

## Лекция 8

### Системы цифрового радиовещания

Эволюция систем радиовещания уже в 70-х годах XX столетия, когда такие системы были практически полностью аналоговыми, естественным образом привела к необходимости создания цифровых систем, которые, очевидно, должны обладать очень существенными преимуществами перед аналоговыми. Большинство методов цифровой обработки и передачи звуковых вещательных сигналов, послуживших основой для разработки современных систем цифрового радиовещания (ЦРВ), известны достаточно давно и широко применяются в существующих системах обработки и передачи звуковых программ. Наиболее полно эти методы используются в системах цифровой звукозаписи, цифровых системах передачи сигналов звукового вещания по радиорелейным и спутниковым линиям связи.

Одним из важнейших требований к системам радиовещания вообще и новым цифровым системам ЦРВ в частности, является высокая частотная (спектральная) эффективность, то есть экономное использование полосы частот. Например, в системе ЦРВ Eureka 147 для передачи шести стереофонических программ требуется полоса частот около 1,5 МГц, а в системе ЧМ вещания для передачи всего трех программ гораздо более низкого качества – 8 МГц.

Другим преимуществом цифровых систем радиовещания является возможность существенного повышения качества звукового сигнала. Например, полоса частот звукового сигнала в системах аналогового вещания на длинных, средних и коротких волнах не превышает 4,5-5 кГц, и только на УКВ приближается к 15 кГц при двухканальном стереовещании. Во всех цифровых системах радиовещания полоса частот превышает 15 кГц, в том числе – при шестиканальном стереовещании в формате 5.1. Отношение сигнал/несущая в аналоговом вещании на ДВ, СВ и КВ - не более 20 дБ, на УКВ – не более 50 дБ. В цифровом вещании этот параметр не хуже 70 дБ.

Еще одним преимуществом ЦРВ, недостижимым для аналоговых систем, является возможность передачи вместе со звуковым сигналом большого объема дополнительной информации – как служебного характера, так и предназначенной для пользователя – справочную, рекламную, коммерческую и т.д. Такая информация может быть выведена на жидкокристаллический дисплей приемного устройства или на внешнее устройство типа персонального компьютера или мобильного телефона. Текстовая информация может содержать данные о наименовании прослушиваемой радиостанции (например, «Маяк» или «Европа плюс») характере музыкальных программ, комментарии к исполняемым музыкальным произведениям, сводки погоды, оценку состояния дорог в городе, сообщения о возможных критических ситуациях, а также отражать данные о платных радиоуслугах (о возможности прослушивать определенные передачи после соответствующей оплаты).

Кроме того, использование в повседневной бытовой сфере радиоэлектронной аппаратуры с цифровым приемным трактом позволило реализовать ряд принципиально новых сервисных возможностей, таких, например, как определение точного географического положения с помощью сигналов «Системы геостационарных спутников» (система глобального позиционирования GPS), прием сигналов интегральной многофункциональной службы ЦРВ, предусматривающей прием и передачу информации из компьютерных баз данных и факсимильных сообщений. Таким образом, система ЦРВ способна предоставить пользователю нечто большее, чем просто высококачественное звучание на радиоволнах – это интеллектуальное коммуникационное устройство, которое способно предложить больше услуг и удобств, чем обычная аналоговая технология.

## Система Eureka 147/DAB

Из всех ныне существующих систем цифрового радиовещания наиболее прогрессивной является система DAB (Digital Audio Broadcasting), разработанная в 1994 году в рамках международного проекта «Eureka 147» и предназначенная для замены существующих сетей с амплитудной и частотной модуляцией. Это устойчивая система передачи звука и данных, обладающая высокой эффективностью использования спектра и мощности передатчика. Предназначена для предоставления пользователям высококачественных цифровых звуковых программ и данных, которые могут передаваться наземными и спутниковыми передатчиками в диапазоне частот 30 МГц–3 ГГц и приниматься автомобильными, переносными и стационарными приемниками цифровых сигналов с использованием простой ненаправленной антенны. Она разработана для наземной (T-DAB – диапазона частот 174...252 МГц), спутниковой (S-DAB – диапазон частот 1452...1492 МГц) передачи, а также передачи по кабельным сетям (DAB-C). Система разработана с учетом применения маломощных ретрансляторов, работающих на единой частоте передачи и приема (gap filter) и обеспечивающих уверенный прием цифрового сигнала в «мертвых зонах» городов с разноэтажной застройкой. Система DAB удовлетворяет необходимым требованиям совместной работы с другими службами радиосвязи.

