

РАЗЛИЧИЯ МЕЖДУ РАДИОПЕРЕДАТЧИКАМИ РАЗНЫХ ТИПОВ

Радиопередатчики позволяют обмениваться огромными объемами информации по всему миру. Мы рассмотрим основные виды радиопередатчиков, в т. ч. классические схемы этих устройств с амплитудной (АМ) и частотной (ЧМ) модуляцией, а также современные цифровые технологии радиопередачи.

Радиопередатчик является важной частью любой системы связи. Функции передатчика реализуются поэтапно. Сначала формируется сигнал несущей, с помощью которого передается исходная информация. Сигнал, содержащий передаваемую (полезную) информацию, модулирует несущую. Сигнал с полезной информацией называется модулирующим, или информативным сигналом. Несущая, по сути, содержит модулированную информацию. Промодулированный сигнал усиливается до уровня, необходимого для передачи на требуемое расстояние. Оконечный каскад усиления реализован с помощью усилителя мощности (УМ), который является важным компонентом в любом радиопередатчике.

Сигнал с оконечного усилителя мощности, как правило, не сразу поступает в антенну. Между нею и усилителем находится специальное согласующее устройство, которое ограничивает внеполосное излучение передатчика и согласовывает выходной импеданс усилителя мощности с входным импедансом антенны, что необходимо для повышения КПД передатчика за счет снижения коэффициента стоячей волны (КСВ). Этот коэффициент определяет несогласованность антенны и выходного каскада передатчика. Завышенный КСВ не только снижает КПД передатчика, но и может стать причиной его выхода из строя. Идеальный КСВ равен единице, что на практике, особенно для передатчиков, работающих в широкой полосе частот, редко достижимо. Приемлемым КСВ считается тот, величина которого не превышает двух; в ряде случаев допускается его увеличение до трех.

Параметры УМ зависят от требований конкретного приложения, например диапазона его рабочих частот, дальности связи, вида модуляции, передающей антенной и чувствительности приемного устройства. Например, требования к мощности базовых станций сотовой связи постоянно растут. Ожидается, что уровни их мощности достигнут 100 Вт. В радиовещании в АМ-диапазоне уровни мощности передаваемых сигналов достигают нескольких киловатт. Таким образом, возможны самые разные схемные и конструктивные решения для построения радиопередатчика.

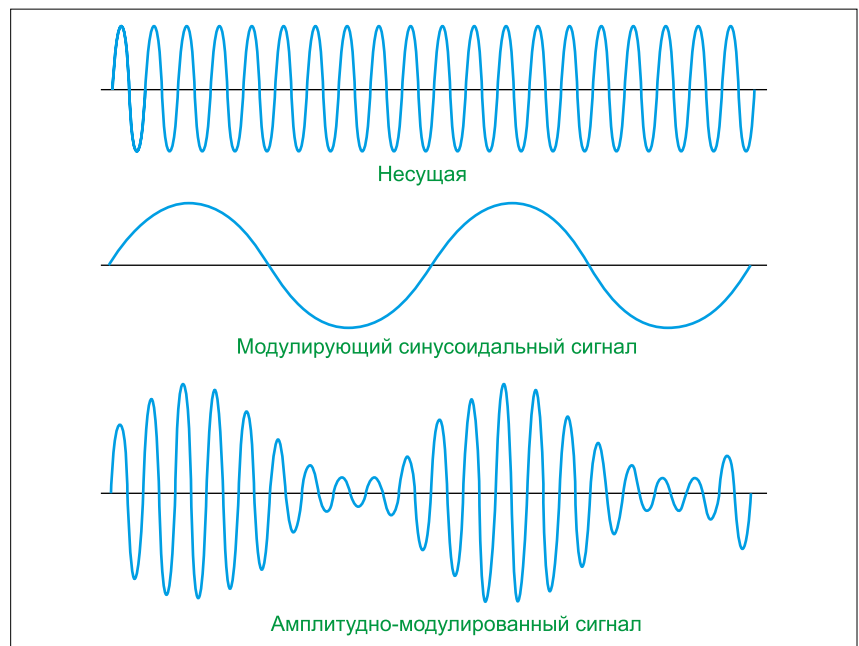
Как уже упоминалось, АМ- и FM-вещание эксплуатируется уже многие годы. Используемая в них амплитудная

и частотная модуляции являются видами аналоговой модуляции. Однако в большей части современной беспроводной связи применяются цифровые методы модуляции, которые мы обсудим позже.

