Лекция 3
Цифровое радиовещание (ЦРВ)

1. Возможности ЦРВ. Стандарты ЦРВ.

2. Стандарт DAB.

3. Стандарт DRM.

4. Стандарт DSR. САМОСТОЯТЕЛЬНО

DAB (Digital Audio Broadcasting)

На сегодняшний день в мире получили распространение несколько технологий цифрового радио.
*Это европейская система **Eureka – 147 (DAB),** продвигаемая в США концепция **IBOC,** система низкочастотного (до 30 МГц) цифрового вещания **DRM** (Digital Radio Mondiale – всемирное цифровое радио), а также цифровое спутниковое вещание в формате **DSR** (Digitale Satelliten Radio).*

Система цифрового звукового вещания DAB (Digital Audio Broadcasting) *предназначена для доставки высококачественных звуковых программ и данных, передаваемых наземными и спутниковыми передатчиками в метровом (88...114 МГц) и дециметровом (0,5...2 ГГц) диапазонах частот и принимаемых автомобильными, переносными и стационарными приемниками цифровых сигналов, а также распределяемых с помощью кабельных сетей. Система DAB разработана для так Называемой одночастотной передающей сети (ОЧС).*

В системе DAB используются широкополосные радиоканалы с одновременной передачей в них нескольких звуковых программ, множества сигналов данных, разнообразной сервисной и другой полезной информации. Она совместима с другими службами радиосвязи.

Характеристики кодирования источника

Частота дискретиза-ции, кГц	Звуковой режим	Скорости цифрового потока, кбит/с	Длительность звукового фрейма, мс
48	Одноканальный (одна монопрограмма)	32, 48, 56, 64, 80, 96, 112, 128, 160, 192	24
	Стереофонический; двухканальный (2 моноканала), объединенный стереофонический)	64, 96, 112, 128, 160, 192, 224, 256, 320, 384	
24	Для всех режимов передачи	8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 80, 96, 112, 128, 144, 160	48

20 моно...4 стерео

Варианты конфигурации мультиплексирования системы DAB

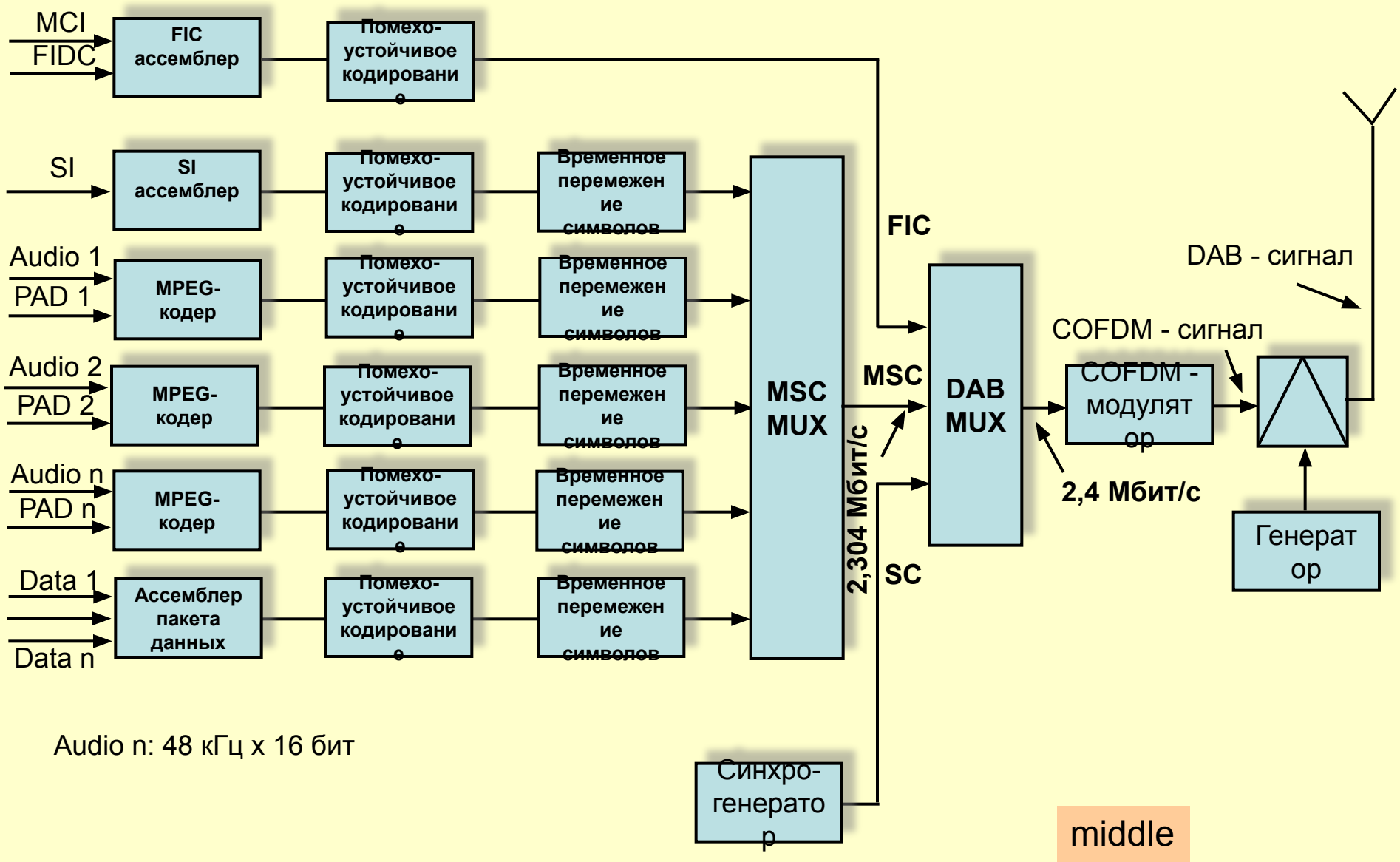
Вариант конфигурации	Передаваемая информация	Скорость цифровых потоков, *кбит/с*
1	9 стереопрограмм ДД	9·2·64 = 1152 16
2	6 стереопрограмм ДД	6·2·96 = 1152 16
3	4 стереопрограммы ДД	4·2·128 = 1024 144
4	2 стереопрограммы 3 стереопрограммы ДД	2·2·128 = 512 3·2·96 = 576 80
5	3 стереопрограммы 3 стереопрограммы ДД	3·2·128 = 768 3·2·64 = 384 16
6	1 стереопрограмма 4 стереопрограммы ДД	1·2·128 = 256 4·2·96 = 768 144

ДД – дополнительные данные

Параметры системы DAB для различных режимов передачи

Параметр	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Суммарная скорость передачи данных, Мбит/с	2,4	2,4	2,4	2,4
Ширина частот радиоканала, МГц	1,536	1,536	1,536	1,536
Число несущих частот (n)	1536	768	384	192
Разнос несущих, кГц	1	2	4	8
Длительность COFDM-символа (T_S), мкс	1000	500	250	120
Длительность защитного интервала между COFDM-символами (T_G), мкс	280	140	70	40
Период следования COFDM-символов (T_{SG}), мкс	1280	640	320	160
Длительность кадра (T_K), мс	96	48	24	24
Число COFDM-символов в кадре ($m = T_K / T_{SG}$)	75	75	75	150
Число битов на COFDM-символ ($2\ n$)	3072	1536	768	384
Максимальная частота радиоканала, МГц	<375	<750	<1500	<3000
Максимальное расстояние между передатчиками при работе в одночастотной сети ($D_{max} \leq c \cdot T_G$), км	84	42	21	12

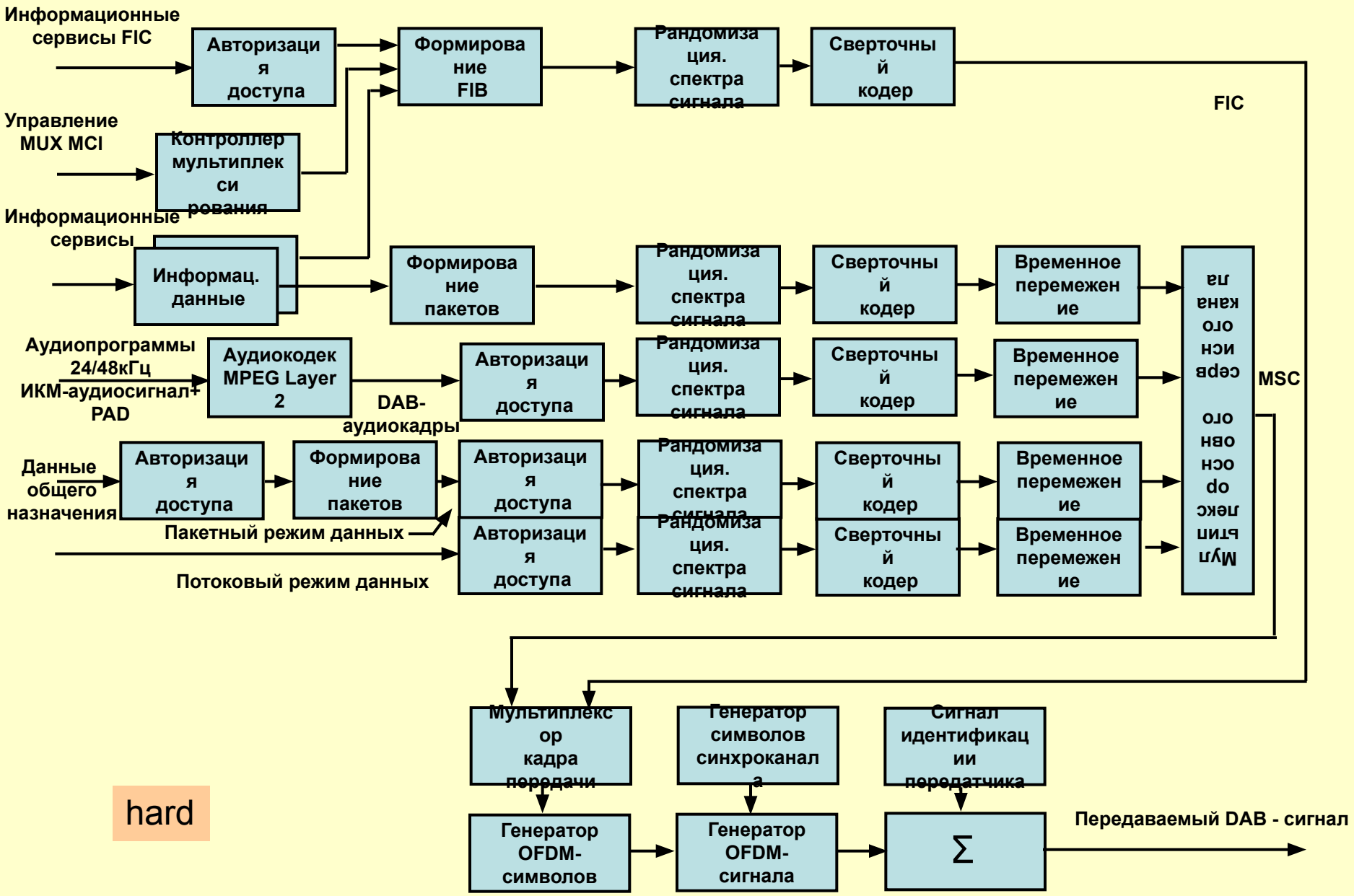
Передающая часть DAB



Audio n: 48 кГц x 16 бит

middle

Функциональная схема передающего узла стандарта ETS 300401 Eureka – 147

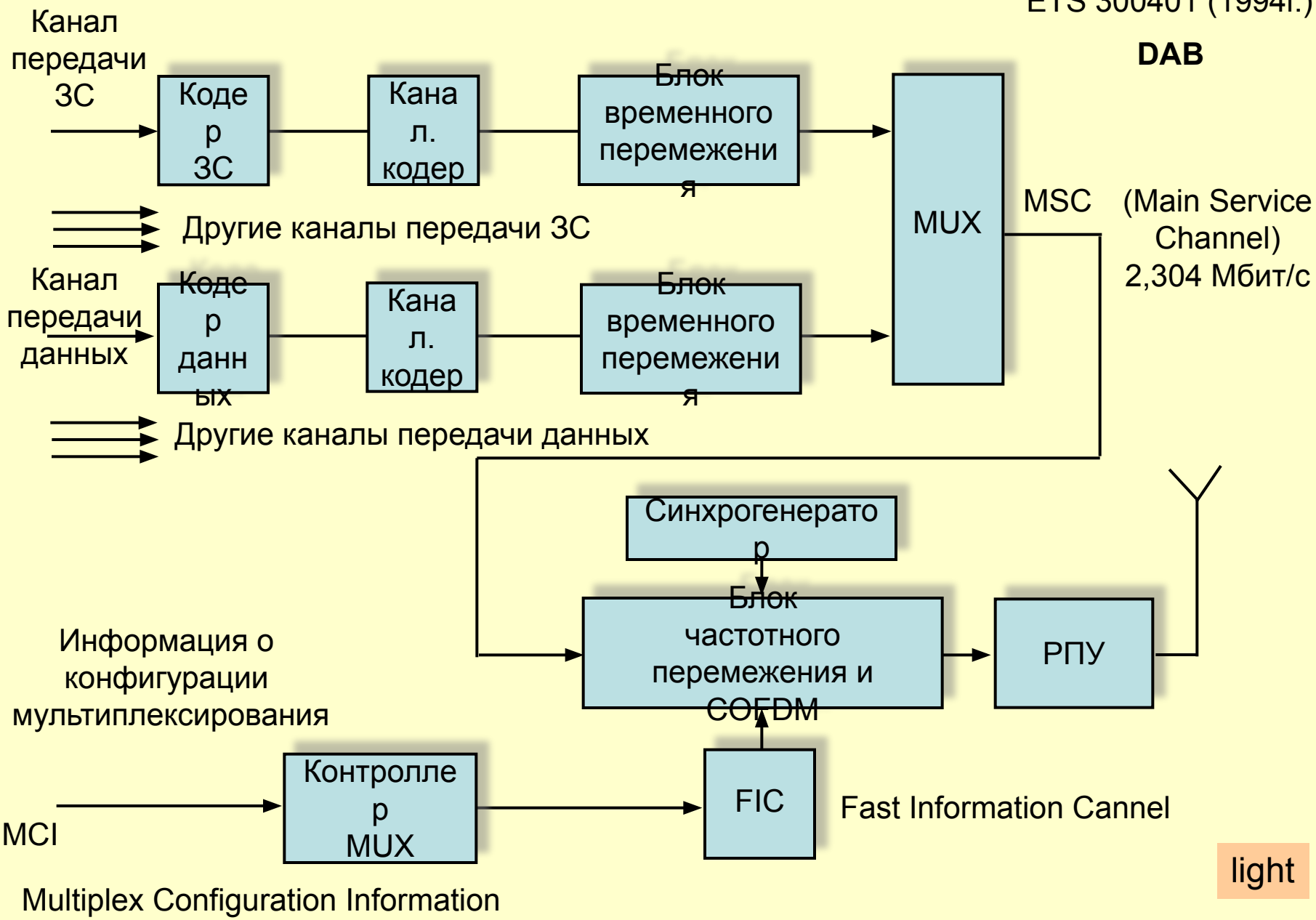


hard

Структурная схема тракта передачи системы “Эврика – 147” (Eureka – 147)

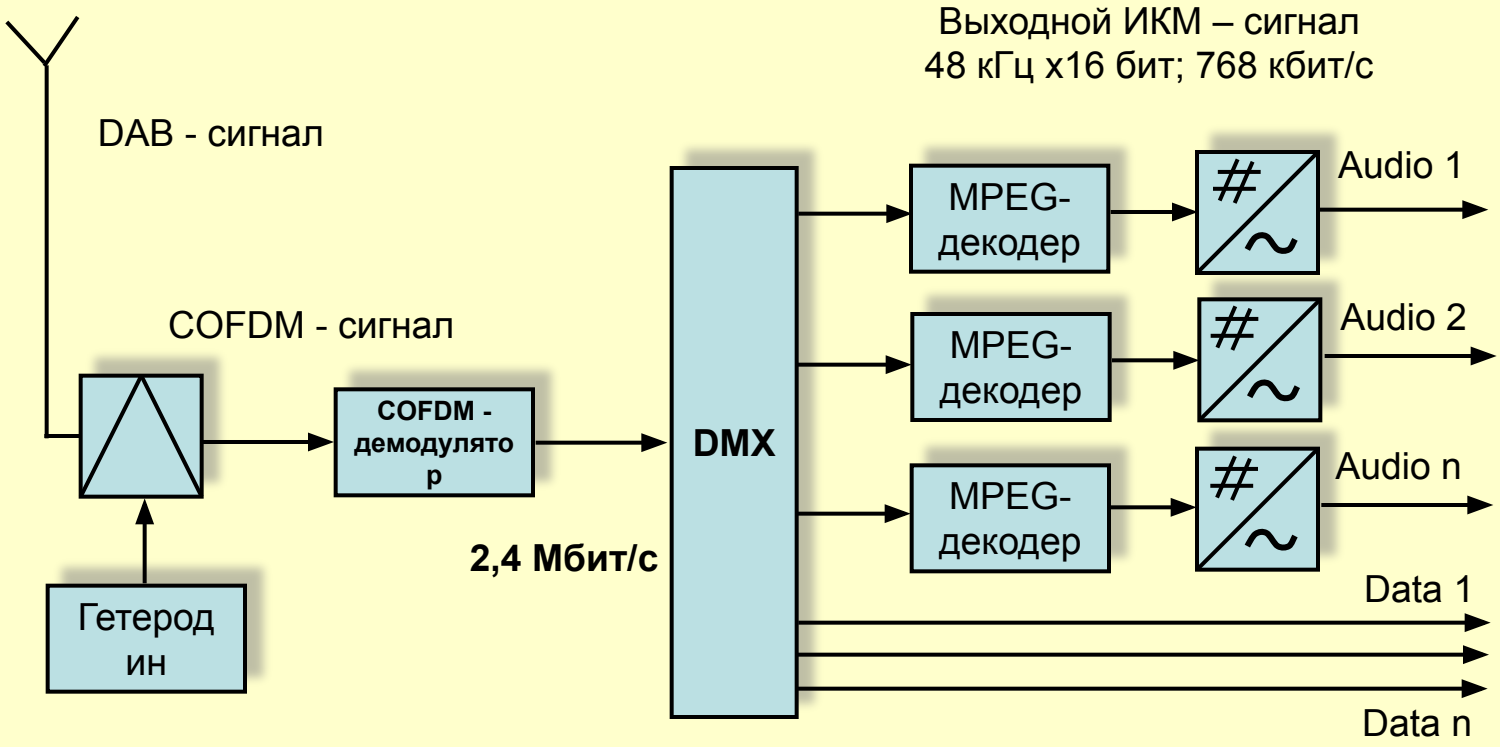
ETS 300401 (1994г.)

DAB

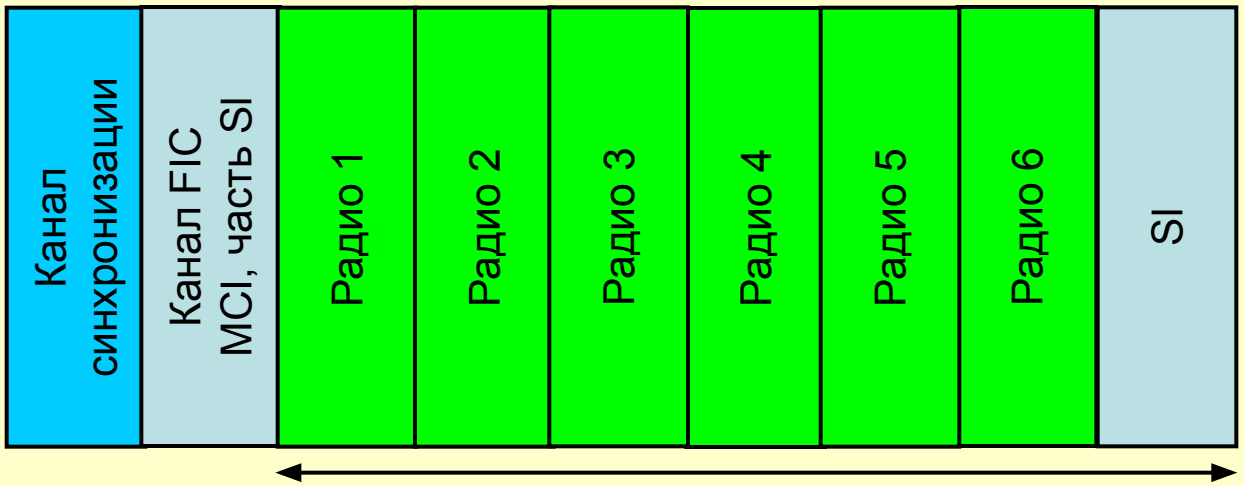


light

Приемная часть DAB



Вариант построения цикла



PAD - Program Associated Data

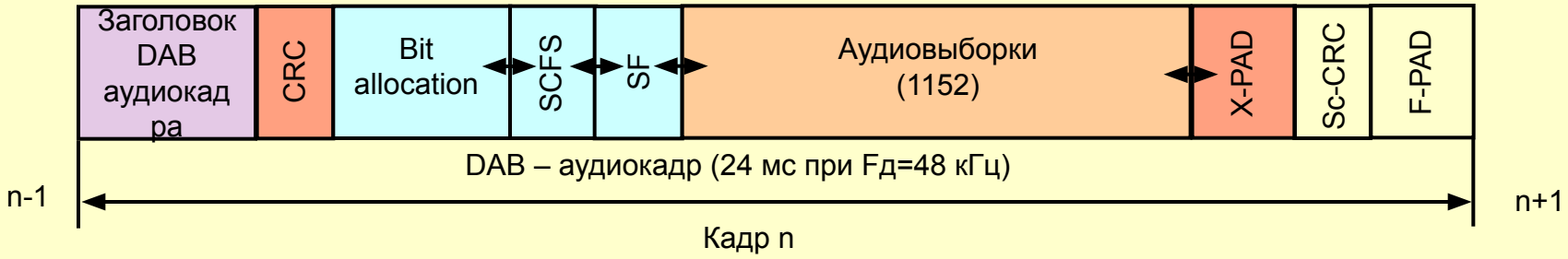
а)

Канал MSC: 6 стереопрограмм, PAD, часть SI

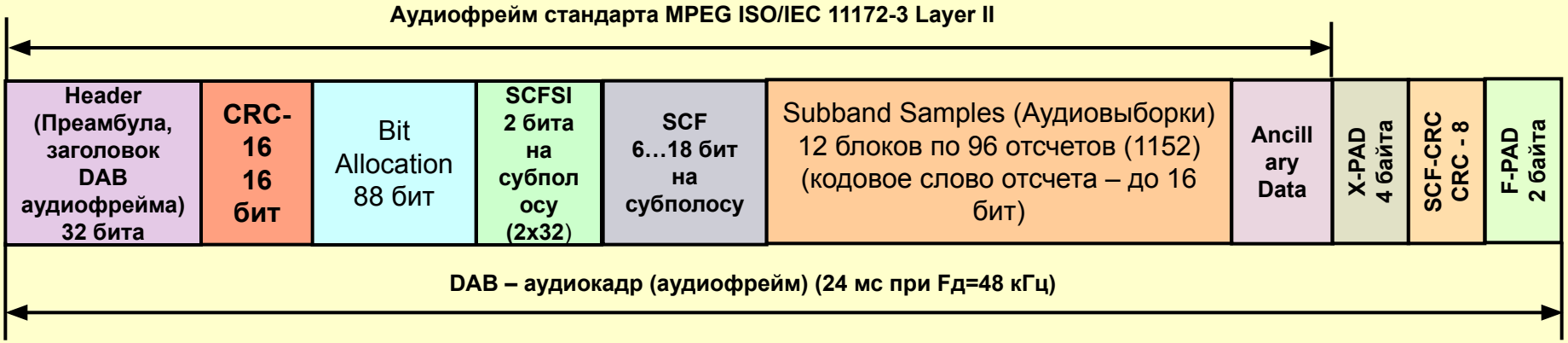
Основные параметры системы «Эврика – 147»

