный уровень MPEG-2 определяется в документе [2] раздела "Справочные документы". Транспортный уровень для данных MPEG-2 состоит из пакетов по 188 байтов, содержащих один байт синхронизации и три байта заголовка с информацией об идентификации услуги и о скремблировании, а также управляющей информацией, за которыми следуют 184 байта данных MPEG-2 или вспомогательных данных.

В.4 Формирование кадров транспортного потока MPEG-2

Формирование кадров транспортного потока MPEG представляет собой внешний уровень обработки. Такая функция является надежным средством доставки информации о синхронизации пакетов MPEG к выходу приемника. Этот блок обработки принимает поток транспортируемых данных MPEG-2, состоящий из непрерывного потока пакетов фиксированной длины в 188 байтов. Указанный поток данных передается последовательным способом, начиная с MSB. Первый байт пакета определяется как синхробайт со значением 47_{HEX} .

Байт синхронизации предназначен для разграничения пакетов. Система кабельной передачи включает в себя дополнительный уровень обработки для обеспечения дополнительной функциональности с использованием информационной емкости этого байта синхронизации. Вместо такого синхробайта используется контрольная сумма по четности, которая представляет собой смежный класс линейного блочного кода проверки на четность FIR, что позволяет улучшить разграничение пакетов и создает возможность обнаружения ошибок независимо от уровня FEC.

Контрольная сумма по четности вычисляется по смежным 187 байтам, которые составляют непосредственно предшествующее содержимое пакета MPEG-2 (за вычетом байта синхронизации). Это позволяет поддерживать синхронизацию пакетов одновременно с обнаружением ошибок. Декодер вычисляет скользящую контрольную сумму в потоке последовательных данных, используя обнаружение действительного кодового слова для обнаружения начала пакета. Как только установлено условие блокирования синхронизации, отсутствие действительного кодового слова в ожидаемой позиции указывает на ошибку пакета. Когда данные выходят из декодера, может быть установлен флаг ошибки предыдущего пакета. Для обеспечения стандартного потока данных MPEG-2 на выходе вместо контрольной суммы вставляется нормальное слово синхронизации.

Синдром вычисляется путем передачи 1496 битов полезной нагрузки через сдвиговый регистр с линейной обратной связью (LFSR) в соответствии со следующим уравнением:

$$f(x) = [1 + x^{1497}b(x)] / g(x),$$

где:

$$g(x) = 1 + x + x^5 + x^6 + x^8; \text{ и}$$

$$b(x) = 1 + x + x^3 + x^7.$$

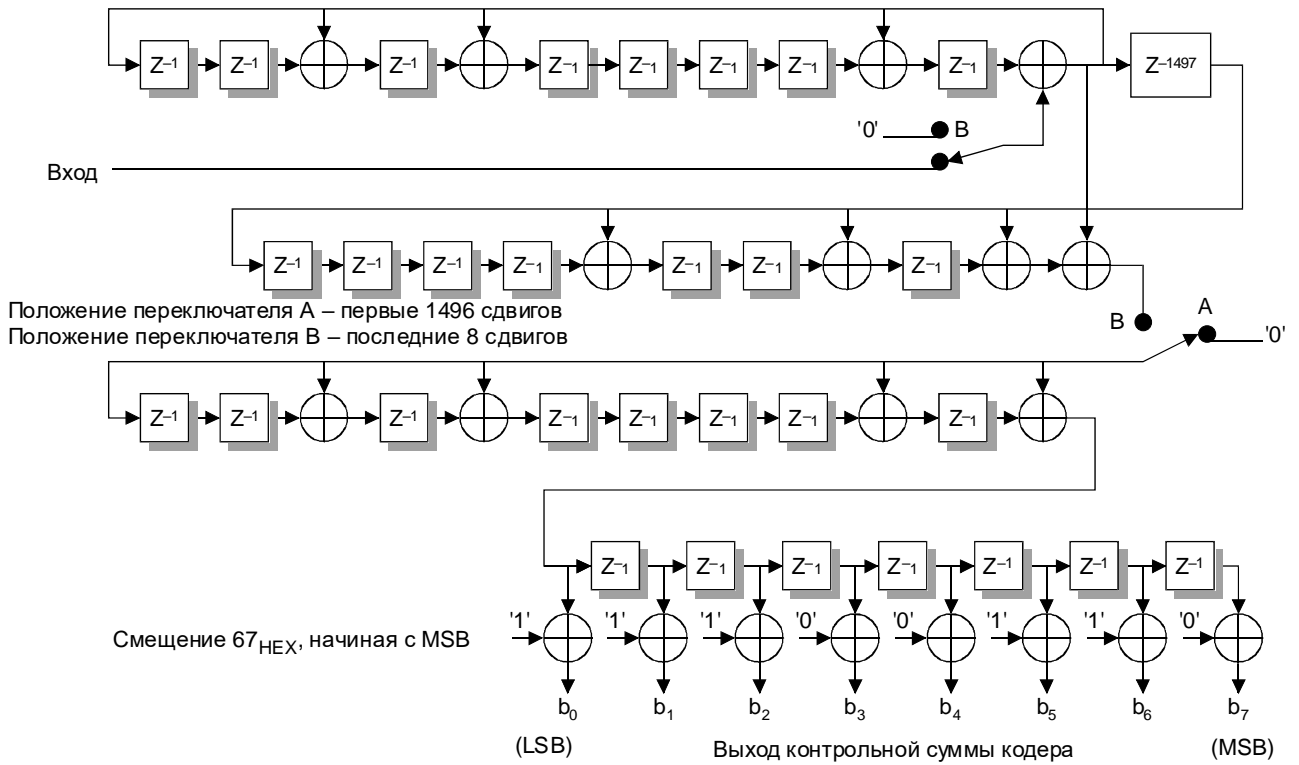
Такая вычислительная структура показана на рисунках В.2 и В.3. Предполагается, что все операции сложения выполняются по модулю 2. Для операции кодирования регистр LFSR сначала инициализируется так, чтобы все элементы памяти содержали нулевое значение. Затем 1496 битов, которые составляют полезную нагрузку пакета транспортного потока MPEG-2, сдвигаются в регистр LFSR. После получения 1496 битов данных на входе кодера устанавливается ноль, и для последовательного вывода восьми вычисленных битов синдрома требуется восемь дополнительных сдвигов. Затем этот 8-битовый результат пропускается через дополнительную функцию $g(x)$ FIR-фильтрации (инициализированную в состояние "все нули" перед вводом 8 битов синдрома) для образования контрольной суммы кодера. К этому результату контрольной суммы добавляется смещение 67_{HEX} для улучшения свойств автокорреляции, что приводит к получению результата 47_{HEX} в ходе операции декодирования синдрома, когда присутствует действительное кодовое слово. Окончательная 8-битовая контрольная сумма с добавленным смещением передается, начиная с MSB, после 1496 битов полезной нагрузки для реализации систематического кодера.

Для идентификации действительной контрольной суммы декодер может использовать матрицу проверки на четность. Для этой цели также может использоваться генератор синдрома, как показано на рисунке В.3. Код разработан таким образом, что если после умножения соответствующих 188 байтов модифицированного пакета транспортного потока MPEG-2 (который включает в себя соответствующую контрольную сумму) на матрицу проверки на четность вычисленное произведение приводит к результату 47_{HEX} , то это указывает на действительное кодовое слово. Каждый из 8 столбцов матрицы проверки на четность P включает в себя 1497-битовый вектор, далее называемый C . Этот вектор определяется на рисунке В.4.

Начиная с крайнего левого столбца матрицы P , 1497-битовый столбец C дублируется в последующих столбцах матрицы P со сдвигом на одну битовую позицию вниз. Позиции битов, не занятые данными столбца, заполняются нулями, как показано на рисунке В.5.

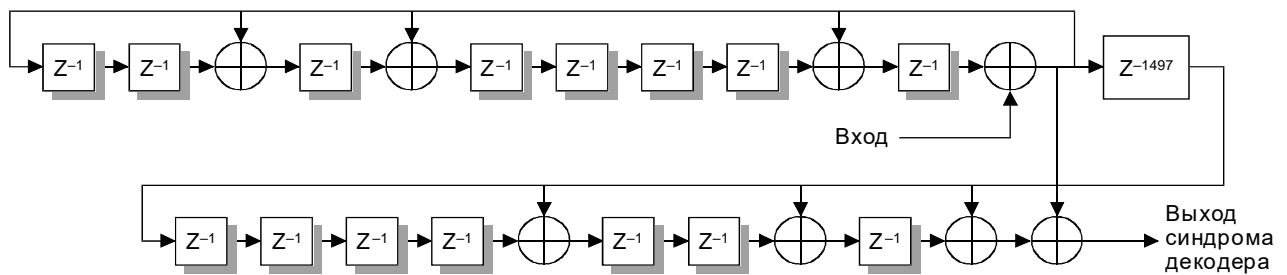
Следует отметить, что контрольная сумма рассчитывается на основе предыдущих 187 байтов, а не тех 187 байтов, которые еще не приняты синхронизирующим декодером MPEG-2. Это противоречит общепринятому представлению о структуре пакета MPEG, согласно которому байтом синхронизации обычно считается первый байт принимаемого пакета.

Полученный вектор R представляет собой данные MPEG-2, состоящие из 187 байтов, за которыми следует байт контрольной суммы, что в сумме составляет 1504 бита. Этот вектор R умножается (по модулю 2) на матрицу P проверки на четность, что в результате дает вектор S длиной 8 битов, как показано на рисунке В.6.



T0903410-96/d10

Рисунок В.2 – Генератор контрольной суммы для кодера байта синхронизации MPEG-2



T0903420-96/d11

Рисунок В.3 – Генератор синдрома для декодера синхронизации MPEG-2

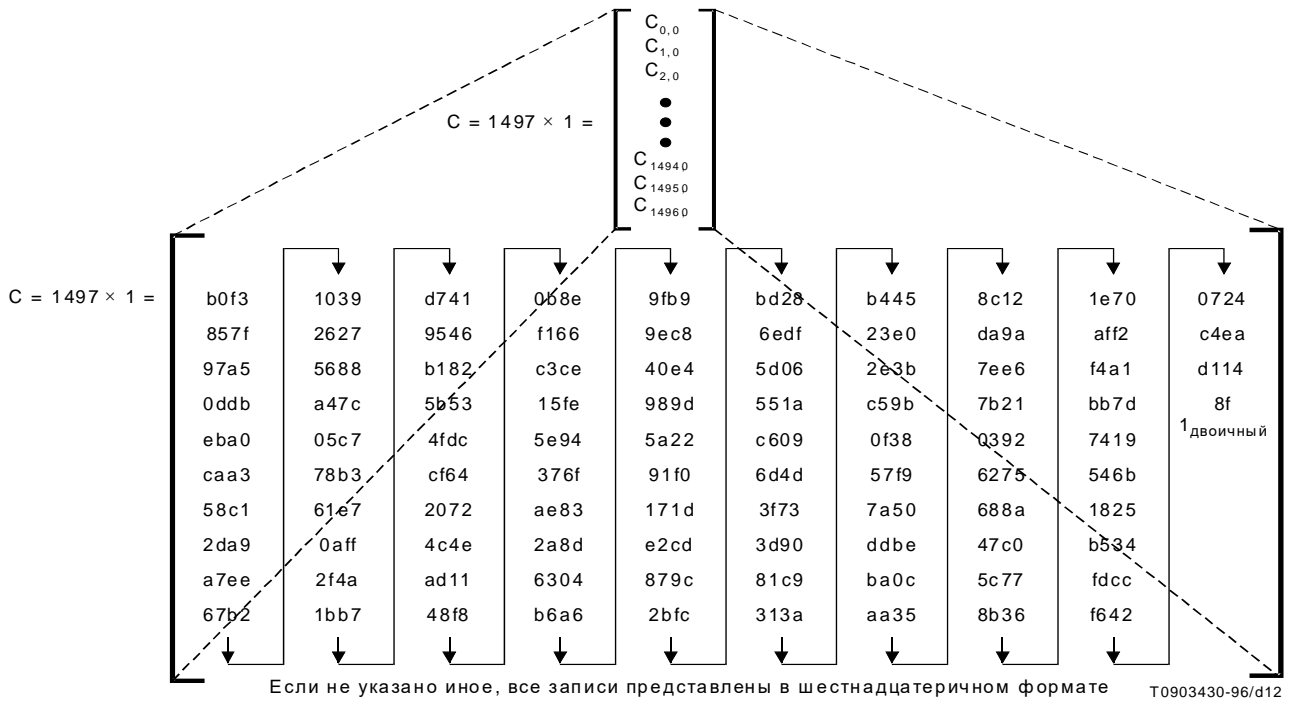


Рисунок В.4 – Вектор столбца C (дублируется внутри матрицы проверки на четность)

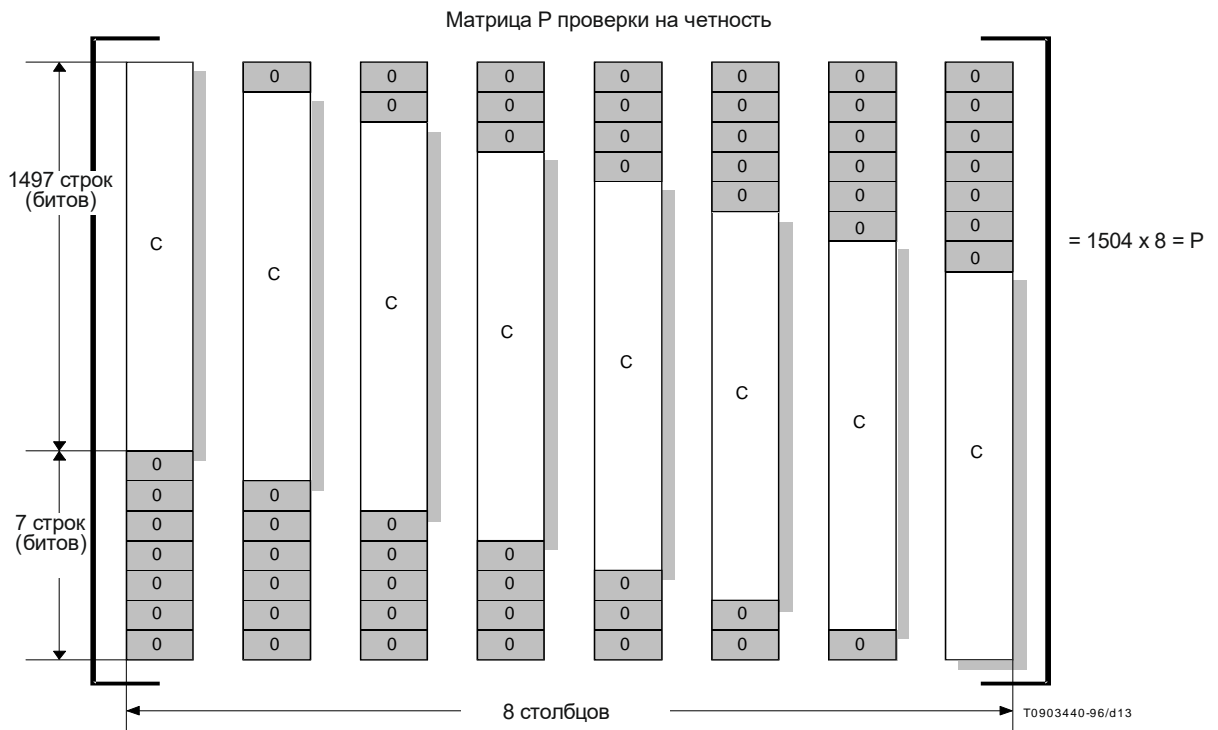


Рисунок В.5 – Структура матрицы P проверки на четность

$$\begin{bmatrix} \text{Вектор R} \\ \text{(окно выравнивания)} \\ 1 \times 1504 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{Матрица P} \\ \text{(проверка на четность)} \\ 1504 \times 8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Вектор S} \\ \text{(полученная} \\ \text{контрольная сумма)} \\ 1 \times 8 \end{bmatrix}$$

$S = [0100 \ 0111] = 0 \times 47$

T09 03 45 0-96/d14

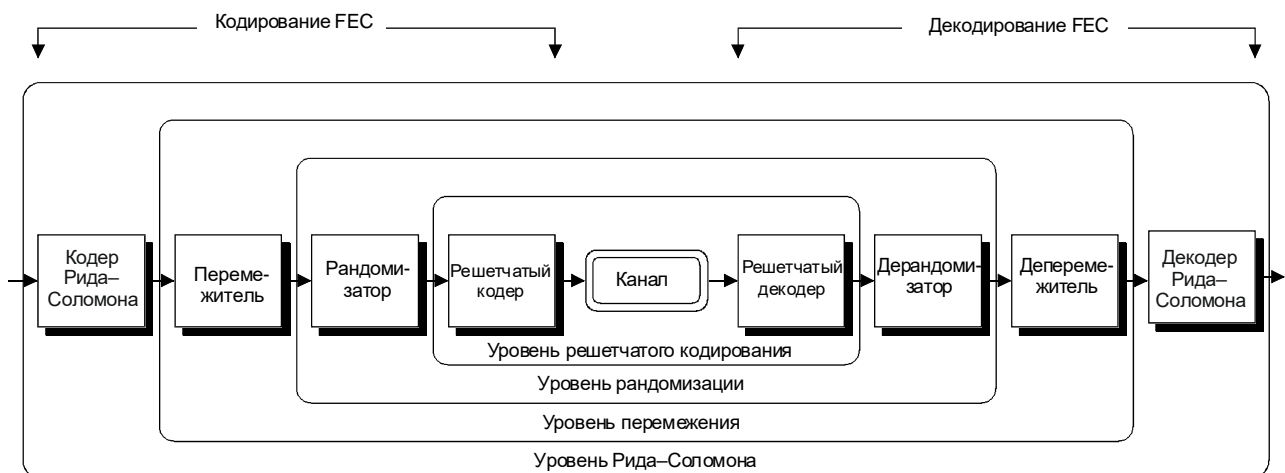
Рисунок В.6 – Умножение полученного вектора MPEG-2 на матрицу проверки на четность

Значение $S = [0100; 0111] = 47_{\text{HEX}}$ указывает на действительную контрольную сумму.

При реализации транспортных протоколов, отличных от транспортного уровня MPEG-2, например ATM, этот внешний уровень исключается или обходится. Уровень FEC принимает и доставляет данные без каких-либо ограничений на протокол. Если это требуется приложением, то секцию формирования кадров можно заменить на ту, что подходит для альтернативного транспортного протокола. Все остальные части настоящей спецификации (модуляция, кодирование, перемежение) реализуются, как описывается ниже. В случае ATM какого-либо уровня формирования кадров не требуется. Функция НЕС ATM обычно обеспечивает адекватное формирование кадров для пакетов и обнаружение ошибок. Таким образом изохронные потоки ATM передаются прозрачно без накладных расходов на инкапсуляцию пакетов MPEG или квази-MPEG.

В.5 Упреждающая коррекция ошибок

Определение упреждающей коррекции ошибок (FEC) состоит из четырех уровней обработки, как показано на рисунке В.7. Ни на одном из уровней FEC нет никаких зависимостей от протокола входных данных. Синхронизация FEC – полностью внутренняя и прозрачная. Любая последовательность данных передается со входа кодера на выход декодера.



T0903460-96/d15

Рисунок В.7 – Уровни обработки FEC

Для надежной передачи данных по кабельному каналу в секции FEC используются разные типы алгоритмов исправления ошибок и методов перемежения:

- кодирование Рида-Соломона (RS) – обеспечивает кодирование и декодирование блоков для исправления до трех символов в пределах блока RS;
- перемежение – равномерно распределяет символы, защищая от передачи в декодер RS пакета ошибок символов;
- рандомизация – располагает данные в канале случайным образом для обеспечения эффективной синхронизации демодулятора QAM;

- решетчатое кодирование – обеспечивает сверточное кодирование с возможностью использования решетчатого декодирования с мягким решением для случайных ошибок канала.

Эти четыре уровня определяются в следующих подразделах.

В.5.1 Кодирование Рида-Соломона

Для транспортного потока MPEG-2 применяется кодирование Рида-Соломона (RS) с использованием кода (128, 122) над GF(128). Этот код позволяет исправлять до $t = 3$ ошибочных символов на блок RS. Для 64-QAM и 256-QAM используется один и тот же код RS. Тем не менее формат кадра FEC для каждого типа модуляции различен, как описывается в следующем подразделе.

В этом подразделе описывается принцип реализации кодера Рида-Соломона. Для реализации расширенного кода Рида-Соломона (128, 122) над GF(128) при $t = 3$ используется систематический кодер. Для формирования поля над GF(128) используется следующий примитивный многочлен:

$$p(x) = x^7 + x^3 + 1,$$

где:

$$p(x) = 0.$$

Порождающий многочлен, используемый кодером:

$$\begin{aligned} g(x) &= (x + \alpha)(x + \alpha^2)(x + \alpha^3)(x + \alpha^4)(x + \alpha^5) = \\ &= x^5 + \alpha^{52}x^4 + \alpha^{116}x^3 + \alpha^{119}x^2 + \alpha^{61}x + \alpha^{15}. \end{aligned}$$

Многочлен сообщения на входе кодера состоит из 122 7-битовых символов и описывается ниже:

$$m(x) = m_{121}x^{121} + m_{120}x^{120} + \dots + m_1x + m_0.$$

Этот многочлен сообщения сначала умножается на x^5 , а затем делится на порождающий многочлен $g(x)$ для получения остатка, который описывается следующим образом:

$$r(x) = r_4x^4 + r_3x^3 + r_2x^2 + r_1x + r_0.$$

Этот остаток состоит из пяти символов контроля четности, которые затем добавляются к многочлену сообщения для образования кодового слова из 127 символов. Оно представляет собой четное кратное порождающего многочлена.

Теперь сгенерированное кодовое слово описывается следующим многочленом:

$$c(x) = m_{121}x^{126} + m_{120}x^{125} + m_{119}x^{124} + \dots + r_4x^4 + r_3x^3 + r_2x^2 + r_1x + r_0.$$

Действительное кодовое слово имеет корни, содержащие с первой по пятую степени α .

Расширенный символ контроля четности (c_-) генерируется путем оценки кодового слова в шестой степени α :

$$c_- = c(\alpha^6).$$

Этот расширенный символ используется для формирования последнего символа передаваемого блока Рида-Соломона. В результате расширенное кодовое слово выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{c} &= xc(x) + c_- \\ &= m_{121}x^{127} + m_{120}x^{126} + \dots + m_1x^7 + m_0x^6 + r_4x^5 + r_3x^4 + r_2x^3 + r_1x^2 + r_0x + c_-. \end{aligned}$$

Порядок передачи символов, выводимых из кодера RS, иллюстрирует следующая структура блока Рида-Соломона:

$$m_{121}m_{120}m_{119}\dots m_1m_0r_4r_3r_2r_1r_0c_- \quad (\text{порядок передачи слева направо}).$$

В.5.2 Перемежение

Функция перемежения включается в модем между кодированием блоков RS и рандомизатором, чтобы обеспечить возможность исправления ошибок, вызванных импульсными помехами. Как в 64-QAM, так и в 256-QAM используется сверточный перемежитель.