Внедрение системы DAB началось в 1995 году в Англии. Сейчас вещание по системе T-DAB (наземный вариант) осуществляется в 15 европейских странах, а также в Индии, Китае, Сингапуре, Тайване, Австралии, Канаде и пр.

### Организация цифровых потоков в системе DAB

Упрощенная структурная схема передающей части системы DAB показана на рис.1.

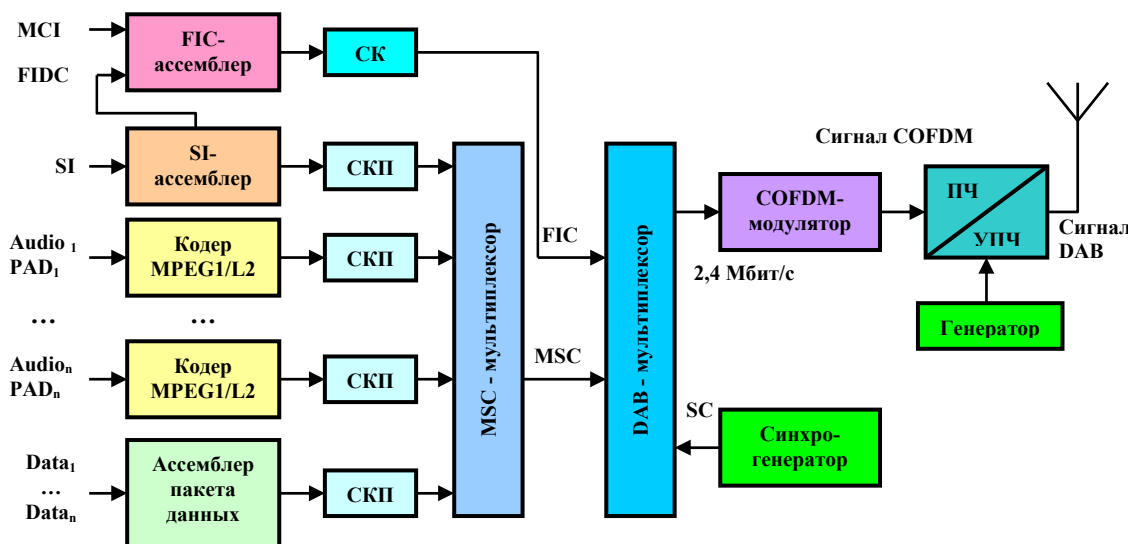


Рис.1. Упрощенная структурная схема передающей части системы DAB:

СК – скремблирование и помехоустойчивое кодирование; СКП – скремблирование, помехоустойчивое кодирование и временное перемежение

В системе DAB формируются три основных канала передачи данных.

**1. Канал пользователя MSC (Main Service Channel).** Входными сигналами системы DAB в канале пользователя являются:

- сигналы звуковых программ  $Audio_1, Audio_2, \dots, Audio_n$  вместе с сопутствующей им информацией  $PAD_1, PAD_2, \dots, PAD_n$  (PAD – Program Associated Data – данные связанные с программой). Это разнообразная сервисная информация, которая передается вместе со звуком, но не воспринимается на слух, например, текст, выводимый на дисплей

приемника и относящийся к звучащей программе, или данные, предназначенные для управления динамическим диапазоном и осуществления индикации типа «музыка/речь» и т.п.);

- **цифровые сигналы данных**  $Data_1, Data_2, \dots, Data_n$ , включающие в себя разнообразные дополнительные данные, такие как сведения о дорожной информации, спорт, новости а также данные условного доступа. Функция управления правом на доступ заключается в распределении этих прав по конкретным радиоприемникам. Существует несколько видов получения права на доступ, соответствующих различным способам «подписки» на канал: предварительно внесенная плата за программу или плата за выбранную в данный момент программу, плата за канал или время. Реализация этой функции предполагает использование секретных ключей и криптографических алгоритмов.

Субканалы канала MSC подвергаются сверточному кодированию, скремблированию и временному перемежению.

**2. Канал быстрой информации FIC** (Fast Information Channel), который используется для быстрого доступа к информации в приемнике. Входными сигналами канала быстрой информации являются:

- **информация о мультиплексировании MCI** (Multiplex Configuration Information), т.е. информация об организации субканалов и канальных компонент. Это многократно повторяющаяся информация о сигналах ЦРВ, компонентах каналов, субканалах и связи между ними;

- **сервисная информация о каналах пользователя SI** (Service Information), включающая в себя наименование канала, язык вещания, дата и время, номер и тип программы (новости, музыка, спорт), комментарии к радиопрограмме, идентификаторы передатчика, зоны вещания, региона и страны, информацию о частотах, о других сигналах ЦРВ и т.п.;

- **данные быстрого доступа FIDC** (Fast Information Data Channel) – специально выделенная часть канала, используемая для передачи не связанных со звуком каналов данных: пейджинг, дорожная информация и сигналы экстренного оповещения, например, сигналы гражданской обороны.