Параметры	Режимы передачи		
	1	2	3
Номинальный частотный диапазон (для мобильного приема), МГц	Ф 375	Ф 1500	Ф 3000
Количество несущих	1536	384	192
Длительность фрейма, мс	96	24	24
Длительность защитного интервала, мкс	246	62	31
Максимальное разнесение передатчиков при работе в одночастотной сети, км	96	24	12

Структура DAB-кадра



Структура аудиофрейма DAB



Header- служебная информация (12 бит синхрослово и 20 бит - описание структуры данных аудиофрейма)

CRC – избыточные биты (остаток) CRC-16

Bit Allocation – распределение количества бит по субполосам

SCFSI – распределение масштабных коэффициентов

SCF – значения масштабных коэффициентов

Subband Samples – значения нормированных отсчетов субполосных сигналов

Ancillary Data – вспомогательные данные

X-PAD – доп. инф. (поясняющий текст)

F-PAD – информация управления и низкоскоростные данные

Описание структуры аудиофрейма (20 бит)

1бит – бит идентификации ID, 1- поток аудиоданных полностью соответствует MPEG 11172-3
0- нет

2 бита – код уровня (слой кодирования: Layer-I; Layer-II; Layer-III; резерв)

1 бит – бит защиты, 1 – не применяется помехоустойчивое кодирование
0 - применяется

4 бита – скорость цифрового потока для каждого слоя кодирования (32…448 кБит/с для Layer-I; 32…384 кБит/с для Layer-II; 32…320 кБит/с для Layer-III)

2 бита – частота дискретизации: 44,1; 48 или 32 кГц

1 бит – паддинг, 1- частота дискретизации равна 44,1 кГц
0 - иначе

1 бит – для передачи дополнительной информации

Joint Stereo

2 бита – код режима передачи: стерео, совмещенное стерео, 2 независимых канала, один канал

2 бита – код режима расширения при передаче в режиме Joint Stereo

1 бит – бит права копирования, равен 0, если копирование запрещено

1 бит – оригинал/копия, равен 1, если передается оригинал

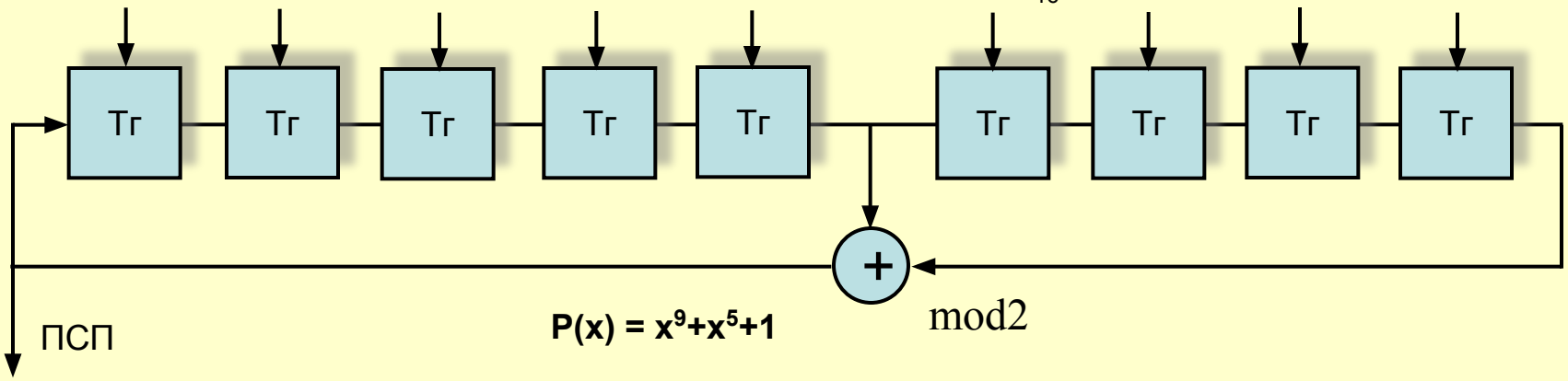
2 бита – код предыскажения

Канальное кодирование в DAB

а)

Генератор ПСП для скремблирования цифрового потока

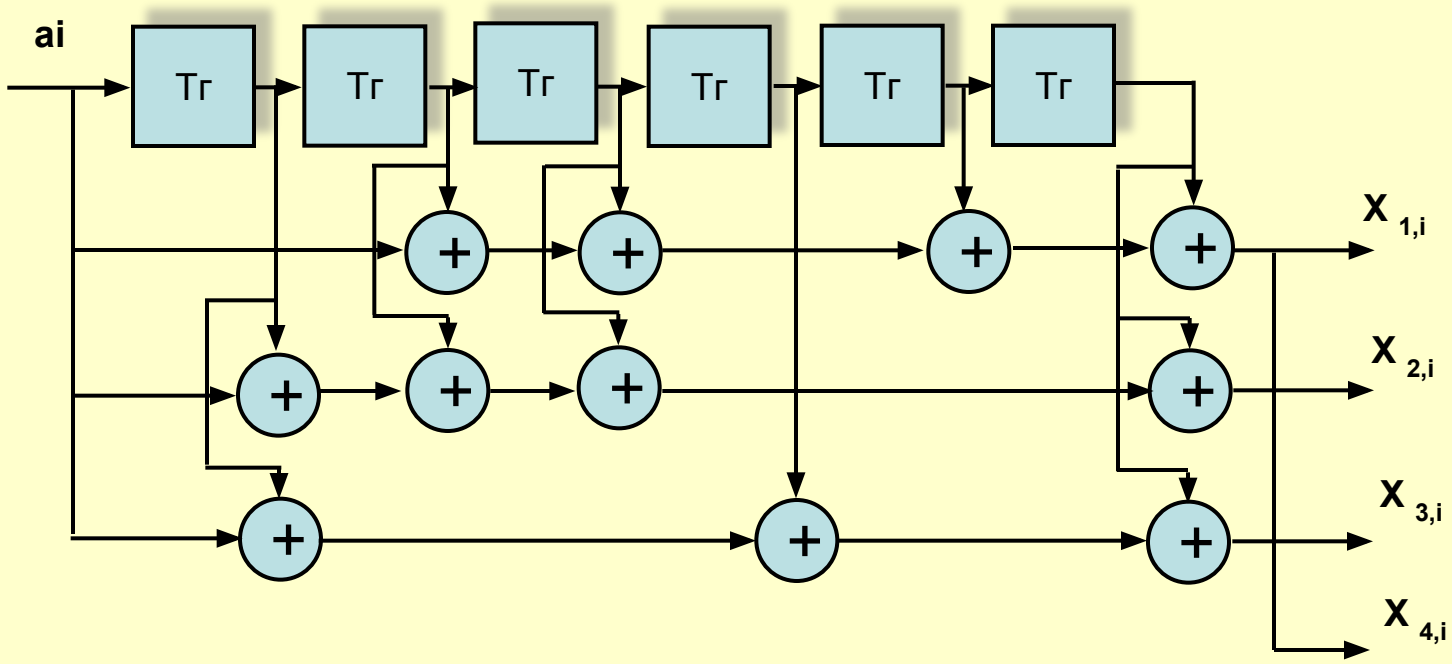
Инициализирующее слово ($1FF_{16}$)



$P(x) = x^9+x^5+1$

Кодер сверточного кода

(1,4,7)



б)

Перемежение (Interleaving)

1. $|a_1 a_2 a_3 \overset{*}{a_4} \overset{*}{a_5} \overset{*}{a_6} | \overset{*}{b_1} \overset{*}{b_2} \overset{*}{b_3} b_4 b_5 b_6 | c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 c_6 | \ldots | f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6 |$

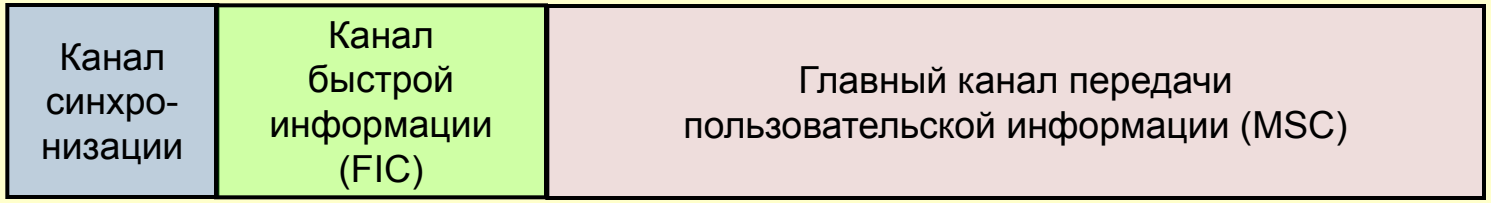
2. $|a_1 b_1 c_1 \overset{*}{d_1} \overset{*}{e_1} \overset{*}{f_1} | \overset{*}{a_2} \overset{*}{b_2} \overset{*}{c_2} d_2 e_2 f_2 | a_3 b_3 c_3 d_3 e_3 f_3 | \ldots | a_6 b_6 c_6 d_6 e_6 f_6 |$

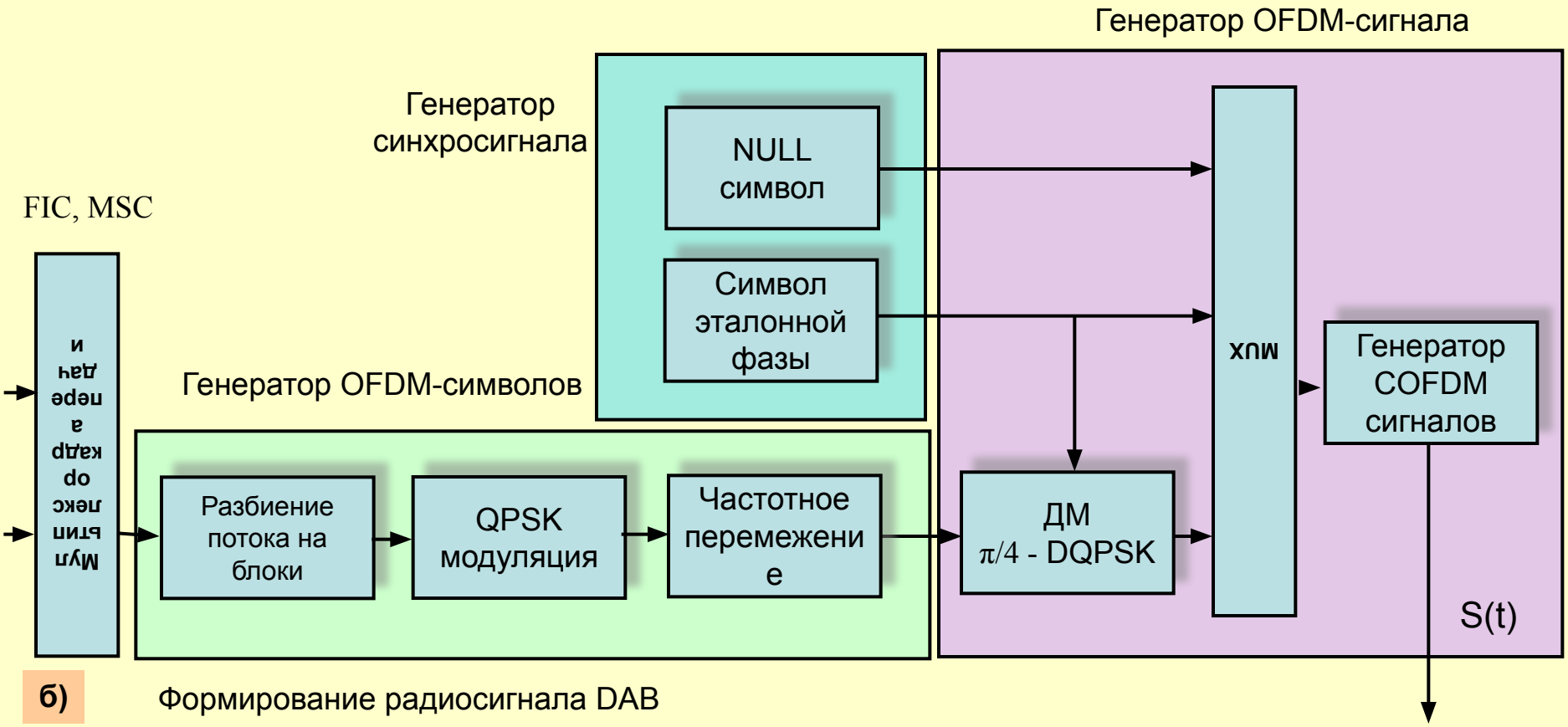
3. $|a_1 \overset{*}{a_2} a_3 a_4 a_5 a_6 | b_1 \overset{*}{b_2} b_3 b_4 b_5 b_6 | c_1 \overset{*}{c_2} c_3 c_4 c_5 c_6 | \ldots | \overset{*}{f_1} f_2 f_3 f_4 f_5 f_6 |$

Формирование сигнала передачи DAB

Структура фрейма передачи DAB

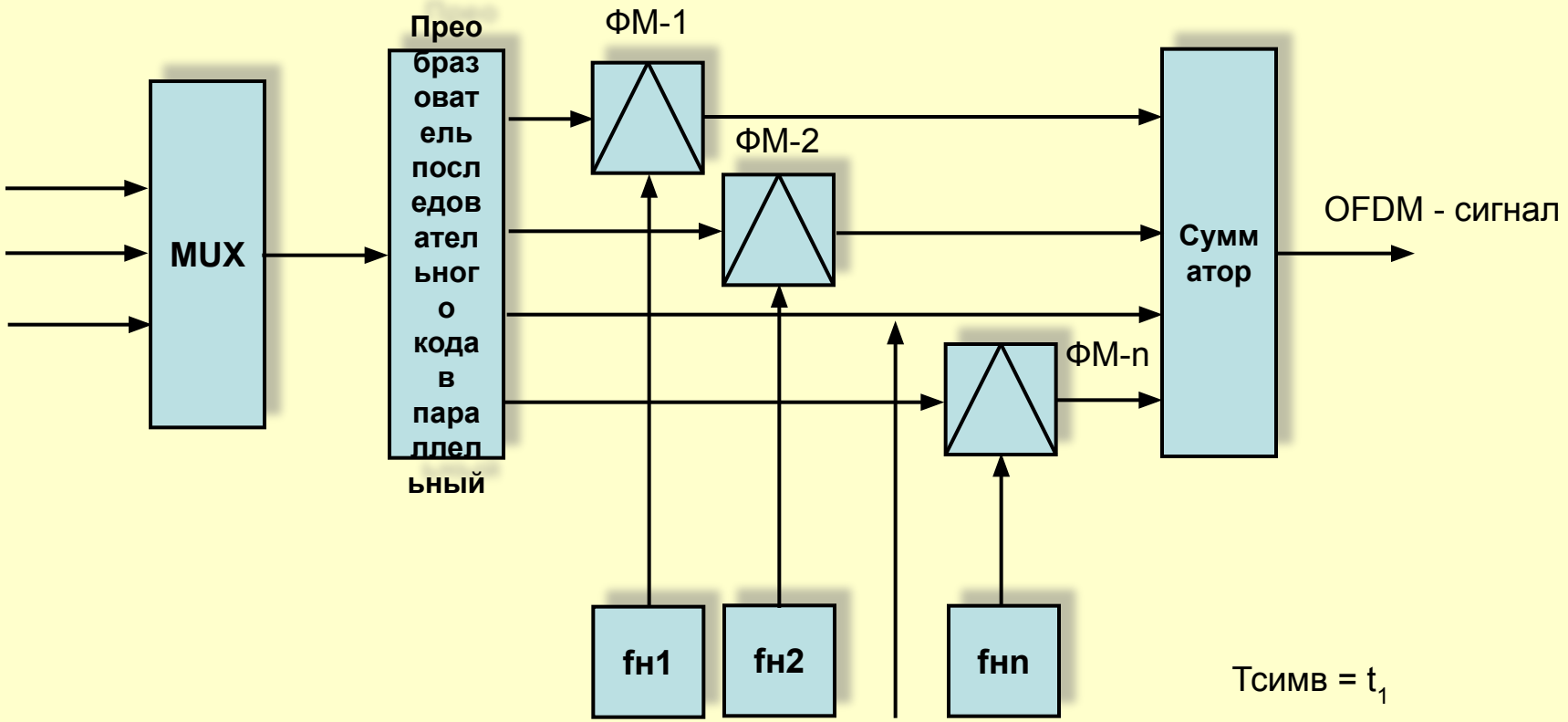
а)