Сверточное перемежение иллюстрируется на рисунке В.8. В начале кадра FEC, определяемого в следующем подразделе, перемежающий коммутатор инициализируется в положение самой верхней ветви и наращивается дискретно с частотой символов RS с выводом одного символа на каждой позиции. С помощью сверточного перемежителя символы кода RS последовательно сдвигаются в банк из I регистров (ширина каждого регистра составляет 7 битов, что соответствует размеру символа RS). У каждого последующего регистра размер памяти на J символов больше, чем у предыдущего. Первая цепь перемежителя имеет нулевую задержку, вторая – период задержки в J символов, третья – период задержки в $2*J$ символов и т. д. до I -го тракта, период задержки которого составляет $(I-1)*J$ символов. Для деперемежителя в кабельном декодере этот порядок меняется на противоположный, так что после прохождения через перемежитель и деперемежитель чистая задержка каждого символа RS одинакова. Импульсные помехи в канале вызывают серию ошибочных символов. Они распределяются деперемежителем по многим блокам RS, так что результирующее количество ошибочных символов на блок остается в диапазоне возможностей коррекции декодера RS.

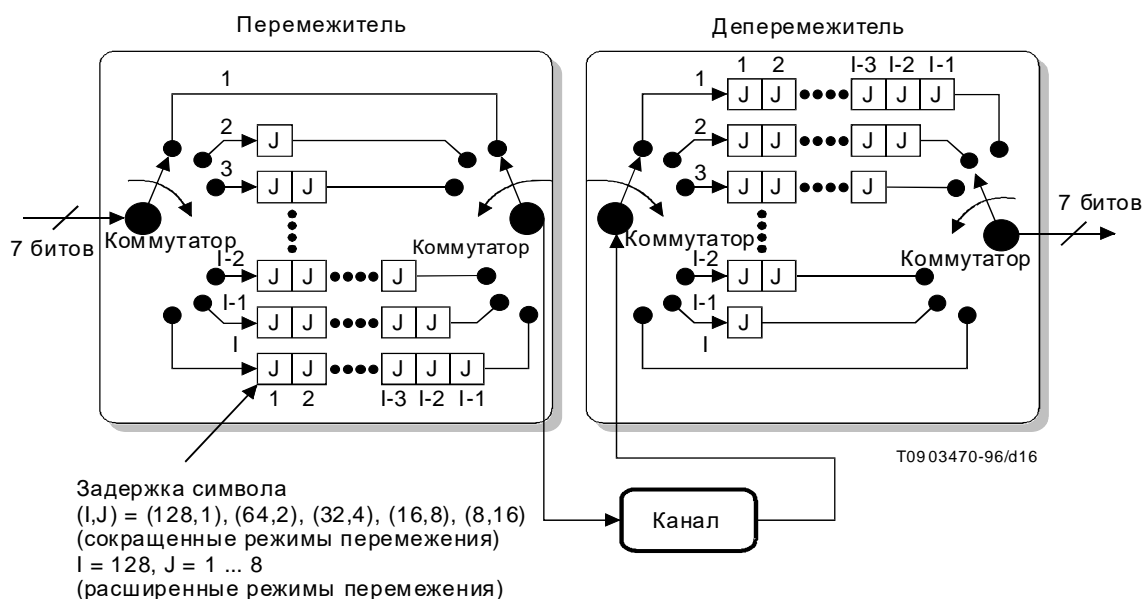


Рисунок В.8 – Функциональная блок-схема перемежения

Что касается возможностей перемежения, то определяются два разных режима работы, которые в дальнейшем обозначаются как *уровень 1* и *уровень 2*.

Уровень 1 определяется только для передачи 64-QAM. Этот режим подходит для установленной базы устаревших цифровых телевизионных приставок с поддержкой только 64-QAM. При работе на уровне 1 поддерживается только одна глубина перемежения $I = 128, J = 1$.

Уровень 2 охватывает передачу как 64-QAM, так и 256-QAM, и при обеих схемах модуляции поддерживает переменное перемежение. При этом глубина перемежения может увеличиваться и уменьшаться относительно номинальной конфигурации 64-QAM (уровень 1). Чтобы доставить параметры перемежения в приемник для данного канала, в течение интервала синхронизации кадра FEC внутри полосы передаются четыре бита данных.

В таблице В.1 приведены параметры перемежителя для работы на уровне 1 с соответствующей задержкой и защитой от импульсных помех. В таблице В.2 показано, как 4-битовое внутриполосное управляющее слово декодируется в параметры перемежения I и J для работы на уровне 2 с соответствующей защитой от импульсных помех и задержкой.

Таблица В.1 – Перемежение на уровне 1

Управляющее слово (4 бита)	I (количество отводов)	J (приращение)	Защита от импульсных помех	Задержка
xxxx	128	1	95 мкс	4,0 мс

Таблица В.2 – Перемежение на уровне 2

Управляющее слово (4 бита)	I (количество отводов)	J (приращение)	Защита от импульсных помех 64-QAM/256-QAM	Задержка 64-QAM/256-QAM
0001	128	1	95 мкс/66 мкс	4,0 мс/2,8 мс
0011	64	2	47 мкс/33 мкс	2,0 мс/1,4 мс
0101	32	4	24 мкс/16 мкс	0,98 мс/0,68 мс
0111	16	8	12 мкс/8,2 мкс	0,48 мс/0,33 мс
1001	8	16	5,9 мкс/4,1 мкс	0,22 мс/0,15 мс
1011	Зарезервировано			
1101	Зарезервировано			
1111	Зарезервировано			
0000	128	1	95 мкс/66 мкс	4,0 мс/2,8 мс
0010	128	2	190 мкс/132 мкс	8,0 мс/5,6 мс
0100	128	3	285 мкс/198 мкс	12 мс/8,4 мс
0110	128	4	379 мкс/264 мкс	16 мс/11 мс
1000	128	5	474 мкс/330 мкс	20 мс/14 мс
1010	128	6	569 мкс/396 мкс	24 мс/17 мс
1100	128	7	664 мкс/462 мкс	28 мс/19 мс
1110	128	8	759 мкс/528 мкс	32 мс/22 мс

В.5.3 Последовательность синхронизации кадров

Концевая часть последовательности синхронизации кадров определяет границы кадра FEC, обеспечивая синхронизированное RS-кодирование, перемежение и рандомизацию. Кроме того, решетчатые группы только для 256-QAM выравниваются с кадром FEC. Функция формирования кадров FEC не выполняет синхронизацию решетчатого декодера пакетов MPEG. Блок RS и 7-битовые структуры символов выравниваются с концом кадра как для 64-, так и для 256-QAM.

Для 64-QAM кадр FEC состоит из 42-битовой синхронизирующей концевой части, которая добавляется после 60 блоков RS по 128 символов в каждом. Каждый символ RS состоит из 7 битов. Таким образом, в этом кадре FEC имеется всего 53 760 битов данных и 42 бита концевой части синхронизации кадров. Первые четыре 7-битовых символа концевой части синхронизации кадров содержат 28-битовый уникальный код синхронизации (1110101 0101100 0001101 1101100), или (75 2С 0D 6С)_{HEX}. Оставшиеся два символа (14 битов) используются следующим образом: первые 4 бита – для управления режимом перемежения, а 10 битов зарезервированы и установлены в ноль. Концевая часть синхронизации кадров вставляется кодером и обнаруживается в декодере. Схемы декодера осуществляют поиск этого шаблона, и когда он найден, определяют местоположение границы кадра и режим глубины перемежителя. Кадр FEC для 64-QAM показан на рисунке В.9.

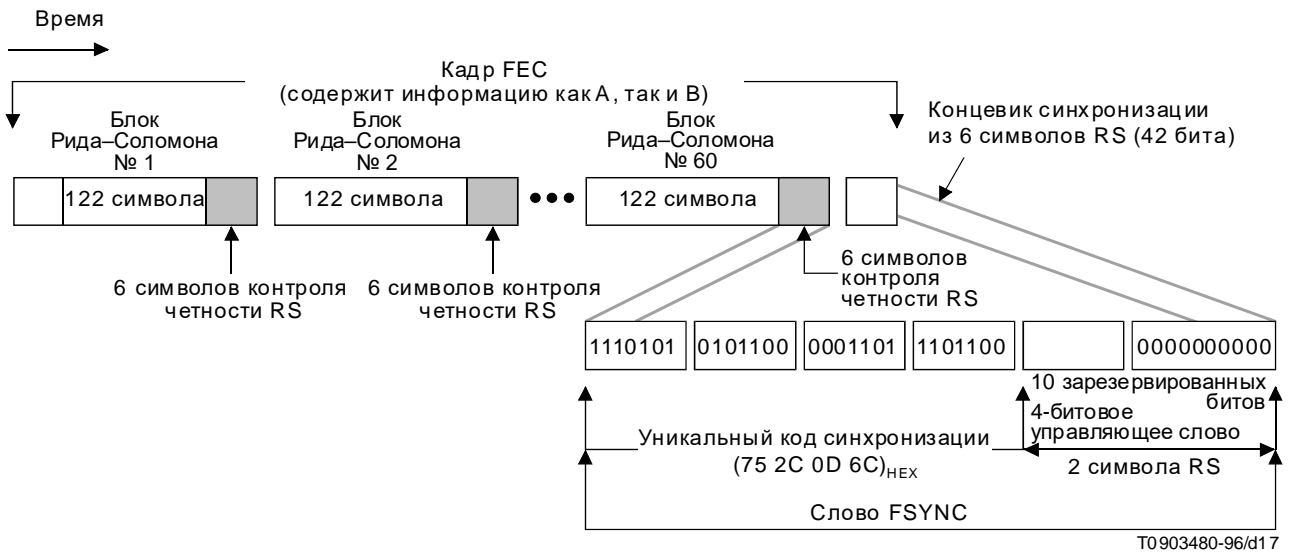


Рисунок В.9 – Формат пакетов кадра для 64-QAM

Для 256-QAM кадр FEC состоит из 40-битовой синхронизирующей концевой части, которая добавляется после 88 блоков RS, по 128 символов в каждом. Каждый символ RS состоит из 7 битов. Таким образом в этом кадре FEC всего 78 848 битов данных и 40 битов концевой части синхронизации кадров. 40-битовая концевая часть синхронизации кадров подразделяется следующим образом: 32 бита составляют уникальный код синхронизации (0111 0001 1110 1000 0100 1101 1101 0100), или (71 E8 4D D4)_{HEX}, 4 бита составляют управляющее слово, определяющее размер используемого перемежителя, а 4 бита являются зарезервированным словом, которое устанавливается в ноль. Кадр FEC для 256-QAM показан на рисунке В.10.

Следует отметить, что между передаваемым блоком RS и транспортными пакетами данных никакой синхронизации нет. Таким образом, синхронизация пакетов транспортного потока MPEG-2 осуществляется независимо от синхронизации кадров RS. Это позволяет сохранить развязку и независимость между FEC и транспортными уровнями.

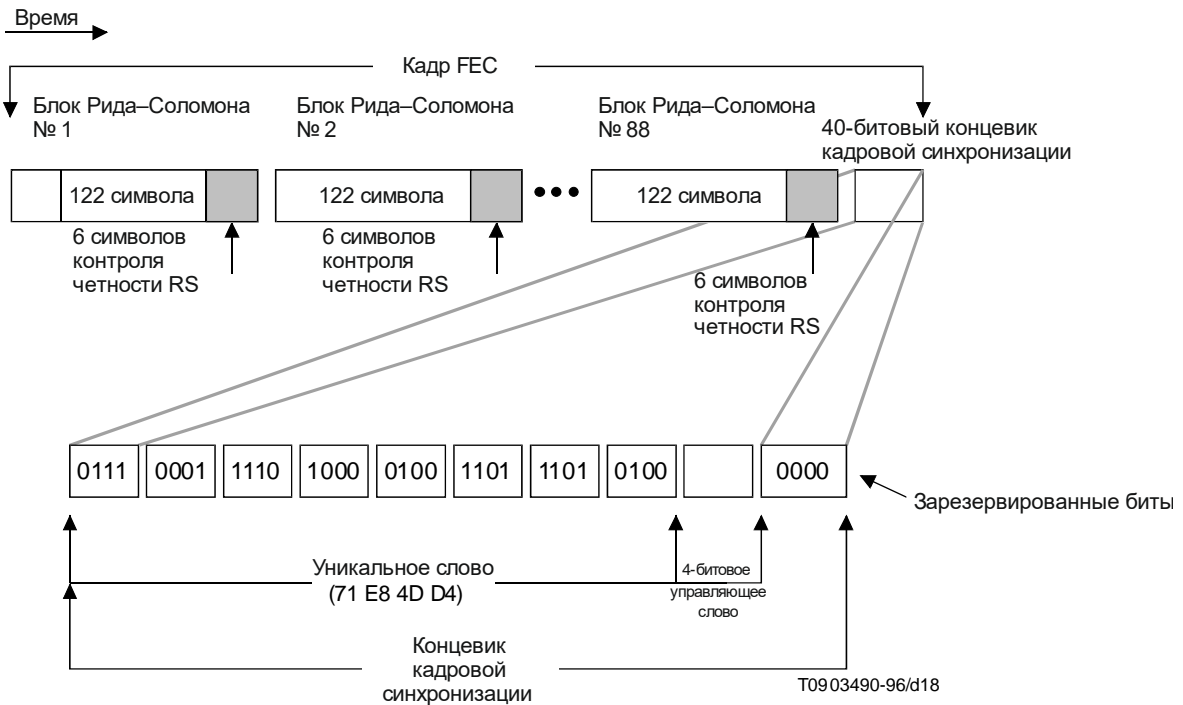


Рисунок В.10 – Формат пакетов кадра для 256-QAM

В.5.4 Рандомизация

Рандомизатор, показанный на рисунке В.11, соответствует третьему уровню обработки на блок-схеме FEC. Рандомизатор обеспечивает равномерное распределение символов в созвездии, что позволяет демодулятору поддерживать надлежащую синхронизацию. Рандомизатор добавляет к символам кадра FEC последовательность 7-битовых символов над GF(128) псевдослучайного шума (PN) (то есть побитовое исключающее ИЛИ) для создания последовательности, передаваемой в случайном порядке.

Как для 64-, так и для 256-QAM рандомизатор инициализируется во время конечной части кадра FEC и включается на первом символе после этой конечной части. Таким образом сама конечная часть не рандомизируется, а инициализированное выходное значение рандомизирует первый символ данных.

Инициализация определяется как предварительная установка в состояние "все единицы" структуры рандомизатора, показанной на рисунке В.11. Рандомизатор использует регистр сдвига с линейной обратной связью, заданный следующим многочленом над GF(128):

$$f(x) = x^3 + x + \alpha^3,$$

где:

$$\alpha^7 + \alpha^3 + 1 = 0.$$

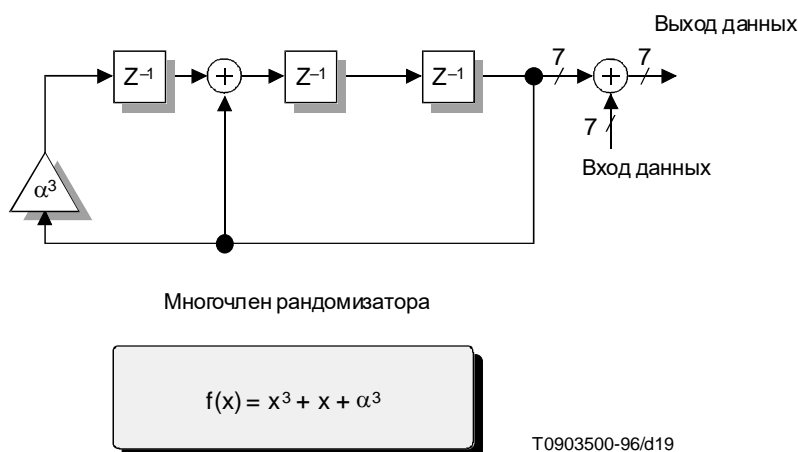


Рисунок В.11 – Рандомизатор (7-битовый символ)

В.5.5 Решетчато-кодовая модуляция

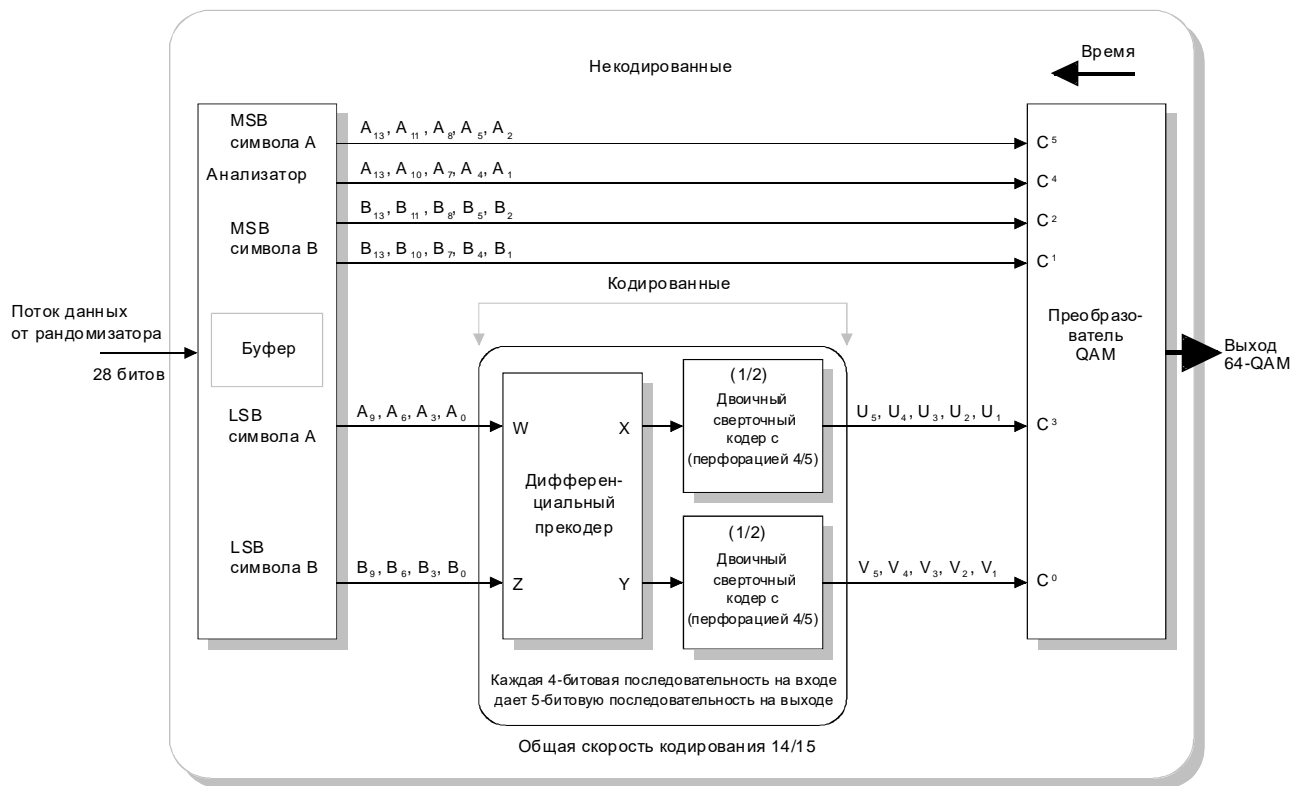
Для внутреннего кода в рамках схемы каскадного кодирования используется решетчатое кодирование. Оно позволяет ввести избыточность для улучшения порогового отношения сигнал/шум (SNR) путем увеличения созвездия символов без повышения скорости передачи символов. Поэтому правильнее называть его решетчато-кодовая модуляция.

В.5.5.1 Режим модуляции 64-QAM

Для 64-QAM на вход модулятора сигналов решетчатого кодирования подается 28-битовая последовательность из четырех 7-битовых символов RS, которые обозначаются парами символов A и B. Блок-схема модулятора решетчатого кодирования для 64-QAM показана на рисунке В.12. Все 28 битов составляют решетчатую группу, причем каждая решетчатая группа образует символы 5-QAM, как показано на рисунке В.13.

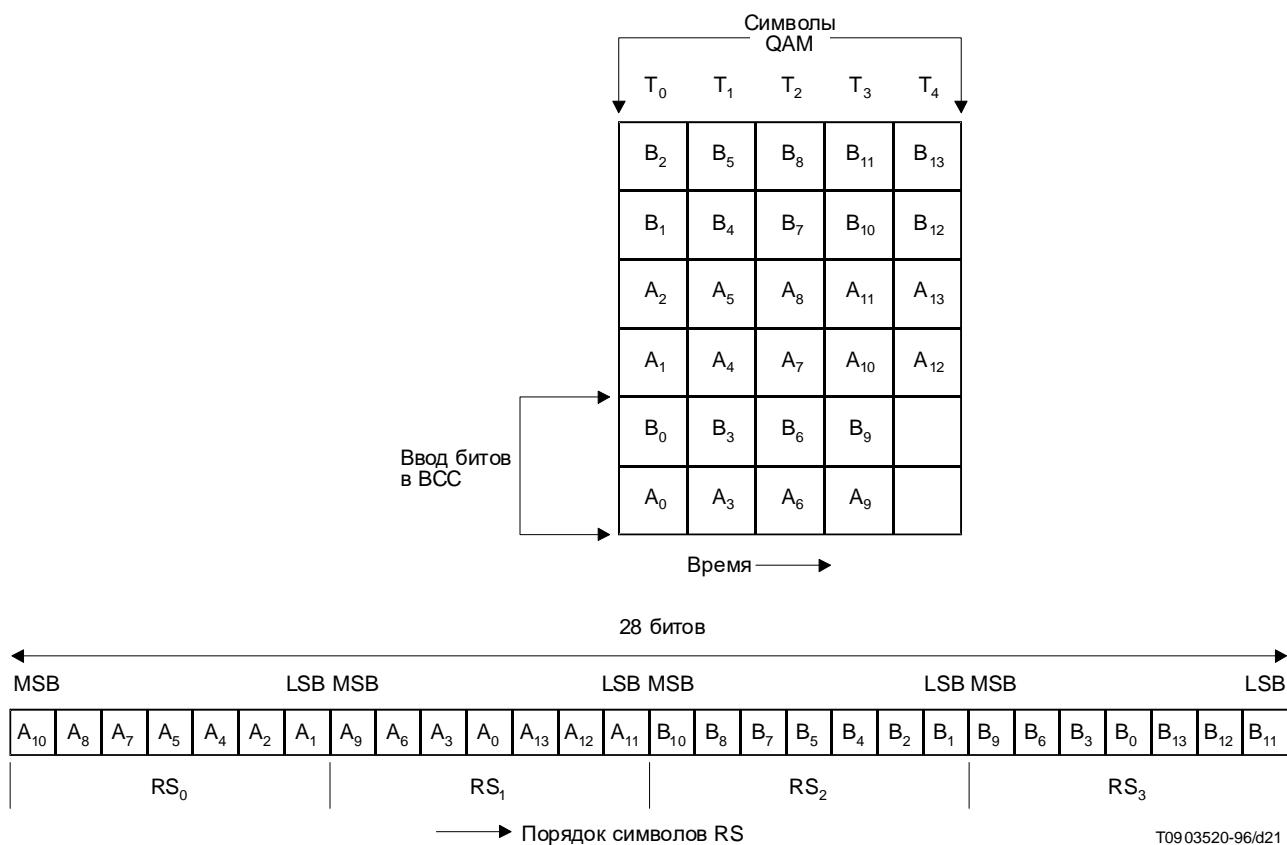
Из 28 входных битов, образующих решетчатую группу, каждая из двух групп по 4 бита дифференциально предварительно кодированных битовых потоков в решетчатой группе кодируется отдельно двоичным сверточным кодером (ВСС). Каждый ВСС производит 5 кодированных битов, как показано на рисунке В.12. Остальные биты отправляются в преобразователь некодированными. Это дает общую длину выходных данных 30 битов. Таким образом общая скорость кодирования сигналов решетчато-кодовой модуляции для 64-QAM составляет 14/15.