ПЕРЕДАТЧИКИ С АМ

В России для радиовещания с АМ-модуляцией используется диапазон несущих частот 526,5–1606,5 кГц. В США АМ-радиовещание ведется в диапазоне 540–1700 кГц с интервалами 10 кГц. Амплитудная модуляция в диапазоне средних волн применяется также в авиационной связи.

При АМ-модуляции модулирующий, или звуковой, сигнал изменяет мгновенную амплитуду несущего сигнала.



▲ Рис. 1. Принцип амплитудной модуляции

Фактически мгновенное значение амплитуды несущего сигнала определяется мгновенной амплитудой модулирующего сигнала. В общем виде амплитудная модуляция гармонической несущей синусоидальным сигналом показана на рис. 1.

На рис. 2 показана структурная схема высокоуровневого передатчика с амплитудной модуляцией АМ [1]. Генератор создает сигнал несущей, который усиливается буферным усилителем, а затем еще раз усиливается предусилителем, или драйвером. Предусилитель должен поднять уровень мощности сигнала до величины, достаточной для управления последним каскадом передатчика — усилителем мощности.

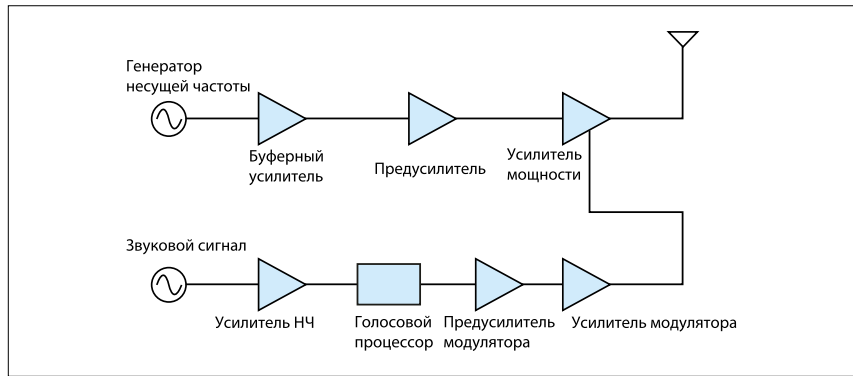
Звуковой сигнал, например с микрофона, поступает на предварительный усилитель и усиливается. После усиления аудиосигнал подается в голосовой процессор, осуществляющий обработку речевых сигналов. Она необходима для того, чтобы обеспечить ограничение или компрессию звукового сигнала, т. е. уменьшить динамический диапазон звукового сигнала, не допустив перемодуляции и возникающих по этой причине нелинейных искажений при приеме сигналов с АМ. Кроме того, осуществляется ограничение полосы передаваемых частот внеполосного излучения, предельные уровни которого регламентируются соответствующими стандартами. Далее предусилитель модулятора повышает звуковой сигнал до уровня, достаточного для управления усилителем модулятора.

Затем выходной сигнал усилителя модулятора модулирует УМ конечного каскада. В генерации сигнала с АМ-модуляцией на выходе УМ используются управляющий аудиосигнал и несущая, поступающая на вход УМ. Этот АМ-сигнал подается в антенну и излучается. Далее в игру вступает АМ-приемник, который принимает сигнал и, в свою очередь, восстанавливает исходный звуковой сигнал.