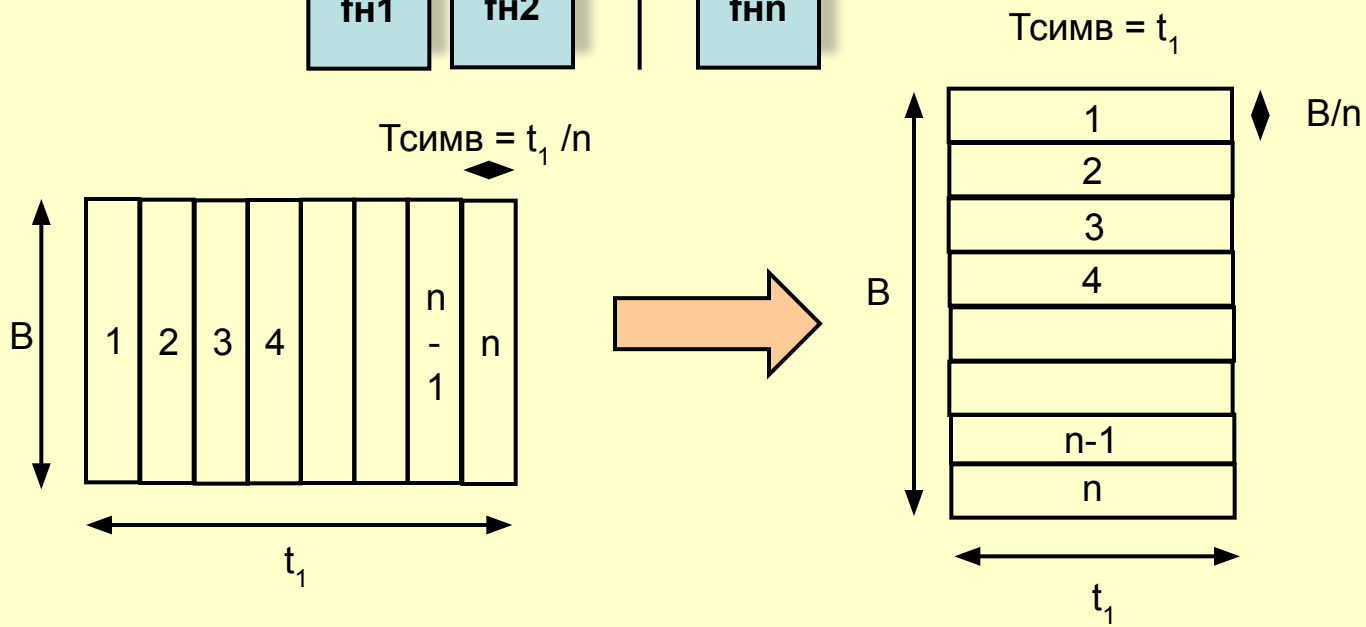




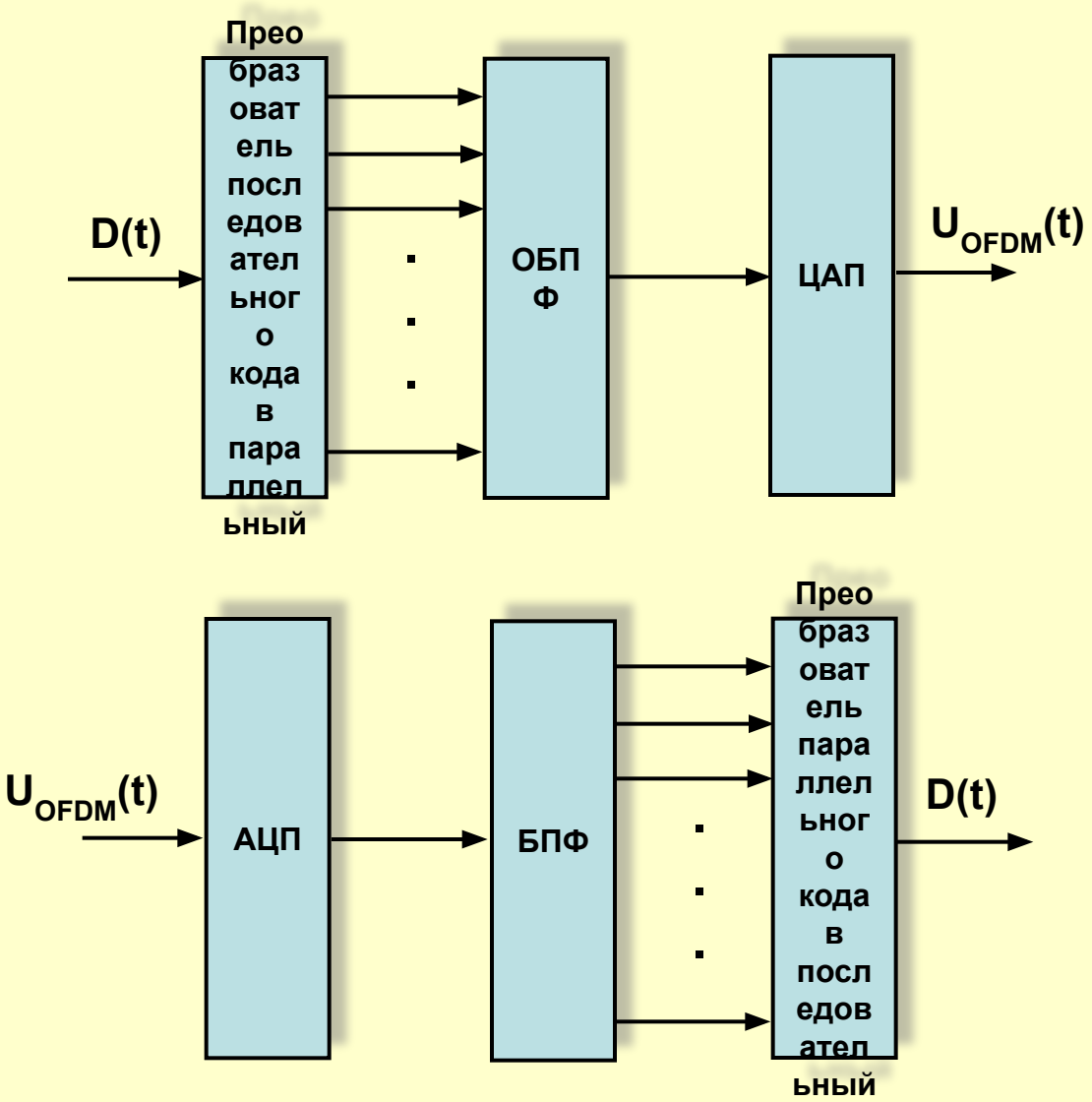
б) Формирование радиосигнала DAB

Принцип формирования OFDM

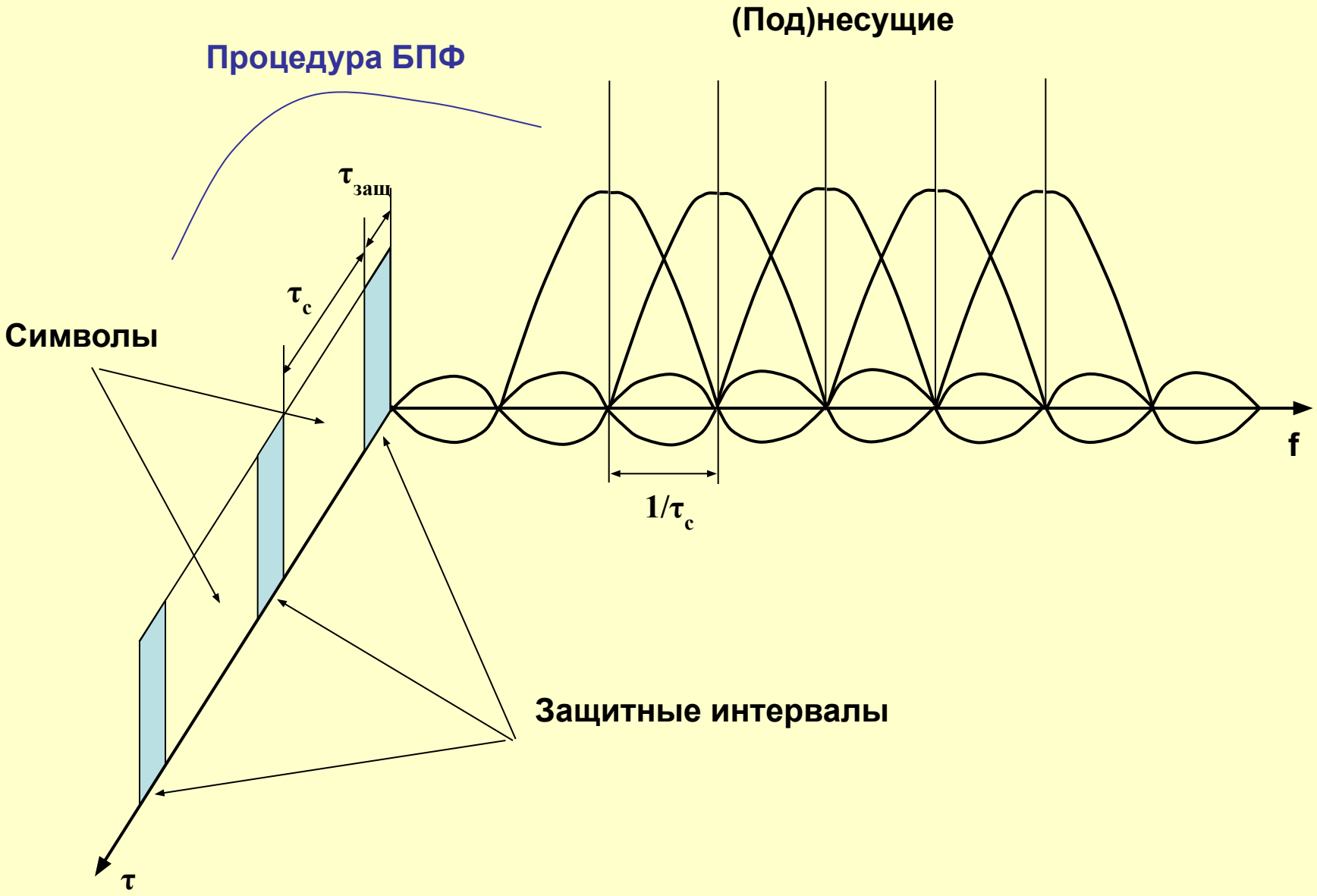




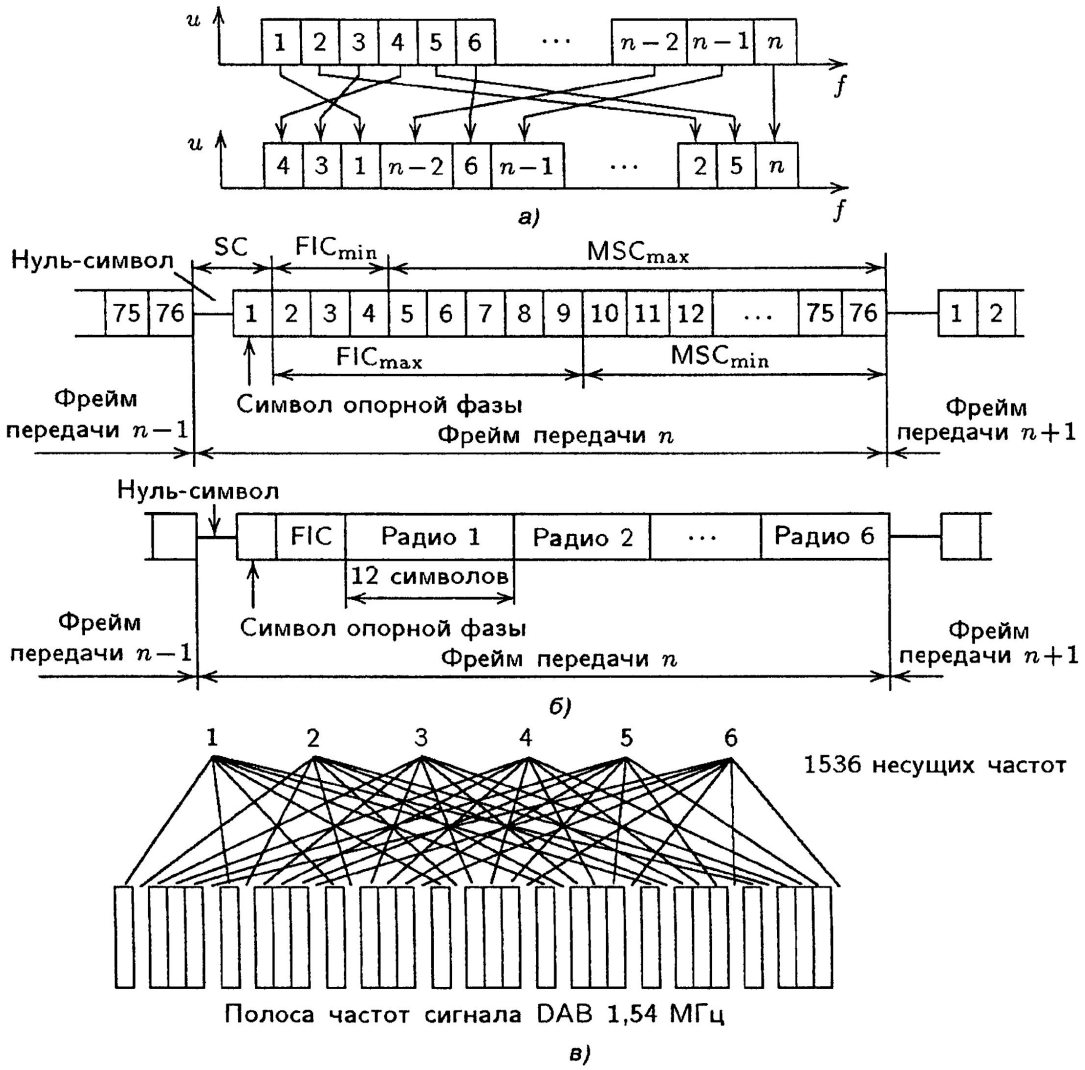
Принцип формирования OFDM



OFDM

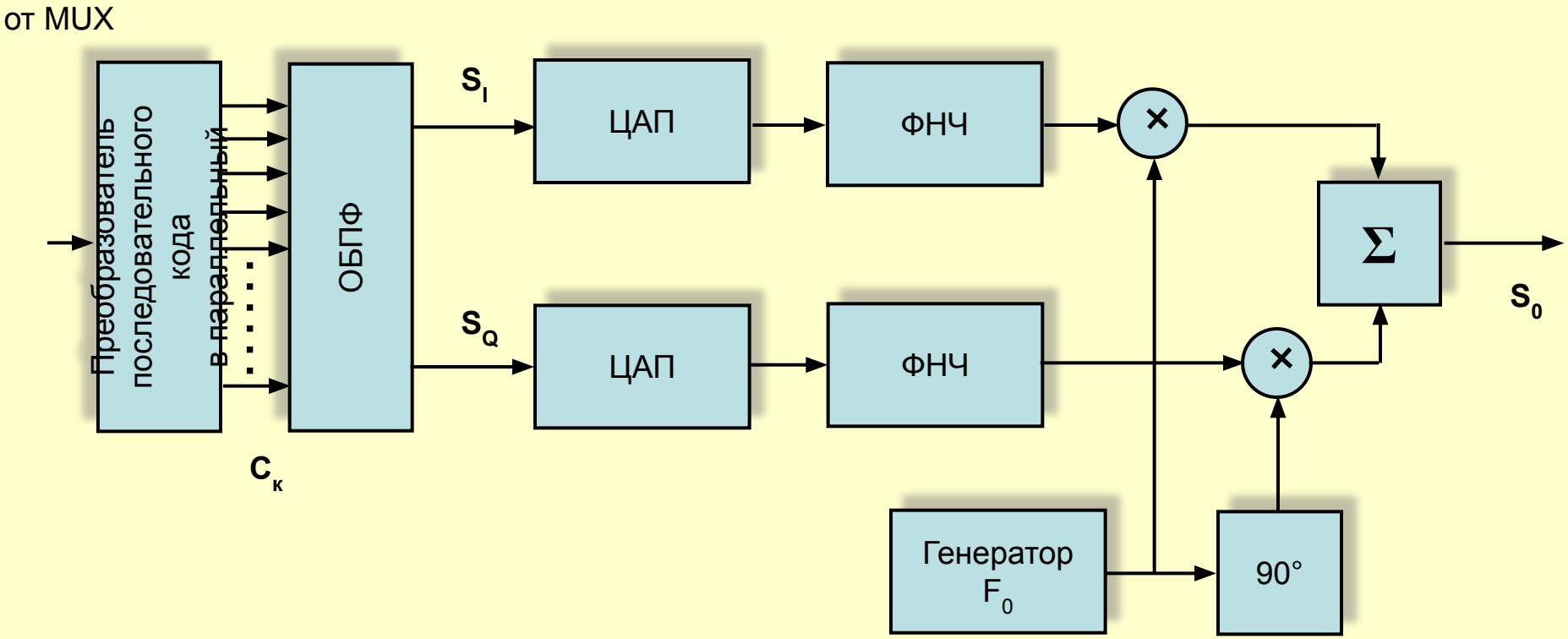

(Под)несущие
Процедура БПФ
$\tau_{заш}$
τ_c
Символы
f
$1/\tau_c$
Защитные интервалы
τ

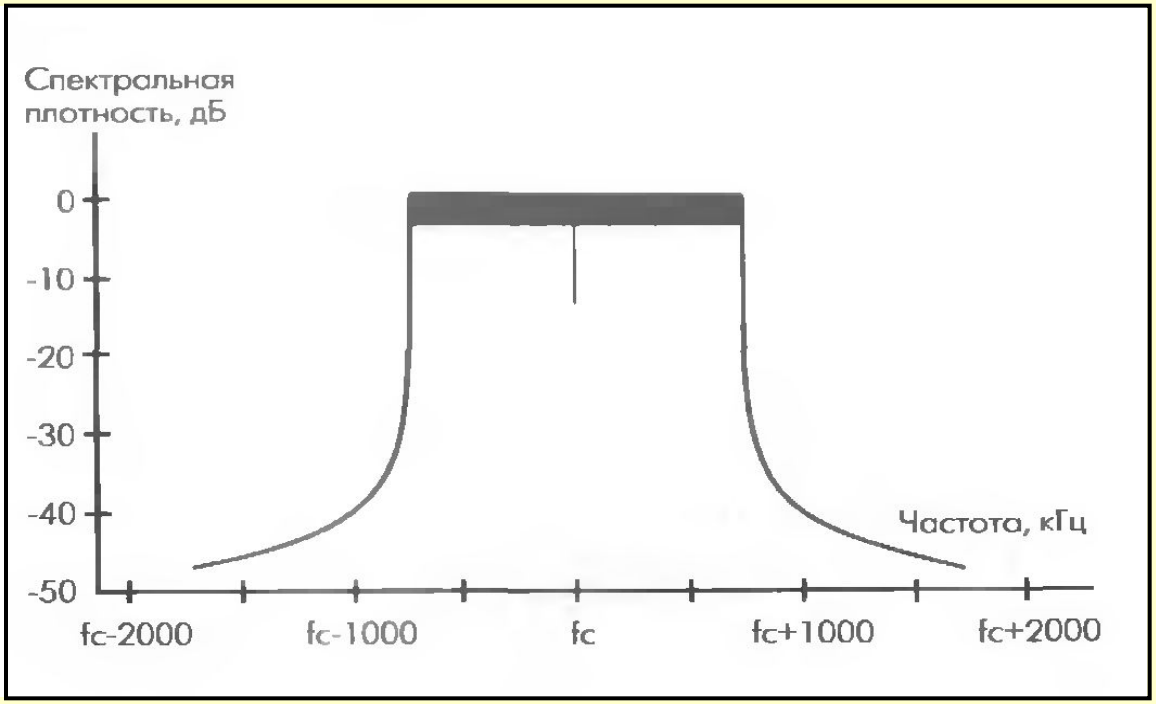
Формирование COFDM сигнала



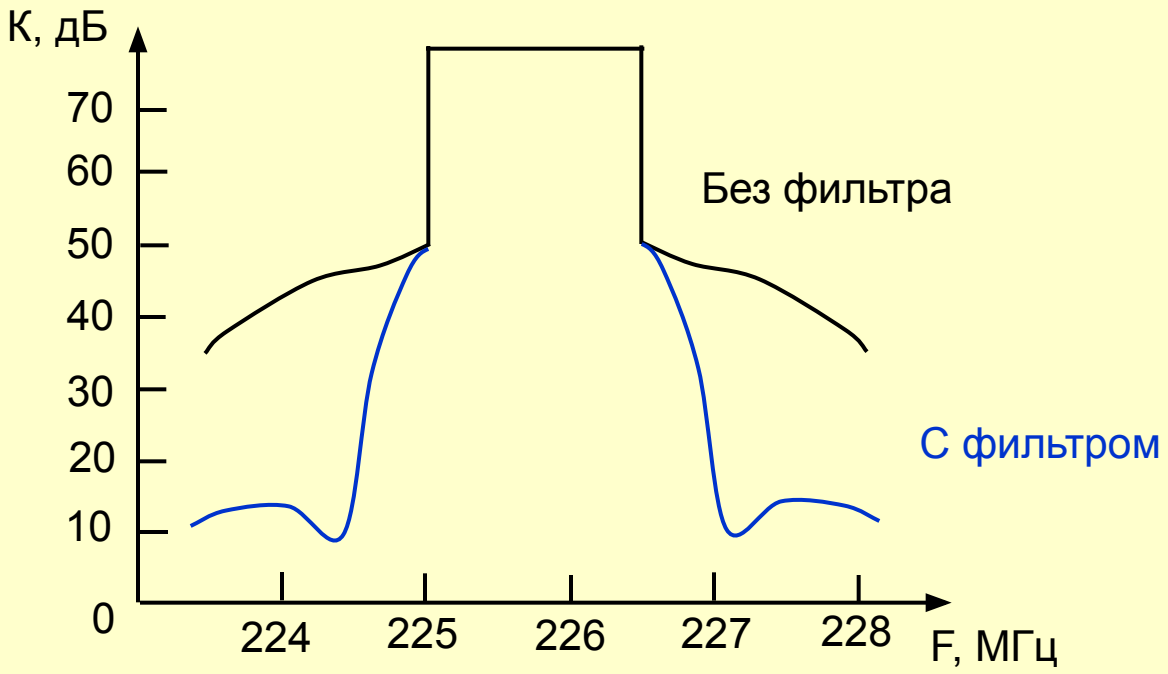
К образованию COFDM-сигнала (*а*), структура фрейма передачи системы DAB в укрупненном виде для режимов работы I и II (*б*) и иллюстрация принципа передачи сигналов звуковых программ по радиоканалу системы DAB (*в*)

Схема формирования радиосигнала COFDM

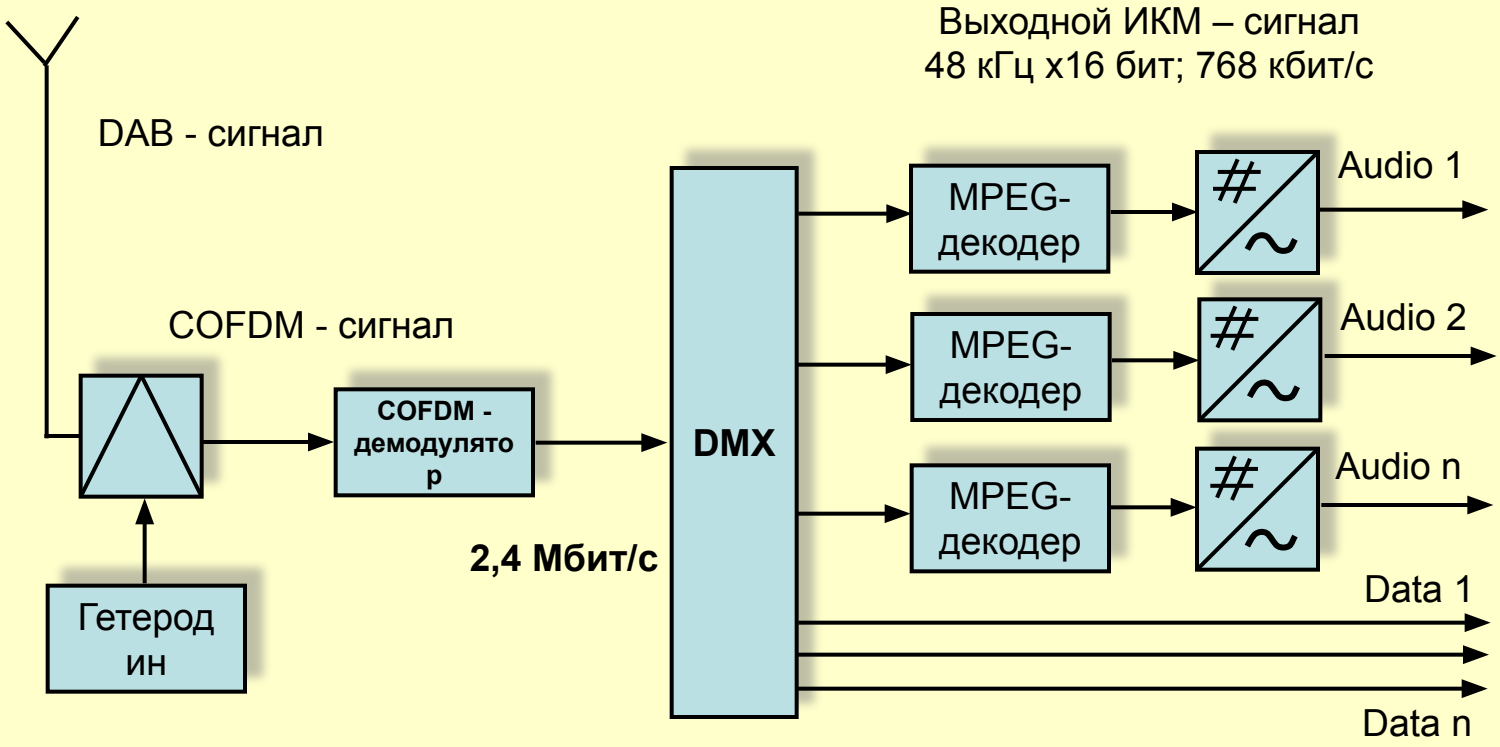



Спектральная плотность, дБ
0
-10
-20
-30
-40
-50
Частота, кГц
fc-2000
fc-1000
fc
fc+1000
fc+2000

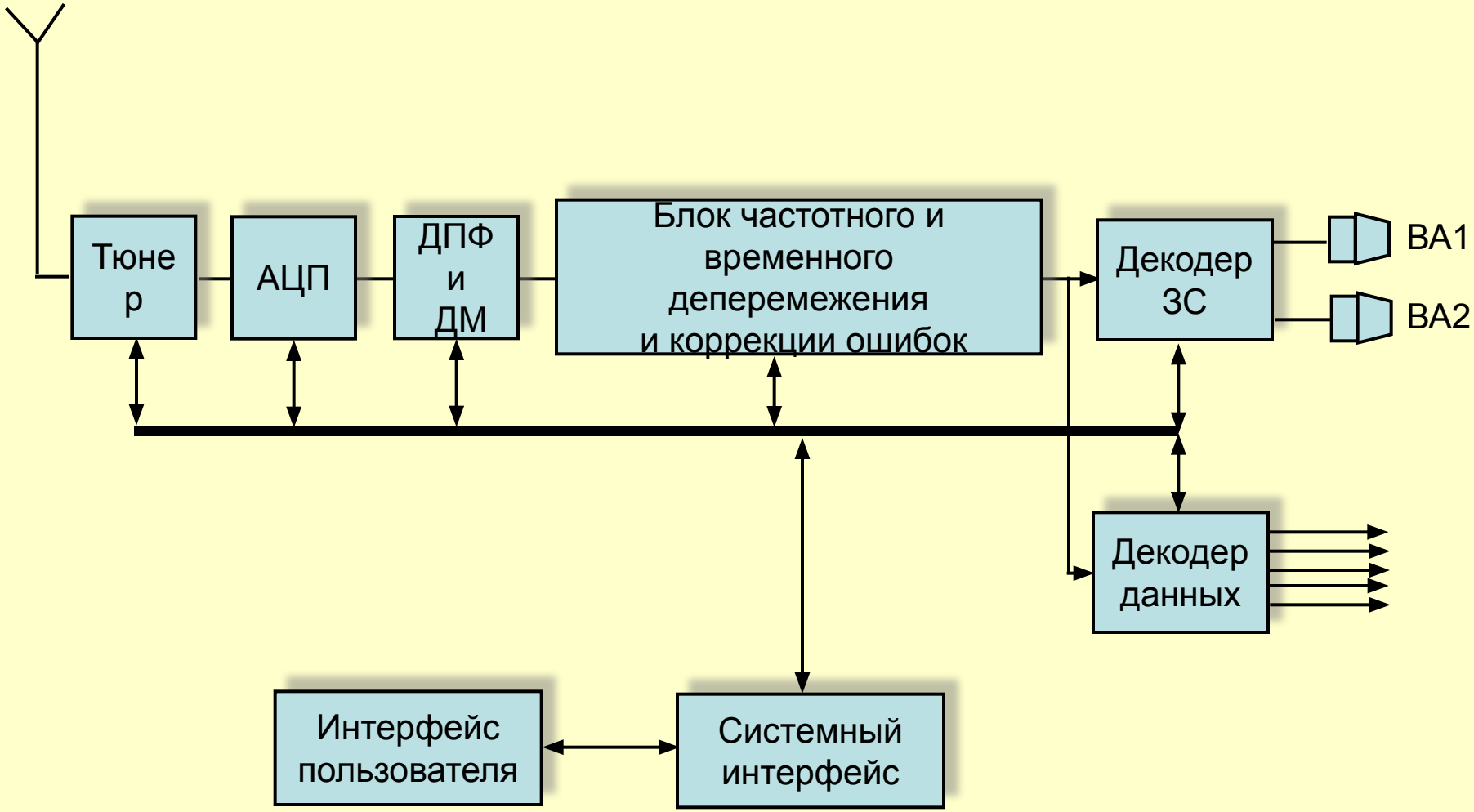
Спектр сигнала ЦРВ



Приемная часть DAB



Структурная схема приемника системы “Эврика – 147”



DRM - Всемирное цифровое радио

Digital Radio Mondiale (DRM - Всемирное цифровое радио) – это многофункциональная система цифрового радиовещания (ЦРВ), предназначенная для применения в диапазонах частот, не превышающих 30 МГц, распределенных радиовещательным службам.

В стандарте DRM предусмотрено использование каналов РВ, занимающих полосы частот шириной 4,5; 5; 9; 10; 18 и 20 кГц.