Решетчатая группа формируется из символов RS следующим образом. Для символов A символы RS считаются от MSB до LSB – $A_{10}, A_8, A_7, A_5, A_4, A_2, A_1$ и $A_9, A_6, A_3, A_0, A_{13}, A_{12}, A_{11}$. Четыре MSB второго символа вводятся в BCC по одному биту за один раз, начиная с LSB. Остальные биты второго символа и все биты первого символа вводятся в преобразователь некодированными, начиная с LSB, по одному за один раз. Четыре бита, отправленных в BCC, образуют 5 кодированных битов, обозначаемых U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 . Тот же процесс выполняется для битов B. Схема процесса показана на рисунке В.12. Для 64-QAM четыре символа RS удобно помещаются в одну решетчатую группу, и в этом случае слово синхронизации может занимать каждую позицию бита в решетчатой группе.



T0903510-96/d20

Рисунок В.12 – Блок-схема модулятора сигналов решетчатого кодирования для 64-QAM



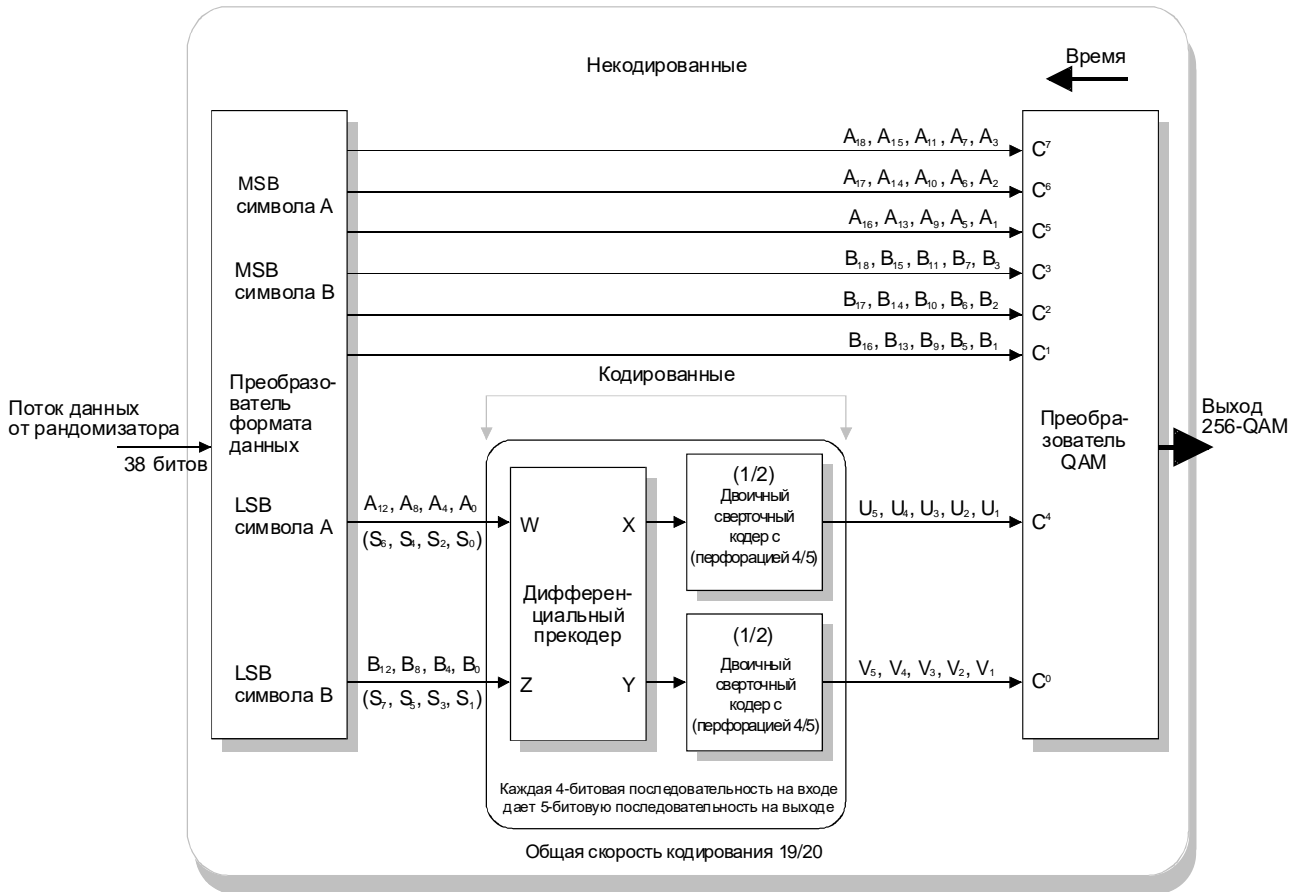
Порядок преобразования битов символов RS в решетчатую группу

Рисунок В.13 – Решетчатая группа 64-QAM

В.5.5.2 Режим модуляции 256-QAM

Для 256-QAM используется аналогичное решетчатое кодирование с применением того же ВСС, что и для 64-QAM, с тем же генератором, работающим со скоростью 1/2, и той же матрицей с перфорацией 4/5. Модулятор сигналов решетчатого кодирования для 256-QAM показан на рисунке В.14. В этом случае вся информация о синхронизации кадров FEC встраивается только в битовые позиции решетчатой группы со сверточным кодированием, как показано на рисунке В.15.

В 256-QAM имеются решетчатые группы двух типов: в дальнейшем они называются *несинхронизированной* и *синхронизированной* группами. Каждая решетчатая группа порождает в модуляторе символы 5-QAM, причем несинхронизированная группа содержит 38 битов данных, а синхронизированная – 30 битов данных и 8 битов синхронизации. Несинхронизированная и синхронизированная решетчатые группы показаны на рисунке В.15. Поскольку в каждом кадре FEC содержится 88 блоков RS плюс 40 битов кадровой синхронизации, каждый кадр состоит в общей сложности из 2076 решетчатых групп. В их числе 2071 несинхронизированная решетчатая группа и пять синхронизированных решетчатых групп. Эти 5 синхронизированных решетчатых групп находятся в конце кадра. Синхронизирующая конечная часть кадров выравнивается по решетчатым группам. В кодере решетчатая группа дополнительно подразделяется на две группы: некодированный поток битов и кодированный поток битов. MSB первого символа RS в кадре FEC присваивается первому биту первой несинхронизированной решетчатой группы, как показано на рисунке В.15. На выходе каждого ВСС будет соответственно пять битов четности $U_1 \dots U_5$ и $V_1 \dots V_5$, как показано на рисунке В.14.



T0903530-96/d22

Рисунок В.14 – Блок-схема модулятора сигналов решетчатого кодирования для 256-QAM

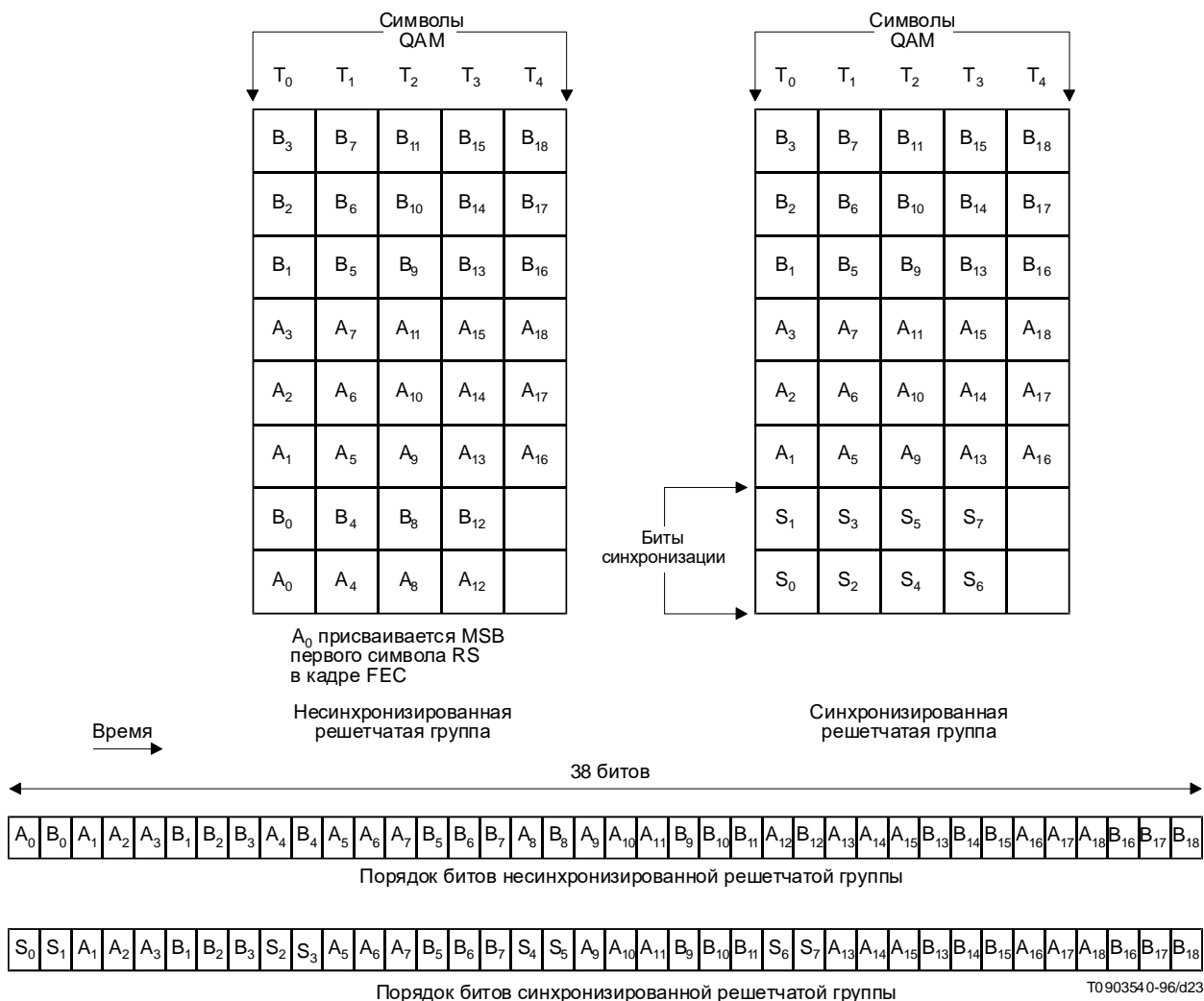


Рисунок В.15 – Синхронизированная и несинхронизированная решетчатые группы для 256-QAM

Для формирования решетчатых групп из кодовых слов RS кодовые слова RS упорядочиваются, начиная с MSB первого символа первого кодового слова RS, следующего за концевой частью сигнала кадровой синхронизации. Биты символов RS размещаются в позициях решетчатой группы в следующем порядке: A₀ B₀ A₁ ... B₃ A₄ B₄ ... B₁₆ B₁₇ B₁₈, как показано на рисунке В.15. Для синхронизированных решетчатых групп биты упорядоченных символов RS размещаются начиная с позиции A₁, а не A₀. Последние пять решетчатых групп в кадре FEC содержат по 8 из 40 битов синхронизации – S₀ S₁ ... S₇ в концевой части сигнала кадровой синхронизации, показанной на рисунке В.10.

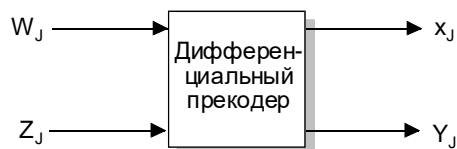
Из 38 входных битов, образующих решетчатую группу, каждая из двух групп по 4 бита дифференциально и предварительно кодированных битовых потоков в решетчатой группе кодируется отдельно двоичным сверточным кодером (ВСС). Каждый ВСС выдает по 5 кодированных битов, как показано на рисунке В.14. Остальные биты отправляются в QAM-преобразователь некодированными. Это дает в общей сложности по 40 битов на каждую решетчатую группу. Таким образом общая скорость кодирования для решетчато-кодовой модуляции 256-QAM составляет 19/20.

В.5.5.3 Ротационно-инвариантное предварительное кодирование

Дифференциальный прекодер, показанный на рисунке В.16, осуществляет решетчатое кодирование, нечувствительное к повороту на 90°. Ротационно-инвариантное кодирование используется для модуляции как 64-, так и 256-QAM. Ключом к созданию надежного модема является очень быстрое восстановление после сдвига фазы несущей. Для неротационно-инвариантного кодирования, когда

отслеживание фазы несущей изменяет выравнивание квадрантов, требуется повторная синхронизация FEC, что приводит к серии ошибок на выходе FEC.

Дифференциальный прекодер позволяет передавать информацию путем изменения фазы, а не при помощи абсолютной фазы. Для 64-QAM дифференциально кодируются 3-й и 6-й биты 6-битовых символов, а для 256-QAM – 4-й и 8-й биты. Если замаскировать 3-й и 6-й биты для 64-QAM, как показано на рисунке В.18 (обозначенные C^3 и C^0), и 4-й и 8-й биты для 256-QAM, как показано на рисунке В.19 (обозначенные C^4 и C^0), то для маркировки созвездия символов будет характерна нечувствительность оставшихся битов к повороту на 90° .



Уравнения дифференциального прекодера

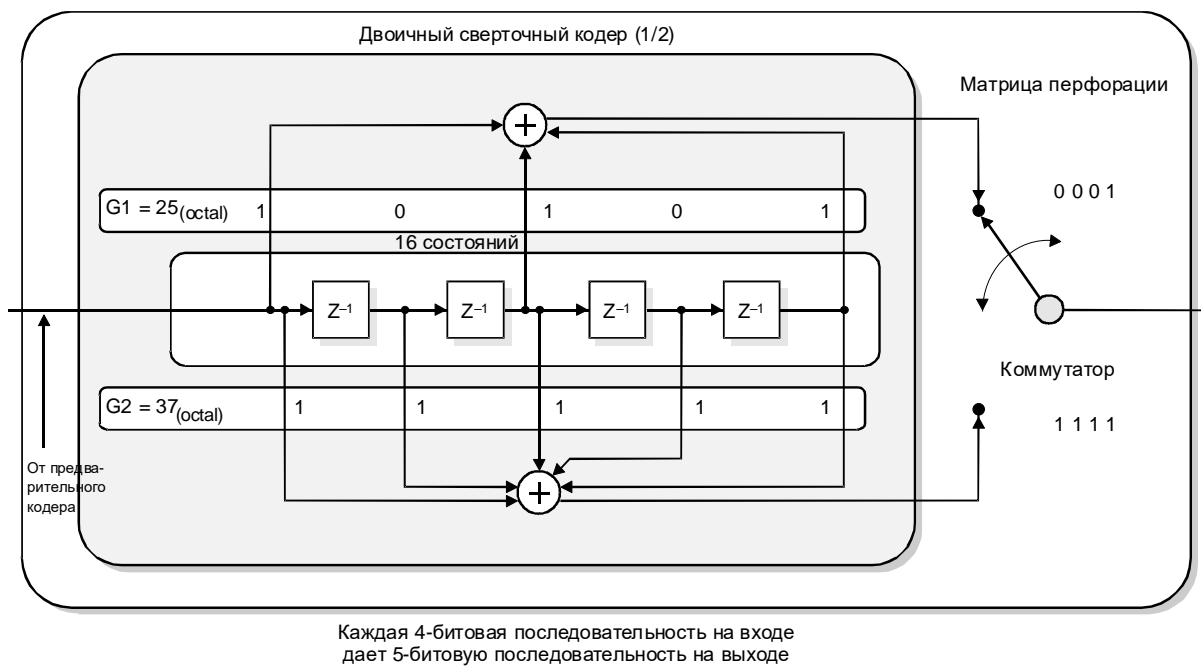
$$\begin{aligned}
 X_J &= W_J + X_{J-1} + Z_J(X_{J-1} + Y_{J-1}) \\
 Y_J &= Z_J + W_J + Y_{J-1} + Z_J(X_{J-1} + Y_{J-1})
 \end{aligned}$$

T0903550-96/d24

Рисунок В.16 – Дифференциальный прекодер

В.5.5.4 Двоичный сверточный кодер

Модулятор с решетчатым кодированием включает в себя двоичный сверточный кодер со скоростью перфорированного кодирования $1/2$, который используется для введения избыточности в младшие значащие биты решетчатой группы. Сверточный кодер представляет собой несистематический кодер на 16 состояний со скоростью кодирования $1/2$ с генератором $G1 = 010\ 101$, $G2 = 011\ 111$ ($25,37_{\text{octal}}$) или эквивалентной порождающей матрицей $[1 \oplus D^2 \oplus D^4, 1 \oplus D \oplus D^2 \oplus D^3 \oplus D^4]$. В начале решетчатой группы коммутатор ВСС изначально находится в позиции $G1$. Для каждого входного бита, представленного в линии задержки с ответвлением, последовательно создаются два бита ($G1$ и следующий за ним $G2$) в соответствии с ассоциируемым набором коэффициентов генератора. Для каждой решетчатой группы 4 входных бита выдают 8 сверточно-кодированных битов. На этот раз выход кодера выбирается в соответствии с матрицей перфорации $[P1, P2] = [0001; 1111]$ (0 означает отсутствие передачи, 1 – передачу), которая генерирует один последовательный битовый поток. Матрица перфорации, по существу, изменяет скорость кодирования с $1/2$ на $4/5$, поскольку после перфорации сохраняются только 5 из 8 кодированных битов. Внутренняя структура кодера с перфорацией показана на рисунке В.17.



Конструкция двоичного сверточного кодера

- 1) 16 состояний.
- 2) Двоичный сверточный кодер со скоростью кодирования 1/2.
- 3) Порождающий код: $G1 = [010\ 101]$, $G2 = [011111]$ (25, 37_{octal})
или порождающая матрица $[1(+)\text{D}^2(+)\text{D}^1, 1(+)\text{D}(+)\text{D}^2(+)\text{D}^3(+)\text{D}^4]$,
где $D = Z^{-1}$.
- 4) Матрица перфорации $[P1; P2] = [0001; 1111]$.

T0903560-96/d25

К преобразователю
QAM

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – 0 означает отсутствие передачи, 1 – передачу.

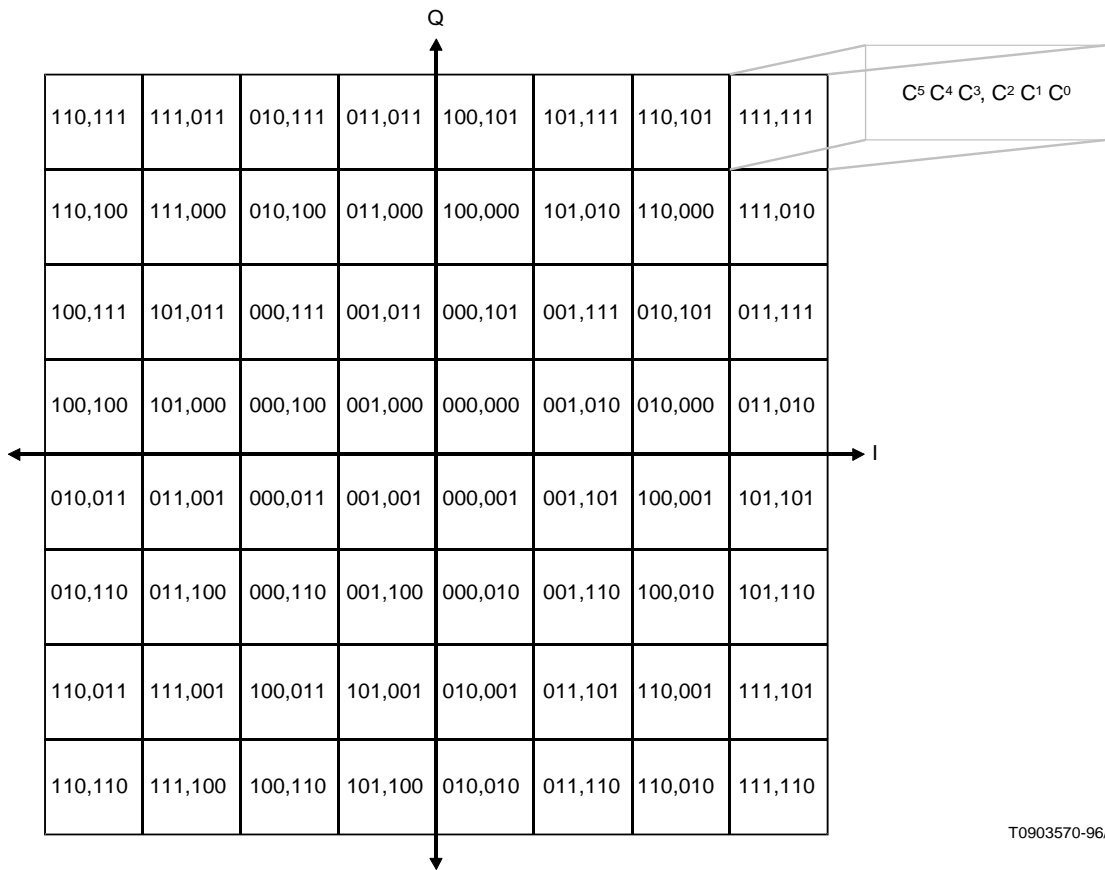
ПРИМЕЧАНИЕ 2. – (+) означает операцию "исключающее ИЛИ".