Для обеспечения быстрого доступа к данным канала FIC, временное перемежение здесь не используется. Данные канала FIC защищены сверточным кодом, а для большей надежности многократно повторяются.

**3. Канал синхронизации SC** (Synchronization Channel) формируется внутри передающей части системы и используется для кадровой синхронизации, автоматического управления частотой тактового генератора в приемной части и обеспечения процессов демодуляции и декодирования.

Цифровые потоки звуковых сигналов ( $Audio_1, \dots, Audio_n$ ), данных, связанных с программами ( $PAD_1, \dots, PAD_n$ ), цифровых данных ( $Data_1, \dots, Data_n$ ), сервисной информации SI после помехоустойчивого кодирования и временного перемежения поступают на **MSC-мультиплексор**, где из них формируется поток данных канала пользователя MSC, скорость которого равна 2,304 Мбит/с. Полученный поток данных далее объединяется с потоком данных канала FIC и символами канала синхронизации SC в **DAВ-мультиплексоре**. Скорость результирующего цифрового потока составляет 2,4 Мбит/с. Далее этот цифровой поток поступает на канальный **COFDM-модулятор** (кодер COFDM – Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex – частотное уплотнение с кодированными ортогональными несущими). После этого сигнал COFDM переносится преобразователем частоты ПЧ в требуемый частотный диапазон, усиливается усилителем радиочастот УРЧ и с помощью антенны излучается в эфир.

Упрощенная структурная схема **приемной части системы DAB** представлена на рис.2. На приемной стороне выполняются обратные преобразования: принятый DAB-сигнал проходит через ВЧ тракт и переносится смесителем на промежуточную частоту.

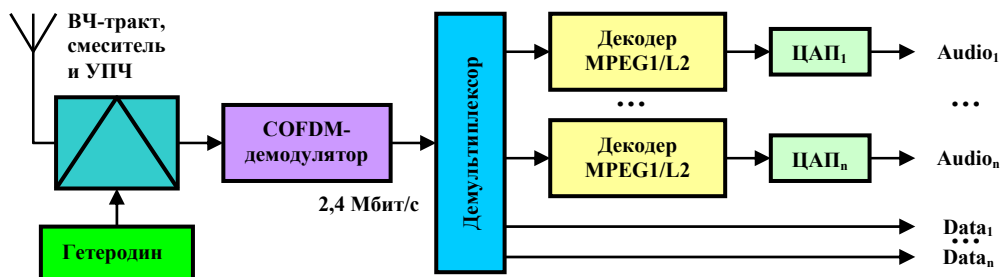


Рис.2. Упрощенная структурная схема приемной части системы DAB

После усиления в УПЧ он демодулируется в COFDM-демодуляторе и демультимплексируется. Затем выполняются процедуры помехоустойчивого декодирования и дегерережежения. Затем компрессированные цифровые потоки, соответствующие звуковым программам, декодируются в MPEG-декодерах. После этого цифровые данные преобразуются в аналоговую форму в ЦАП<sub>1</sub> – ЦАП<sub>n</sub>. Выходными сигналами приемной части системы DAB являются сигналы звуковых программ Audio<sub>1</sub> – Audio<sub>n</sub>, данные PAD и сигналы данных Data<sub>1</sub> – Data<sub>n</sub>.

### Кадр данных системы DAB

Структура кадра данных системы DAB представлен на рис.3.



Рис.3. Структура кадра данных системы DAB

Фактически, он представляет собой кадр данных стандарта MPEG1 Layer 2, дополненный еще тремя группами данных: данными X-PAD, F-PAD и SCF-CRC. Данные **F-PAD** содержат в себе информацию управления в реальном масштабе времени. Эти данные имеют постоянную длину, равную 2 байтам. Данные **X-PAD** имеют переменную длину. С их помощью передается дополнительная информация, относящаяся к звуковой программе, например, поясняющий текст. Кроме того, кадр данных системы DAB содержит группу CRC, предназначенную для защиты коэффициентов масштабирования Scale Factors (**SCF-CRC**).