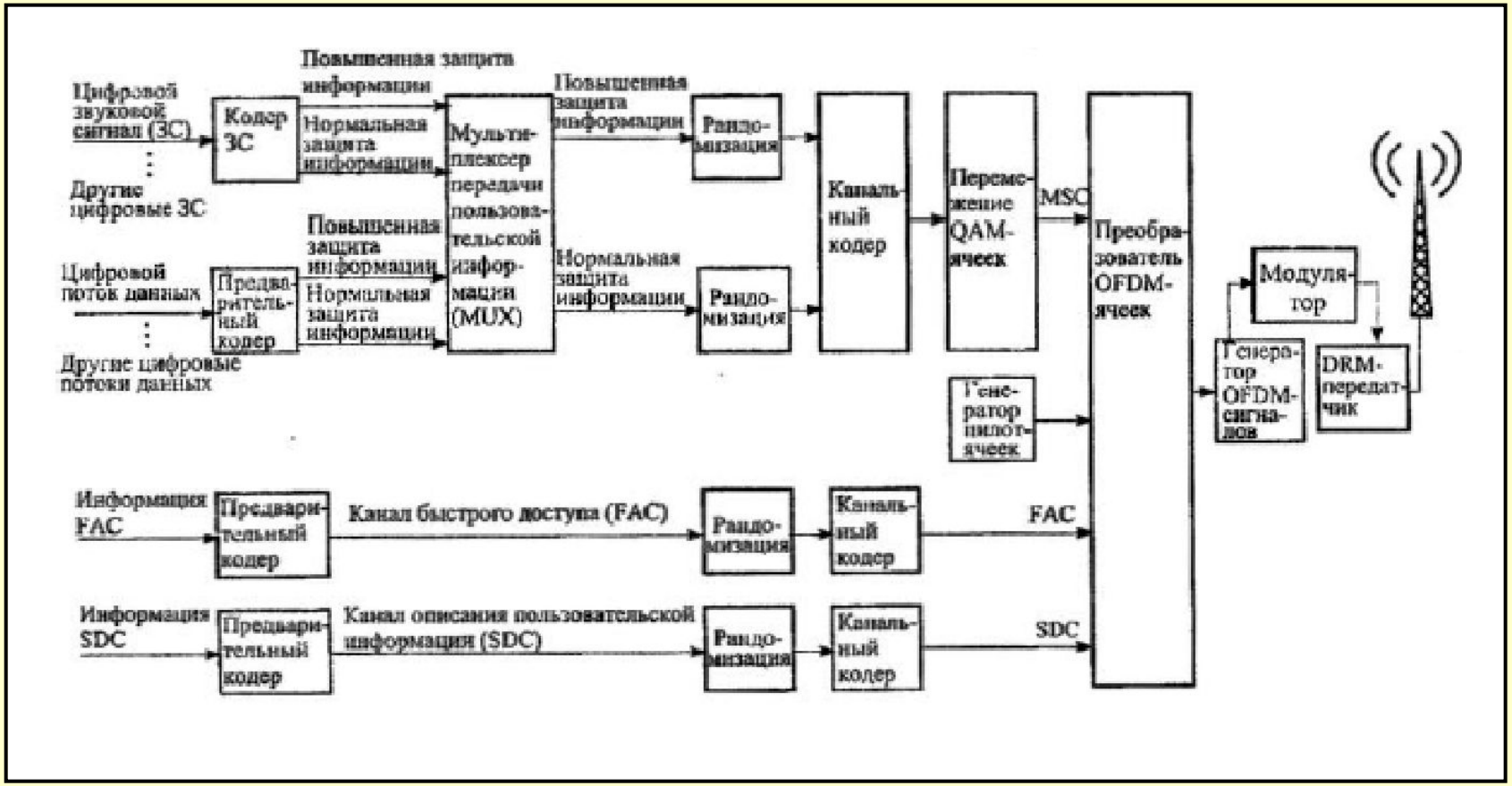
DRM позволяет реализовать стереофоническое РВ с качеством УКВ ЧМ радиовещания и намного более высоким, нежели при АМ РВ.
Возможна передача монофонических программ, речевых сигналов и разнообразной дополнительной информации (данные, относящиеся к программам, независимые данные, текстовая и графическая информация, неподвижные изображения и др).

При необходимости DRM обеспечивает совместную передачу в одном канале сигнала цифрового РВ и аналогового вещательного сигнала с АМ или однополосной модуляцией (ВБП или НБП).

Основные технические характеристики стандарта DRM

1. Диапазоны частот, используемых для радиовещания DRM, МГц	Менее 30
2. Значения ширины полос частот, занимаемых радиосигналами DRM, кГц	4,5; 5; 9; 10; 18; 20
3. Возможность совместной передачи в одном радиоканале сигналов аналогового радиовещания и DRM-сигналов	Имеется
4. Виды сигналов, поступающих от создателей радиопрограмм	Звуковые и речевые сигналы; данные
5. Режимы передачи звуковых сигналов	Стерео, моно
6. Методы кодирования звуковых (речевых) сигналов	MPEG-4 AAC; MPEG-4 CELP; MPEG-4 HVXC
7. Метод расширения полос воспроизводимых частот звукового диапазона	Spectral Band Replication (SBR)
8. Диапазон скоростей передачи звуковых (включая речевые) сигналов, кбит/с	2–72
9. Методы защиты от ошибок и виды модуляции сигналов в системных каналах	Сверточное кодирование; перемежение битов; квадратурная амплитудная модуляция (QAM); перемежение QAM-ячеек
	(в канале MSC)
10. Способ модуляции передаваемых радиосигналов DRM	OFDM

Концептуальная структурная схема тракта передачи DRM

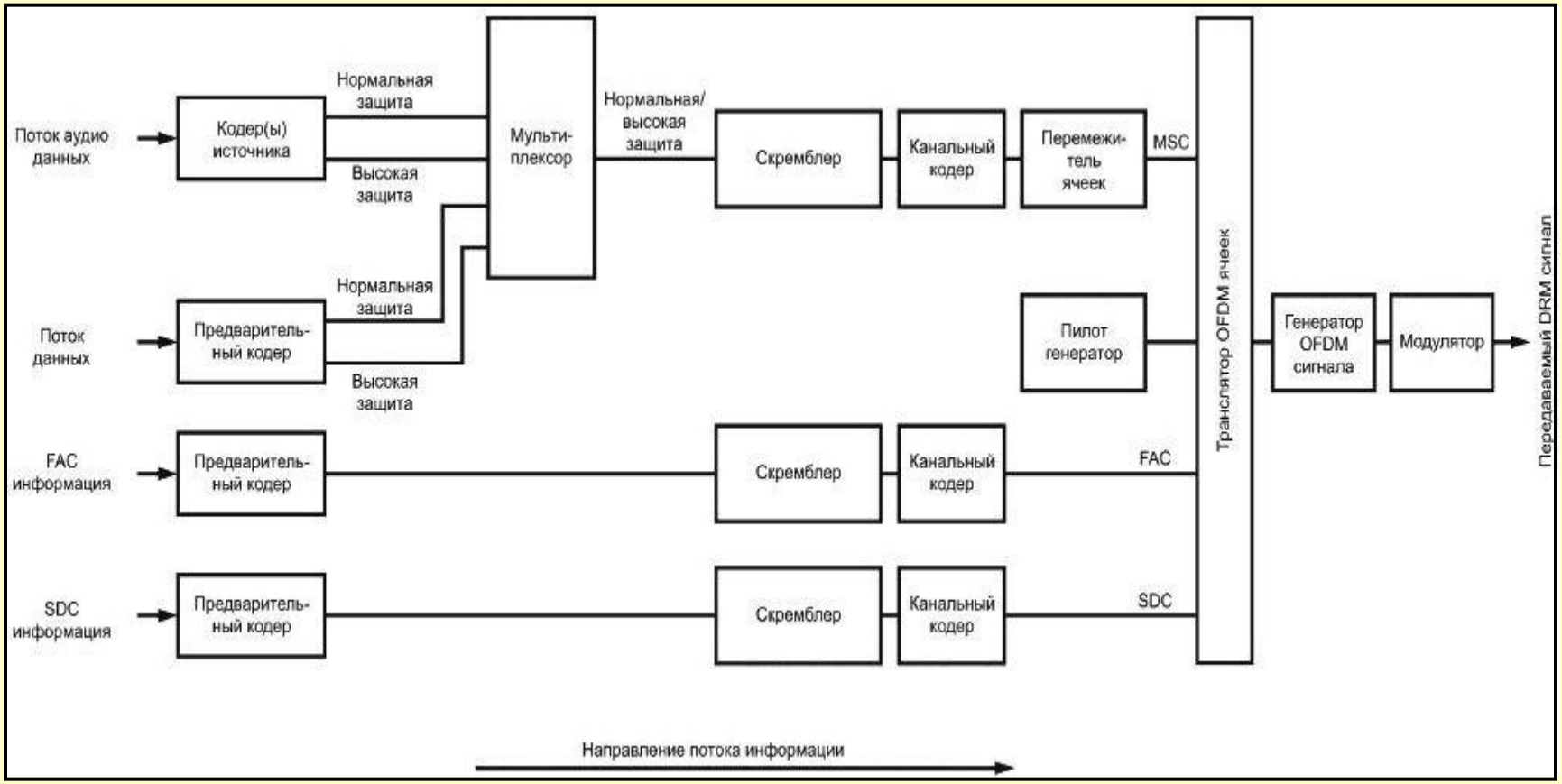


MSC – Main Service Channel – Главный канал пользовательской информации;

FAC – Fast Access Channel – Канал быстрого доступа;

SDC – Service Description Channel – Канал описания пользовательской информации

Концептуальная структурная схема тракта передачи DRM

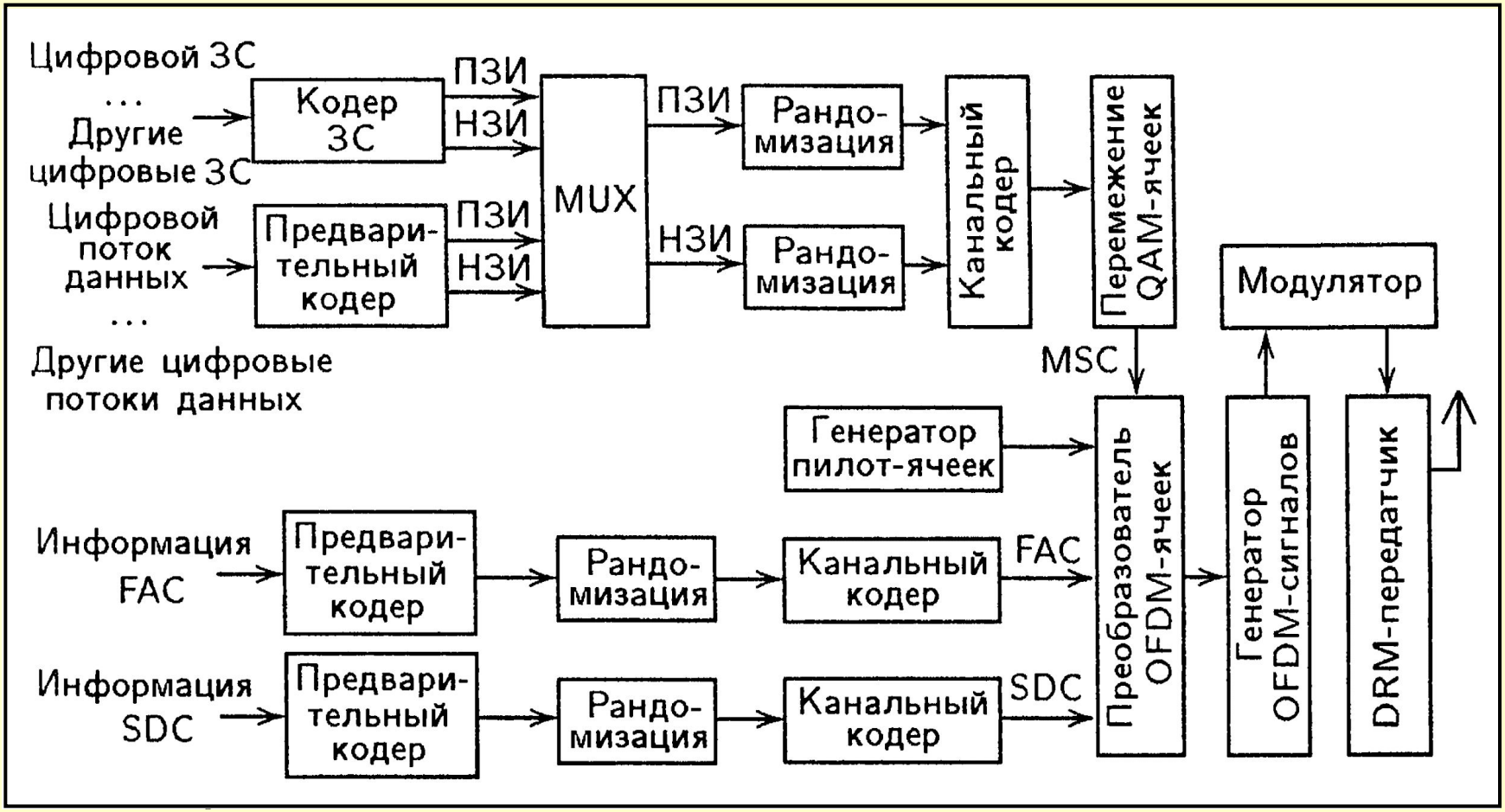


MSC – Main Service Channel – Главный канал пользовательской информации;

FAC – Fast Access Channel – Канал быстрого доступа;

SDC – Service Description Channel – Канал описания пользовательской информации

Концептуальная структурная схема тракта передачи DRM

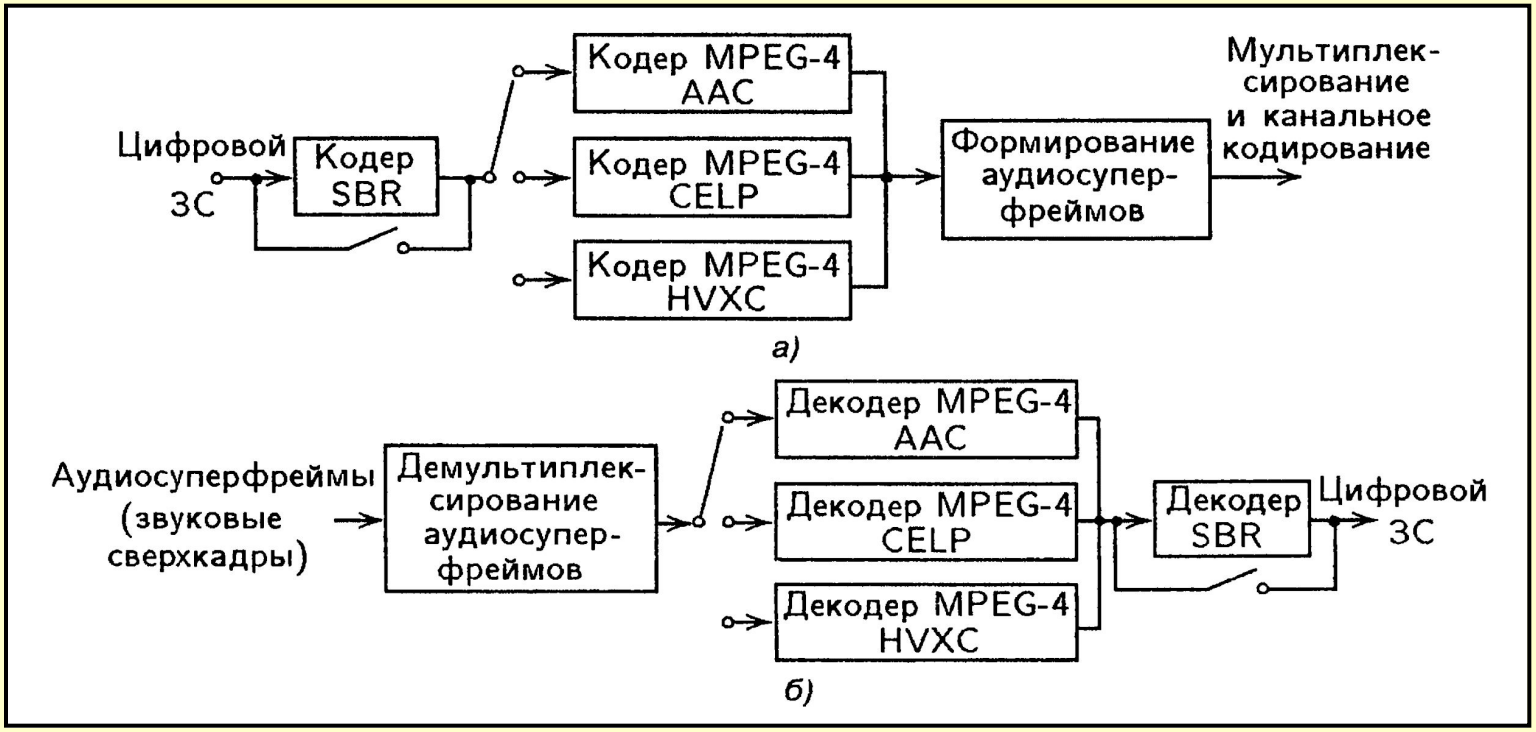


MSC – Main Service Channel – Главный канал пользовательской информации;

FAC – Fast Access Channel – Канал быстрого доступа;

SDC – Service Description Channel – Канал описания пользовательской информации

Кодирование и декодирование первичных цифровых ЗС в DRM



Особенности применения MPEG-4 AAC в стандарте DRM

– в системе DRM применяется устойчивый к ошибкам вариант 2 MPEG-4 AAC (Object Type ID-17, который является частью High Quality Audio Profile);

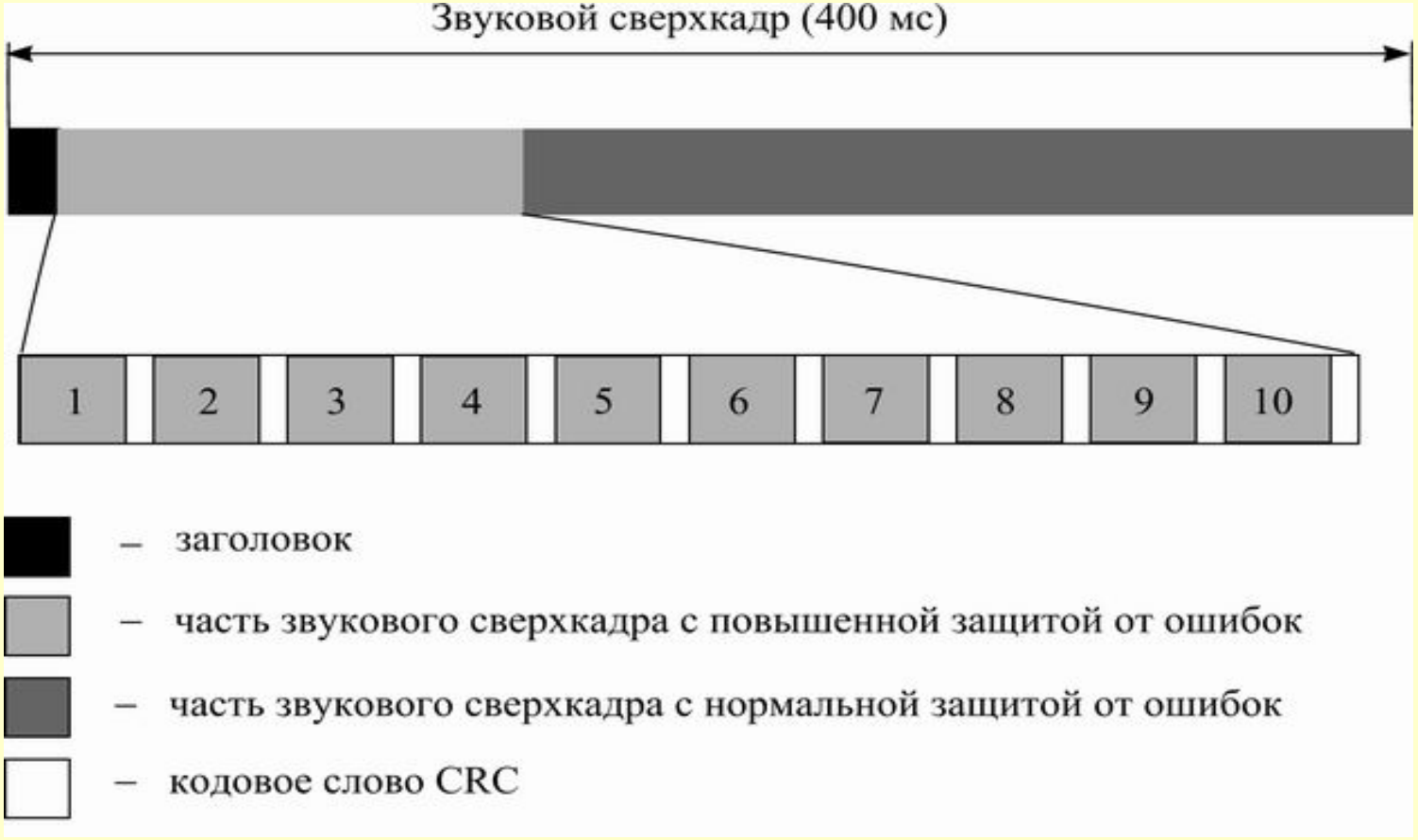
– разрешены частоты дискретизации *f*д=12 кГц и *f*д=24 кГц;

– длительность сформированных в кодере *звуковых кадров (аудиофреймов)* равна 80 мс при *f*д=12 кГц и 40 мс при *f*д=24 кГц, что соответствует 960 отсчетам;

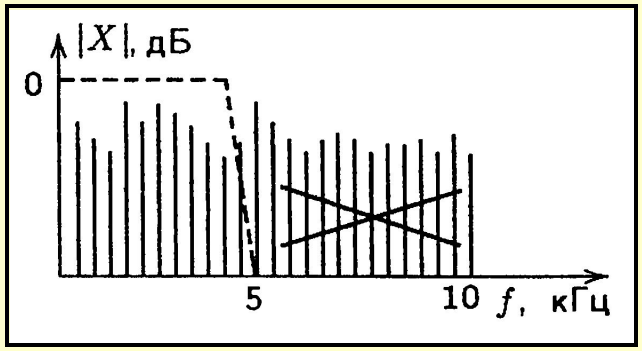
– из звуковых кадров формируются *звуковые сверхкадры (аудиосуперфреймы),* длительность которых равна 400 мс; таким образом один звуковой сверхкадр содержит 5 звуковых кадров, имеющих длительность, равную 80 мс (на кадр), или 10 звуковых кадров с длительностью каждого 40 мс;

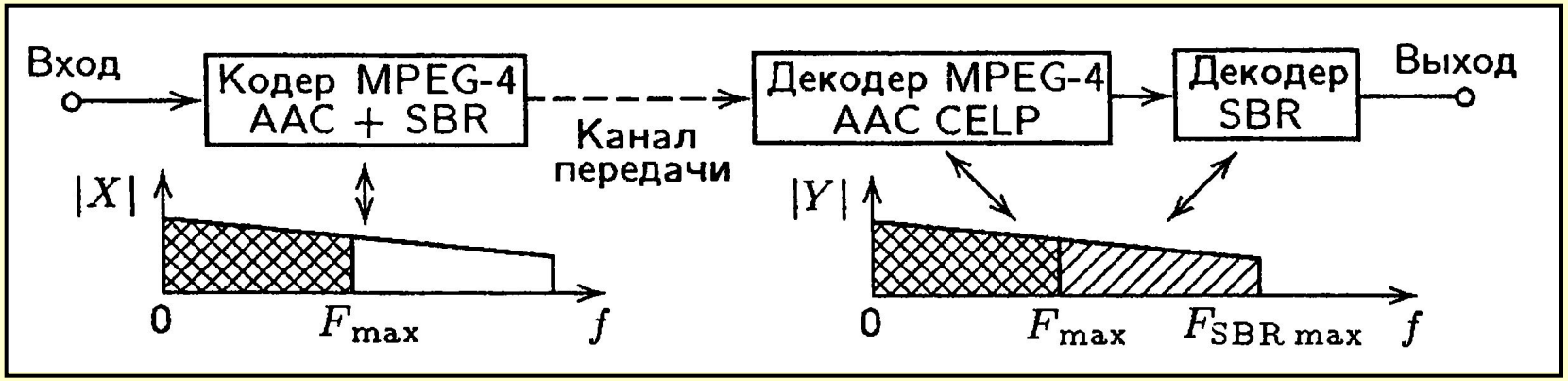
– один звуковой сверхкадр всегда расположен в одном логическом кадре; это позволяет исключить дополнительную синхронизацию при кодировании и декодировании ЗС.