Рисунок В.17 – Двоичный сверточный кодер с перфорацией

В.5.5.5 Преобразование созвездия QAM

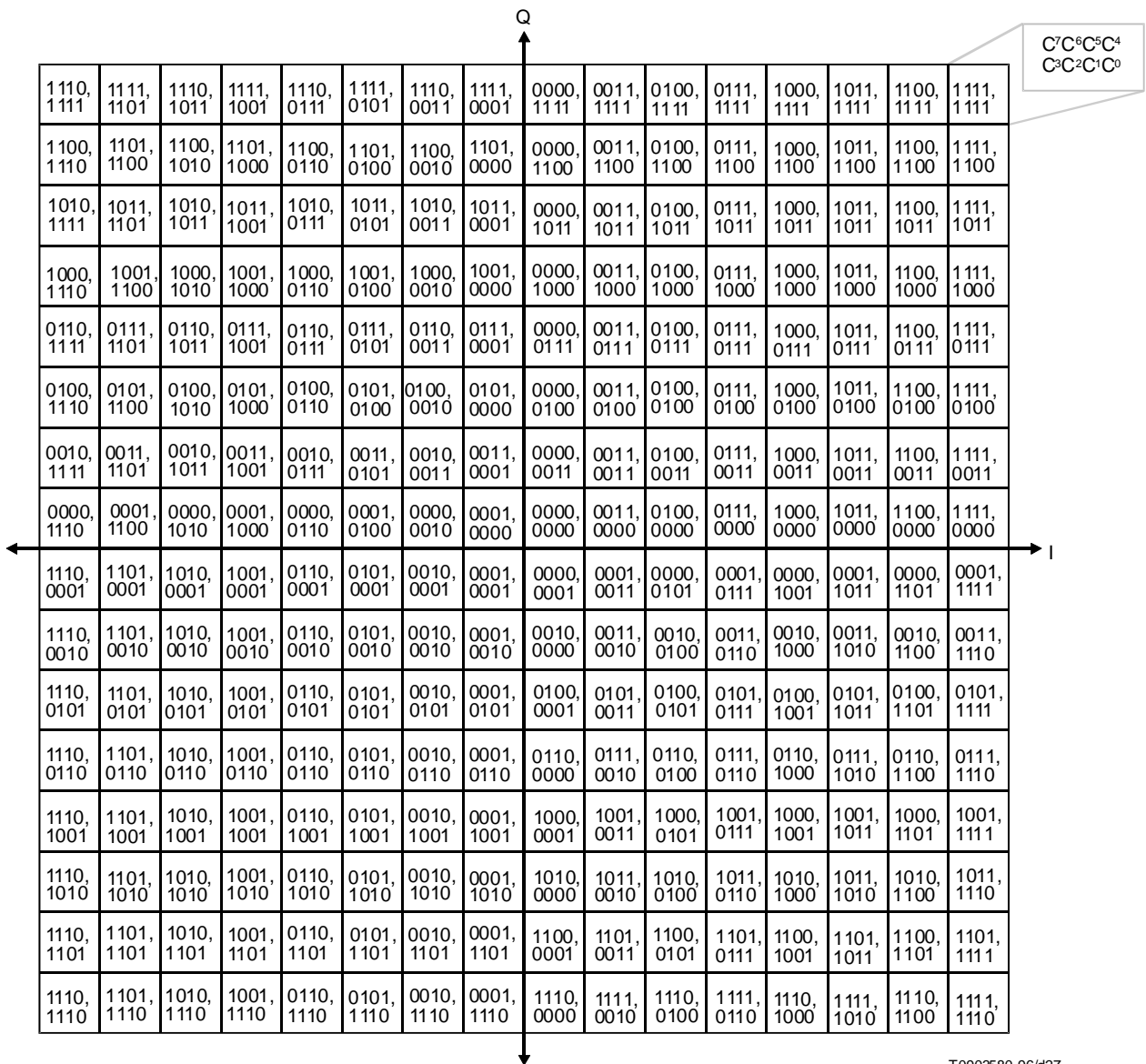
При модуляции 64-QAM преобразователь QAM получает от модулятора решетчатого кодирования 3-битовые закодированные и не закодированные данные А и В. Эти биты используются для обращения к справочной таблице, которая выдает 6-битовый символ созвездия. Затем 6-битовый символ созвездия направляется в модулятор 64-QAM, где генерируется созвездие сигнала, как показано на рисунке В.18.

При модуляции 256-QAM преобразователь QAM получает от модулятора решетчатого кодирования 4-битовые закодированные и не закодированные данные А и В. Эти биты используются для обращения к справочной таблице, которая выдает 8-битовый символ созвездия. Затем 8-битовый символ созвездия направляется в модулятор 256-QAM, где генерируется созвездие сигнала, как показано на рисунке В.19.



T0903570-96/d26

Рисунок В.18 – Созвездие 64-QAM



T0903580-96/d27

Рисунок В.19 – Созвездие 256-QAM

В.6 Модуляция и демодуляция

В.6.1 Характеристики QAM

Сводные характеристики формата кабельной передачи для 64-QAM и 256-QAM приведены в таблице В.3. В таблице В.4 содержится сводная информация о соответствующих характеристиках режимов с переменным перемежением.

Таблица В.3 – Формат кабельной передачи

Параметр	Формат 64-QAM	Формат 256-QAM
Модуляция	64-QAM, ротационно-инвариантное кодирование	256-QAM, ротационно-инвариантное кодирование
Размер символа	3 бита для размерности I и 3 бита для размерности Q	4 бита для размерности I и 4 бита для размерности Q
Полоса передачи	От 54 до 860 МГц (Примечание)	От 54 до 860 МГц (Примечание)
Разнос каналов	6 МГц (Примечание)	6 МГц (Примечание)
Скорость передачи символов	5,056941 Мсимв./с \pm 5 ppm (Примечание)	5,360537 Мсимв./с \pm 5 ppm (Примечание)
Скорость передачи информации	26,97035 Мсимв./с \pm 5 ppm (Примечание)	38,81070 Мсимв./с \pm 5 ppm (Примечание)
Частотная характеристика	Фильтр с характеристикой типа квадратный корень из приподнятого косинуса (коэффициент спада \approx 0,18)	Фильтр с характеристикой типа квадратный корень из приподнятого косинуса (коэффициент спада \approx 0,12)
Формирование кадров FEC	42-битовый концевик синхронизации следует за 60 блоками RS (см. В.5.3)	40-битовый концевик синхронизации следует за 88 блоками RS (см. В.5.3)
Преобразование созвездия QAM	6 битов на символ (см. В.5.5)	8 битов на символ (см. В.5.5)
ПРИМЕЧАНИЕ. – Эти значения относятся к разнесу каналов 6 МГц. Дополнительные наборы для других значений разнеса каналов находятся в стадии изучения.		

Таблица В.4 – Режимы с переменным перемежением

	Уровень 1	Уровень 2
Формат QAM	64-QAM (см. таблицу В.3)	64- или 256-QAM (см. таблицу В.3)
Перемежение	Фиксированное перемежение (см. В.5.2) $I = 128$ $J = 1$	Переменное перемежение (см. В.5.2) $I = 128, 64, 32, 16, 8$ $J = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 16$

В.6.2 РЧ-выход модулятора QAM

РЧ-модулированный сигнал QAM $s(t)$ определяется следующим образом:

$$s(t) = I(t) \times \cos(2\pi ft) + Q(t) \times \sin(2\pi ft),$$

где t – время, f – частота РЧ-несущей, а $I(t)$ и $Q(t)$ – соответствующие значения компонента основной полосы частот и квадратурного компонента символов созвездия после фильтра Найквиста с характеристикой типа корень из приподнятого косинуса.

Приложение С

Цифровая многопрограммная система С

(Данное Приложение является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации.)

С.1 Введение

В данном Приложении приводится описание структуры формирования кадров, а также способов канального кодирования и модуляции цифровой многопрограммной системы кабельного распределения.

В этой системе используется транспортное мультиплексирование на основе MPEG-2 (см. раздел "Справочные документы" [2]), что позволяет ей взаимодействовать с другими средствами информации, такими как цифровое вещание, сети ЦСИС или пакетированные средства. Структура формирования кадров и способы канального кодирования те же, что приведены в Приложении А. Схемы модуляции – это 64-QAM и 256-QAM, а скорость передачи символов QAM и коэффициент спада оптимизируются для плана каналов шириной 6 МГц.

Данная система также допускает дальнейшую эволюцию до созвездий QAM более высокого порядка, и в настоящее время изучаются соответствующие модификации схем ее канального кодирования и преобразования символов.

С.2 Концепция кабельной системы

Кабельная система определяется как аппаратный функциональный блок, осуществляющий адаптацию ТВ-сигналов основной полосы частот к характеристикам кабельного канала.

ТВ-сигнал основной полосы может поступать в главный узел кабельной сети из системы радиовещания, вторичных линий распределения и подачи, а также от местных источников программ.

Применяется следующий процесс, как показано на рисунке С.1.

С.2.1 Сопряжение и синхронизация в основной полосе частот

Этот блок адаптирует структуру данных к формату источника сигнала. Структура формирования кадров должна соответствовать транспортному уровню MPEG-2, включая байты синхронизации.

С.2.2 Инверсия и рандомизация байта Sync 1

Этот блок инвертирует байт синхронизации MPEG-2 (Sync 1) через каждые восемь пакетов в соответствии со структурой кадрирования MPEG-2 и рандомизирует поток данных для целей формирования спектра.

С.2.3 Кодер Рида-Соломона (RS)

Этот блок применяет к каждому рандомизированному транспортному пакету укороченный код Рида-Соломона (RS) для создания пакета, защищенного от ошибок. Этот код также применяется к самому байту синхронизации.

С.2.4 Сверточный перемежитель

Этот блок выполняет сверточное перемежение глубиной $I = 12$ защищенных от ошибок пакетов. Периодичность байтов синхронизации должна оставаться неизменной.

С.2.5 Преобразование байтов в m -разрядные кортежи

Этот блок выполняет преобразование байтов, генерируемых перемежителем, в символы QAM.

С.2.6 Дифференциальное кодирование

Этот блок применяет дифференциальное кодирование двух старших значащих битов (MSB) каждого символа, чтобы получить созвездие, не чувствительное к повороту.

С.2.7 QAM-модуляция и физический интерфейс

Этот блок выполняет функцию фильтра с характеристикой типа квадратный корень из приподнятого косинуса для сигналов I и Q перед QAM-модуляцией. Затем производится сопряжение QAM-модулированного сигнала с радиочастотным (RF) кабельным каналом.

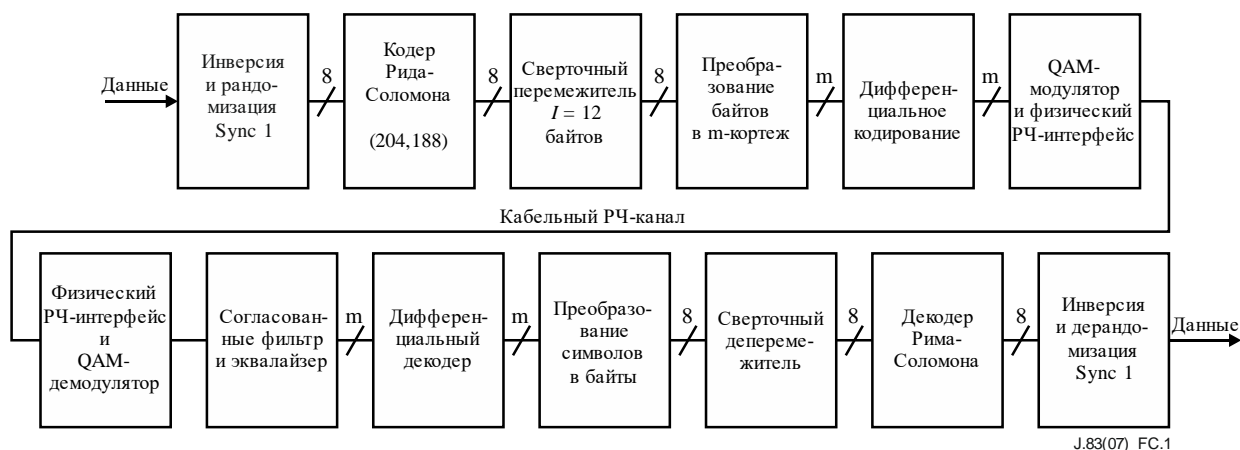


Рисунок С.1 – Конфигурация системы

С.2.8 Кабельный приемник

Приемник системы выполняет обработку сигнала, обратную по отношению к описанному выше процессу модуляции, для восстановления сигнала основной полосы частот.

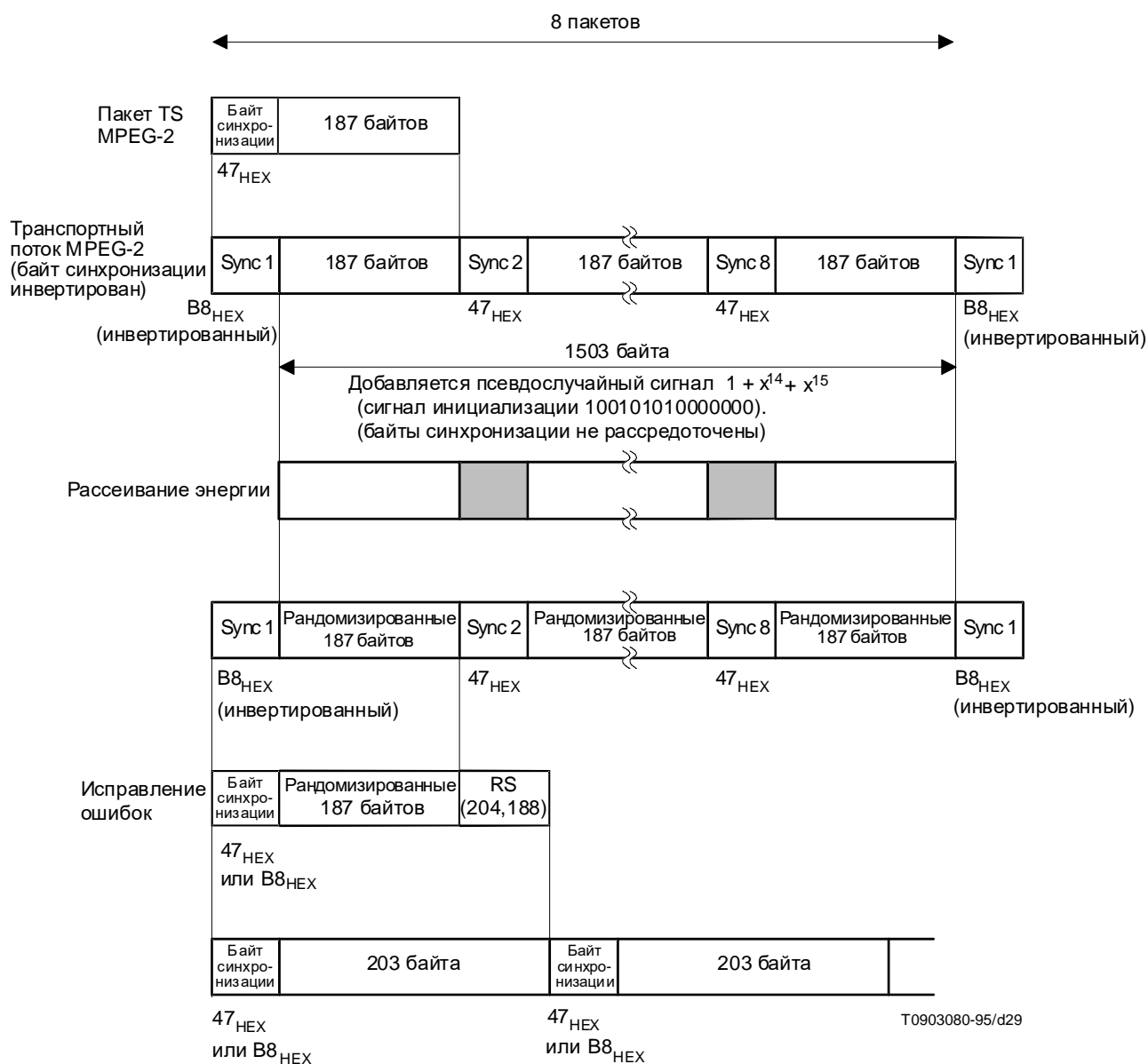
Кроме того, в каждом кабельном приемнике устанавливается эквалайзер, с тем чтобы не допустить увеличения интенсивности битовых ошибок, вызванных отражением в кабельной системе.

С.3 Транспортный уровень MPEG-2

Транспортный уровень цифровой многопрограммной системы основан на стандарте MPEG-2 (см. [2] в разделе "Справочные документы"). Транспортное мультиплексирование выполняется в пакете транспортного потока, содержащем 188 байтов в соответствии со стандартом MPEG-2.

С.4 Структура формирования кадров

Порядок формирования кадров основан на структуре транспортного пакета MPEG-2. Структура кадров системы показана на рисунке С.2.



Переमेжение – сверточное перемежение (по байтовым словам).
Задержка байтов синхронизации отсутствует.

Рисунок С.2 – Конфигурация передаваемого сигнала

С.5 Канальное кодирование

Для достижения соответствующего уровня защиты от ошибок, требуемого для передачи цифровых данных по кабельным каналам, используется упреждающая коррекция ошибок (FEC) на основе кода Рида-Соломона. Защита от пакетных ошибок обеспечивается путем перемежения.

С.5.1 Рандомизация

Входной поток системы группируется в пакеты фиксированной длины (см. рисунок С.2), поступающие из транспортного мультиплексора MPEG-2. Общая длина транспортного мультиплексного пакета MPEG-2 составляет 188 байтов. В состав пакета входит один байт слова синхронизации.

Чтобы обеспечить максимальную совместимость с другими средствами информации и адекватные двоичные переходы для восстановления синхронизации, данные на выходе транспортного мультиплексора MPEG-2 рандомизируются в соответствии с конфигурацией, показанной на рисунке С.3.

С.5.3 Сверточное перемежение

В соответствии со схемой, показанной на рисунке С.4, к пакетам данных с защитой от ошибок применяется сверточное перемежение с глубиной $I = 12$.

Перемежитель может содержать $I = 12$ ветвей, циклически подключаемых к входному байтовому потоку с помощью входного коммутатора. Каждая ветвь представляет собой регистр сдвига, построенный по методу FIFO (то есть в порядке очереди) с ячейками емкостью (M_j) (где $M = 17 = N/I$, $N = 204$ – длина кадра с защитой от ошибок, $I = 12$ – глубина перемежения, j – индекс ветви). Ячейки FIFO должны содержать 1 байт, а входные и выходные коммутаторы должны быть синхронизированы.

Для обеспечения синхронизации неинвертированные и инвертированные синхробайты всегда подаются в ветвь с индексом 0 перемежителя (соответствующую нулевой задержке).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Устройство для деперемежения, по сути, похоже на перемежитель, однако отличается обратной индексацией ветвей (то есть $j = 0$ соответствует наибольшей задержке). Синхронизация деперемежителя может обеспечиваться путем подачи первого распознанного синхробайта в ветвь 0.

С.6 Модуляция

С.6.1 Преобразование байтов в символы

После сверточного перемежения выполняется безошибочное преобразование байтов в символы. Оно основано на использовании границ байта в системе модуляции.

В каждом случае MSB символа Z берется из MSB байта V . Соответственно следующий значащий бит символа берется из следующего значащего бита этого байта. Для случая модуляции 2^m -QAM данный процесс преобразует k байтов в n символов, так что

$$8k = n \cdot m.$$

Для случаев 64-QAM (когда $m = 6$, $k = 3$ и $n = 4$) и 256-QAM (когда $m = 8$, $k = 3$ и $n = 3$) этот процесс иллюстрируется на рисунке С.5.

С.6.2 Дифференциальное кодирование

Затем производится дифференциальное кодирование двух MSB каждого символа для получения созвездия QAM, нечувствительного к повороту на $\pi/2$. Дифференциальное кодирование двух MSB описывается следующим выражением:

$$I_k = \overline{(A_k \oplus B_k)} \cdot (A_k \oplus I_{k-1}) + (A_k \oplus B_k) \cdot (A_k \oplus Q_{k-1});$$
$$Q_k = \overline{(A_k \oplus B_k)} \cdot (B_k \oplus Q_{k-1}) + (A_k \oplus B_k) \cdot (B_k \oplus I_{k-1}).$$

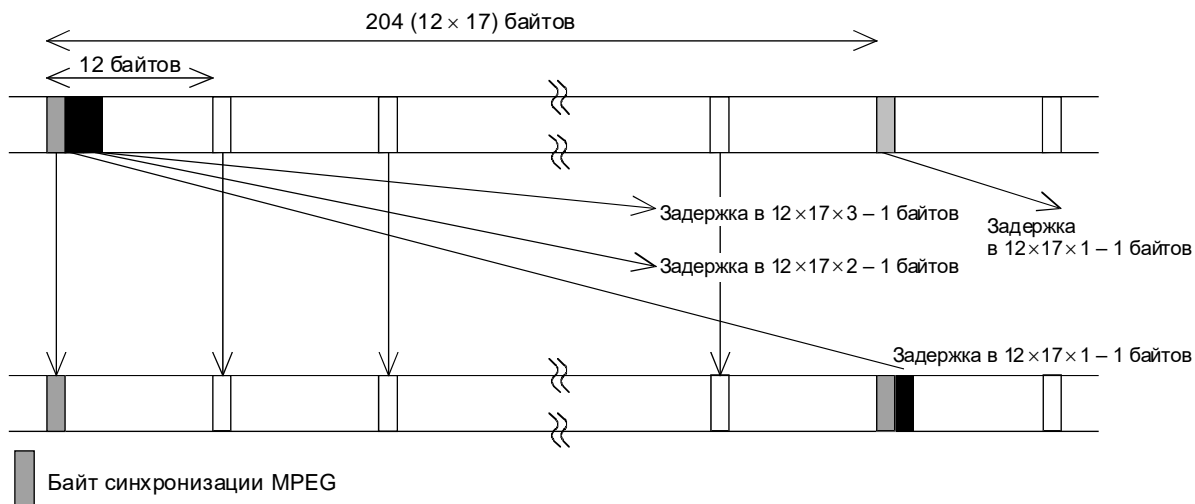
На рисунке С.6 приведен пример реализации процесса преобразования байтов в символы для 64-QAM и 256-QAM.

С.6.3 Созвездие QAM

Система может быть адаптирована к разносу каналов 6 МГц. Схема побайтовой модуляции, описываемая в этом подразделе, напрямую связана со способом преобразования байтов в символы, приведенным в разделе С.6.1.

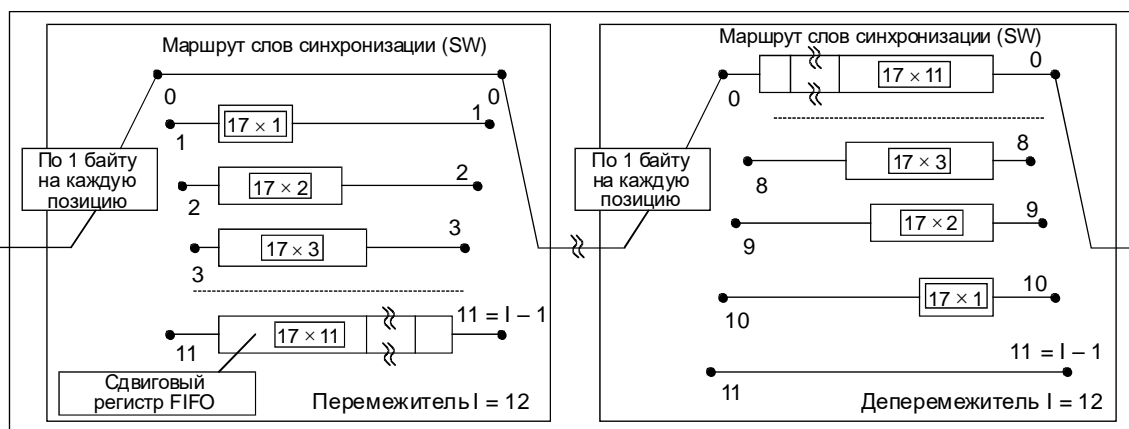
В данной системе выполняется квадратурно-амплитудная модуляция (QAM) с 64 точками (64-QAM) и 256 точками (256-QAM) в диаграмме созвездия.

