

# КВАДРАТУРНО-АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ И ЧАСТОТНОЕ УПЛОТНЕНИЕ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ НЕСУЩИМИ

Доц. Новгородцев А. И., студ. Бородийчук А. В.,  
Сучков А. В.

Создание стандартов для цифрового радиовещания (DRM - Digital Radio Mondiale) требовало обеспечения высокой пропускной способности канала передачи данных при работе в диапазонах ДВ, СВ и КВ, в условиях высокого уровня помех и наводок от отраженного сигнала.

В процессе DRM-вещания передается как информация, содержащая звуковые фрагменты, предварительно сжатые программными алгоритмами (AAC кодек) и файлы, так и сервисная информация с характеристиками передающей станции, частотами вещания и т. п. Для этого требуется пропускная способность канала порядка 24 кбит/с.

Первым шагом к ее увеличению становится использование квадратурно-амплитудной модуляции (QAM - Quadrature Amplitude Modulation) суть которой в том, что у несущей есть несколько фиксированных значений фазовых сдвигов (фазовая модуляция) и столько же значений амплитуды (амплитудная модуляция). Например, QAM-16 (число указывает количество вариантов которыми оперирует данная модуляция) имеет 16 комбинаций состояний несущей, которые образуются использованием 4-х состояний фазы и 4-х – амплитуды. Соответственно передается  $\log_2 16 = 4$  бита информации за один акт модуляции.

QAM-технология почти идеально использует емкость канала связи, и потому звучит очень похоже на обычный шум. Будучи одним из самых эффективных видов модуляции отдельной несущей, кроме DRM она применяется в новейших системах связи, например цифровом телевидении, или RadioEthernet.

Стандарт DRM допускает использование трех QAM – 4-, 16- и 64-позиционной. Более сложные варианты непрактичны, поскольку радиоэфир сильно искажает сигнал, сдвигая фазу и

амплитуду волны, из-за чего приемник не может правильно определить тип модуляции. Кроме того, даже QAM-64 применима по большей части только на СВ и ДВ, а для КВ лучше использовать QAM-16.

Сигналы DRM-станции могут занимать в эфире 6 полос частот – 10 и 9 кГц как основные для трансляций на КВ и СВ/ДВ, а также полосы шириной 4,5, 5, 18 и 20 кГц.

Теоретически в канале шириной 10 кГц, модулируя сигнал с частотой 10 кГц с помощью QAM-16, можно достигнуть скорости передачи до 40 кбит/с. Однако, на КВ несущую не стоит модулировать даже с частотой 1 кГц. Чтобы цифровая трансляция устойчиво принималась на больших расстояниях, ее дискретные сигналы должны быть достаточно долгими – порядка десятков мс каждый. Даже, если каждое изменение будет длиться 10 мс, сигнал сможет модулироваться лишь 100 раз в секунду: при использовании QAM-64 это дает нам скорость 600 бит/с. Очевидно, что с подобным битрейтом цифровой звук передавать нельзя.

Выход из положения кроется в использовании нескольких параллельных несущих. Поскольку DRM-станция имеет в распоряжении широкий канал, вместо одной волны, модулированной с частотой 100Гц, она свободно может излучать в эфир две несущие, расположив их на разных частотах внутри канала шириной 10кГц. В этом случае мы получим удвоенную скорость с прежней помехоустойчивостью – акты модуляции по-прежнему будут долгими, то есть проходящими через большинство эфирных шумов. Увеличивая количество параллельных потоков в канале, DRM-станция может наращивать скорость. Но при этом возникает межчастотная интерференция.

Для разрешения этой проблемы в DRM используется технология частотного уплотнения с ортогональными несущими (OFDM – Orthogonal Frequency Division Modulation). Она служит для плотной упаковки множества независимых потоков, избегая их взаимного искажения. Благодаря ей в DRM-сигнале расстояние между несущими уменьшено до десятков Гц, причем совершенно неважно, как модулирована каждая из них.

Например, если есть 3 несущих, отстоящих друг от друга на величину  $\Delta F \ll F$ , где  $F$  - основная частота полосы. То есть все 3 частоты практически одинаковы. При этом с периодичностью  $1/\Delta F$  наступают промежутки, когда одна из волн находится в максимуме, а две других проходят через ноль (волны ортогональны). При этом первая не интерферирует с последними, и, соответственно не искажается, как в остальные промежутки времени.

Несмотря на все преимущества QAM и OFDM скорость передачи в DRM не превышает 25 кбит/с из-за отражений волн, которые, образуя эхо, в точке приема накладываясь, ослабляются, повторяются и глушат сами себя.

В аналоговом вещании эту проблему можно игнорировать, а в DRM биты и байты в среде со случайным и сильным эхо приходится транслировать с расстановкой, перемежая их особыми защитными вставками – Guard Interval'ами. Это сложные сигналы, формируемые следующим образом: после того как передатчик упаковывает множество несущих в объединенную посылку, где все они ортогональны друг другу, получается весьма короткий пакет (OFDM-символ). Далее у него берется маленький фрагмент из самого конца, и его копии циклически излучаются в эфир перед тем, как будет отправлен сам OFDM-символ.

Эффективность использования спектра у DRM достигает 2,5 бит/с/Гц. К тому же DRM-передача устойчива против помех – широкополосный сигнал, состоящий из сотен независимых узкополосных, мало чувствителен к искажениям отдельных несущих. Работа с сотнями разночастотных потоков в общем сигнале не требует сотен частотных фильтров – кодирование несущих (передатчиком) в единый сигнал, а затем их выделение (приемником) осуществляются математически, с применением прямого и обратного преобразований Фурье.

Ортогональная модуляция обладает следующими недостатками. Она ощутимо страдает от доплеровских искажений – сдвигов частоты радиосигнала, которые при ионосферных прохождениях достигают 2 Гц и более.