Пример построения звукового сверхкадра MPEG-4 AAC

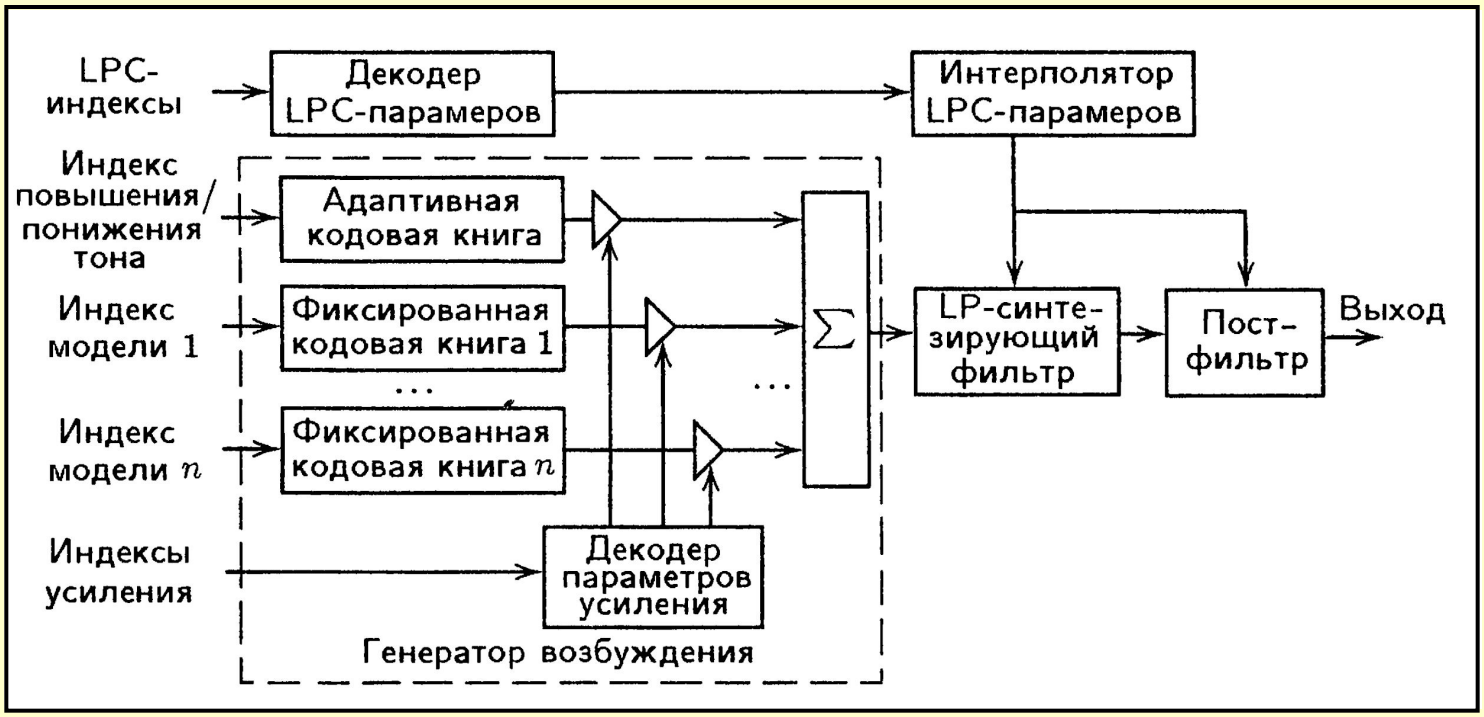


Принцип реализации метода SBR в DRM

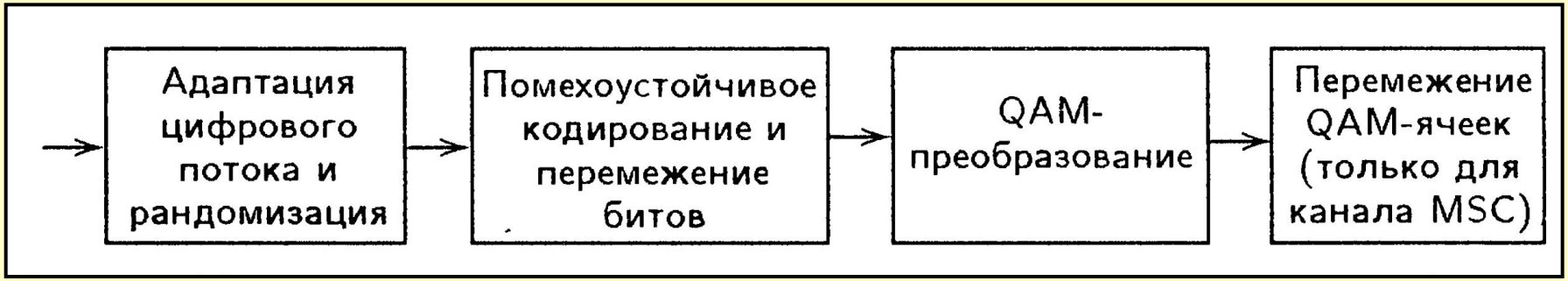




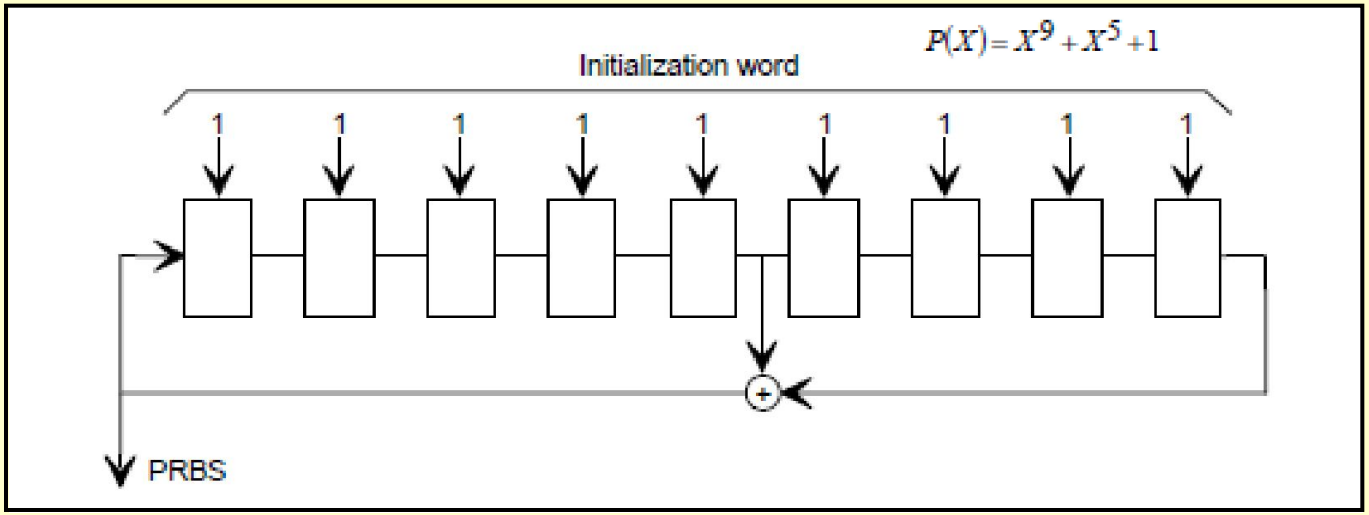
Базовая структурная схема декодера MPEG-4 CELP



Канальное кодирование и модуляция в DRM



Концептуальная схема кодирования в каналах MSC; FAC; SDC

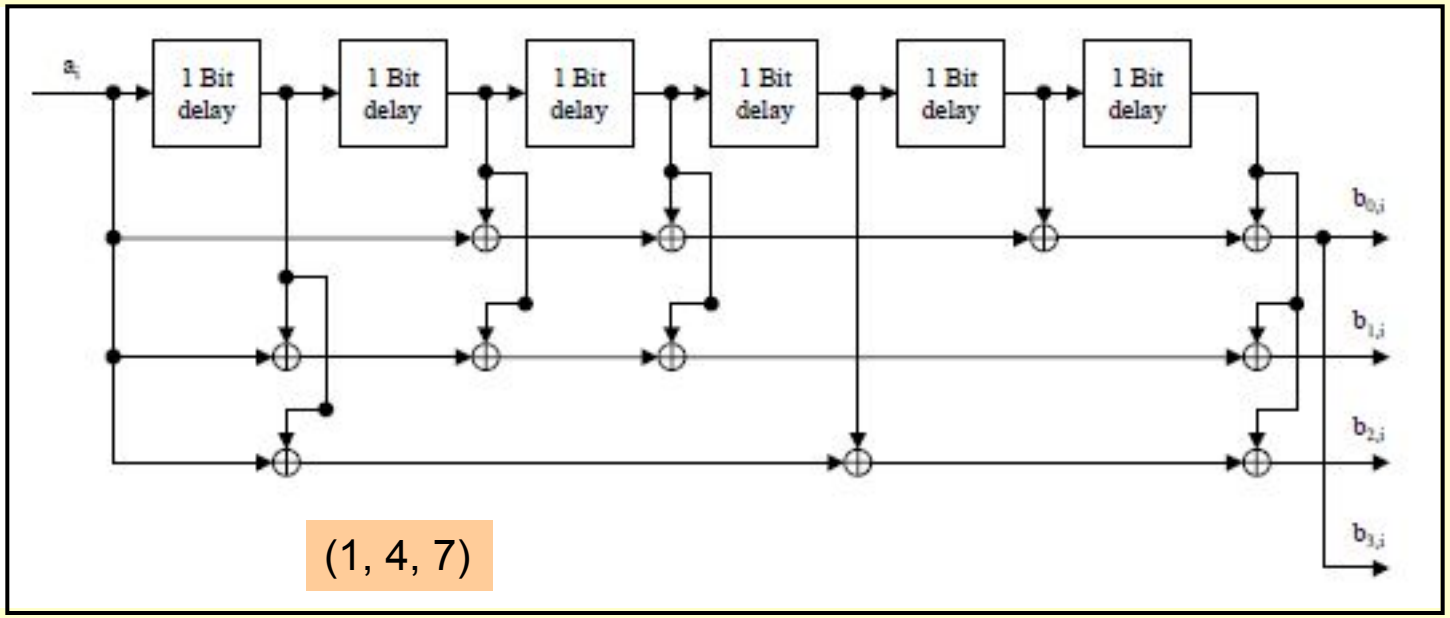


Генератор ПСП

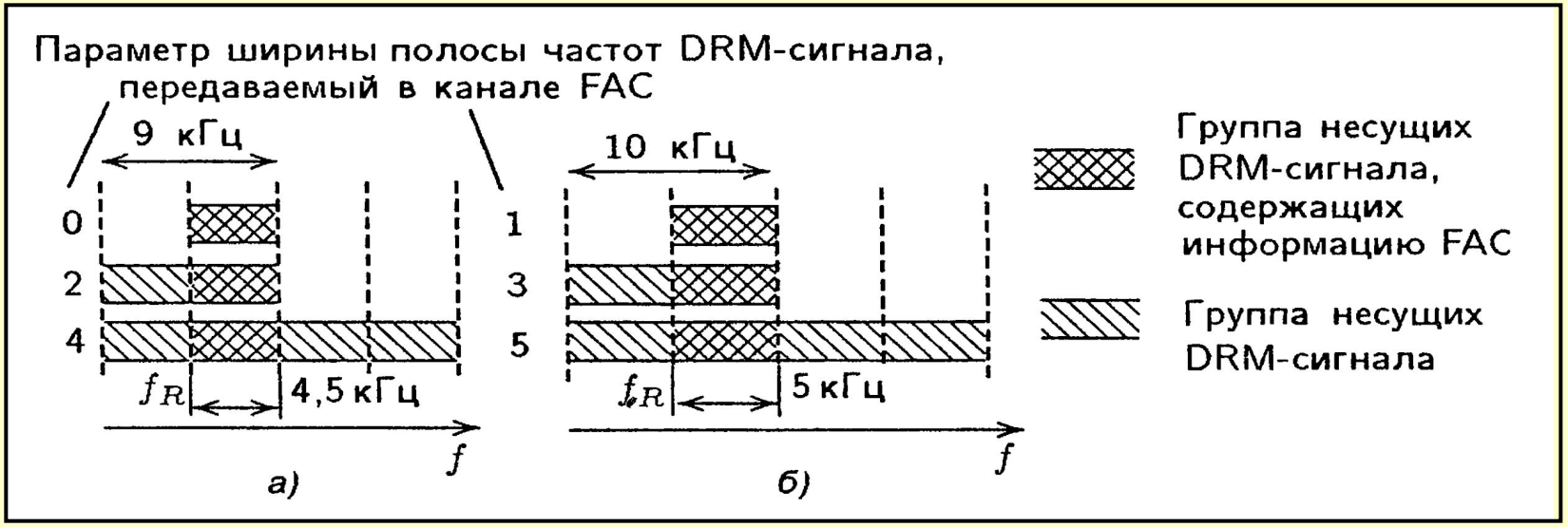
bit index	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
bit value	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0

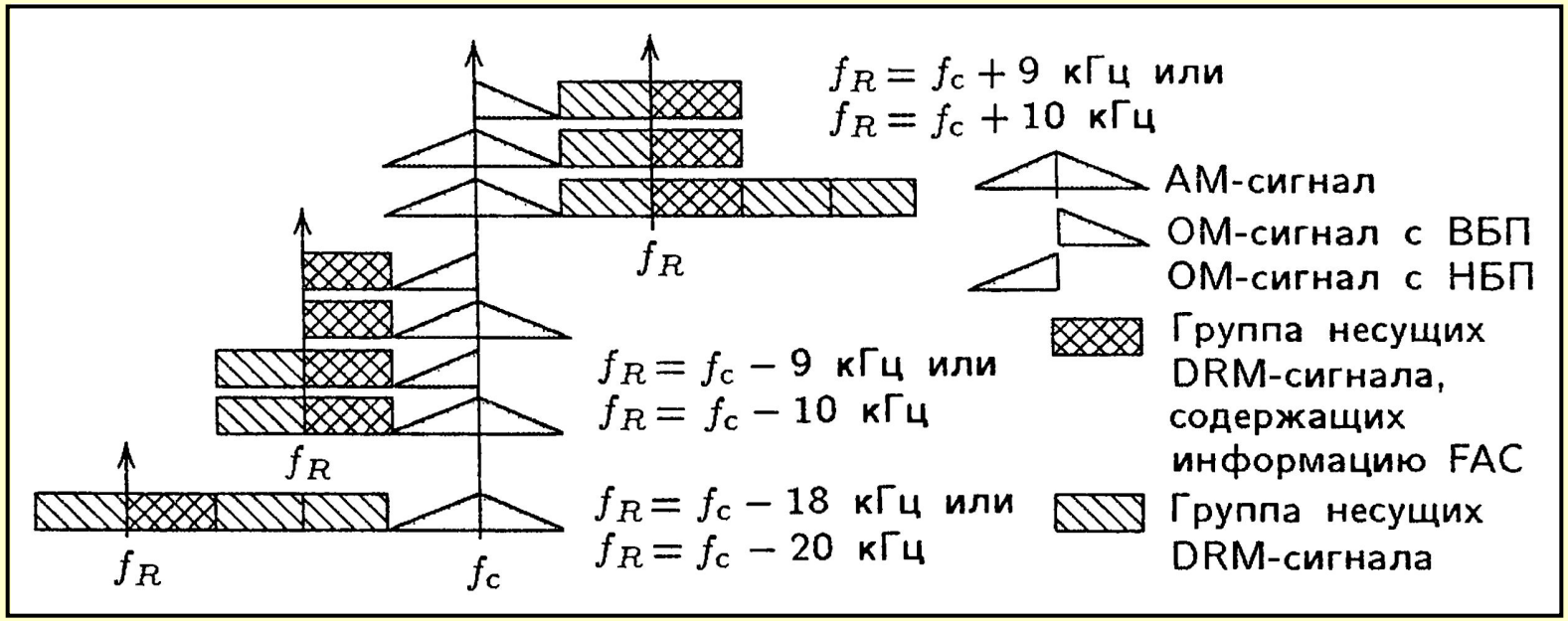
Первые 16 бит ПСП

Канальное сверточное кодирование

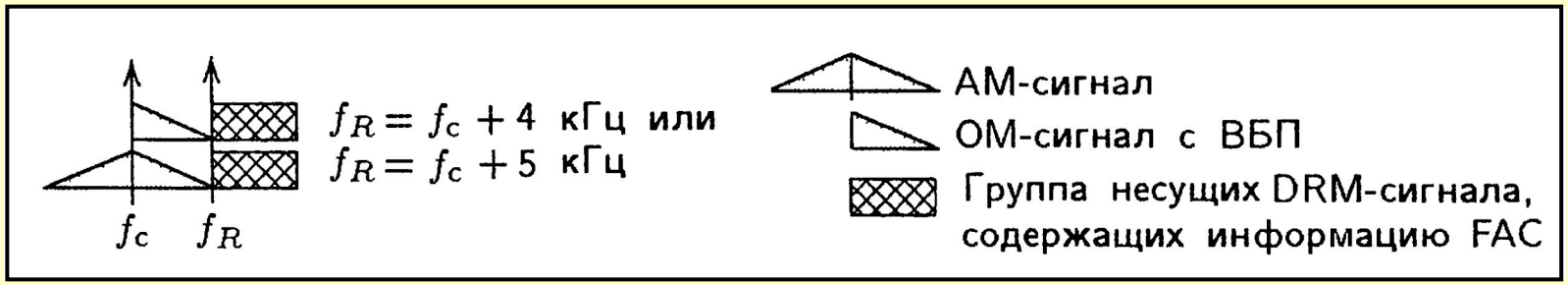


Спектр сигнала DRM при ширине занимаемой полосы частот, кратной 4,5 (а) и 5 кГц (б)





Пример спектров, формируемых при одновременной передаче сигналов аналогового радиовещания и DRM-сигналов; сдвиг между несущими частотами аналоговых сигналов (fc) и опорными частотами DRM-сигналов (f_R) равен: 9, 10, -18, -20 кГц



Пример спектров, формируемых при одновременной передаче сигналов аналогового радиовещания и DRM-сигналов; сдвиг между несущими частотами аналоговых сигналов (fc) и опорными частотами DRM-сигналов (f_R) равен 4 или 5 кГц

Параметры OFDM-символов DRM

Режим устойчивости	Условия распространения радиосигналов
A	Гауссовские каналы с малыми замираниями
B	Каналы с замираниями, имеющие частотную и временну́ю селективнсть, с увеличенными задержками распространения сигналов
C	Аналогично режиму B, но с увеличенным эффектом Доплера
D	Аналогично режиму B, но с существенными задержками распространения сигналов и значительным эффектом Доплера

Параметр	Режим устойчивости			
	A	B	C	D
Элементарный временно́й период T, мкс	83 1/3	83 1/3	83 1/3	83 1/3
Длительность используемой части символа OFDM T_u, мс	24 ($288T$)	21 1/3 ($256T$)	14 2/3 ($176T$)	9 1/3 ($112T$)
Длительность защитного интервала символа символа OFDM T_g, мс	2 2/3 ($32T$)	5 1/3 ($64T$)	5 1/3 ($64T$)	7 1/3 ($88T$)
Отношение длительностей защитного интервала и используемой части символа OFDM T_g/T_u	1/9	1/4	4/11	11/14
Длительность символа OFDM $T_s = T_u + T_g$, мс	26 2/3	26 2/3	20	16 2/3
Разнос несущих частот $1/T_u$, Гц	41 2/3	46 7/8	68 2/11	107 1/7
Длительность фрейма передачи T_{rmF}, мс	400	400	400	400
Количество символов в фрейме передачи N_s	15	15	20	24

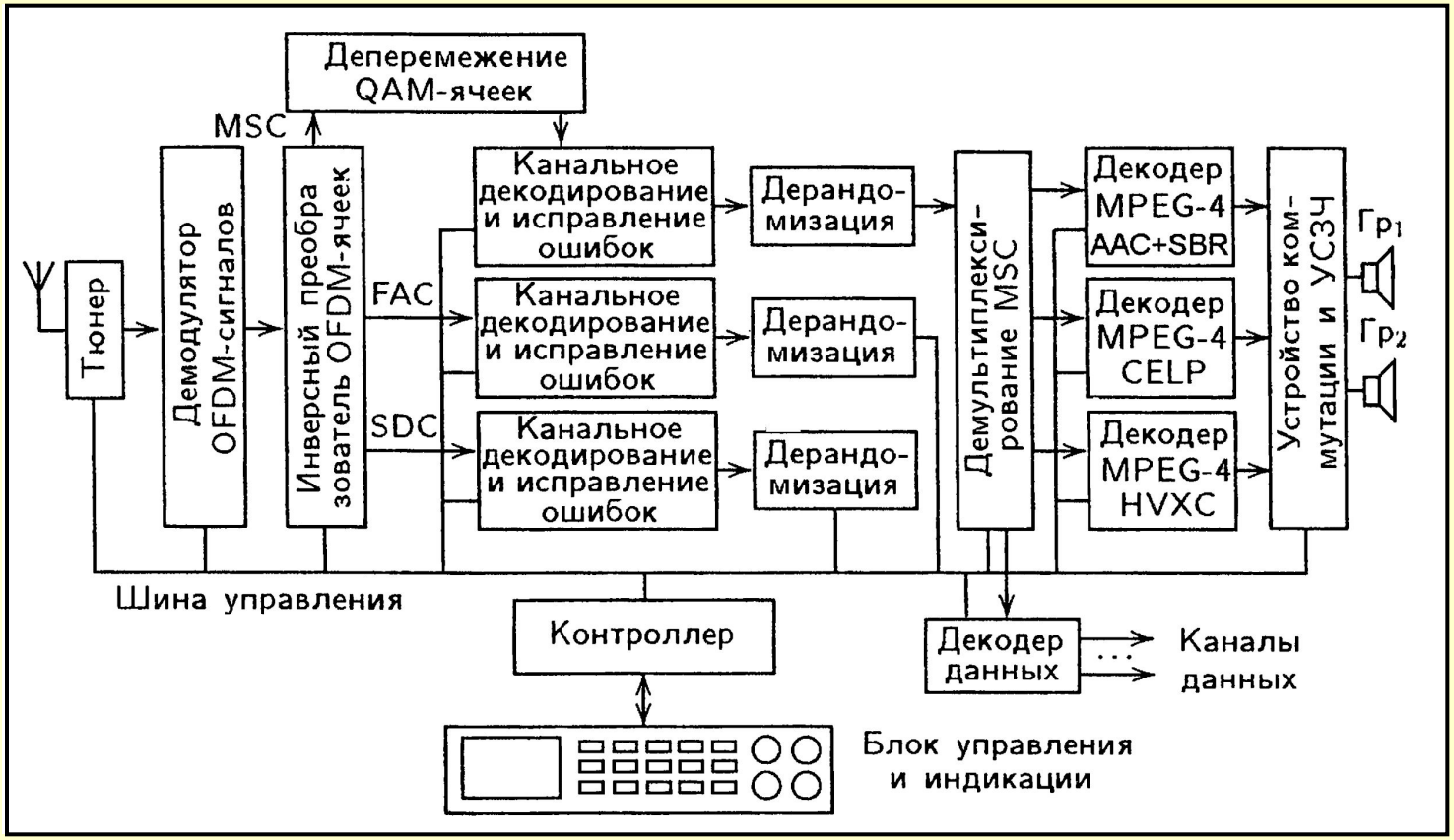
Параметры OFDM-символов DRM

Параметр, передаваемый в канале FAC	0	1	2	3	4	5
Ширина полосы частот, кГц	4,5	5	9	10	18	20

Режим устойчивости	Минимальный и максимальный номер несущей частоты	Индекс ширины полосы частот					
		0	1	2	3	4	5
A	K_{min}	2	2	−102	−114	−98	−110
	K_{max}	102	114	102	114	314	350
B	K_{min}	1	1	−91	−103	−87	−99
	K_{max}	91	103	91	103	279	311
C	K_{min}	–	–	–	−69	–	−67
	K_{max}	–	–	–	69	–	213
D	K_{min}	–	–	–	−44	–	−43
	K_{max}	–	–	–	44	–	135

Временное размещение информации MSC, FAC и SDC в суперфрейме (сверхкадре) передачи

Структурная схема тракта приема цифровых сигналов радиоприемника системы DRM



Существующие и перспективные системы спутникового РВ

● ***Sirius Satellite***, в которой работают три спутника на геостационарной орбите, обеспечивающие передачу до 100 стереофонических программ на территорию США. В системе Sirius музыкальные программы составляют около 60%, остальные – информационные. Музыкальные программы кодируются.

● ***XM Radio*** – была введена в эксплуатацию в конце 2001 г., работает на двух геостационарных спутниках XM Rock и XM Roll. Система XM-Radio работает в S-диапазоне (полоса 2330...2345 МГц). С целью максимального охвата населения вещательными программами в различных городах США установлено около 1500 наземных ретрансляторов.