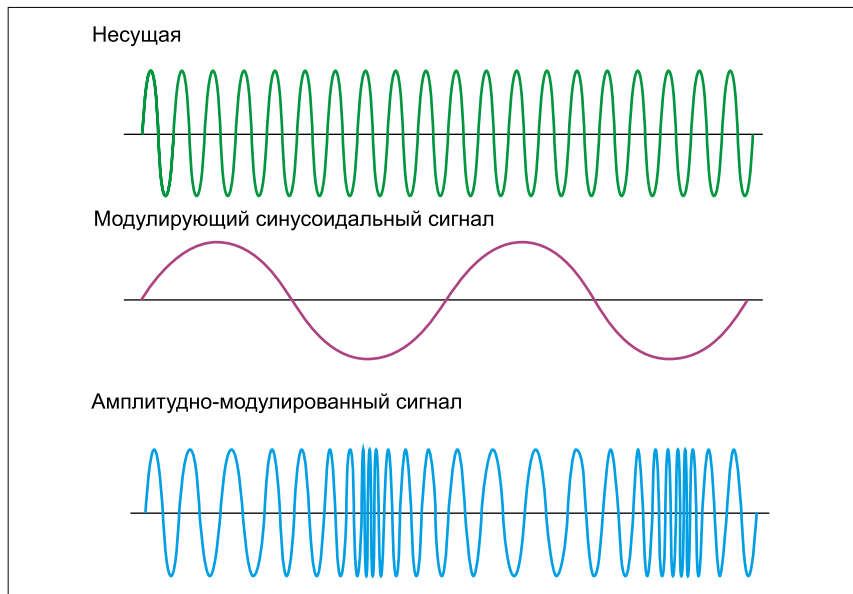
ПЕРЕДАТЧИКИ С ЧМ

Подобно АМ, ЧМ-радиовещание играет важную роль в течение уже многих лет. В США FM-радиовещание осуществляется в частотном диапазоне 88–108 МГц. В отличие от амплитудной модуляции, при частотной модуляции пропорционально амплитуде модулирующего сигнала меняется не амплитуда, а частота несущей. В общем виде частотная модуляция гармонической несущей синусоидальным сигналом показана на рис. 3.

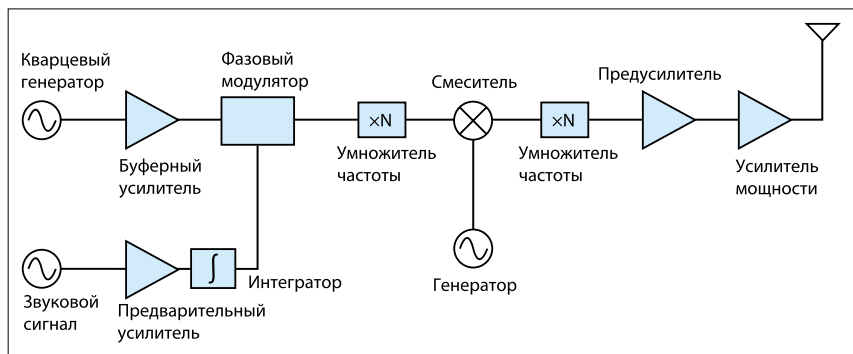
Величину изменения частоты называют частотной девиацией. В ЧМ-радиовещании в США и Европе, а также



▲ Рис. 2. Структурная схема многоуровневого АМ-передатчика



▲ Рис. 3. Пример частотной модуляции



▲ Рис. 4. Структурная схема ЧМ-передатчика с использованием косвенного метода формирования сигнала

в России максимально допустимая девиация частоты составляет ± 75 кГц.

На рис. 4 показана структурная схема одной из возможных реализаций типового ЧМ-передатчика. В этом конкретном передатчике используется т. н. косвенный метод формирования ЧМ-модуляции. Сигнал несущей генерируется опорным кварцевым генератором. Этот сигнал усиливается буферным усилителем до уровня, требуемого для функционирования фазового модулятора. Параллельно принимается, например с микрофона, и усиливается

звуковой сигнал, который поступает на фазовый модулятор. Звуковой сигнал и несущая образуют частотно-модулированный сигнал на выходе фазового модулятора.

В приведенном на рис. 4 примере построения передатчика с частотной модуляцией сигнала кварцевый генератор выдает сигнал несущей с частотой ниже конечной несущей частоты передаваемого сигнала. Следовательно, промодулированный сигнал должен проходить через частотный множитель, за которым установлен смеситель,

а затем еще один множитель частоты. Необходимо не только умножить частоту сигнала до заданной, но и обеспечить требуемую девиацию частоты. Уже сформированный сигнал усиливается предусилителем, а затем мощность сигнала до его поступления в передающую антенну увеличивается до заданной в оконечном УМ. Передаваемый сигнал, в конечном итоге, достигает приемной антенны ЧМ-приемника, который и восстанавливает исходную информацию. Такое построение передатчика обеспечивает высокую стабильность средней частоты несущей, что достаточно сложно реализовать при использовании прямого метода частотной модуляции.