## Модуляция частот в системе DAB

Способ модуляции с одновременным использованием нескольких несущих частот, который называется OFDM – (Orthogonal Frequency Division Multiplex – мультиплексирование ортогональных несущих), известен почти 40 лет, но особенно актуален стал в связи с развитием цифрового телерадиовещания.

Основная идея его состоит в следующем. Передаваемый цифровой поток модулирующего сигнала «распараллеливается» и передается по нескольким каналам – путем модуляции нескольких несущих. Число этих несущих выбирается так, чтобы сократить до необходимого значения скорость передачи информации на каждой отдельной несущей. В результате на передачу одного символа на каждой отдельной несущей может быть выделено большее время. Настолько большее, чтобы сделать передачу каждого символа независимой от наличия отраженных сигналов, обусловленных так называемым «многолучевым» распространением радиоволн, что характерно для городских условий. Сами несущие при этом выбираются из следующих соображений:

- число несущих должно быть таким, чтобы при неизменной скорости потока данных на входе модулятора OFDM увеличить до требуемой величины время передачи одного символа на каждой несущей;

- несущие должны быть достаточно близки друг к другу, чтобы сократить занимаемую полосу частот канала связи;

- частоты несущих должны быть выбраны так, чтобы они не создавали взаимных помех.

Последнее условие выполняется, если частоты удовлетворяют требованию ортогональности. Физический смысл этого требования состоит в том, что спектр каждой несущей после модуляции должен иметь «нули» на частотах, на которых расположены остальные несущие. Выполнение этого условия обеспечивает отсутствие взаимных помех и независимую передачу информации на каждой несущей.

Один из вариантов способа модуляции OFDM, известный под названием COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex – частотное уплотнение с кодированными ортогональными несущими), предполагает перемешивание передаваемых символов во времени таким образом, что следующие друг за другом символы полезной информации на передающей стороне модулируют те несущие, номера которых предписываются специальной заранее определенной последовательностью. Эта последовательность точно соблюдается на передающей стороне и, в обратном порядке – в приемном устройстве. Такая мера позволяет сделать данный метод передачи информации практически нечувствительным к различного рода замираниям, а также помехам, исключая на короткое время возможность использования какого-либо участка диапазона частот.

Структурная схема модулятора COFDM показана на рис. 4.

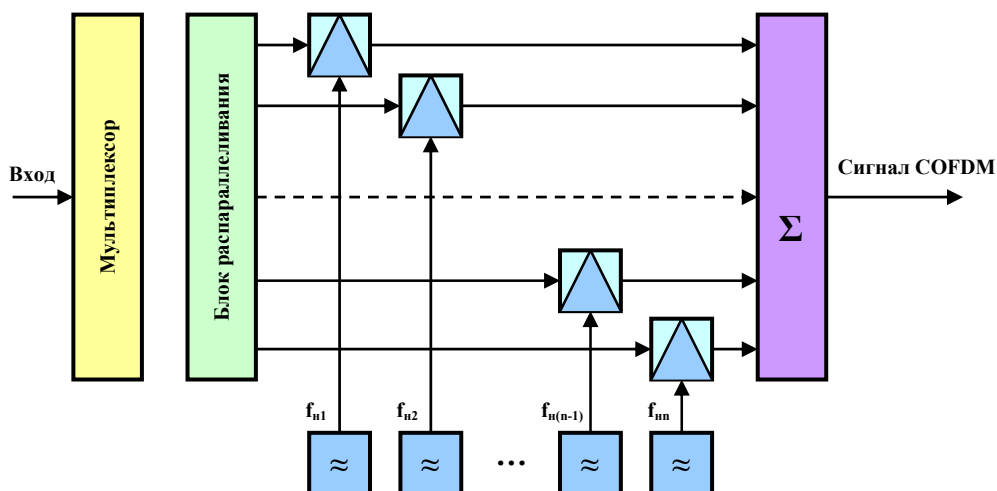


Рис. 4. Структурная схема COFDM-модулятора

Последовательный поток данных, поступающий с мультиплексора, прежде всего, распараллеливается. После этого каждый из полученных субпоток поступает на свой ФМ-модулятор ( $\Phi M_1, \Phi M_2, \dots, \Phi M_n$ ), на вторые входы которых подаются сигналы несущих частот ( $f_{n1}, f_{n2}, \dots, f_{nn}$ ). Переход от последовательной к параллельной передаче двоичных символов цифровой последовательности для  $n$  несущих частот условно изображен на рис.5.