● ***World Space*** (создана в начале 1990-х годов) система спутникового радиовещания, работающая в полосе частот 1450...1490 МГц для стран третьего мира. В настоящее время в системе World Space функционируют три спутника: ***AmeriStar***, охватывающий в основном страны Центральной и Южной Америки; ***AfriStar***, рассчитанный на обслуживание населения Африканского континента; ***AsiaStar***, обеспечивающий радиовещательными программами со спутников страны Азиатского континента. Сигналы со спутников AsiaStar принимаются в Казахстане и в дальневосточных регионах России, а со спутников AfriStar- на Украине, в Белоруссии и на юге России.
Компания World Space планирует в ближайшие несколько лет вывести на орбиту европейский и австралийский спутники. В случае реализации этих планов спутники системы World Space будут обслуживать более 70% населения земного шара или около 5 млрд. человек. Каждый из спутников системы World Space имеет три пучка, в пучке транслируется по 40 радиовещательных программ.

Существующие и перспективные системы спутникового РВ

Рекомендации МСЭ-Р / стандарт ETSI	Наименование системы	Способ передачи аудио	Вид модуляции	Начало эксплуатации
BO. 1130-1; Цифровая система А	S-DAB (Media Star)	OFDM	4-ФМ-4/OFDM	Не определено
BO.1130-1 Цифровая система В	JPL|VOA	TDM	4-ФМ	Не определено
BO.1130+BS.1547 Цифровая система D	World Space	TDM, MCM	4-ФМ	1998
BO.1130-3 Цифровая система Е	Digital System E	CDM	4-ФМ	Не определено
BO.712-1	DSR	TDM	4-ФМ	1989

Программы в формате DSR в настоящее время передаются:

- через спутник TV-SAT 2 (19 градусов западной долготы, частота 11,977 ГГц, левая поляризация);
- через спутник DFS-3 Kopernikus (23,5 градуса восточной долготы, частота 12,625 ГГц,
горизонтальная поляризация);
- в немецкой кабельной сети (каналы S2 и S3, частоты 111...125 МГц);
- в швейцарской системе направленной радиосвязи GAZ (Gemeinschafts Antennen Zubringernetz).

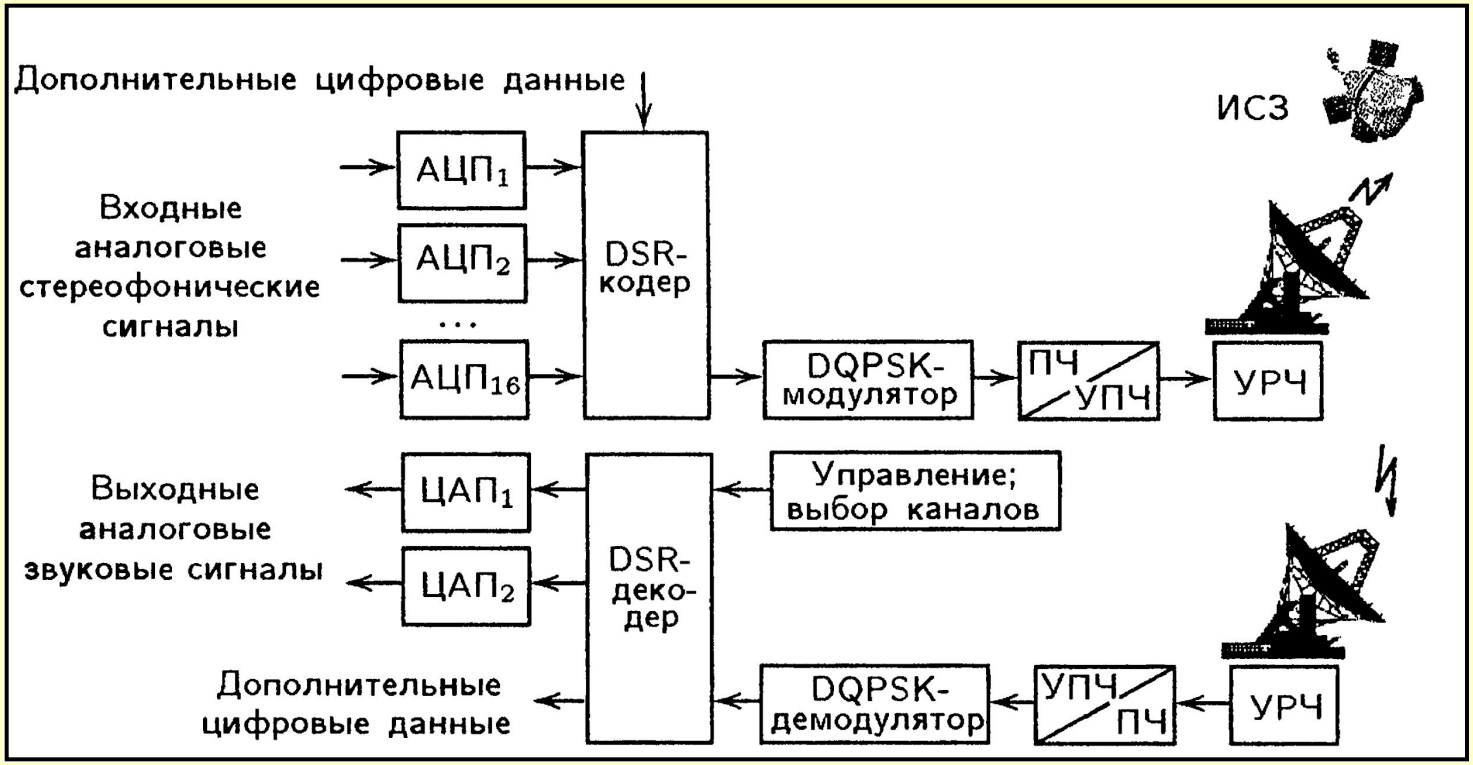
DSR - (Digitale Satelliten Radio – Цифровое спутниковое радио)

Впервые цифровое спутниковое радиовещание в формате DSR (Digitale Satelliten Radio) было продемонстрировано в Берлине на международной выставке в 1989 году.

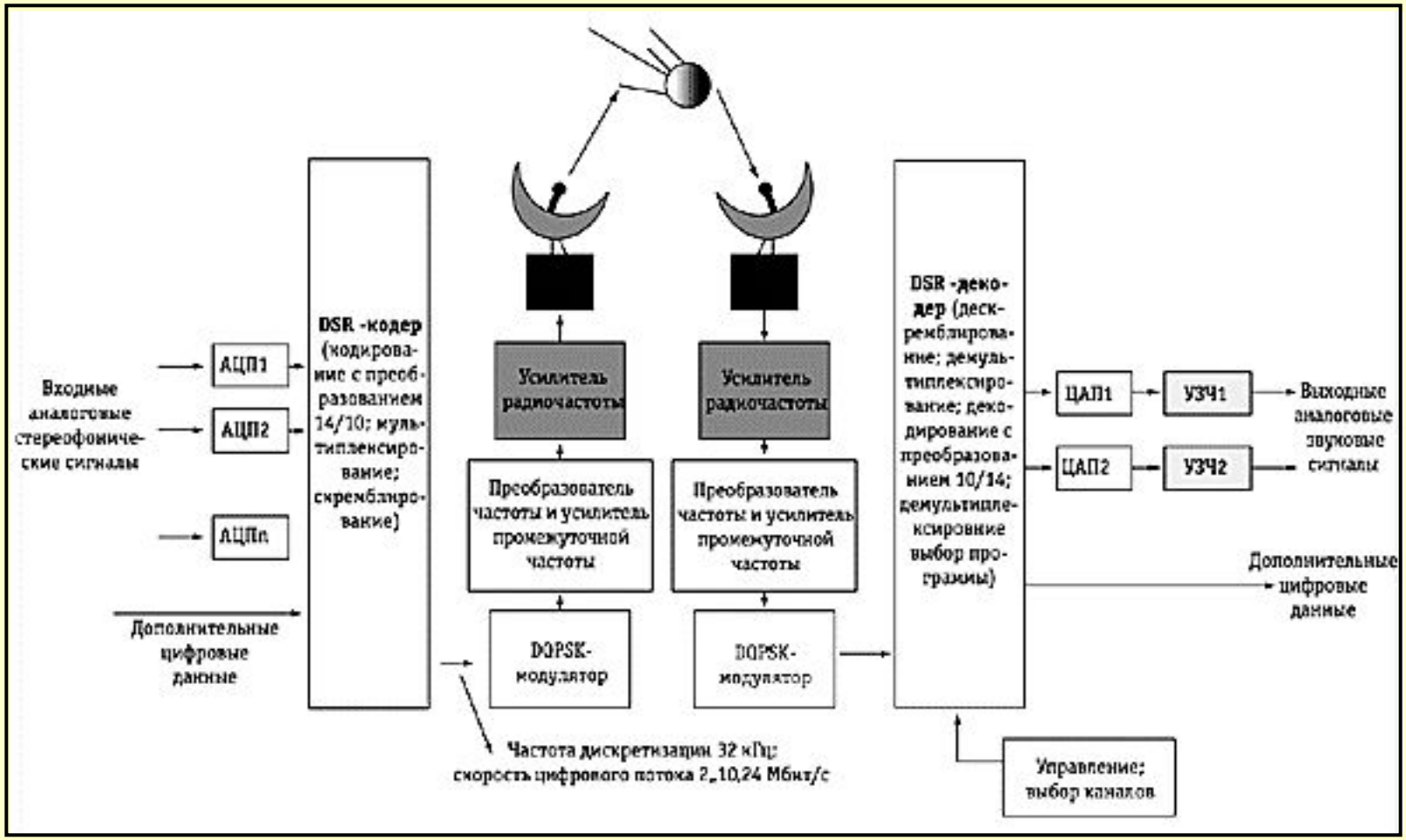
Программы в формате DSR в настоящее время передаются:
- через *спутник* ***TV-SAT 2*** (19 градусов западной долготы, частота 11,977 ГГц, левая поляризация);
- через *спутник* ***DFS-3 Kopernikus*** (23,5 градуса восточной долготы, частота 12,625 ГГц, горизонтальная поляризация);
- в немецкой кабельной сети (каналы S2 и S3, частоты 111...125 МГц);
- в швейцарской системе направленной радиосвязи GAZ (Gemeinschafts Antennen Zubringernetz).

В системе DSR в цифровом потоке с общей скоростью 20,48 Мбит/с передаются 16 стереофонических программ радиовещания. Суммарная ширина полосы частот радиоканала здесь составляет 14 МГц. Так как спутниковые каналы имеют обычно полосу частот 27 или даже 36 МГц, то передача радиосигнала системы DSR не имеет проблем в части, касающейся требуемой полосы пропускания. При выборе меньшей полосы частот ориентировались, прежде всего, на пропускную способность кабельных сетей.

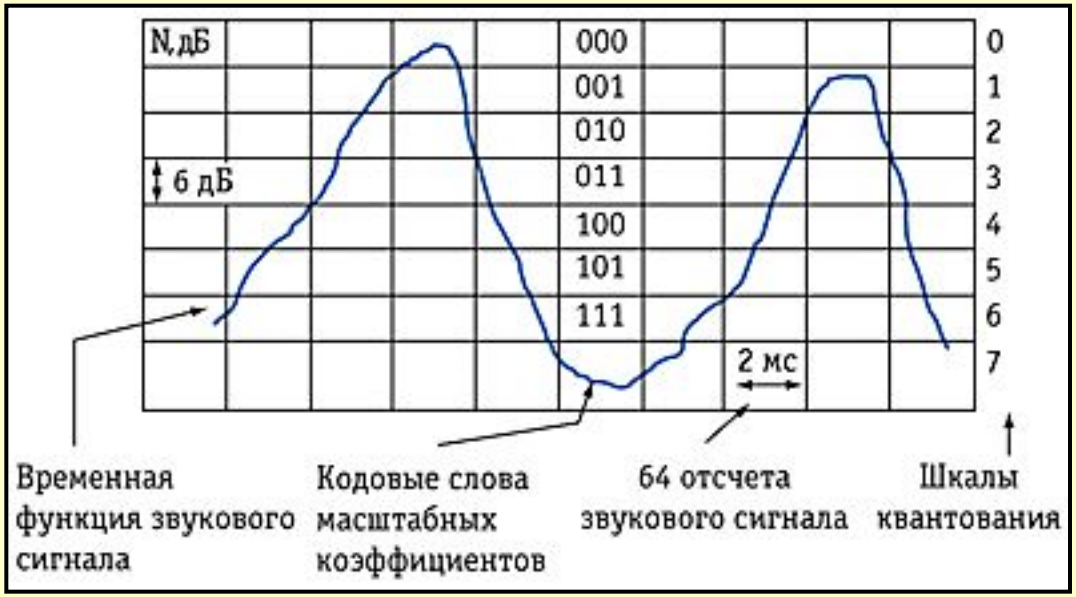
Структурная схема РВ в стандарте DSR



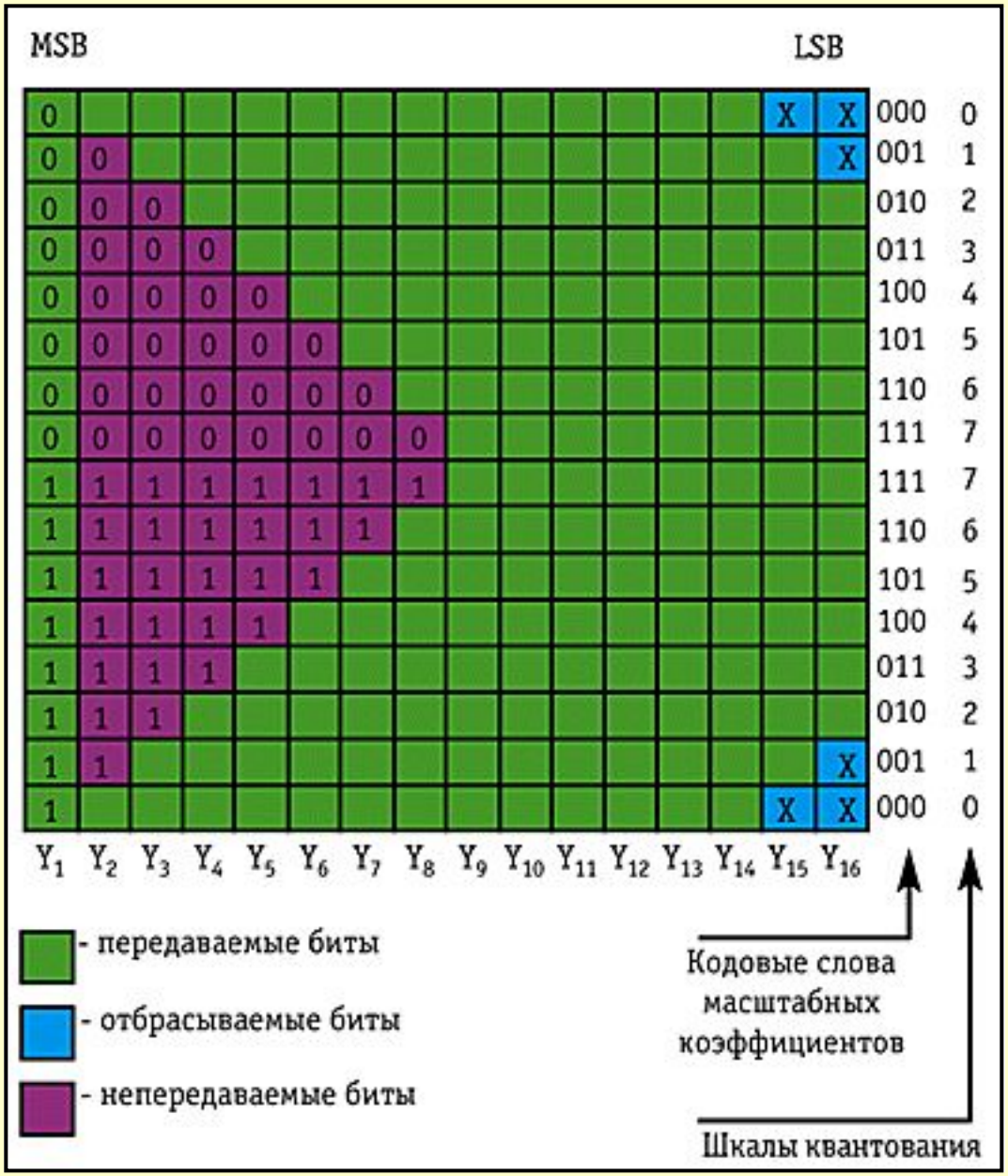
Структурная схема РВ в стандарте DSR



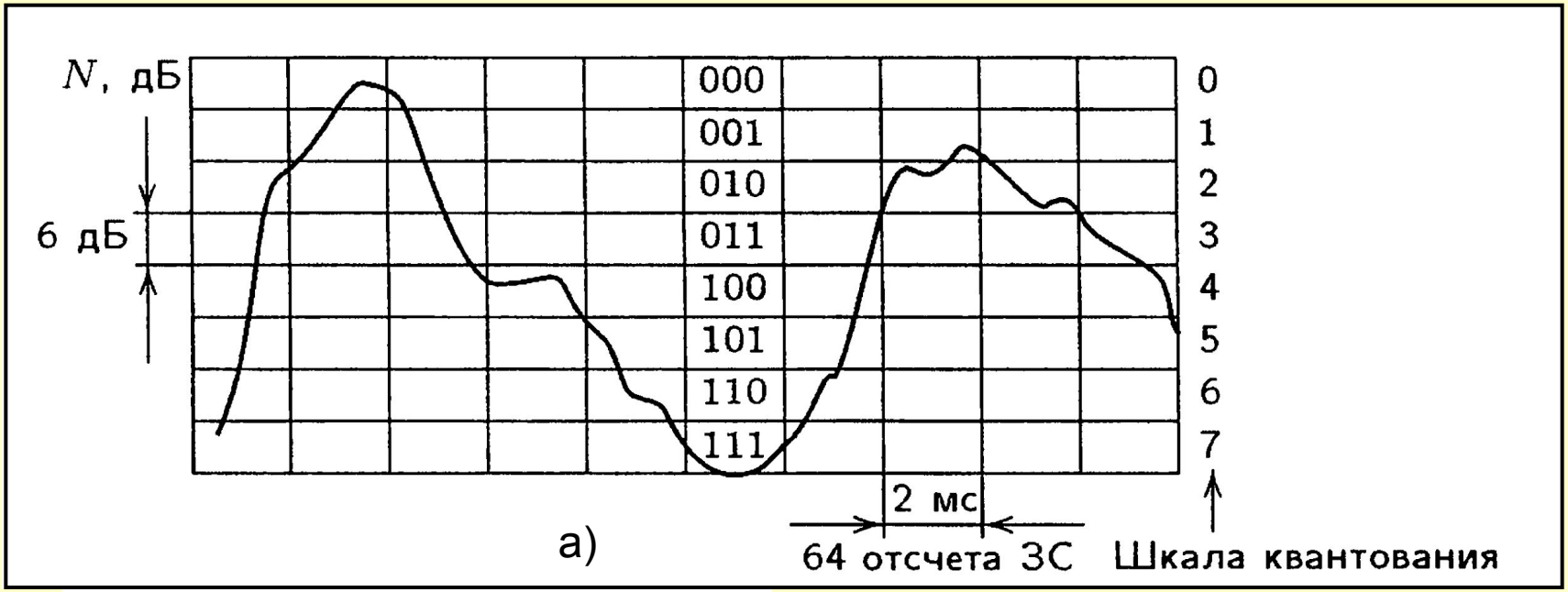
Кодирование в DSR



Процедура преобразования 16/14



Преобразование 16/14 (подробный вариант)



а)

Преобразование 16/14 (подробный вариант)

Шкала квантования

Коэффициент масштаба

		MSB															LSB					
0	000	0															×	×				
1	001	0	0															×				
2	010	0	0	0																		
3	011	0	0	0	0																	
4	100	0	0	0	0	0																
5	101	0	0	0	0	0	0															
6	110	0	0	0	0	0	0	0														
7	111	0	0	0	0	0	0	0	0													
7	111	1	1	1	1	1	1	1	1													
6	110	1	1	1	1	1	1	1														
5	101	1	1	1	1	1	1															
4	100	1	1	1	1	1																
3	011	1	1	1	1																	
2	010	1	1	1																		
1	001	1	1															×				
0	000	1															×	×				
		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	Y_{16}	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5

б)

Преобразование 16/14 (подробный вариант)

Y_1	Y_2												Y_{14}
Y_1	Y_3												Y_{15}
Y_1	Y_4												Y_{16}
Y_1	Y_5											Y_{16}	Z_1
Y_1	Y_6										Y_{16}	Z_1	Z_2
Y_1	Y_7									Y_{16}	Z_1		Z_3
Y_1	Y_8								Y_{16}	Z_1			Z_4
Y_1	Y_9							Y_{16}	Z_1				Z_5
Y_1	Y_9							Y_{16}	Z_1				Z_5
Y_1	Y_8								Y_{16}	Z_1			Z_4
Y_1	Y_7									Y_{16}	Z_1		Z_3
Y_1	Y_6										Y_{16}	Z_1	Z_2
Y_1	Y_5											Y_{16}	Z_1
Y_1	Y_4												Y_{16}
Y_1	Y_3												Y_{15}
Y_1	Y_2												Y_{14}

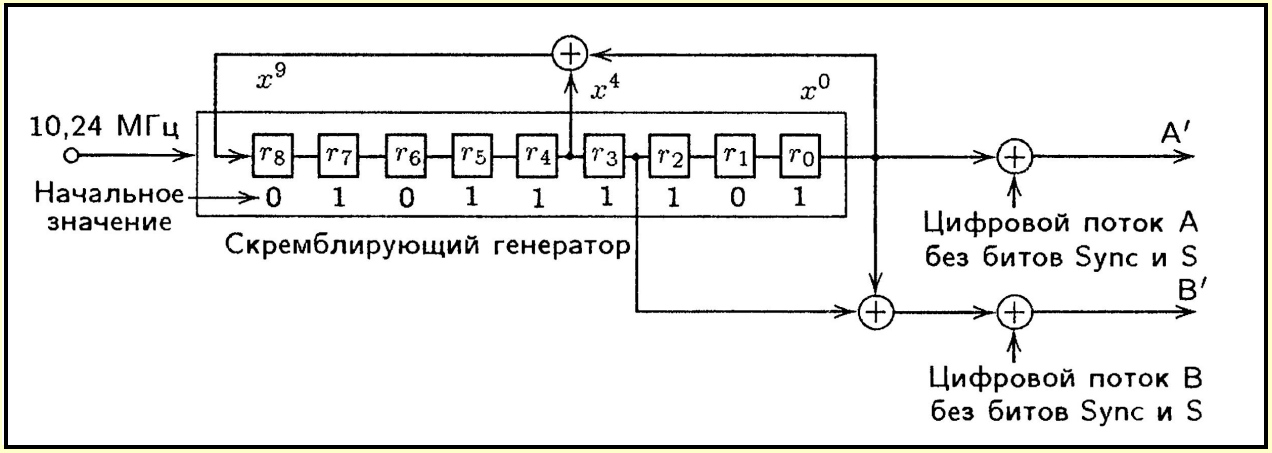
в)