Диаграммы созвездий системы для 64-QAM и 256-QAM приведены на рисунке С.7.



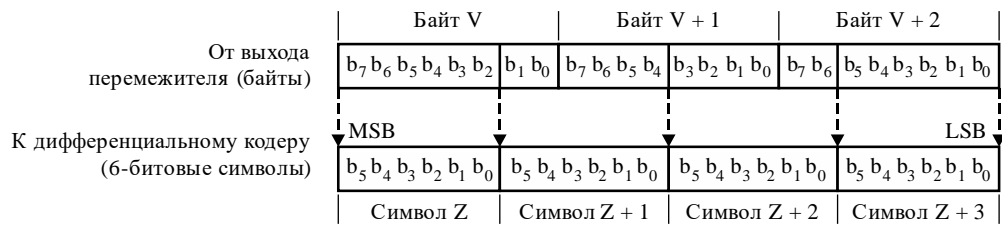
Глубина перемежения	$I (= 12)$
Синхронизация	Маршрутизация SW (цикл I)
Требуемая емкость памяти	$1/2 \times I \times L$

$L (= 17 \times 11)$

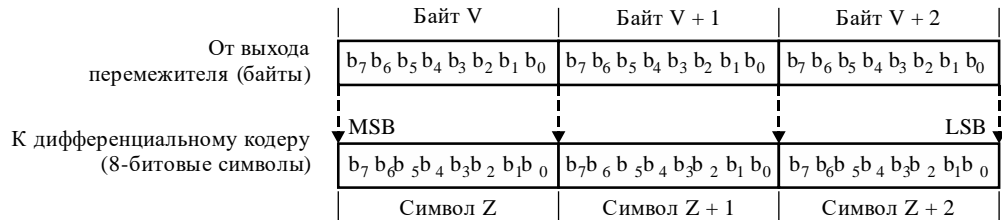


T0903100-95/d31

Рисунок С.4 – Схема перемежения



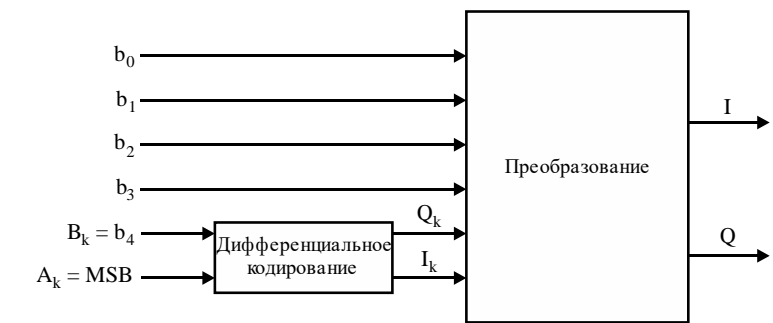
Преобразование байтов в m-кортеж 64-QAM



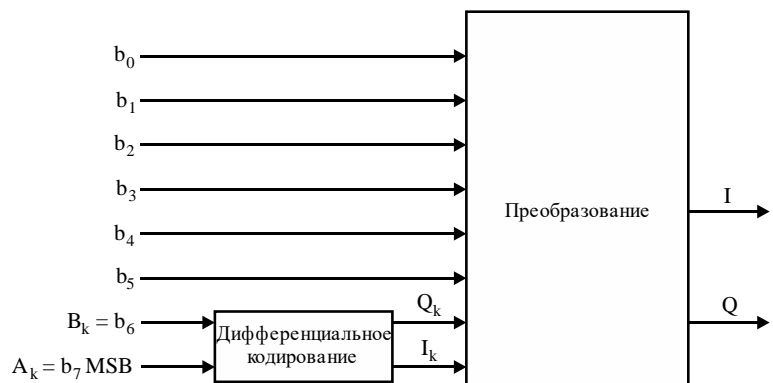
Преобразование байтов в m-кортеж 256-QAM

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Под b_0 следует понимать младший значащий бит (LSB) каждого байта или m-кортежа.
 ПРИМЕЧАНИЕ 2. – При этих преобразованиях каждый байт преобразуется в несколько m-кортежей, обозначаемых Z, Z + 1 и т. д., причем Z передается перед Z+1.

Рисунок С.5 – Преобразование байтов в m-разрядные кортежи для 64-QAM и 256-QAM



Преобразование байтов в символы 64-QAM



Преобразование байтов в символы 256-QAM

Рисунок С.6 – Пример реализации преобразования байтов в символы и дифференциального кодирования двух MSB

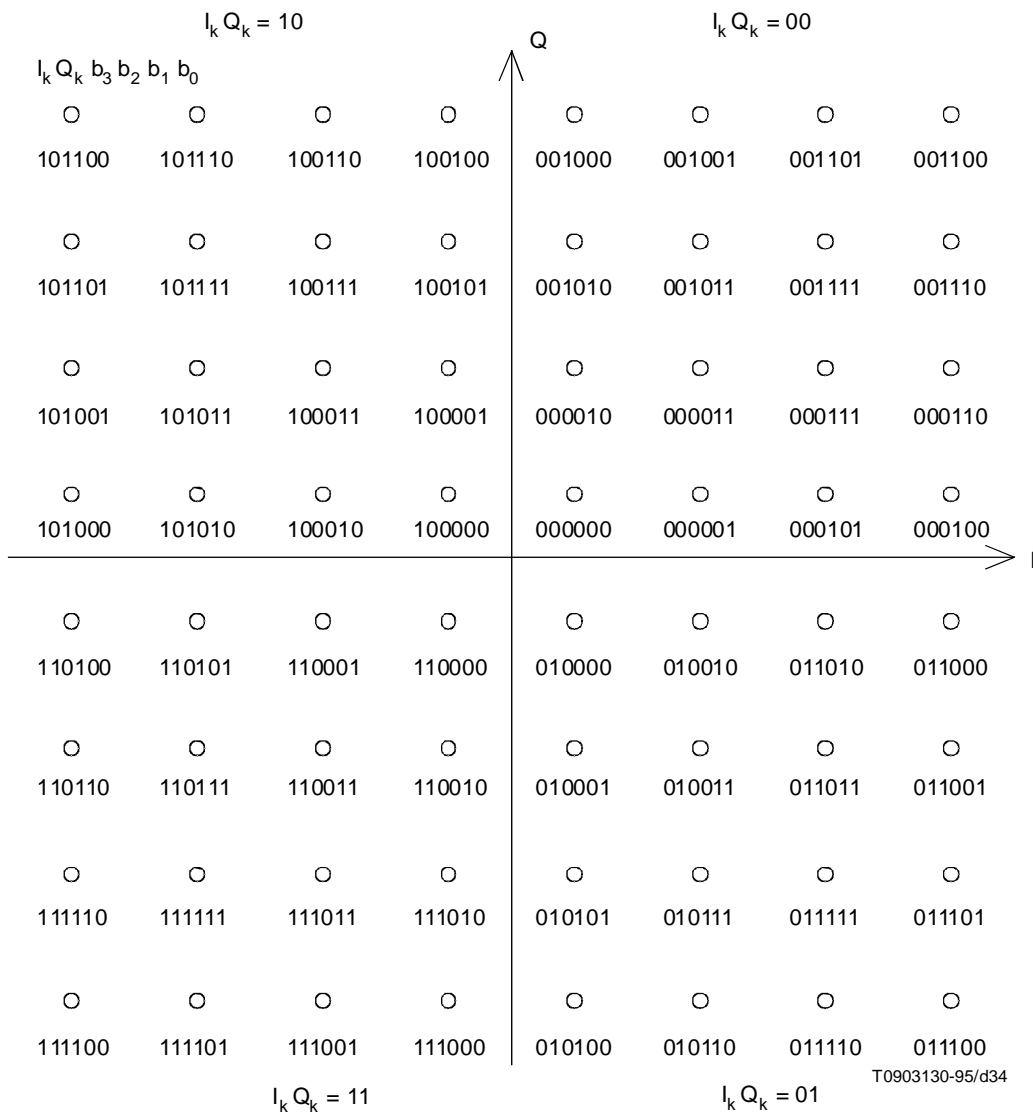
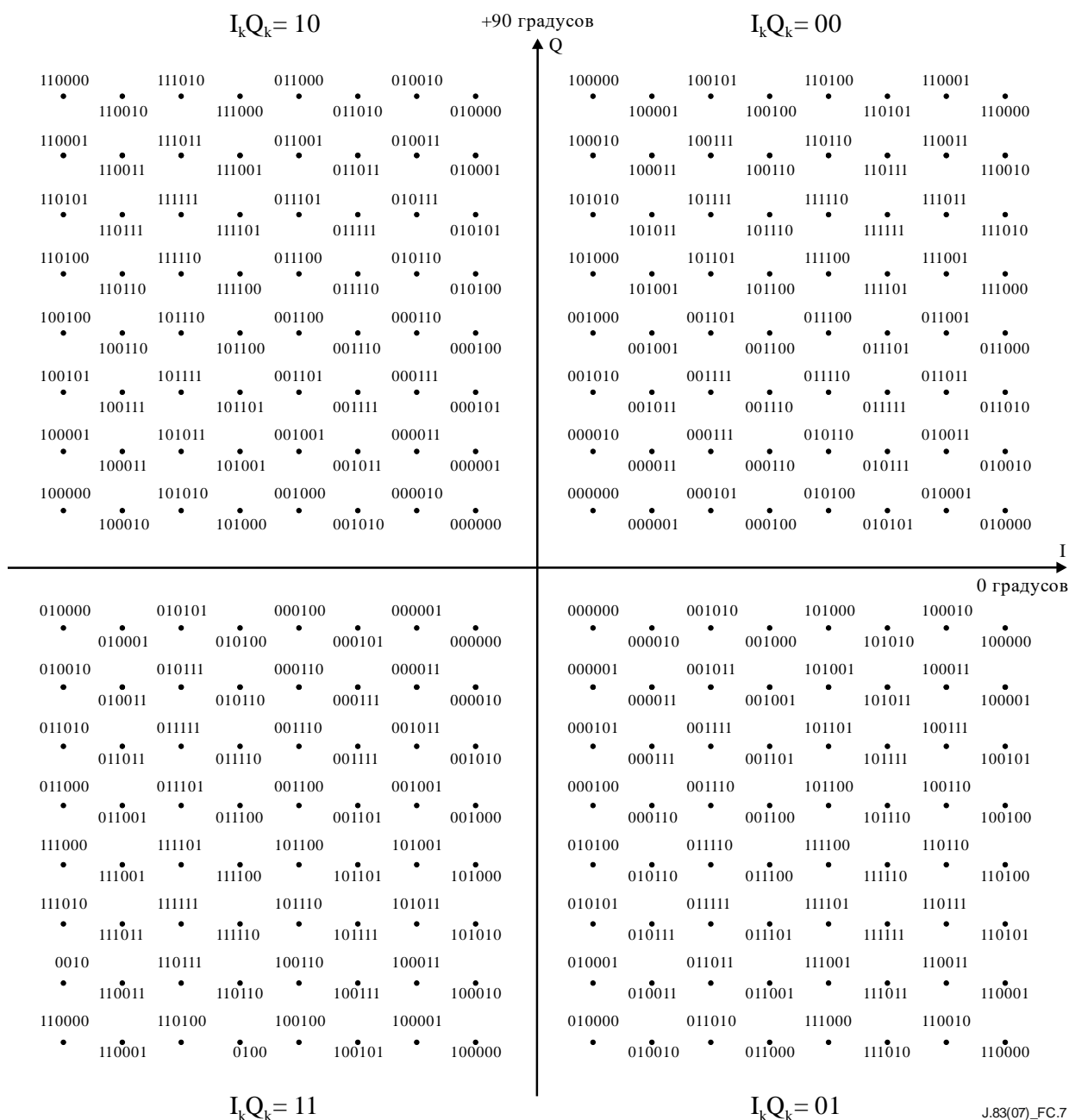


Рисунок С.7 – Часть 1 – диаграмма созвездия для 64-QAM



J.83(07)_FC.7

Рисунок С.7 – Часть 2 – диаграмма созвездия для 256-QAM

С.6.4 Коэффициент спада

Перед модуляцией сигналы I и Q проходят через фильтр с характеристикой типа квадратный корень из приподнятого косинуса. Коэффициент спада равен 0,13.

Теоретическая функция фильтра с характеристикой типа квадратный корень из приподнятого косинуса определяется следующими формулами:

$$H(f) = 1 \quad \text{для } |f| < f_N(1 - \alpha);$$

$$H(f) = \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{2f_N} \left[\frac{f_N - |f|}{\alpha} \right] \right]^{1/2} \quad \text{для } f_N(1 - \alpha) \leq |f| \leq f_N(1 + \alpha), \quad H(f) = 0 \quad \text{для } |f| > f_N(1 + \alpha),$$

где:

$$f_N = \frac{1}{2T_s} = \frac{R_s}{2} \quad \text{— это частота Найквиста, а коэффициент спада } \alpha = 0,13.$$

ПРИМЕЧАНИЕ. — Характеристики фильтра передачи приведены в следующем подразделе. Коэффициент спада применяется при наличии помех от сигналов соседнего канала (то есть ТВ-сигнала и т. д.) и при указанных характеристиках фильтра основной полосы.

С.6.5 Характеристики фильтра основной полосы

В качестве минимального требования к аппаратной реализации фильтра Найквиста следует использовать шаблон, приведенный на рисунке С.8. Этот шаблон учитывает не только конструктивные ограничения цифрового фильтра, но и искажения, создаваемые аналоговыми обрабатывающими компонентами системы (например, цифро-аналоговое преобразование, аналоговая фильтрация и т. д.).

Величина внутриполосной пульсации r_m в полосе пропускания до $(1 - \alpha)f_N$ должна быть ниже 0,4 дБ. Подавление вне полосы пропускания должно превышать 43 дБ. Пульсация r_N на частоте Найквиста f_N должна быть ниже 1,0 дБ.

Данный фильтр должен быть линейно-фазовым с пульсацией групповой задержки $\leq 1,0 T_s$ (нс) в полосе пропускания до $(1 - \alpha)f_N$ и $\leq 2,0 T_s$ (нс) при f_N ,

где:

$$T_s = \frac{1}{R_s} \quad \text{— период символов.}$$

ПРИМЕЧАНИЕ. — Значения внутриполосной пульсации и внеполосного подавления, приведенные в этом Приложении, зависят от условий эксплуатации кабельных систем и могут потребовать дальнейшего изучения.

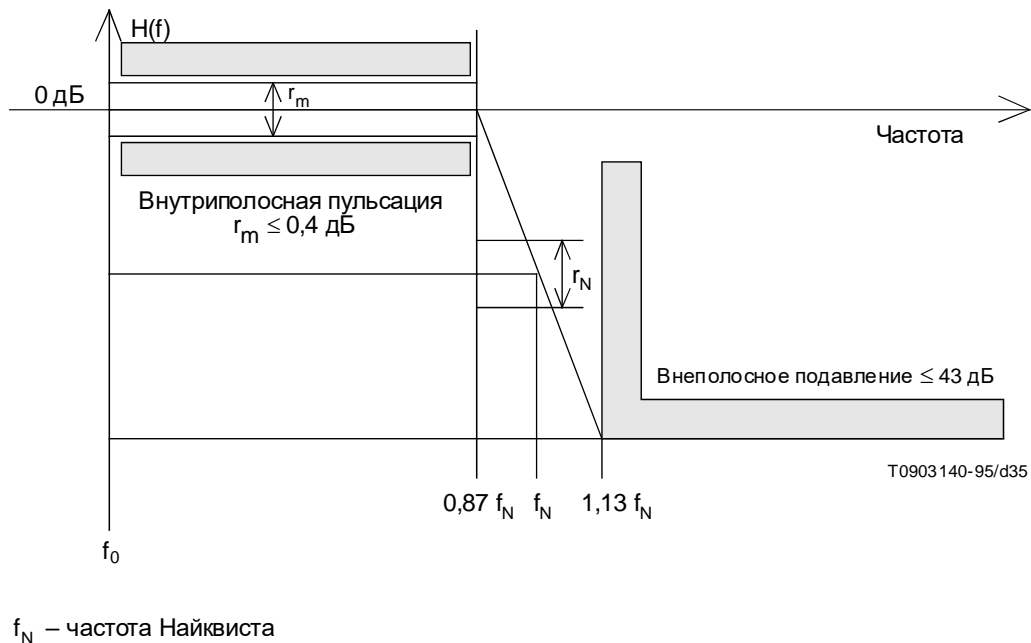


Рисунок С.8 — Амплитудные характеристики фильтра Найквиста в основной полосе частот (для половинного уровня спада)

Приложение D

Цифровая многопрограммная система D

(Данное Приложение является неотъемлемой частью настоящей Рекомендации.)

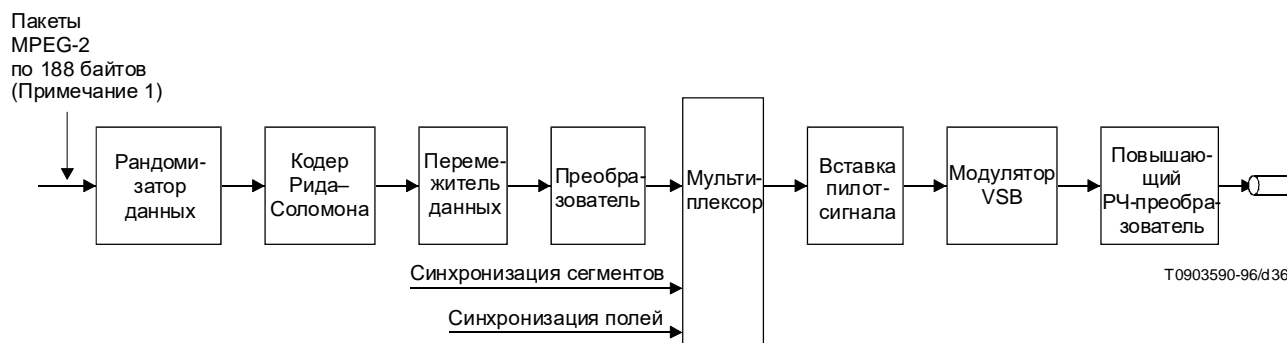
D.1 Введение

Данное Приложение основано на проделанной работе в области наземного цифрового телевизионного вещания в Северной Америке; в нем приводится описание структуры формирования кадров, канального кодирования и модуляции для распределения цифрового многопрограммного телевидения по кабельным сетям на основе транспортного мультиплексирования MPEG-2 и цифровой передачи 16-VSB (частично подавленная боковая полоса).

D.2 Концепция кабельной системы

Система 16-VSB поддерживает номинальную скорость передачи данных полезной нагрузки 38,78 Мбит/с в канале 6 МГц¹. Функциональная блок-схема типичного кабельного передатчика 16-VSB показана на рисунке D.1. Входные данные, поступающие в подсистему передачи из транспортной подсистемы, эквивалентны номинальному потоку последовательных данных со скоростью 38,78 Мбит/с, состоящему из MPEG-совместимых пакетов данных по 188 байтов, см. [2] в разделе "Справочные документы" (включая байт синхронизации и 187 байтов данных)¹.

Поступающие данные рандомизируются и затем обрабатываются в целях упреждающей коррекции ошибок (FEC) в форме кода Рида-Соломона (к каждому пакету добавляются 20 байтов контроля четности RS) и перемежения 1/12 поля данных. К байту синхронизации транспортного пакета, который при передаче представлен сигналом синхронизации сегмента данных, как описывается ниже, процессы рандомизации и FEC не применяются. После рандомизации и обработки с помощью упреждающей коррекции ошибок выполняется сверточное перемежение байтов, а затем пакеты данных форматируются в кадры данных для передачи с добавлением сигналов синхронизации сегментов данных и полей данных.



ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Предоставляются наземными радиовещательными, спутниковыми или местными источниками сигналов.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Включает в себя частные кабельные сети (гостиницы, жилые дома, кондоминиумы и школы – проводные и MMDS (многоканальная многоточечная распределительная система) – беспроводные микроволновые каналы).

Рисунок D.1 – Передатчик 16-VSB (узел кабельной сети или SMATV – Примечание 2)

¹ Значение параметра для канала с шириной полосы пропускания 6 МГц; для других значений полосы пропускания канала это значение может быть скорректировано.

D.3 Транспортный уровень MPEG-2

Транспортный уровень MPEG-2 определяется в документе [2] раздела "Справочные документы". Транспортный уровень для данных MPEG-2 состоит из пакетов по 188 байтов, содержащих один байт синхронизации и три байта заголовка с информацией об идентификации услуги, о скремблировании и управляющей информации, за которыми следуют 184 байта MPEG-2 или вспомогательных данных.

D.4 Структура формирования кадров

На рисунке D.2 показано, как группируются данные для передачи. Каждый кадр данных состоит из двух полей данных по 313 сегментов в каждом. Первый сегмент данных каждого поля представляет собой уникальный синхронизирующий сигнал (синхронизация полей данных) и включает в себя обучающую последовательность, используемую эквалайзером в приемнике. Каждый из оставшихся 312 сегментов данных переносит эквивалент двух транспортных пакетов по 188 байтов плюс соответствующие служебные сигналы FEC. Вследствие перемежения данных фактические данные поступают в каждый сегмент данных из нескольких транспортных пакетов. Каждый сегмент данных состоит из 832 символов. Первые 4 символа передаются в двоичной форме и обеспечивают синхронизацию сегмента. Этот сигнал синхронизации сегментов данных также является байтом синхронизации для каждого из двух MPEG-совместимых транспортных пакетов по 188 байтов. Оставшиеся 828 символов каждого сегмента данных содержат данные, состоящие из двух групп по 187 байтов данных, за которыми следуют 20 байтов кода Рида-Соломона. Эти 828 символов передаются в форме 16-уровневых сигналов и, следовательно, содержат по четыре бита на символ. Таким образом в каждом сегменте данных переносятся $828 \times 4 = 3312$ битов данных, что в точности соответствует требованию передачи двух защищенных транспортных пакетов:

$$187 \text{ байтов данных} + 20 \text{ байтов контроля четности RS} = 207 \text{ байтов};$$

$$2 \times 207 \text{ байтов} \times 8 \text{ бит/байт} = 3312.$$

Точная скорость передачи символов определяется следующим уравнением:

$$S_r (\text{МГц}) = 4,5/286 \times 684 = 10,76 \dots \text{МГц}^1.$$

16-уровневые символы в сочетании с двоичными сигналами синхронизации сегментов данных и полей данных используются для модуляции одной несущей в режиме с подавленной несущей. Однако перед передачей большая часть нижней боковой полосы удаляется. Результирующий спектр получается плоским, за исключением краев полосы, где номинальная характеристика типа квадратный корень из приподнятого косинуса приводит к переходным областям 620 кГц. Номинальный спектр передачи VSB показан на рисунке D.3¹.

На частоте подавленной несущей 310 кГц от нижней границы полосы к сигналу добавляется пилот-сигнал небольшого уровня.

Кабельная система позволяет также передавать стандартные телевизионные сигналы и по другим каналам, как показано на рисунке D.3. Номинальная средняя мощность сигнала VSB на 6 дБ ниже пиковой мощности синхронизации стандартных телевизионных сигналов, передаваемых по соседним каналам.