ОДНОПОЛОСНЫЕ ПЕРЕДАТЧИКИ

Как известно, при амплитудной модуляции передаются несущая частота,

разностные верхняя и нижняя боковые полосы (рис. 5). Частота верхней боковой полосы равна сумме частоты несущей и частоты полезного модулирующего сигнала, тогда как частота нижней боковой полосы равна разности частоты несущей и частоты полезного модулирующего сигнала. Передатчик с одной боковой полосой, или SSB-передатчик (single-sideband modulation), отличается от классического АМ-передатчика тем, что передает только одну полосу частот — верхнюю или нижнюю боковую, а не обе. Таким образом, SSB-передатчик использует меньшую полосу частот, чем передатчик с АМ, но его преимущества заключаются не только в этом.

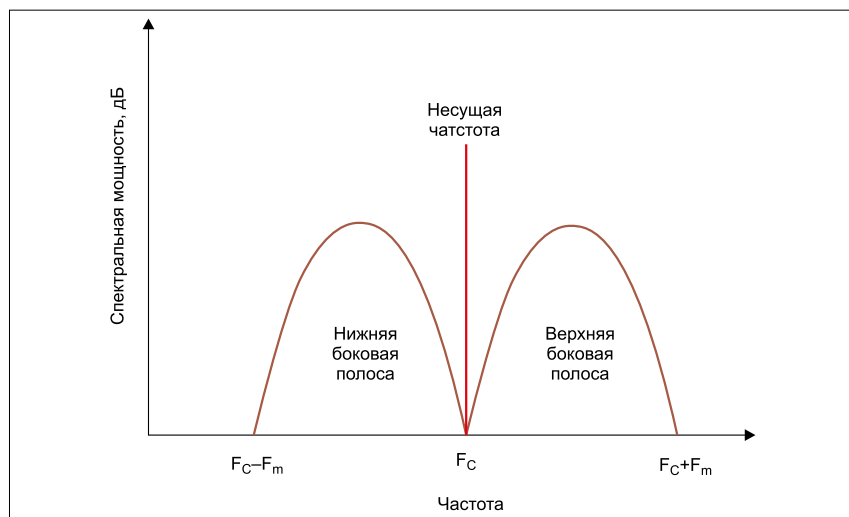
Основное преимущество однополосной амплитудной модуляции заключается в том, что при амплитудной модуляции 70% мощности пере-

датчика расходуется на излучение сигнала несущей частоты, который не содержит полезной информации. Остальные 30% делятся поровну между боковыми частотными полосами, представляющими собой зеркальное отображение друг друга. Таким образом, без всякого ущерба для передаваемой информации можно исключить из спектра сигнала несущую и одну из боковых полос, расходуя всю мощность передатчика для излучения только полезного сигнала.

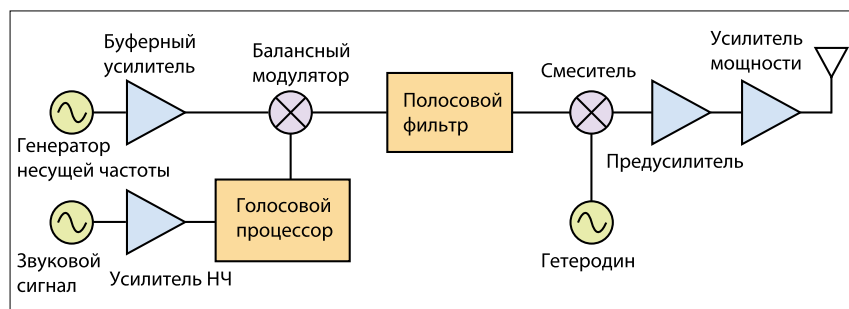
Недостатками технологии SSB являются жесткие требования к фильтрам, стабильности и точности опорных генераторов не только передатчика, но и приемника. В случае невыполнения этих требований возникают искажения сигнала. Из-за этого SSB-технология не применяется в аналоговом радиовещании.

На рис. 6 показана одна из возможных реализаций SSB-передатчика. В его состав входит генератор, обеспечивающий несущий сигнал, который перед поступлением в балансный модулятор усиливается до требуемого уровня. Кроме того, усиливается и полезный сигнал, например аудиосигнал. Еще до поступления на вход балансного модулятора полезный сигнал обрабатывается голосовым процессором — сжимается по динамическому диапазону. Это необходимо для того, чтобы избежать перемодуляции. Сигнал также ограничивается по спектру, что упрощает фильтрацию для выделения боковой полосы.