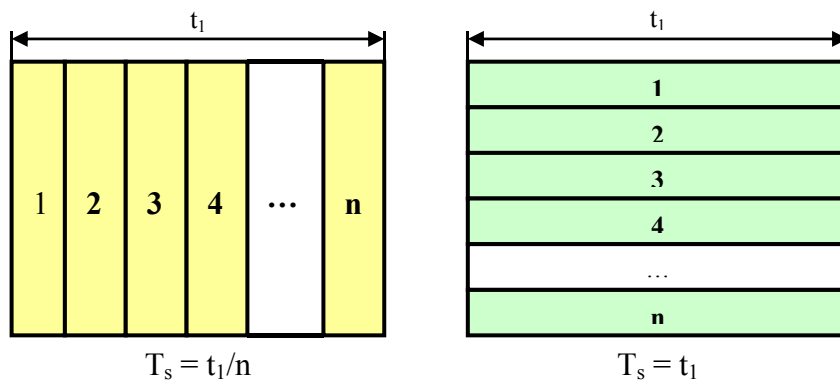


Рис.5. Переход от последовательной к параллельной передаче двоичных символов цифровой последовательности для  $n$  несущих частот;  $T_s$  – время передачи одного двоичного символа;  $t_1$  – время, необходимое для передачи  $n$  двоичных символов.

Очевидно, что при распараллеливании цифрового потока скорость передачи цифровых данных в каждом из субканалов падает в  $n$  раз, а время передачи одного символа, соответственно, возрастает в это же число раз. Здесь  $n$  – количество несущих частот.

Полученная совокупность ФМ-сигналов поступает на сумматор  $\Sigma$ , на выходе которого и образуется COFDM-сигнал.

Следует заметить, что на практике такого множества генераторов несущих частот нет, поскольку это вряд ли возможно было бы реализовать – число таких несущих частот составляет сотни и даже тысячи. Обычно исходный цифровой поток данных

распараллеливается (демультиплексируется побитно) и далее поступает на блок обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ), где и образуется COFDM-сигнал.

### Режимы передачи

Для того чтобы использовать радиовещательную систему T-DAB в различных конфигурациях передающей сети и в широком диапазоне рабочих частот, предусмотрены четыре альтернативных режима передачи. Они позволяют организовать вещание в диапазоне частот от приблизительно 30 МГц до 3 ГГц. Эти режимы были разработаны для устранения различных нежелательных эффектов в условиях мобильного приема при наличии многолучевости и эхо-сигналов от альтернативных в одночастотной сети. В настоящее время приняты решения об использовании для этой системы преимущественно полос частот диапазона ОВЧ – 174...240 МГц и нижней части диапазона УВЧ – 1452...1492 МГц. Полоса в диапазоне УВЧ выделена в 1992 г. Всемирной радиоконференцией исключительно для цифрового радиовещания как наземного (T-DAB), так и спутникового (S-DAB).

В таблице 1 приведены основные параметры системы в зависимости от режима передачи. Как видно из приведенных в таблице данных, использование более высоких частот налагает более жесткие ограничения на длительности защитных интервалов и, следовательно, на максимальную задержку эхо-сигнала, которая определяет допустимый разнос передатчиков одночастотной сети вещания.

Таблица 1. Основные параметры системы DAB

Параметры	Режим передачи			
	I	II	III	IV
Номинальный частотный диапазон, (для мобильного приема), МГц	≤375	≤1500	≤3000	≤750
Количество несущих, используемых в модеме COFDM	1536	384	192	768
Длительность защитного интервала, мкс	~246	~62	~31	~123
Максимальное разнесение передатчиков при работе в одночастотной сети, км	96	24	12	48
Длительность кадра передачи, мс	96	24	12	48

**Режим I** лучше всего подходит для организации наземного вещания и построения одночастотных сетей, поскольку допускает наибольшее разнесение передатчиков и, следовательно, позволяет обойтись меньшим их количеством при заданной площади обслуживания.

**Режим II** наиболее приемлем для сетей местного радиовещания с использованием одного наземного передатчика, а также для построения гибридных наземно-спутниковых систем ЦРВ на частотах до 1,5 ГГц.

**Режим III** более пригоден для организации спутникового и дополняющего его наземного вещания на частотах до 3 ГГц, а также для использования в современных широкополосных сетях кабельного телевидения в диапазоне частот 47...862 МГц.

**Режим IV** оптимизирует параметры DAB-сигнала для использования в одночастотных сетях, организуемых в диапазоне УВЧ. Он обеспечивает большее разнесение передатчиков в одночастотной сети, чем режим II.