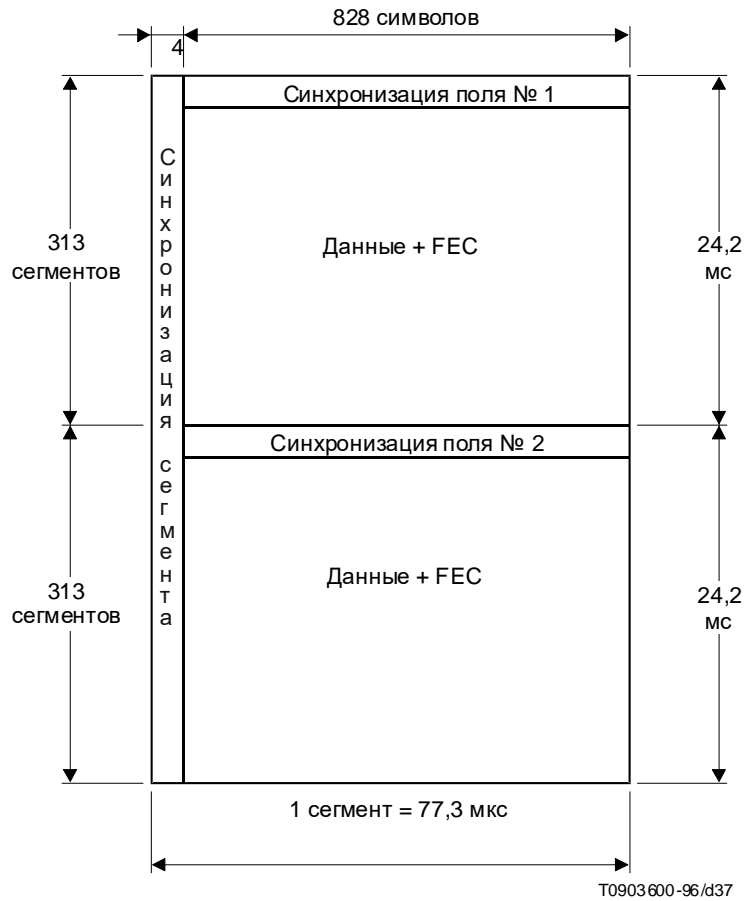


Рисунок D.2 – Кадр данных VSB

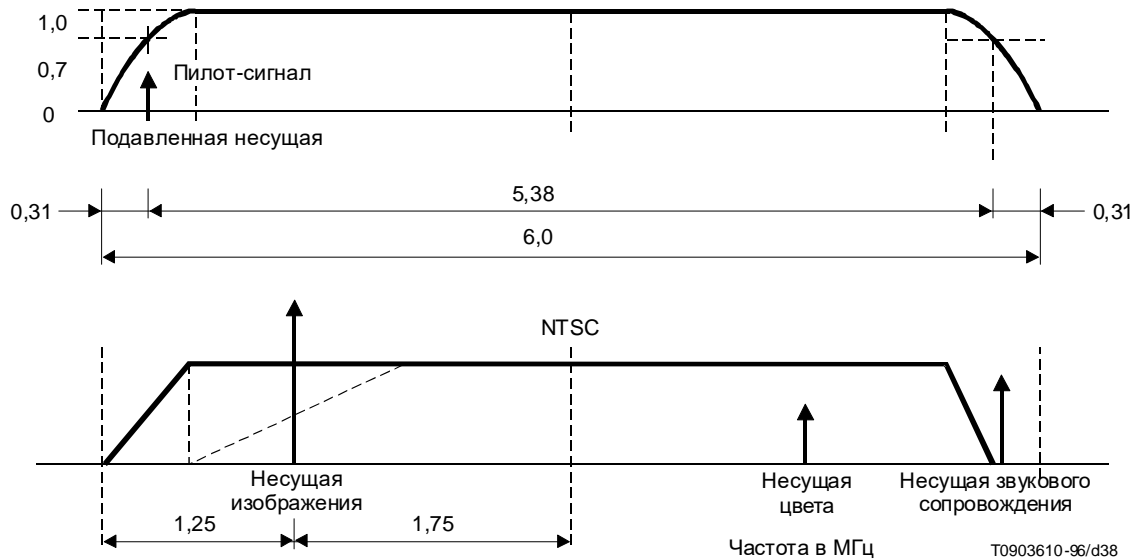


Рисунок D.3 – Занятость каналов VSB и NTSC

D.5 Канальное кодирование

D.5.1 Рандомизатор данных

Рандомизатор данных используется для рандомизации полезной нагрузки всех входных данных (исключая сигналы синхронизации полей данных и сегментов данных, а также байты контроля четности RS). Рандомизатор данных сопоставляет по схеме "исключающее ИЛИ" все входящие байты данных с псевдослучайной двоичной последовательностью (PRBS) максимальной длиной 16 битов, которая инициализируется в начале поля данных. PRBS генерируется в 16-разрядном сдвиговом регистре с 9 ответвлениями обратной связи. Восемь выходов сдвигового регистра выбираются в качестве фиксированного байта рандомизации, причем каждый бит этого байта используется для индивидуального сопоставления по схеме "исключающее ИЛИ" с соответствующим битом входных данных. Биты данных сопоставляются по схеме "исключающее ИЛИ": MSB с MSB ... LSB с LSB.

Инициализация (предварительная загрузка) шестнадцатеричного значения F180 (загрузка до 1) происходит в течение интервала синхронизации сегмента данных до первого сегмента данных.

Порождающий многочлен рандомизатора и его инициализация показаны на рисунке D.4.

Порождающий многочлен $G_{(16)} = x^{16} + x^{13} + x^{12} + x^{11} + x^7 + x^6 + x^3 + x + 1$
Инициализация (предварительная загрузка) происходит в течение интервала синхронизации полей

Инициализация в шестнадцатеричное значение
F180 (загрузка до 1)
 $x^{16} x^{15} x^{14} x^{13} x^9 x^8$

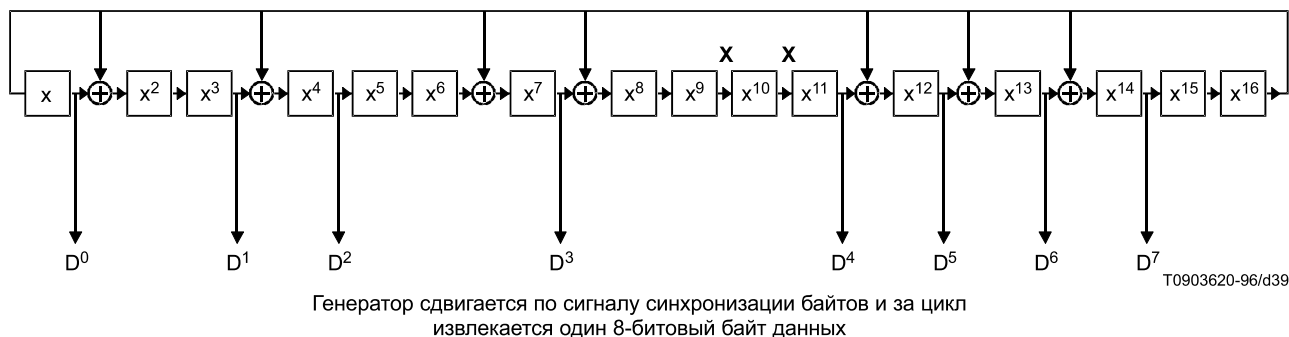


Рисунок D.4 – Многочлен рандомизатора

D.5.2 Кодер Рида-Соломона

Код RS, используемый в подсистеме передачи VSB, представляет собой код $t = 10$ (207, 187). Размер блока данных RS составляет 187 байтов с добавлением 20 байтов контроля четности RS для исправления ошибок. На каждый сегмент данных передаются два блока RS по 207 байтов.

В конце каждой соответствующей группы из 187 байтов передаются 20 байтов контроля четности RS. Порождающий многочлен контроля четности и порождающий многочлен примитивных элементов поля показаны на рисунке D.5.

$$\prod_{i=0}^{i=2t-1} (x + \alpha^i) = x^{20} + x^{19}\alpha^{17} + x^{18}\alpha^{60} + x^{17}\alpha^{79} + x^{16}\alpha^{50} + x^{15}\alpha^{61} + x^{14}\alpha^{163} +$$

$$+ x^{13}\alpha^{26} + x^{12}\alpha^{187} + x^{11}\alpha^{202} + x^{10}\alpha^{180} + x^9\alpha^{221} + x^8\alpha^{225} + x^7\alpha^{83} +$$

$$+ x^6\alpha^{239} + x^5\alpha^{156} + x^4\alpha^{164} + x^3\alpha^{212} + x^2\alpha^{212} + x^1\alpha^{188} + \alpha^{190}$$

$$= x^{20} + 152x^{19} + 185x^{18} + 240x^{17} + 5x^{16} + 111x^{15} + 99x^{14} +$$

$$+ 6x^{13} + 220x^{12} + 112x^{11} + 150x^{10} + 69x^9 + 36x^8 + 187x^7 +$$

$$+ 22x^6 + 228x^5 + 198x^4 + 121x^3 + 121x^2 + 165x^1 + 174.$$

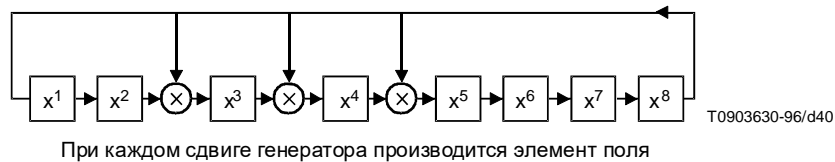
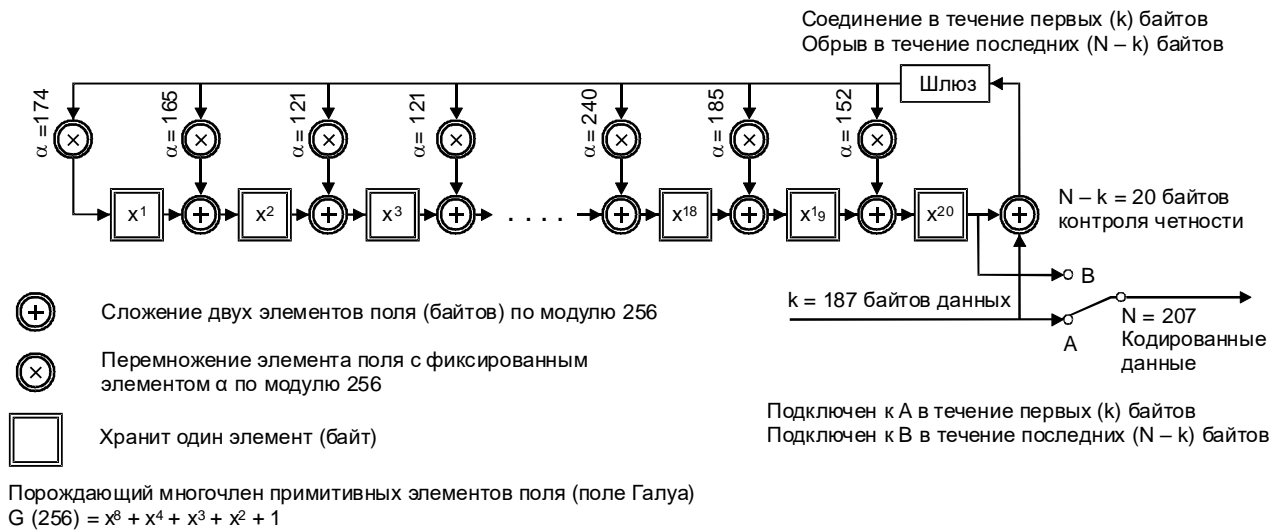


Рисунок D.5 – Порождающий многочлен контроля четности Рида-Соломона (207, 187) при $t = 100$

D.5.3 Перемежение

Перемежитель, используемый в системе передачи VSB, представляет собой сверточный байтовый перемежитель на 26 сегментов данных (межсегментный). Обеспечивается перемежение до глубины около 1/12 поля данных (соответствует 2 мс). Перемежаются только байты данных. Перемежитель синхронизируется с первым байтом данных поля данных. Сверточный перемежитель показан на рисунке D.6.

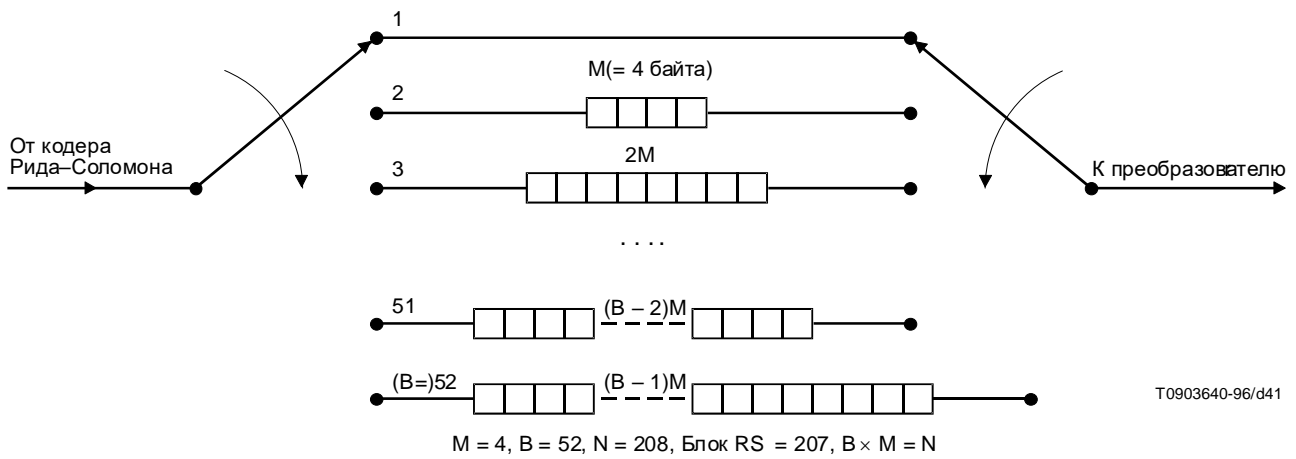


Рисунок D.6 – Сверточный перемежитель

D.5.4 Синхронизация сегментов данных

Многоуровневые данные передаются через мультиплексор, который вставляет различные сигналы синхронизации (сегментов данных и полей данных).

В начало каждого сегмента данных в потоке 16-уровневых цифровых данных вводится двухуровневый (двоичный) 4-символьный сигнал синхронизации сегментов данных. (Сигнал синхронизации сегментов данных заменяет байт синхронизации MPEG.) Сигнал синхронизации сегментов данных, встроенный в случайные данные, показан на рисунке D.7.

Полный сегмент состоит из 832 символов: четыре символа синхронизации сегмента данных и 828 символов данных плюс символ контроля четности. Сигнал синхронизации сегментов данных двоичный (двухуровневый). Одна и та же последовательность синхроимпульсов регулярно передается с интервалами 77,3 мкс и является единственным сигналом, повторяющимся с такой периодичностью. В отличие от данных, четыре символа синхронизации сегментов данных не кодируются кодом Рида-Соломона и не перемежаются. Шаблон синхронизации сегмента данных представляет собой комбинацию 1001, как показано на рисунке D.7.

D.5.5 Синхронизация полей данных

Данные разделяются не только на сегменты, но и на поля, каждое из которых состоит из 313 сегментов. Каждое поле данных (24,2 мс) начинается с одного полного сегмента данных синхронизации полей данных, как показано на рисунке D.8. Каждый символ состоит из одного бита данных (двухуровневый). Ниже определяются 832 символа этого сегмента. См. рисунок D.8.

D.5.5.1 Сигнал синхронизации

Соответствует сигналу синхронизации сегментов данных и определяется как 1001.

D.5.5.2 PN511

Эта псевдослучайная последовательность определяется как $x^9 + x^7 + x^6 + x^4 + x^3 + x + 1$ с предварительно загружаемым значением 010000000.

Генератор последовательности PN511 показан на рисунке D.9.

D.5.5.3 PN63

Эта псевдослучайная последовательность повторяется три раза. Она определяется как $x^6 + x + 1$ с предварительно загружаемым значением 100111. Средняя последовательность PN63 инвертируется для каждого второго сигнала синхронизации полей данных.

Генератор последовательности PN63 показан на рисунке D.9.

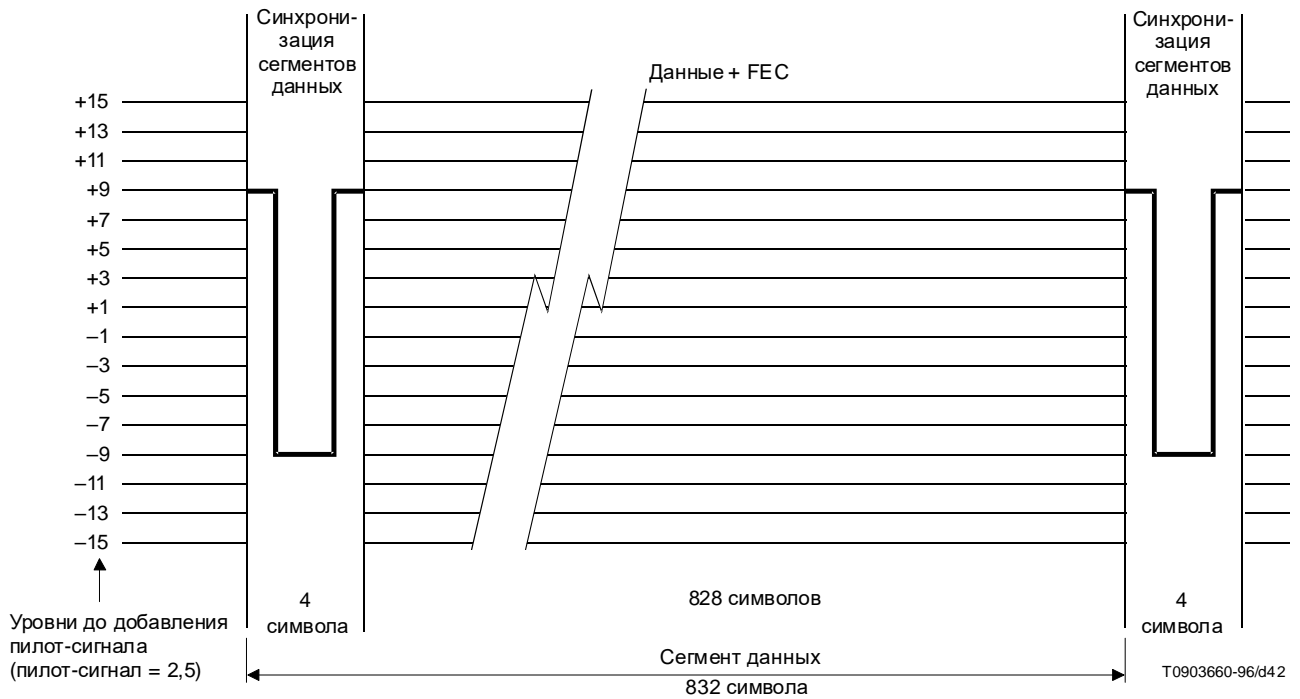


Рисунок D.7 – Сегмент данных 16-VSB

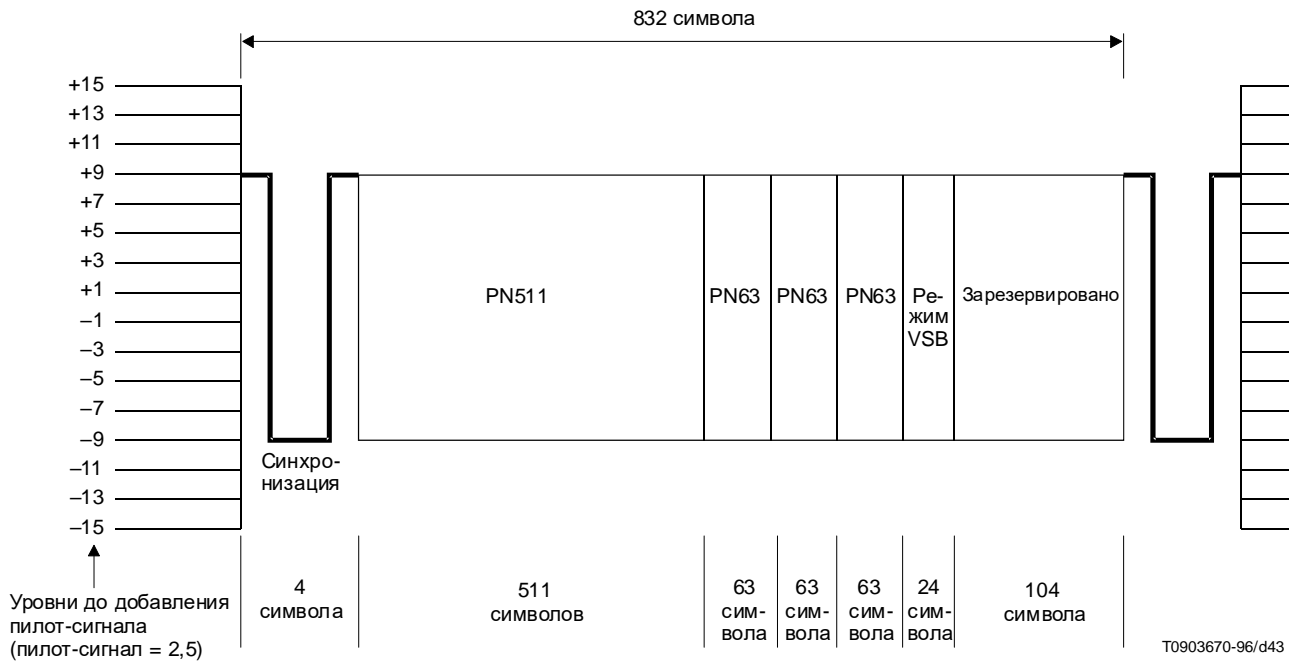


Рисунок D.8 – Синхронизация полей данных 16-VSB

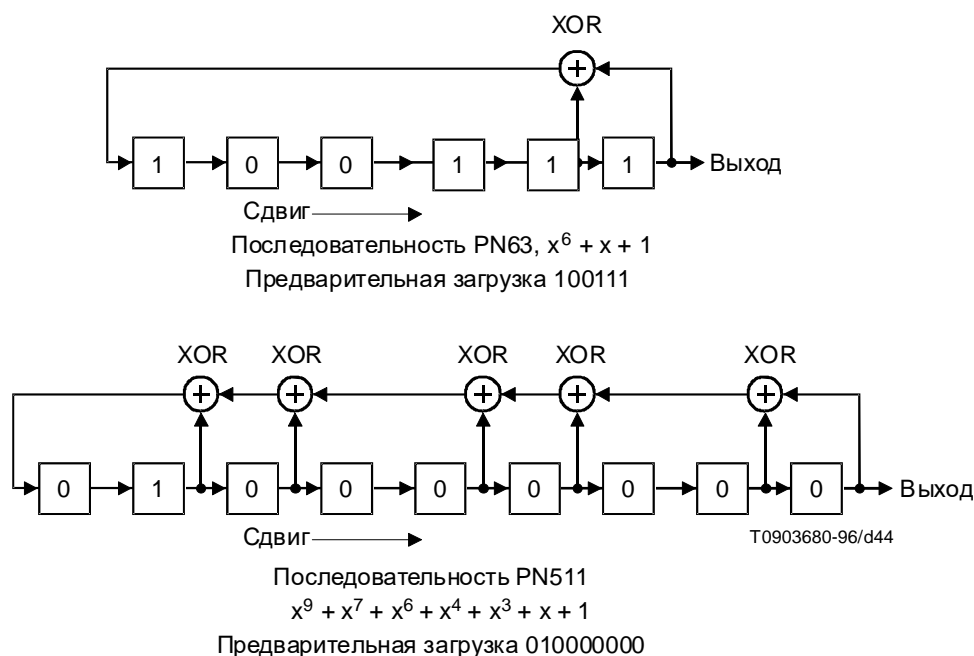


Рисунок D.9 – Генераторы PN-последовательностей синхронизации полей

D.5.5.4 Режим VSB

Эти 24 бита определяют режим VSB для данных внутри кадра. Первые два байта зарезервированы. Рекомендуемый шаблон заполнения 0000111100001111. Следующий байт определяется следующим образом:

P A B C P A B C,

где P – бит контроля четности, MSB байта, а A, B, C – фактические биты режима.