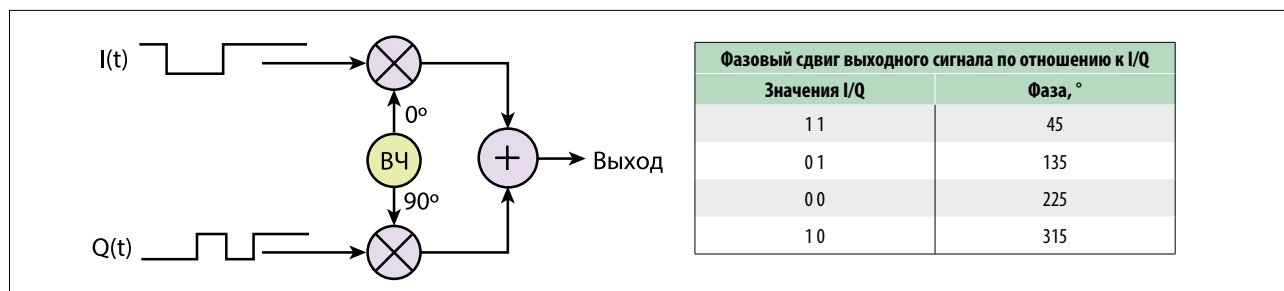
Затем сигнал с выхода балансного модулятора поступает в фильтр выделения боковой полосы. На практике при использовании этого SSB-метода применяются весьма сложные лестничные фильтры на кварцевых резонаторах или электромеханические фильтры. Фильтры позволяют выделить требуемую боковую полосу и подавить нежелательную. После фильтрации сигнал поступает в смеситель вместе с сигналом местного гетеродина. На выходе смесителя появляется высокочастотный сигнал необходимой частоты, который усиливается до необходимого уровня и излучается в эфир.



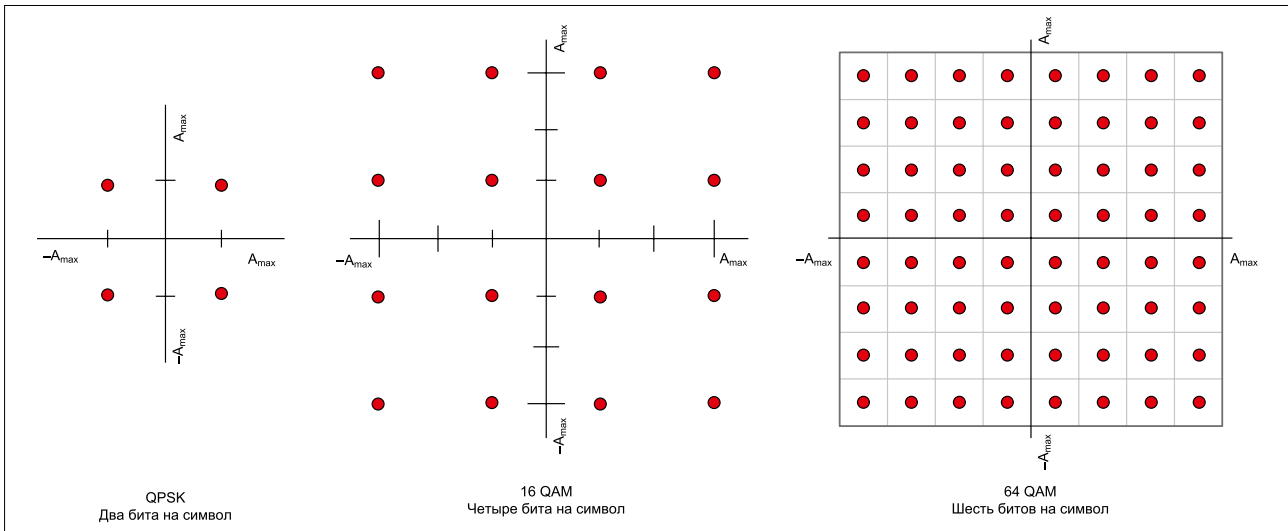
▲ Рис. 5. Спектр АМ-сигнала



▲ Рис. 6. Структурная схема SSB-передатчика с выделением боковой полосы фильтром



▲ Рис. 7. Простое представление модуляции QPSK



▲ Рис. 8. Примеры квадратурной модуляции

СОВРЕМЕННЫЕ ПЕРЕДАТЧИКИ

Модулирующий сигнал в передатчиках с АМ- и ЧМ-модуляциями является чисто аналоговым. Однако более современные передатчики используют цифровые технологии. По сути, сегодняшние передатчики для обработки передаваемой информации часто применяют технологию цифровой обработки сигналов — DSP (digital signal processing).