□ — биты кодового слова, подлежащие передаче

⊠ — непередаваемые биты

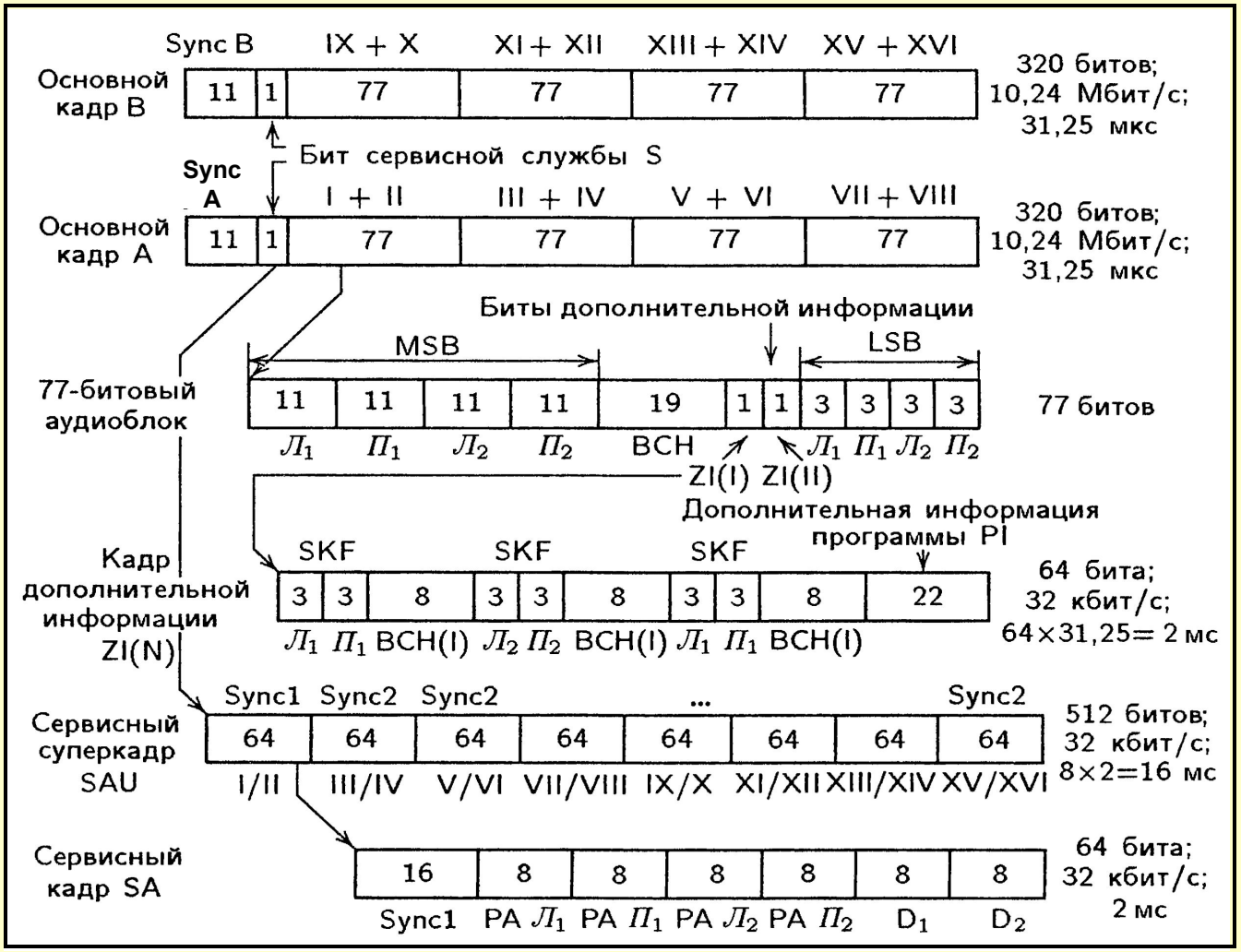
Структура цифрового потока DSR

Генератор ПСП



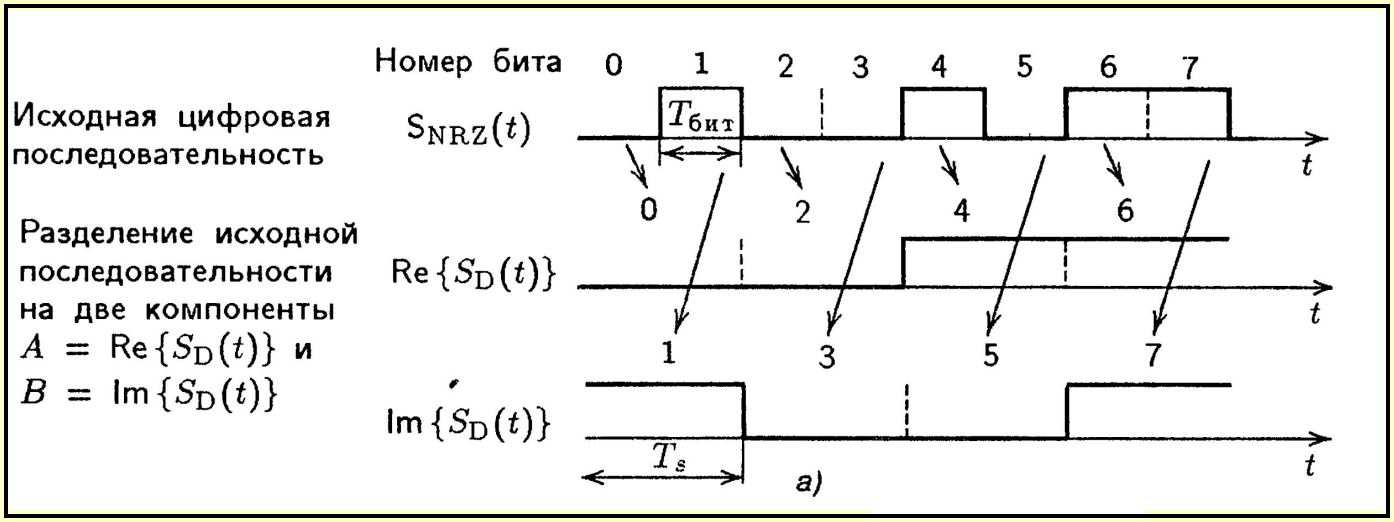
$$P(x) = x^9+x^4+1$$

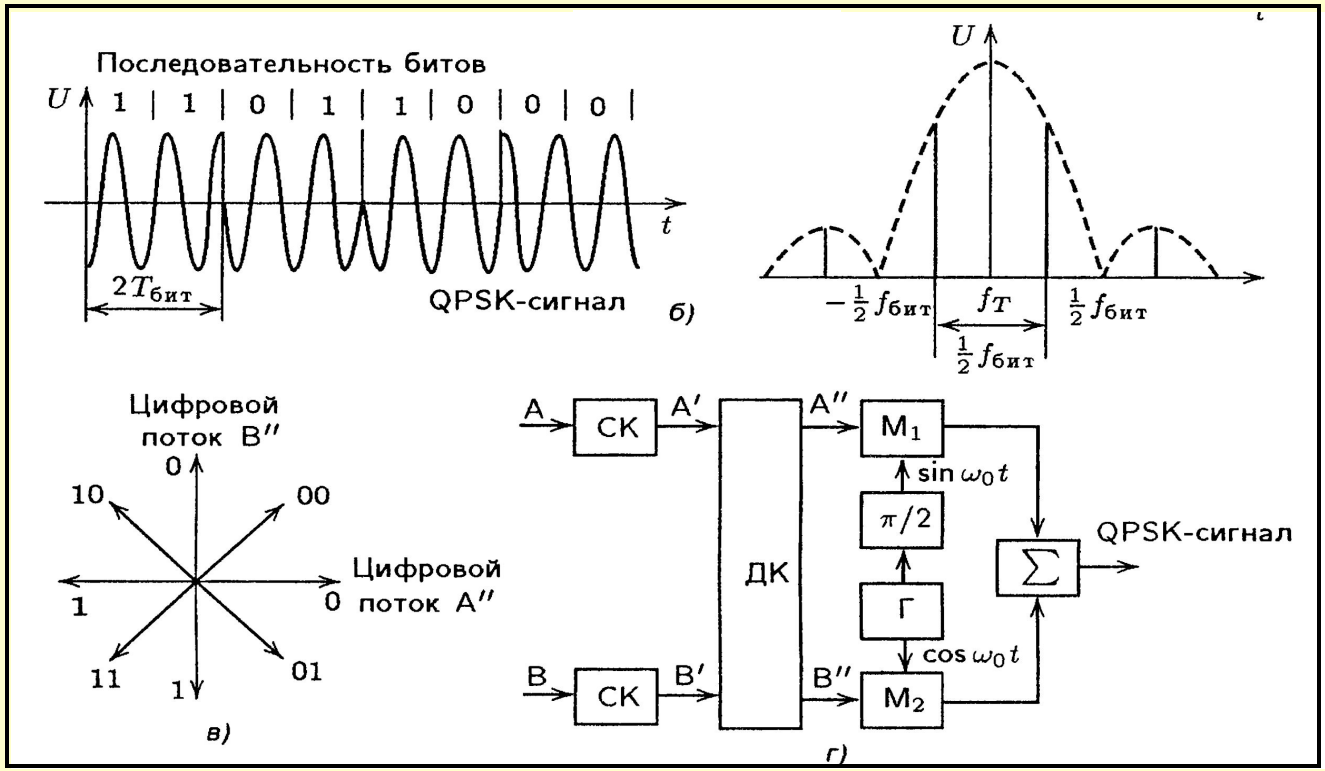
Структура цифрового потока DSR



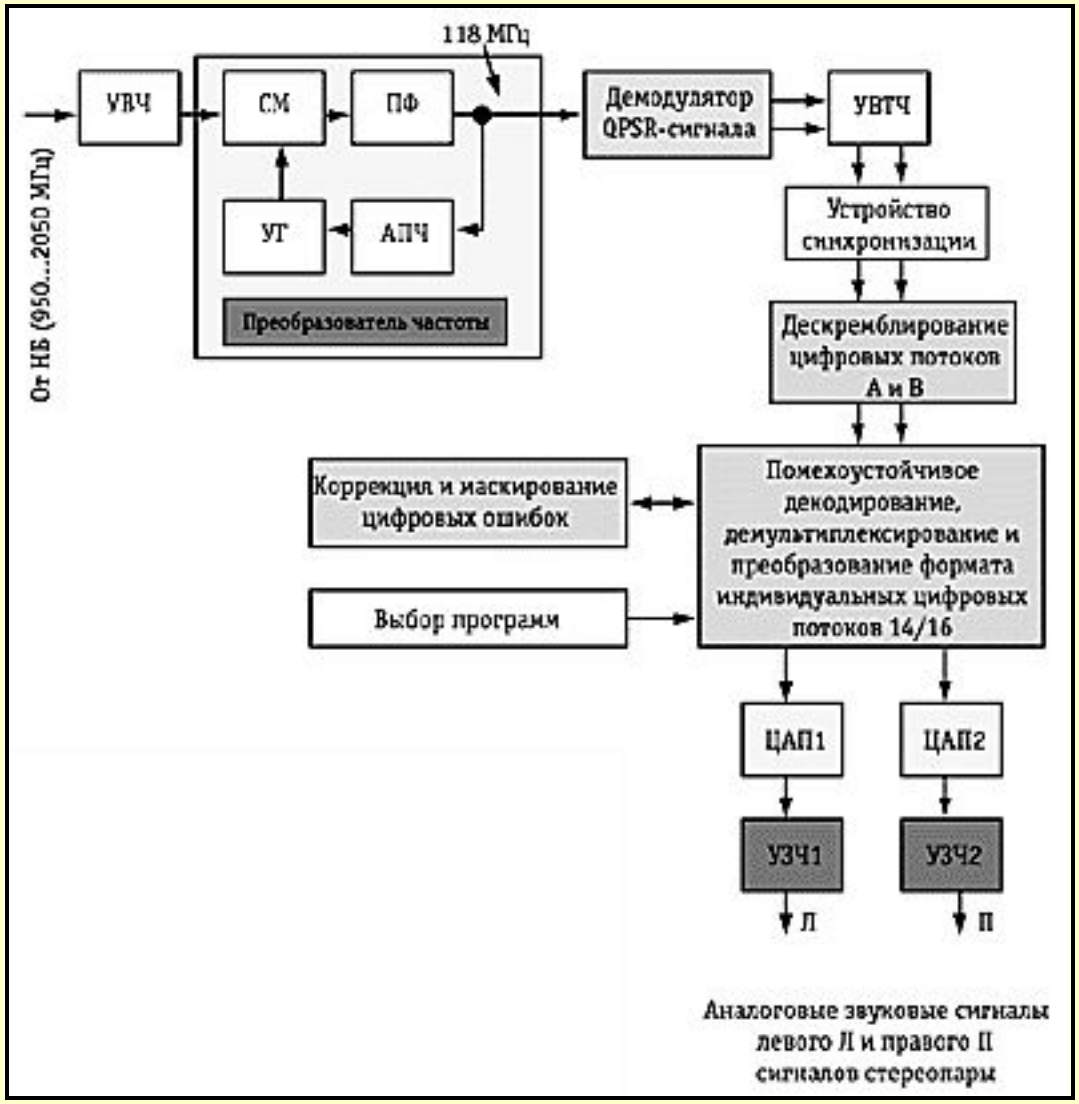
Sync A = 11100010010

Sync B = 00011101101

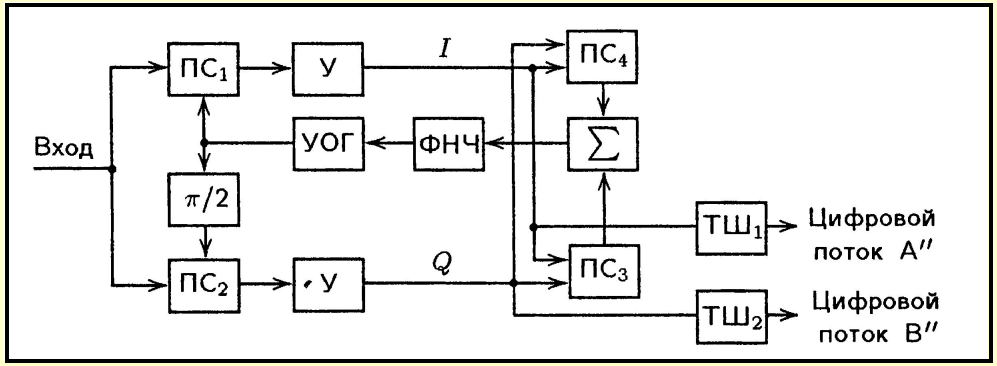

Номер бита
0 1 2 3 4 5 6 7
Исходная цифровая последовательность
$S_{NRZ}(t)$
$T_{бит}$
t
0 2 4 6
Разделение исходной последовательности на две компоненты $A = \mathrm{Re}\{S_D(t)\}$ и $B = \mathrm{Im}\{S_D(t)\}$
$\mathrm{Re}\{S_D(t)\}$
1 3 5 7
$\mathrm{Im}\{S_D(t)\}$
T_s
а)


Последовательность битов
U
1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
t
$2T_{бит}$
QPSK-сигнал
б)
U
$-\frac{1}{2}f_{бит}$
f_T
$\frac{1}{2}f_{бит}$
$\frac{1}{2}f_{бит}$
Цифровой поток B″
0
10
00
Цифровой поток A″
1
0
11
01
1
в)
A
СК
A′
A″
M_1
$\sin\omega_0 t$
$\pi/2$
ДК
Г
$\cos\omega_0 t$
$\sum$
QPSK-сигнал
B
СК
B′
B″
M_2
г)

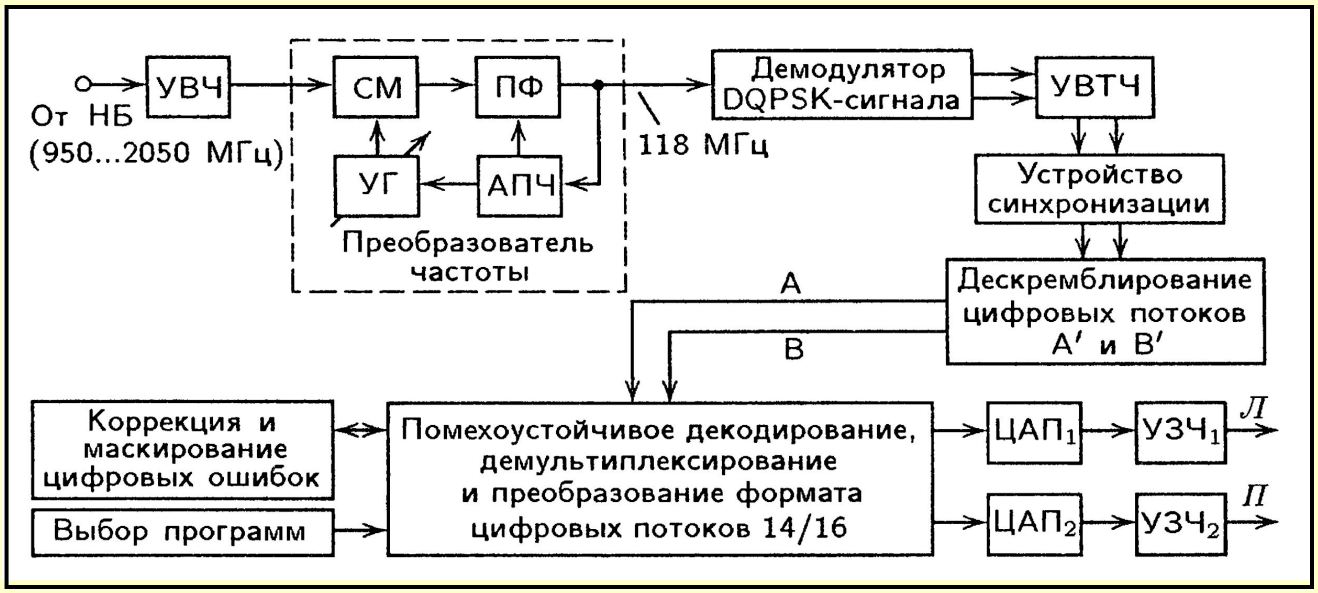
Структурная схема тюнера стандарта DSR



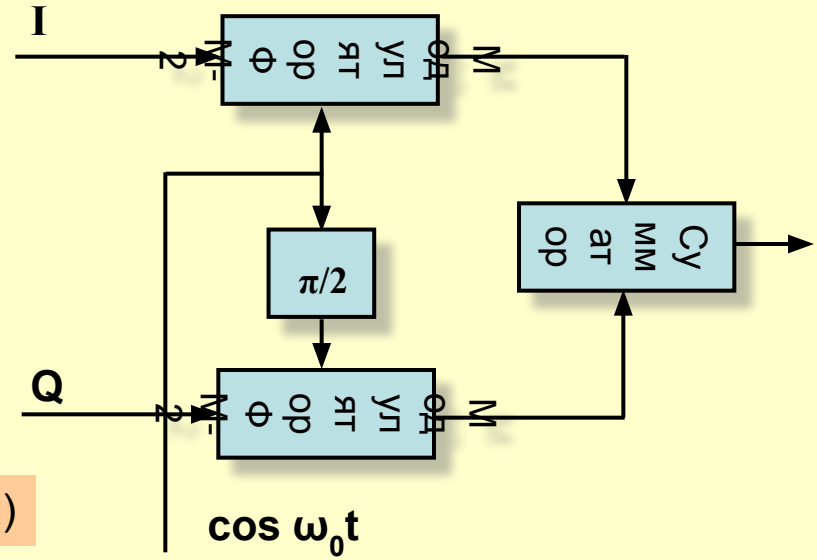
Демодуляция сигнала QPSK с устройством восстановления несущей частоты по методу Костаса



Структурная схема тюнера DSR



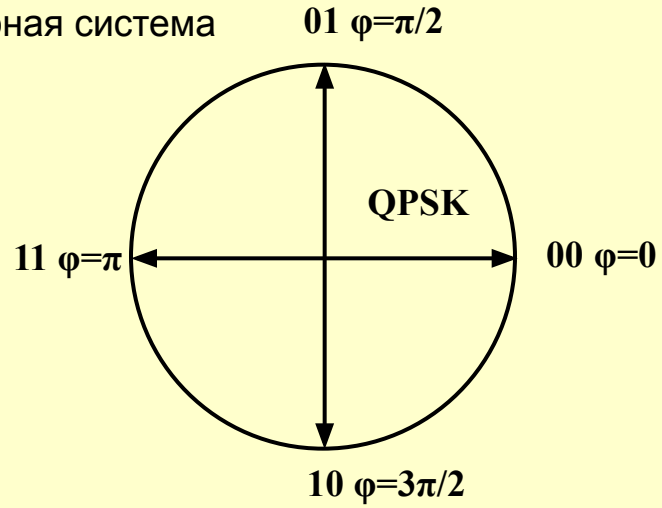
Формирование сигналов ФМ-4 (QPSK)



а)

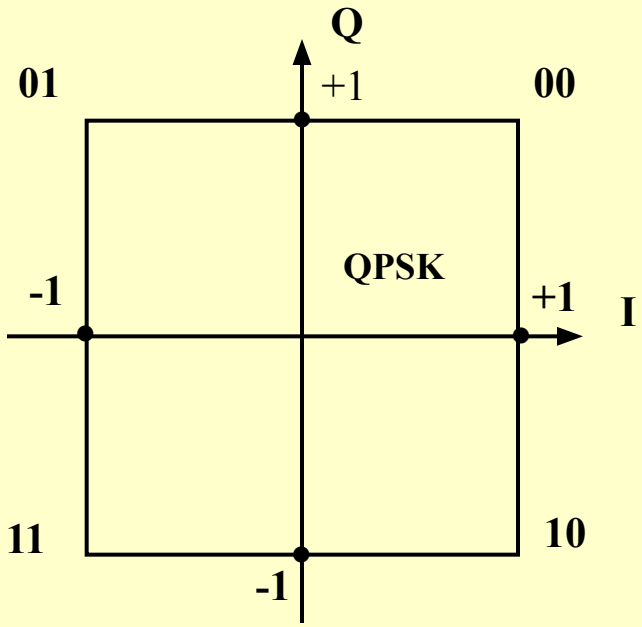
Входной дибит	di	dq	Фаза сигнала
00	+1	+1	0°
01	+1	-1	90°
11	-1	-1	180°
10	-1	+1	270°

Полярная система

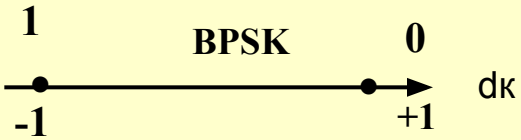


б)