P A B C

0 0 0 0 2 VSB

1 0 0 1 4 VSB

1 0 1 0 8 VSB

0 0 1 1 Зарезервирован

1 1 0 0 Кабельное вещание 16-VSB

0 1 0 1 Наземное вещание 8-VSB (Примечания) (решетчатое кодирование)

0 1 1 0 Зарезервирован

1 1 1 1 Зарезервирован

ПРИМЕЧАНИЕ. – В режиме наземного вещания 8-VSB предыдущие биты определяются следующим образом:

0 0 0 0 P A B C P A B C 1 1 1 1.

D.5.5.5 Зарезервировано

Последние 104 бита – это зарезервированное пространство. Предполагается, что оно заполняется продолжением последовательности PN63.

Все последовательности предварительно загружаются перед началом сигнала синхронизации полей данных.

Как и сигнал синхронизации сегментов данных, сигнал синхронизации полей данных не кодируется кодом Рида-Соломона и не перемежается.

D.6 Модуляция

D.6.1 Преобразование битов в символы

На рисунке D.10 показана схема преобразования выходных сигналов перемежителя в сигналы номинальных уровней ($\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \pm 9, \pm 11, \pm 13, \pm 15$). Как показано на рисунках D.7 и D.8, номинальные уровни сигналов синхронизации сегментов данных и полей данных составляют -9 и $+9$.

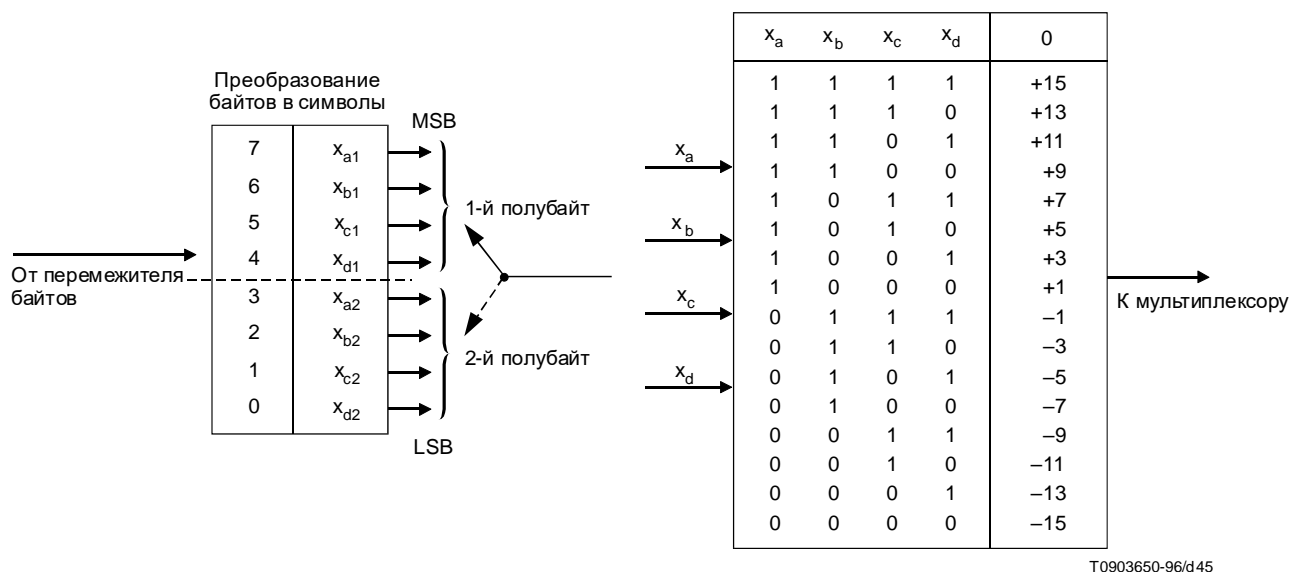


Рисунок D.10 – Преобразователь 16-VSB

D.6.2 Добавление пилот-сигнала

К сигналу данных добавляется короткий синфазный пилот-сигнал. Частота пилот-сигнала та же, что и частота подавленной несущей, как показано на рисунке D.3. Его можно сгенерировать следующим образом. К каждому символу (данных и синхронизации) цифровых данных основной полосы частот плюс сигнал синхронизации ($\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \pm 9, \pm 11, \pm 13, \pm 15$) добавляется небольшой (цифровой) уровень постоянного тока (2,5). Мощность пилот-сигнала на 11,3 дБ ниже средней мощности сигнала данных.

D.6.3 Метод модуляции 16-VSB

Модулятор VSB принимает 16-уровневый составной сигнал данных (с добавленными пилот-сигналом и сигналом синхронизации) со скоростью 10,76 Мсимвол/с. Эффективность цифровой многопрограммной системы основана на линейно-фазовой характеристике (типа приподнятого косинуса) фильтра Найквиста в каскадном передатчике и приемнике, как показано на рисунке D.11¹. Характеристика системного фильтра по существу имеет плоскую форму во всей полосе, за исключением переходных областей на каждом конце полосы. Номинальная кривая спада в передатчике имеет характеристику линейно-фазового фильтра типа квадратный корень из приподнятого косинуса. Допуски, как внутри-, так и внеполосные, находятся в стадии изучения.

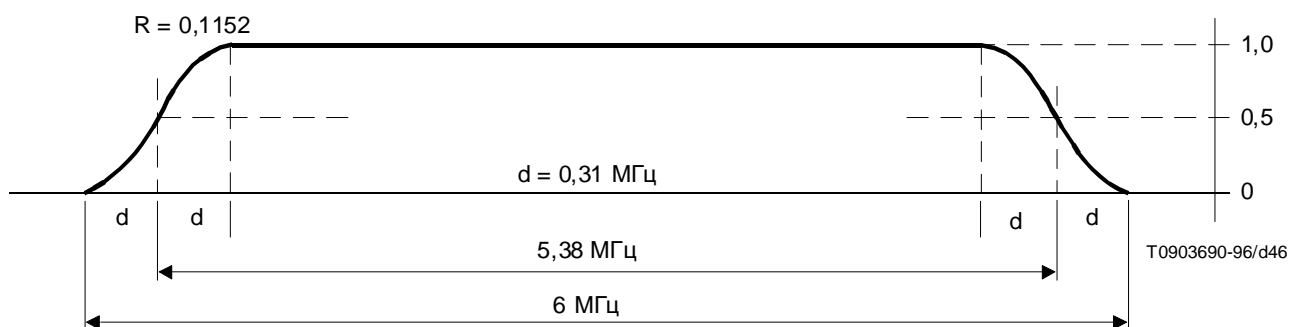


Рисунок D.11 – Номинальная характеристика канала системы VSB (линейно-фазовый фильтр Найквиста типа приподнятого косинуса)

D.6.4 Преобразование с повышением частоты

Процесс модуляции обычно выполняется на промежуточной частоте (ПЧ). Затем модулированный ПЧ-сигнал преобразуется с повышением частоты до конечной частоты, передаваемой кабельной системой.

D.7 Кабельный приемник 16-VSB

Кабельный приемник 16-VSB показан на рисунке D.12. В приемнике выполняются все функции, обратные функциям передатчика: преобразование с понижением частоты (тюнер), обнаружение, восстановление синхронизации и выделение тактового сигнала, обратное перемежение, упреждающая коррекция ошибок методом Рида-Соломона и дерандомизация данных.

Кроме того, эквалайзер устраняет межсимвольные помехи, используя в качестве обучающего опорного сигнала сигнал синхронизации полей данных, а фазоследящее устройство уменьшает фазовошумовой эффект локального генератора тюнера. За фазоследящим устройством следует слайсер для восстановления данных из многоуровневых символов.

Демодулирующая несущая восстанавливается из пилот-сигнала, а сигнал синхронизации и тактовая частота – из сигнала синхронизации сегментов.

Приемник может получать сигналы кабельного режима от кабельной распределительной системы или, если это приемник наземного радиовещания, может также получать данные наземного радиовещания с решетчатым кодированием 8-VSB или из частных кабельных сетей (SMATV, или MMDS, или др.).

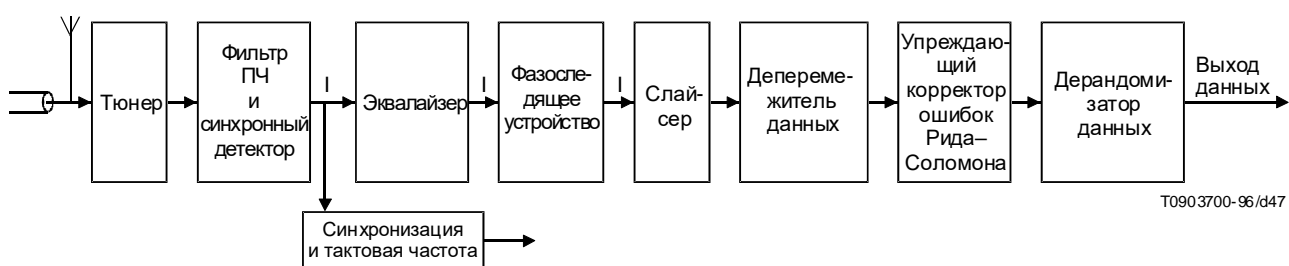


Рисунок D.12 – Приемник 16-VSB

D.8 Другие режимы VSB

D.8.1 Введение

В подразделе D.5.5.4 определены биты режима VSB в интервале синхронизации полей данных VSB для VSB-режимов 2-VSB, 4-VSB, 8-VSB, 16-VSB и 8-VSB (с решетчатым кодированием). До этого момента в настоящем Приложении описывались процессы для режима 16-VSB, включая входные пакеты MPEG по 188 байтов, структуру кадра данных, рандомизатор данных, упреждающую коррекцию ошибок (FEC) методом Рида-Соломона, перемежение байтов, преобразование, синхронизацию сегментов данных, синхронизацию полей данных, VSB-модуляцию и приемник 16-VSB.

D.8.2 Обзор режимов VSB

Группа режимов VSB образует семейство с высокой степенью общности процессов. В каждом режиме из этой группы используются одинаковые процессы синхронизации скорости передачи символов, формирования спектра и одинаковая ширина полосы канала. Разница между режимами обусловлена изменением количества битов на символ и соответствующей скорости передачи данных полезной нагрузки, которая может поддерживаться. Эти соотношения показаны в таблице D.1.

Таблица D.1 – Сравнительная таблица режимов VSB

Режим VSB	Скорость передачи данных	Допуск на продолжительность шумового импульса	Порог C/N
2-VSB	9,7 Мбит/с	387 мкс	10 дБ
4-VSB	19,39 Мбит/с	193 мкс	16 дБ
8-VSB	29,09 Мбит/с	129 мкс	22 дБ
16-VSB	38,79 Мбит/с	97 мкс	28 дБ
8-VSB (решетч.)	19,39 Мбит/с	193 мкс	15 дБ

Каждый из режимов VSB рассматривается в следующих подразделах.

D.8.3 Транспортный уровень MPEG-2

Как указано в разделе D.3, транспортный уровень обеспечивает пакеты по 188 байтов.

D.8.4 Структура формирования кадров

На рисунке D.2 показана общая для всех режимов VSB система формирования символов данных, сегментов данных и полей данных. В таблице D.2 показана взаимосвязь между пакетами MPEG-2, защищенными с помощью FEC Рида-Соломона, сегментами данных и режимами VSB.

Таблица D.2 – Сравнительная таблица кадров данных и пакетов MPEG для разных режимов VSB

Режим VSB	Бит/символ	Бит/сегмент	Пакеты MPEG с защитой FEC/сегмент
2	1	828	1/2
4	2	1656	1
8	3	2484	1 1/2
16	4	3312	2
8T	2	1656	1

D.8.5 Канальное кодирование

D.8.5.1 Рандомизатор данных

Рандомизация данных для режимов 2-VSB, 4-VSB, 8-VSB и 8-VSB (с решетчатым кодированием) осуществляется, как указано в разделе D.5.1.

D.8.5.2 Кодер Рида-Соломона

Процесс FEC RS для режимов 2-VSB, 4-VSB, 8-VSB и 8-VSB (с решетчатым кодированием) описывается в разделе D.5.2.

D.8.5.3 Перемежение

Перемежение в режимах 2-VSB, 4-VSB, 8-VSB и 8-VSB (с решетчатым кодированием) осуществляется как описывается в разделе D.5.3. Поскольку битовые скорости для разных режимов VSB различаются, характеристика по шумовым импульсам будет разной, как показано в таблице D.1.

D.8.5.4 Синхронизация сегментов данных

Синхронизация сегментов данных одинакова для всех режимов VSB. Детали синхронизации сегментов данных описываются в разделе D.5.4. Однако способ встраивания сигнала синхронизации в данные многоуровневых символов варьируется. Это показано для режимов 2-VSB, 4-VSB, 8-VSB и 8-VSB (с решетчатым кодированием) соответственно на рисунках D.13, D.14, D.15 и D.16.

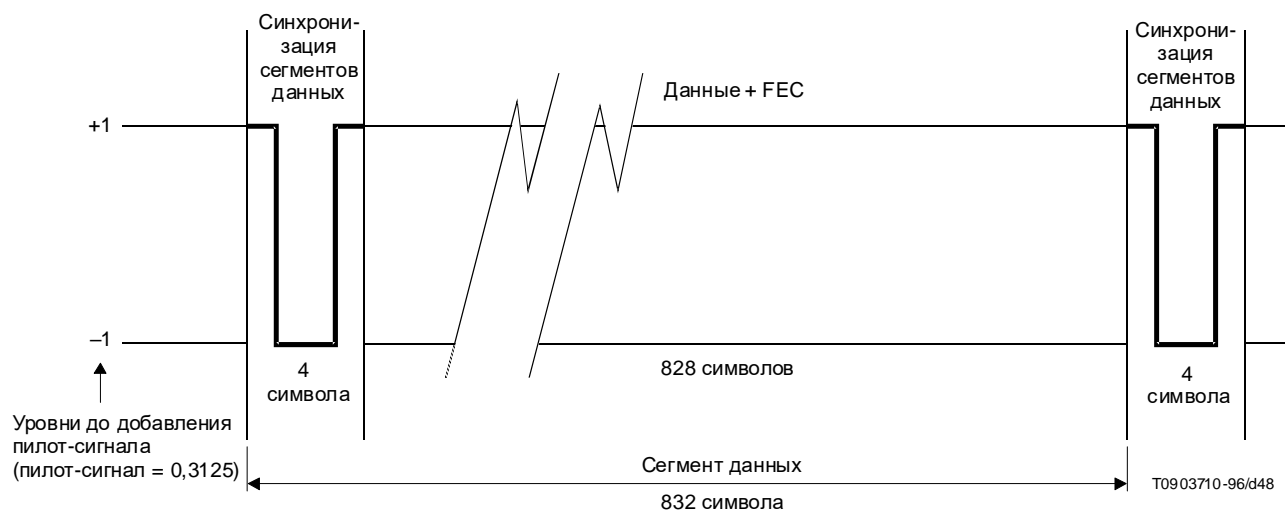


Рисунок D.13 – Сегмент данных в режиме 2-VSB

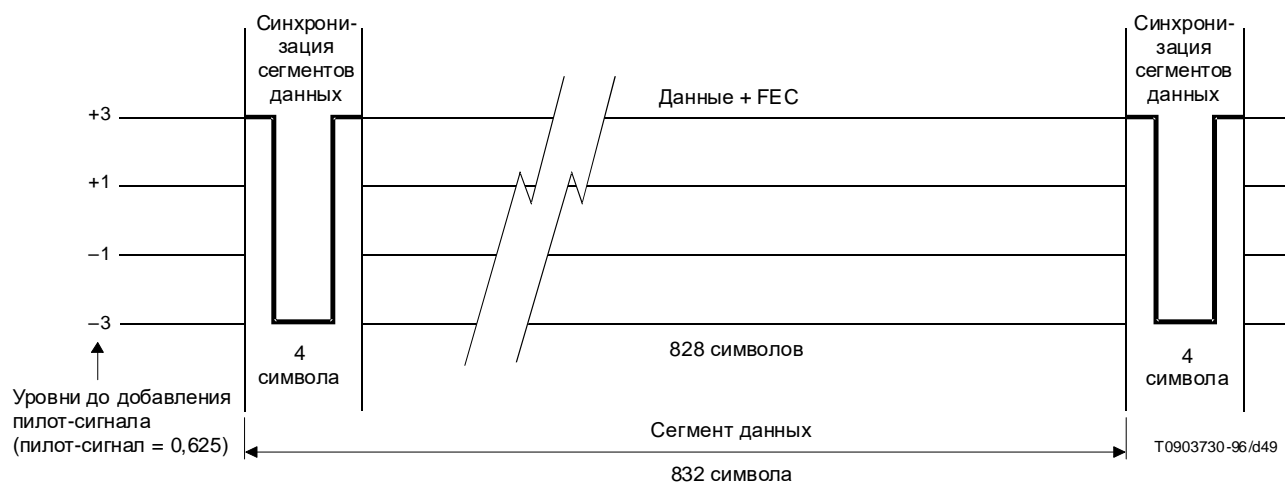


Рисунок D.14 – Сегмент данных в режиме 4-VSB

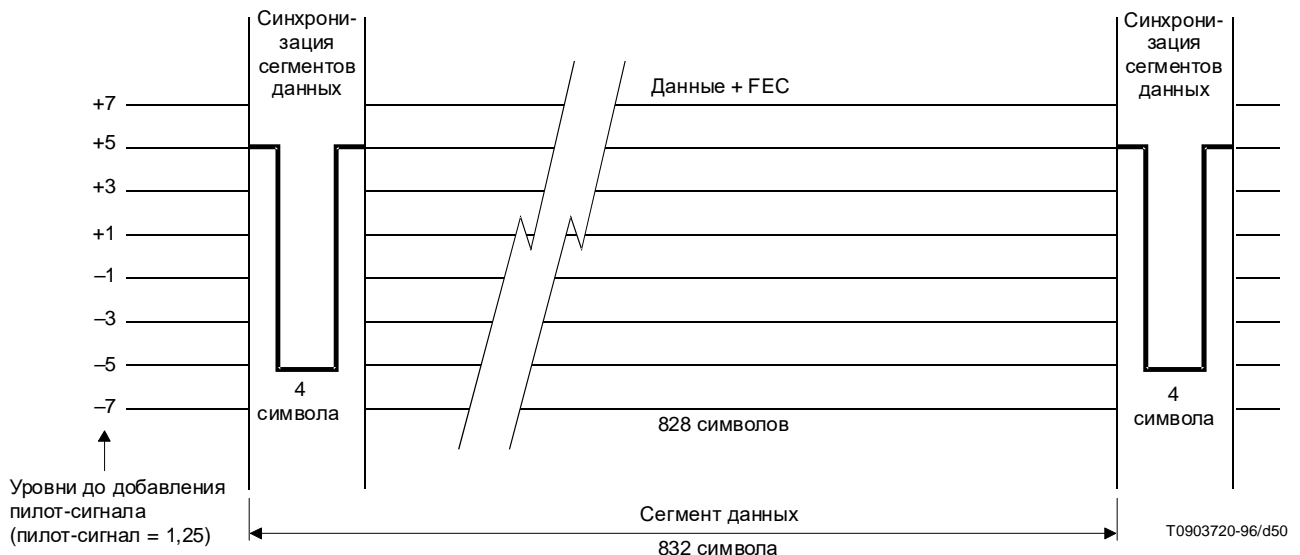


Рисунок D.15 – Сегмент данных в режиме 8-VSB

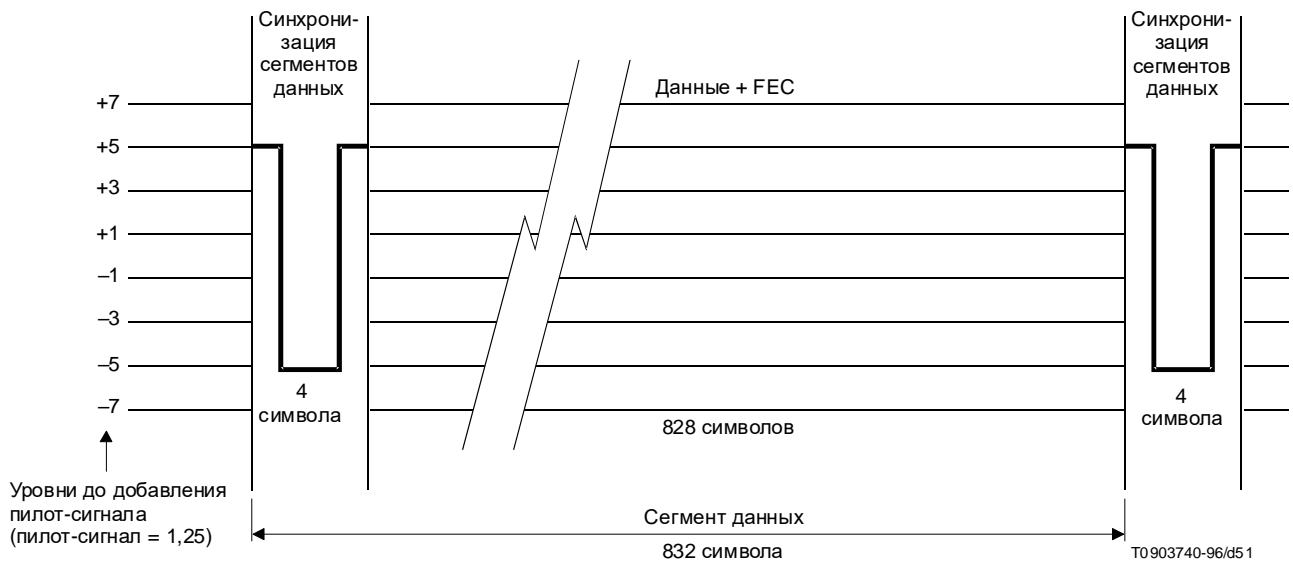


Рисунок D.16 – Сегмент данных в режиме 8-VSB (с решетчатым кодированием)

D.8.5.5 Синхронизация полей данных

Синхронизация полей данных одинакова для всех режимов VSB. Детали синхронизации полей данных описываются в разделе D.5.5. Однако, как и в случае синхронизации сегментов, способ встраивания сигналов синхронизации полей данных в данные многоуровневых символов варьируется. Это показано для режимов 2-VSB, 4-VSB, 8-VSB и 8-VSB (с решетчатым кодированием) соответственно на рисунках D.17, D.18, D.19 и D.20.