I/Q-СИГНАЛЫ

Синфазные/квадратурные (I/Q) сигналы составляют основу сложных методов модуляции. Эти сигналы I/Q определяются как пара сигналов, которые отличаются по фазе на 90° . Синфазный (I) сигнал является опорным, а квадратурный (Q) сигнал сдвинут на 90° по фазе от сигнала I.

Косинусоидальная и синусоидальная функции, как известно из тригонометрии, различаются по фазе на 90° . В рассматриваемом случае косинусоидальная функция считается сигналом I, а синусоидальная функция представляет Q-сигнал. При суммировании косинусоидального и синусоидального сигналов с равными амплитудами получается синусоида, сдвинутая по фазе на 45° от сигнала I. Комбинирование сигналов I и Q является важной концепцией, применяемой в сложных типах модуляции.

На рис. 7 представлен пример квадратурной модуляции с фазовой манипуляцией QPSK (quadrature phase shift keying), в которой используются сигналы I/Q, а также несущий радиочастотный сигнал. Эти квадратурные I- и Q-сигналы фактически являются цифровыми битовыми потоками. Из таблицы на рис. 7 видно, что фазовый сдвиг выходного сигнала определяется значениями I и Q. Такой вид QPSK имеет всего четыре состояния.

Существует также много других методов модуляции, но их описание выходит

за рамки этой статьи. Однако понятно, что сигнал несущей может модулироваться путем управления амплитудой сигналов I/Q. Это важное обстоятельство в понимании особенностей функционирования многих современных передатчиков.

Заметим, что для передачи большего числа битов используется метод квадратурной амплитудной модуляции QAM (quadrature amplitude modulation). Эта разновидность амплитудной модуляции сигнала, как и QPSK, представляет собой сумму двух несущих колебаний одной частоты, сдвинутых по фазе относительно друг друга на 90° . Каждое из них модулировано по амплитуде своим модулирующим сигналом. Число передаваемых битов определяется порядком квадратурной модуляции. В случае QPSK с двумя битами на символ передаются четыре состояния, в 16 QAM (четыре бита на символ) — 16 состояний, в 64 QAM (шесть битов на символ) — 64 состояния. На рис. 8 сравниваются эти виды модуляции для передачи цифровых сигналов.

ПЕРЕДАТЧИК С ПРЯМЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

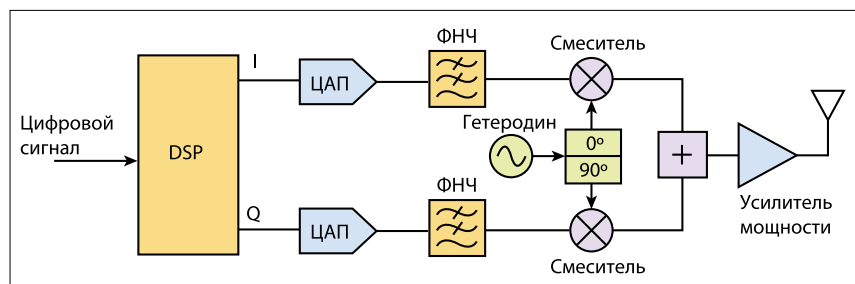
Одними из часто используемых передатчиков являются передатчики с прямым преобразованием. Они просты

в реализации и весьма экономичны (рис. 9). Цифровые данные с передаваемой информацией обрабатываются путем формирования сигналов I/Q в определенной полосе частот. Затем сигналы I и Q подаются на соответствующие цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). Далее каждый из выходных сигналов ЦАП поступает в соответствующие фильтры нижних частот. После прохождения этих фильтров оба сигнала отправляются в соответствующие смесители.