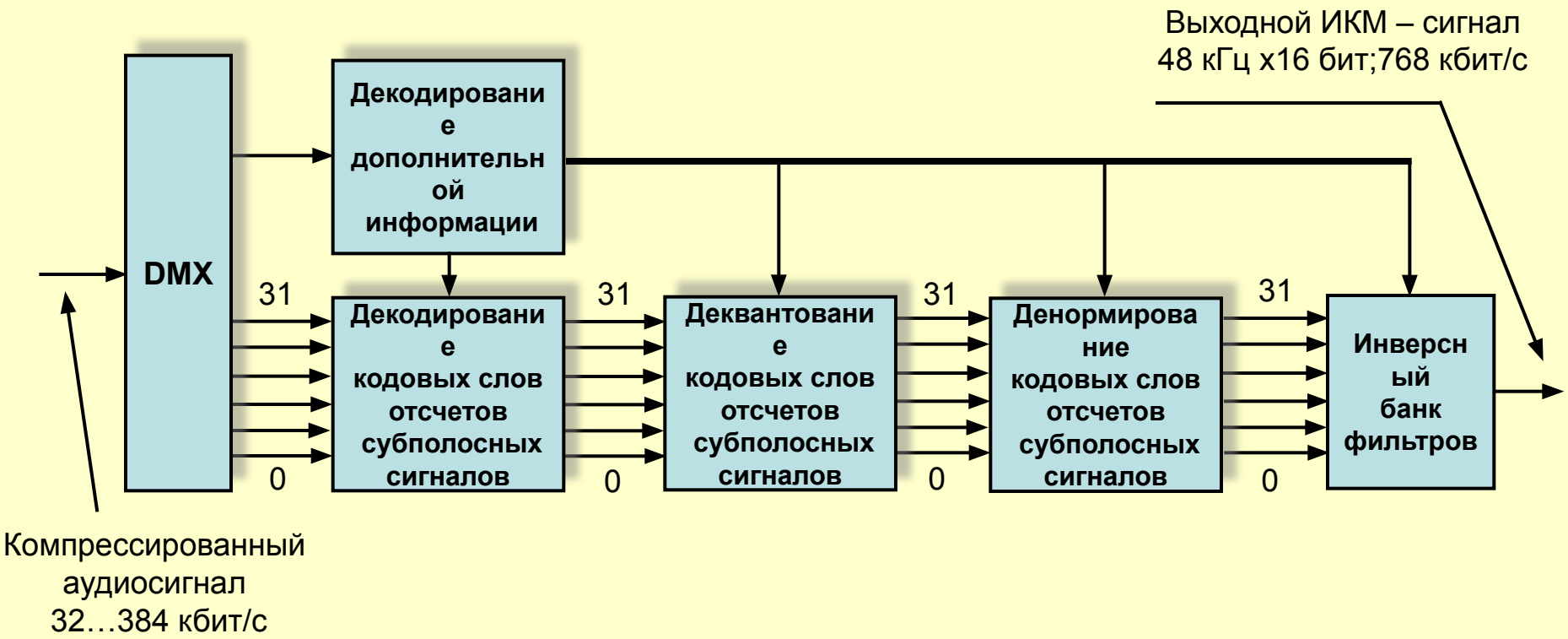
Декартова система



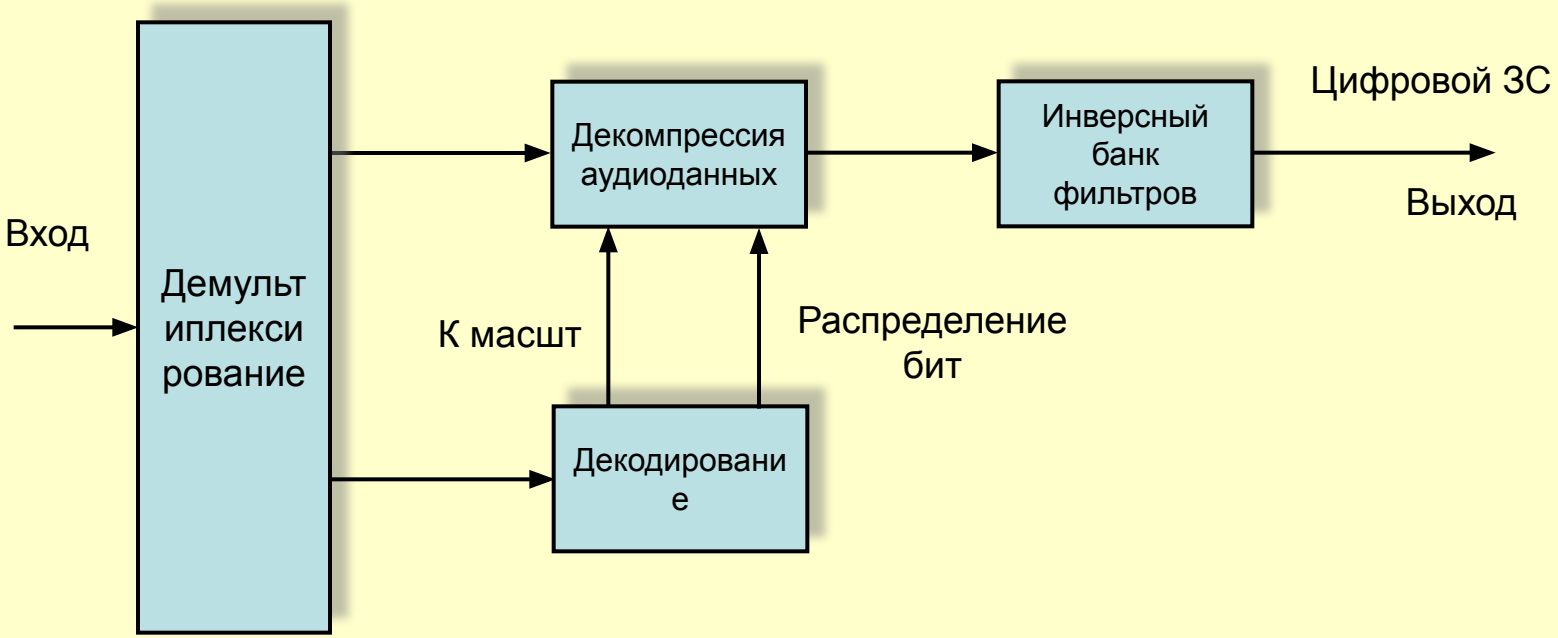
в)



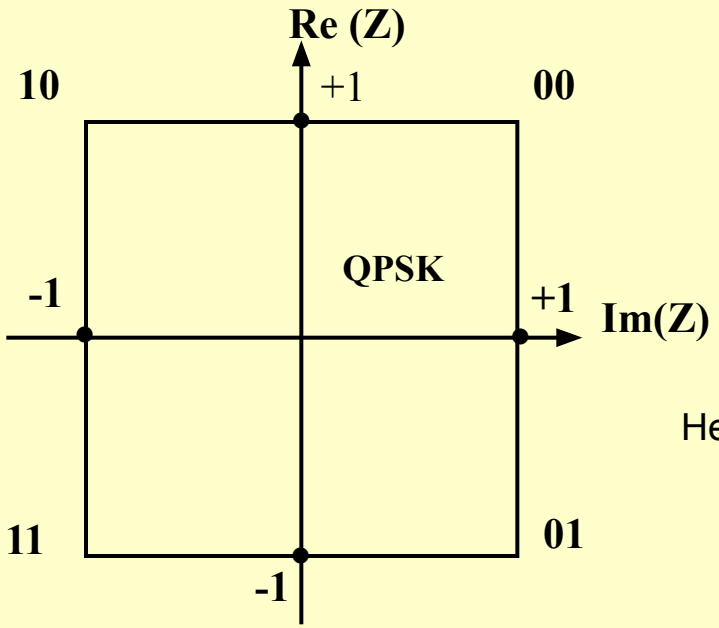
MPEG - декодер



Структурная схема декодера MUSICAM

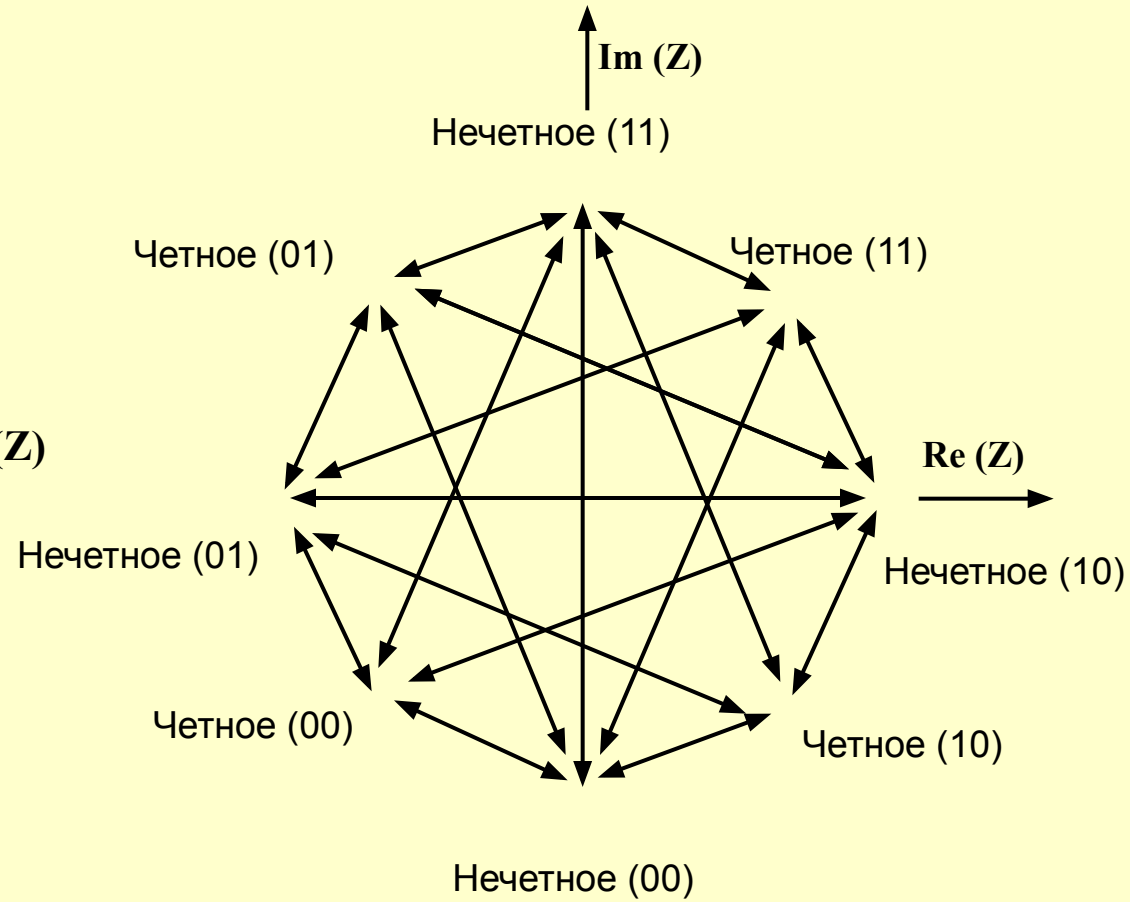


Векторная диаграмма ОФМ-4 (DQPSK)



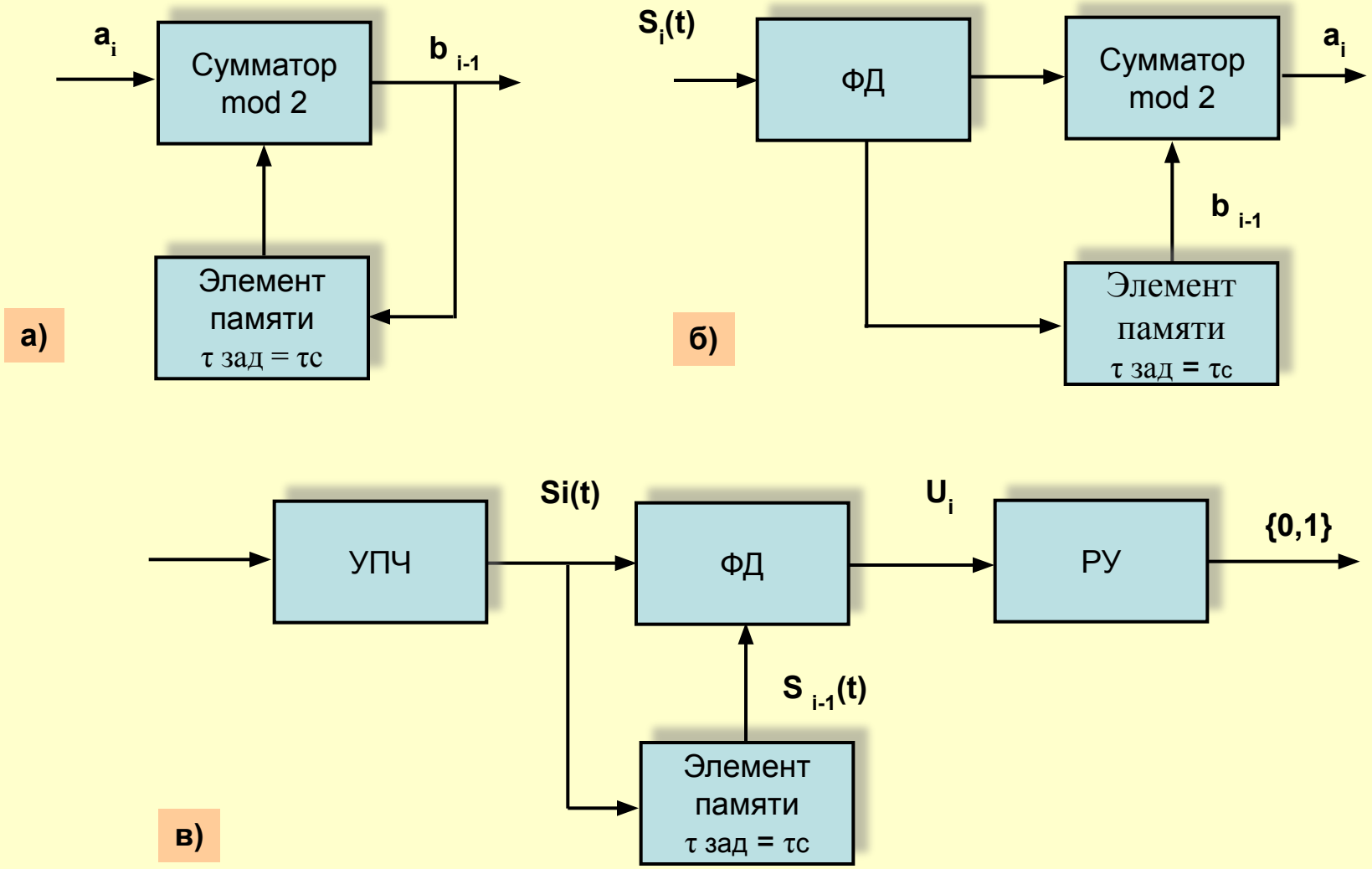
а)

Векторная диаграмма состояний π/4 - shift DQPSK



б)

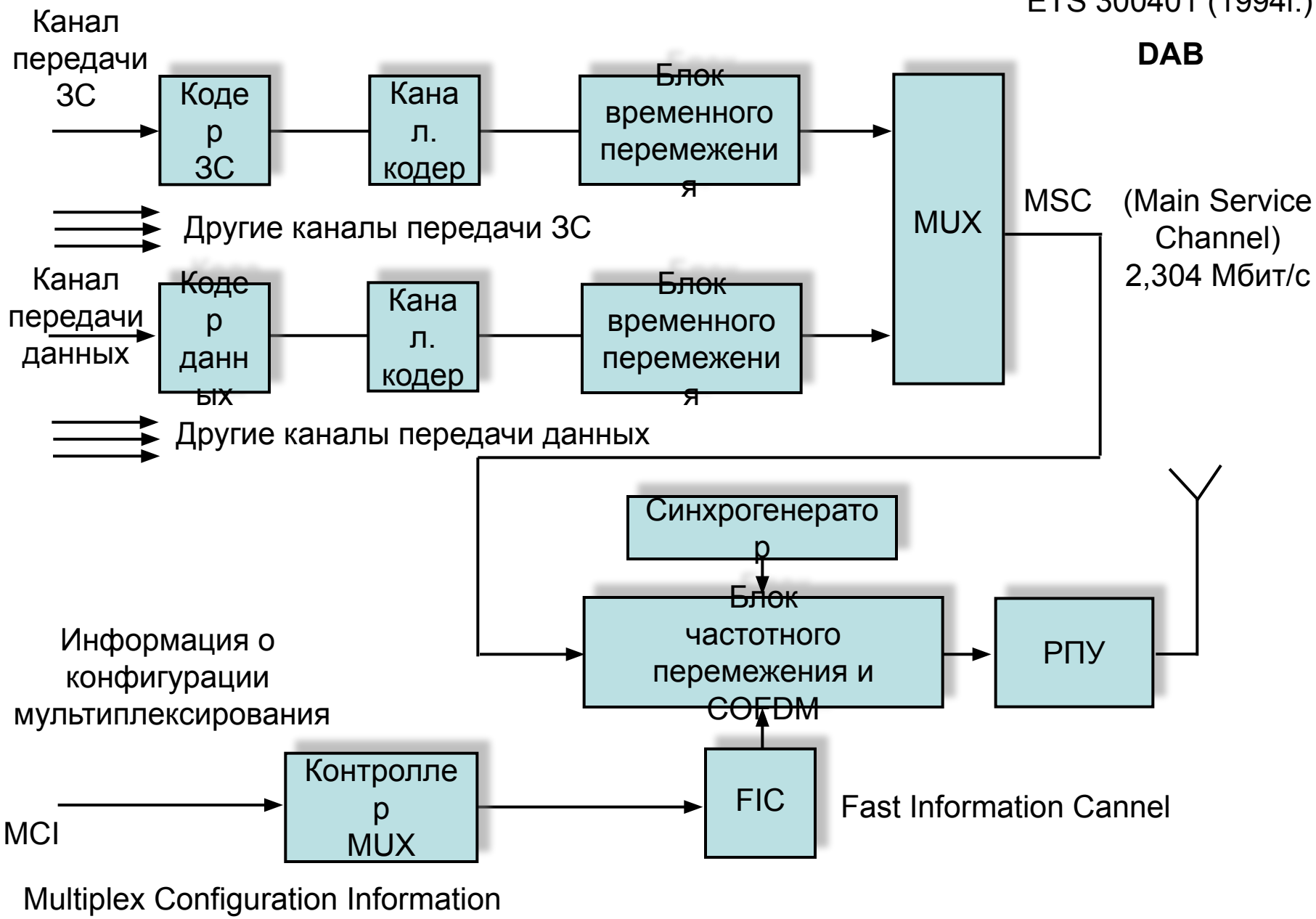
Принцип относительного кодирования (декодирования) при ФМ



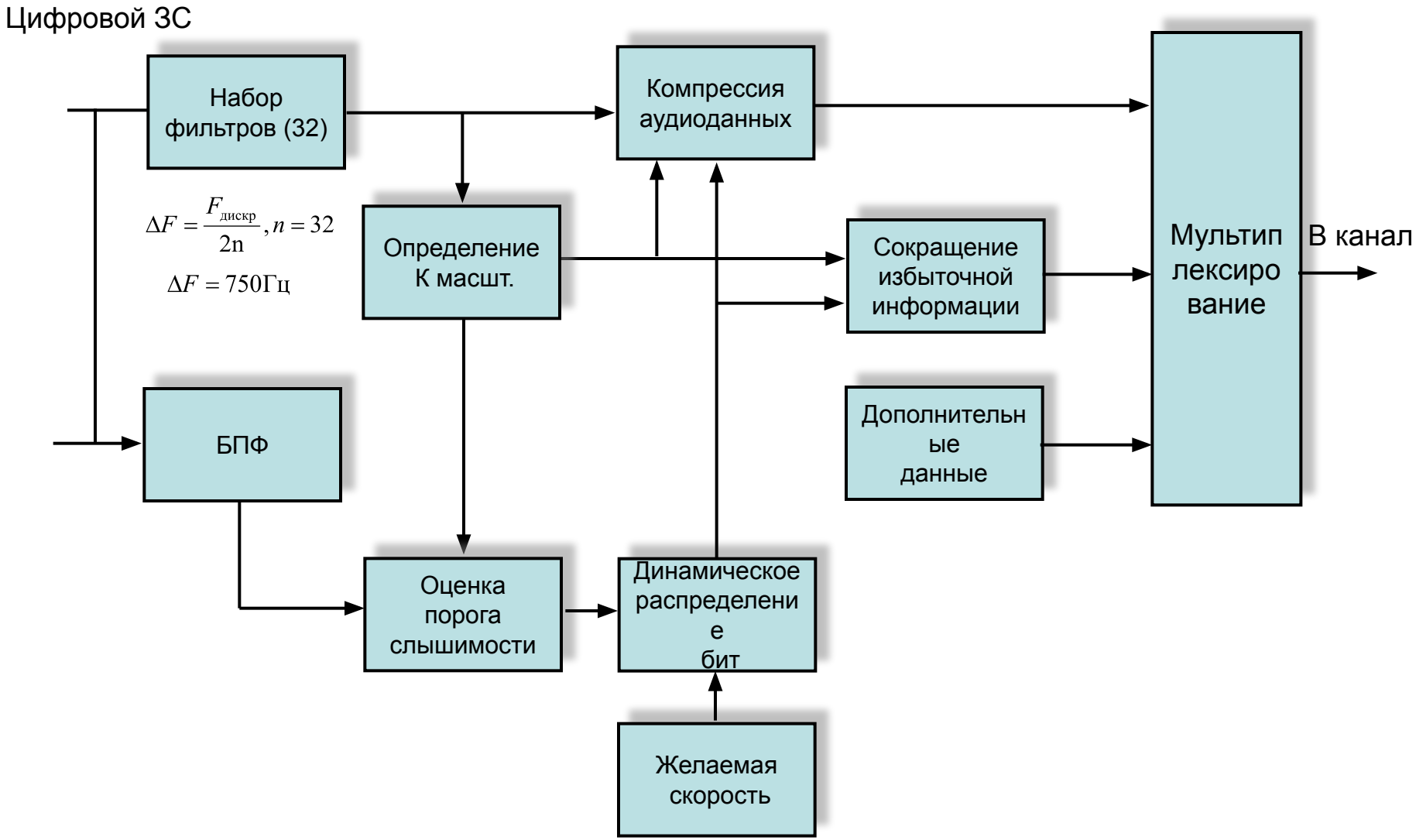
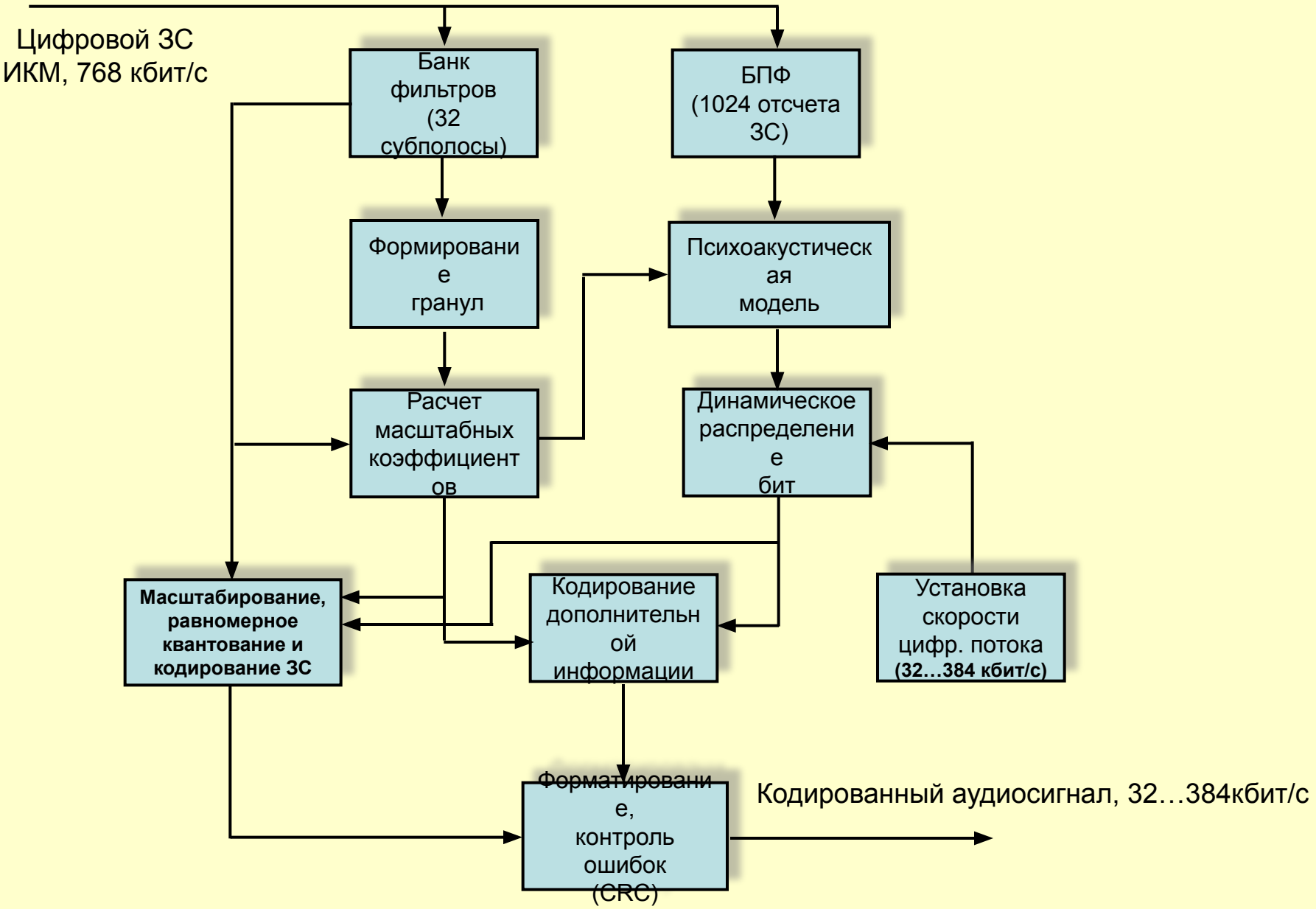
Структурная схема тракта передачи системы “Эврика – 147” (Eureka – 147)

ETS 300401 (1994г.)

DAB



Структурная схема монофонического кодера MUSICAM



Функционирование кодера MUSICAM