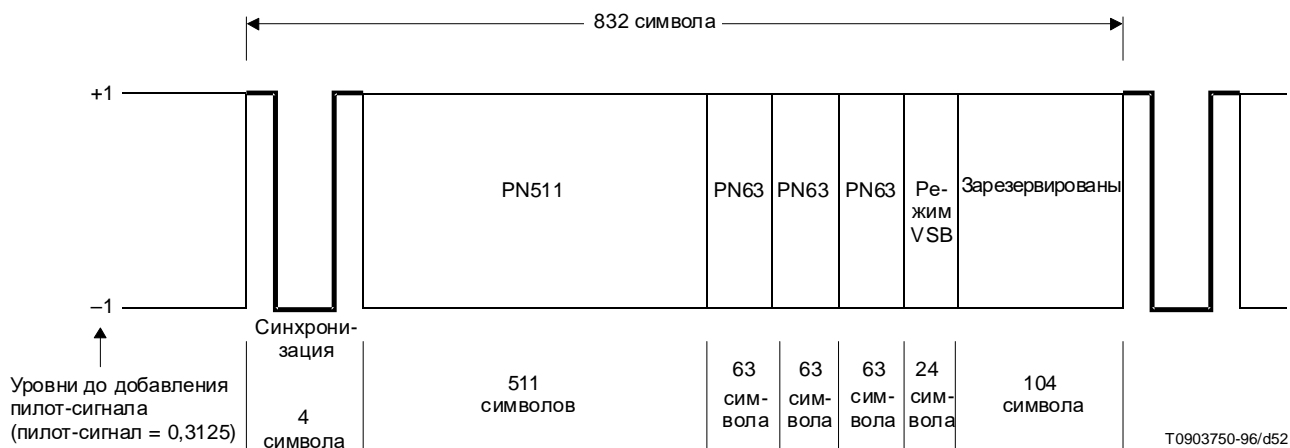


Рисунок D.17 – Синхронизация полей данных в режиме 2-VSB

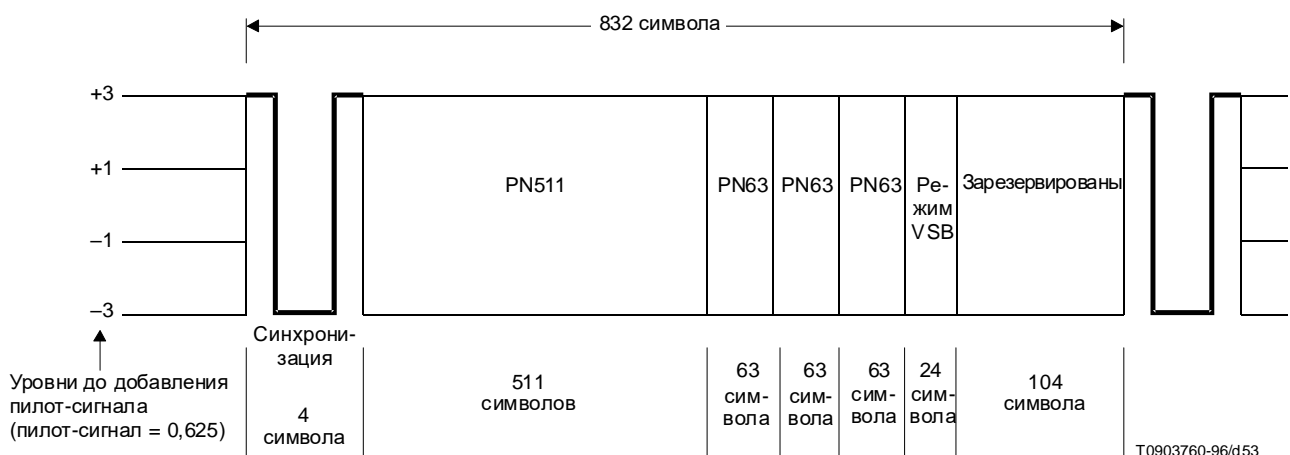


Рисунок D.18 – Синхронизация полей данных в режиме 4-VSB

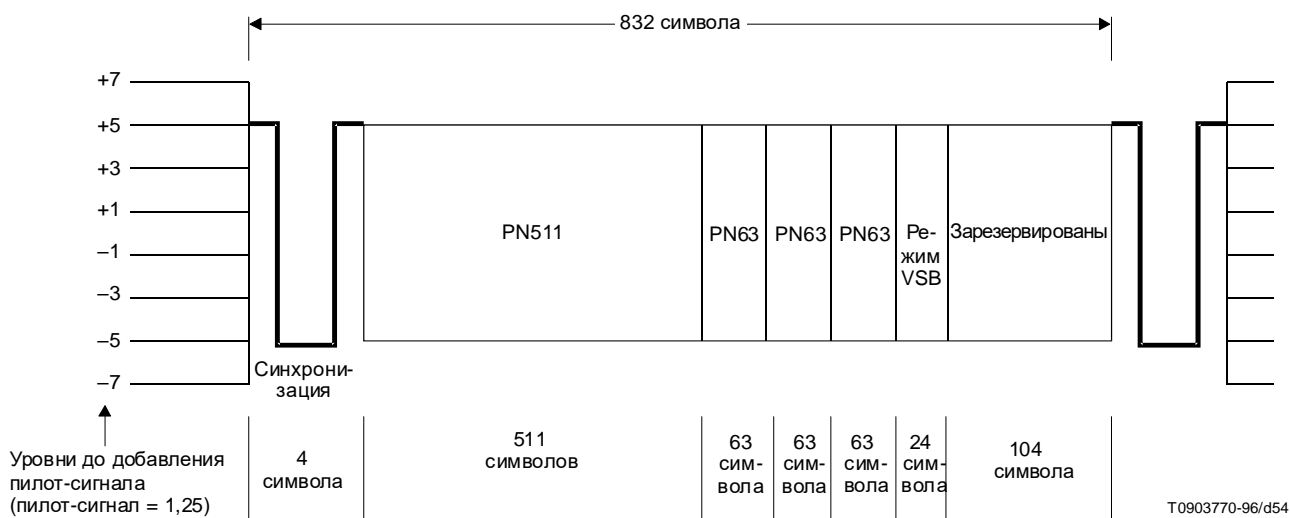
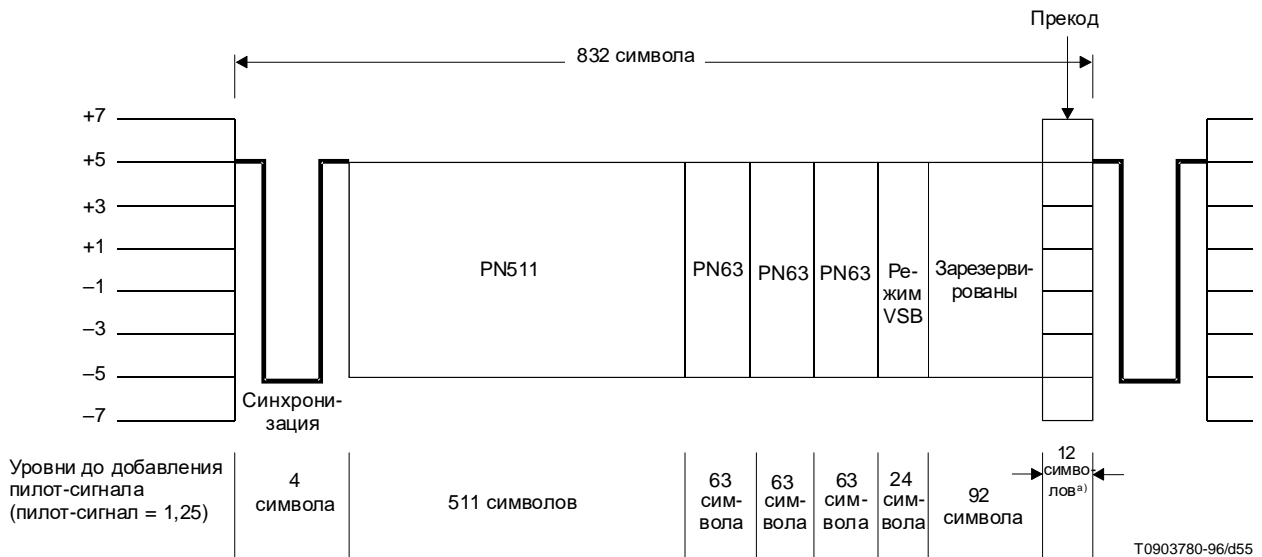


Рисунок D.19 – Синхронизация полей данных в режиме 8-VSB



^{а)} Для режима 8-VSB с решетчатым кодированием последние 12 символов предыдущего сегмента дублируются в последних 12 зарезервированных символах сигнала синхронизации полей.

Рисунок D.20 – Синхронизация полей данных в режиме 8-VSB (с решетчатым кодированием)

D.8.6 Модуляция

D.8.6.1 Преобразование битов в символы

Схемы преобразования битов в символы в режимах 2-VSB, 4-VSB, 8-VSB и 8-VSB (с решетчатым кодированием) показаны соответственно на рисунках D.21, D.22, D.23 и D.24. Уровни символов данных составляют ± 1 для режима 2-VSB, $\pm 1, \pm 3$ для режима 4-VSB и $\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7$ для режимов 8-VSB и 8 VSB (с решетчатым кодированием)².

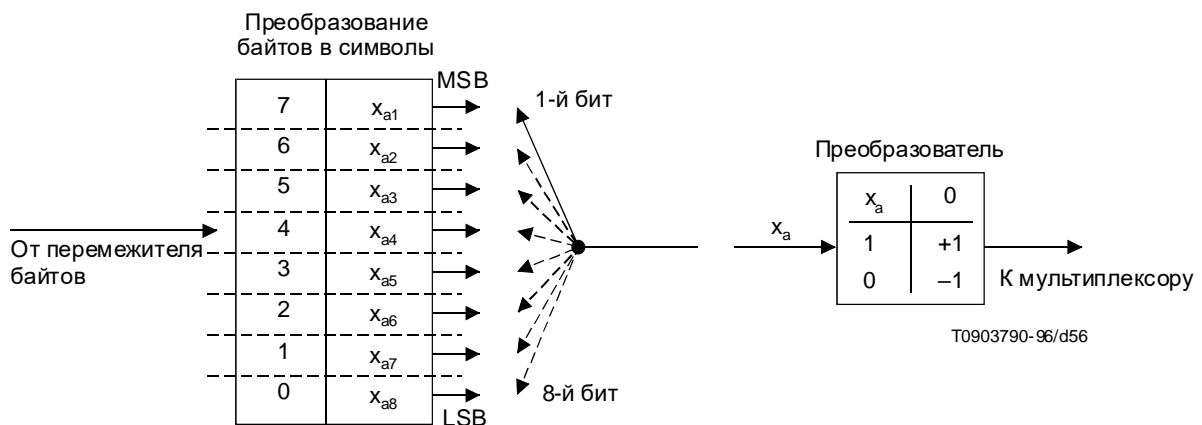


Рисунок D.21 – Преобразователь 2-VSB

² Режим 8-VSB (с решетчатым кодированием) подробно описывается в [b-1].

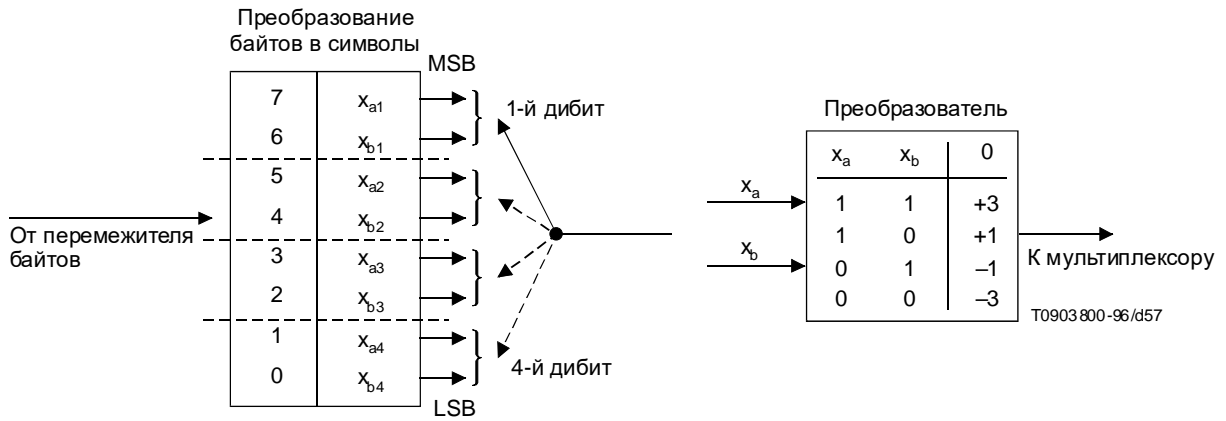


Рисунок D.22 – Преобразователь 4-VSB

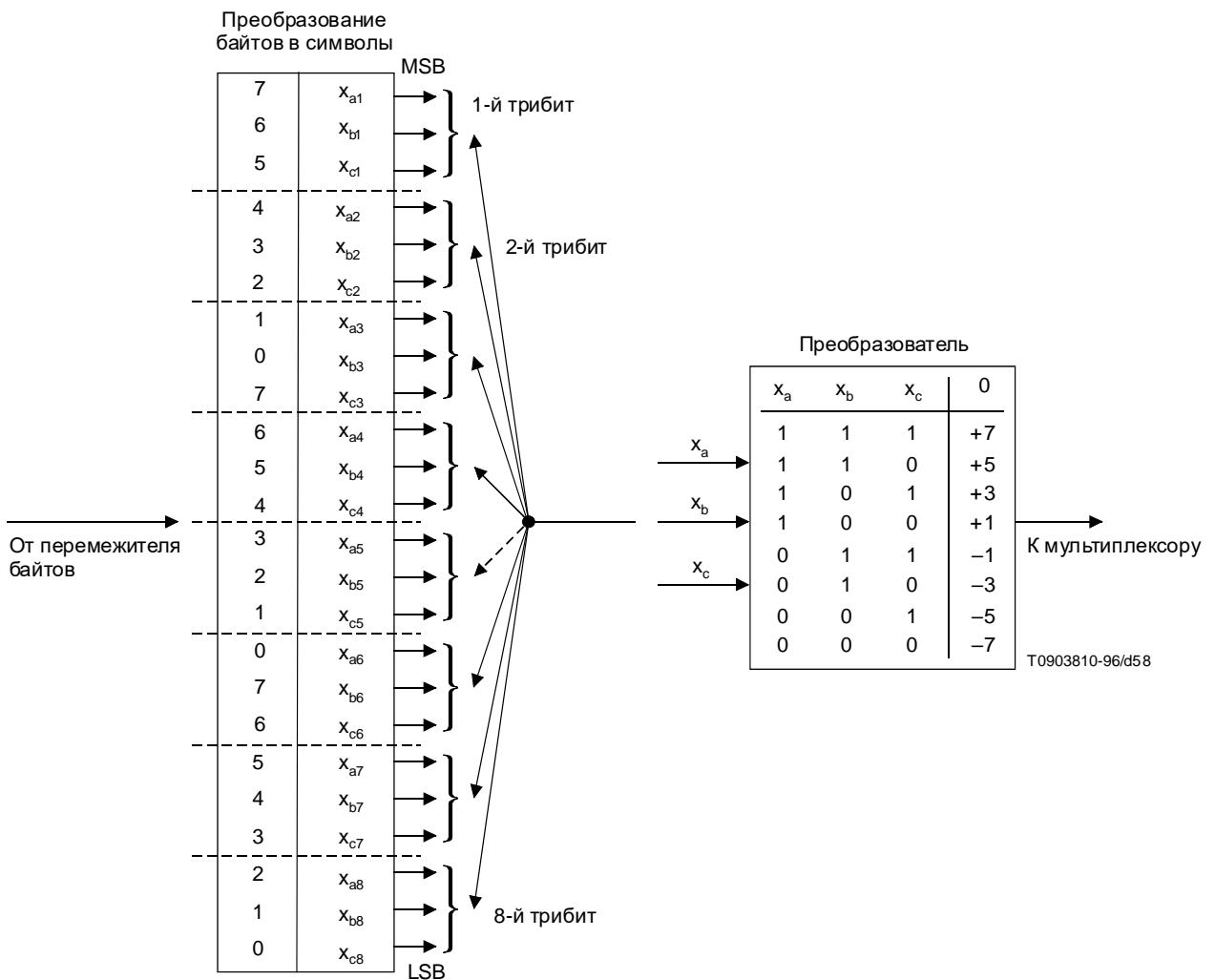


Рисунок D.23 – Преобразователь 8-VSB

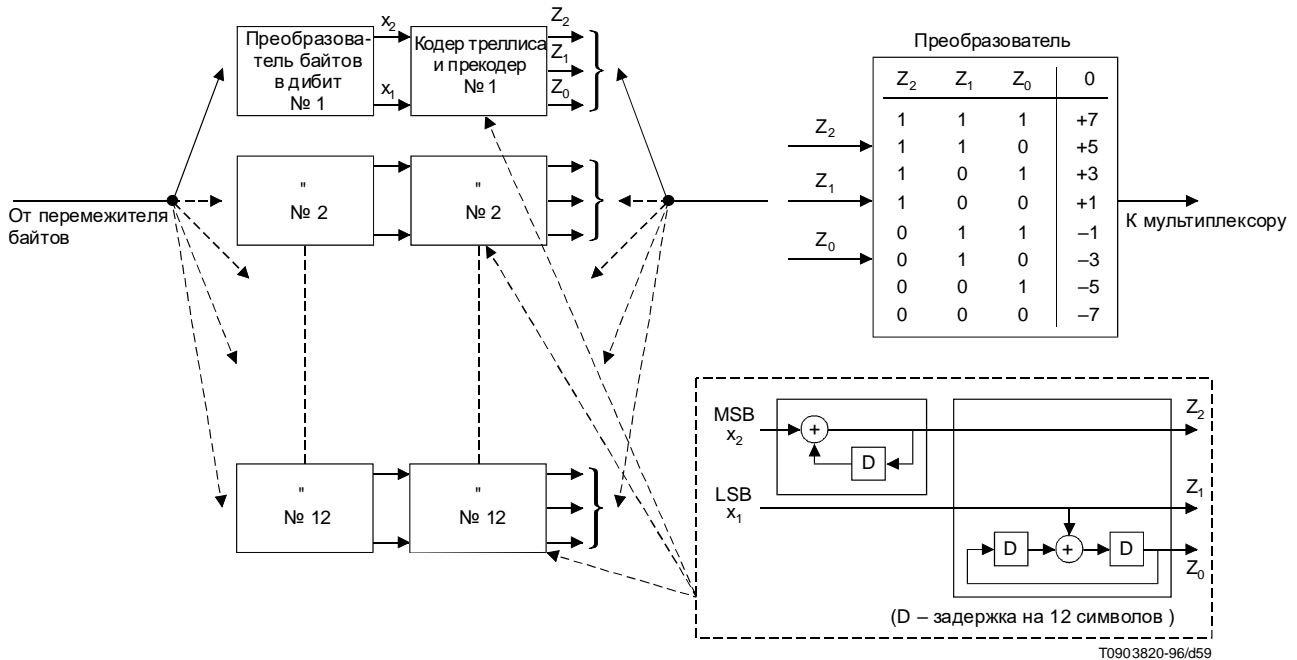


Рисунок D.24 – Преобразователь для режима 8-VSB (прекодер, кодер треллиса решетчатого кодирования), скорость равна 2/3

D.8.6.2 Добавление пилот-сигнала

Добавление пилот-сигнала может быть выполнено таким же способом, как указано в разделе D.6.2 – путем добавления постоянного тока небольшого уровня к символам основной полосы (данных и синхронизации). Значение уровня постоянного тока составляет 0,3125 для режима 2-VSB, 0,625 для режима 4-VSB, 1,25 для режимов 8-VSB и 8-VSB (с решетчатым кодированием).

Это показано для режимов 2-VSB, 4-VSB, 8-VSB и 8-VSB (с решетчатым кодированием) соответственно на рисунках D.13, D.14, D.15 и D.16.

D.8.6.3 Метод модуляции VSB

Модуляция для всех систем VSB осуществляется так же, как описывается в разделе D.6.3. Общая частотная характеристика канала имеет форму, показанную на рисунке D.11.

D.8.6.4 Преобразование с повышением частоты

Процесс модуляции обычно выполняется на промежуточной частоте. Затем модулированный ПЧ-сигнал преобразуется с повышением частоты до конечной частоты РЧ-канала системы передачи.

D.8.7 Приемник VSB

Приемник VSB выполняет все функции, обратные функциям передатчика. Приемник определяет режим передачи VSB, как описывается в разделе D.5.5.4. Затем функции приемника настраиваются в соответствии с требуемыми уровнями среза данных и скоростям входящих потоков³.

³ Процесс приема в режиме 8-VSB (с решетчатым кодированием) подробно описывается в [b-2].

Библиография

- [b-1] Advanced Television Systems Committee (ATSC): *Digital television standard, Washington D.C., September 1995.*
- [b-2] Advanced Television Systems Committee (ATSC): *Guide to the use of the ATSC digital standard, Washington D.C., October 1995.*

СЕРИИ РЕКОМЕНДАЦИЙ МСЭ-Т

Серия А	Организация работы МСЭ-Т
Серия D	Общие принципы тарификации
Серия E	Общая эксплуатация сети, телефонная служба, функционирование служб и человеческие факторы
Серия F	Нетелефонные службы электросвязи
Серия G	Системы и среда передачи, цифровые системы и сети
Серия H	Аудиовизуальные и мультимедийные системы
Серия I	Цифровая сеть с интеграцией служб
Серия J	Кабельные сети и передача сигналов телевизионных и звуковых программ и других мультимедийных сигналов
Серия K	Защита от помех
Серия L	Конструкция, прокладка и защита кабелей и других элементов линейно-кабельных сооружений
Серия M	Управление электросвязью, включая СУЭ и техническое обслуживание сетей
Серия N	Техническое обслуживание: международные каналы передачи звуковых и телевизионных программ
Серия O	Требования к измерительной аппаратуре
Серия P	Качество телефонной передачи, телефонные установки, сети местных линий
Серия Q	Коммутация и сигнализация
Серия R	Телеграфная передача
Серия S	Оконечное оборудование для телеграфных служб
Серия T	Оконечное оборудование для телематических служб
Серия U	Телеграфная коммутация
Серия V	Передача данных по телефонной сети
Серия X	Сети передачи данных, взаимосвязь открытых систем и безопасность
Серия Y	Глобальная информационная инфраструктура, аспекты протокола Интернет и сети последующих поколений
Серия Z	Языки и общие аспекты программного обеспечения для систем электросвязи