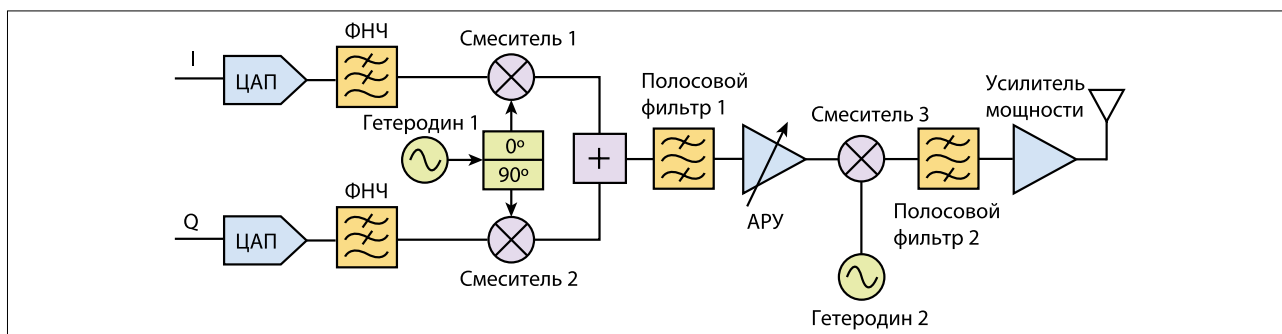
Генератор гетеродина выдает радиочастотный сигнал, который затем делится на два сигнала, сдвинутых по фазе на 90° . Каждый из них поступает на вход первого и второго смесителей, соответственно. Выходные сигналы от обоих микшеров объединяются. Результирующий модулированный сигнал усиливается, подается на антенну и излучается в эфир. Передаваемый сигнал поступает в приемник, который демодулирует принятый сигнал для восстановления сигналов I/Q. Это один из вариантов реализации квадратурной амплитудной модуляции.

СУПЕРГЕТЕРОДИННЫЙ ПЕРЕДАТЧИК

На рис. 10 показана структурная схема супергетеродинного передатчика, практическая реализации которого



▲ Рис. 9. Передатчик прямого преобразования, широко используемый в системах беспроводной связи



▲ Рис. 10. Супергетеродинный передатчик

го сложнее по сравнению с передатчиком с прямым преобразованием. Его функционирование аналогично передатчику прямого преобразования вплоть до первого полосового фильтра. Сигнал, который поступает в этот фильтр, называется сигналом промежуточной частоты (ПЧ).

После прохождения через полосовой фильтр 1 сигнал ПЧ усиливается, а затем преобразуется с помощью смесителя с повышением до конечной выходной частоты. Затем сигнал фильтруется, усиливается и излучается в эфир. Из структурной схемы на рис. 10 видно, что одним из недостатков супергетеродинного передатчика является генерация нежелательных сигналов на выходе смесителя 3. Это объясняется тем, что частота требуемого выходного сигнала равна сум-

ме частот второго гетеродина и сигнала ПЧ. Однако на выходе микшера 3 также присутствует нежелательный сигнал с частотой, равной разности частот ПЧ и второго гетеродина.

Происходит и обратное, когда необходимая выходная частота может равняться разности ПЧ и частоты второго гетеродина. Таким образом, на выходе смесителя 3 появляется нежелательный сигнал с частотой, равной сумме частот второго гетеродина и сигнала ПЧ. Как бы ни происходило формирование нежелательного сигнала, для его подавления используется второй полосовой фильтр.

Для всех описанных в этой публикации передатчиков требуется ограничение по полосе излучения и согласование выходного импеданса усилителя мощности с входным импедансом антенны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Передатчики бывают самые разные и по вариантам исполнения, и по видам используемой модуляции. Хотя АМ- и ЧМ-передатчики все еще находят применение, современные системы беспроводной связи широко используют другие технологии — в частности, цифровые с прямым преобразованием и супергетеродинные. Не будем забывать и о том, что в настоящее время именно цифровая технология DSP является ключевой в системах беспроводной связи. ◀

ЛИТЕРАТУРА:

1. Frenzel, Louis E. *Principles of Electronic Communication Systems, Fourth Edition*, McGraw Hill, 2016.
2. Tektronix, *What's Your IQ — About Quadrature Signals*. April, 2013.