

# Лекция 7 Модуляция

## 1. Фазовая модуляция

Простейшим случаем фазовой модуляции является двухпозиционная фазовая манипуляция, которая еще называется **2-PSK (Phase Shift Keying)** или **BPSK (Binary Phase Shift Keying)** (рис. 1)

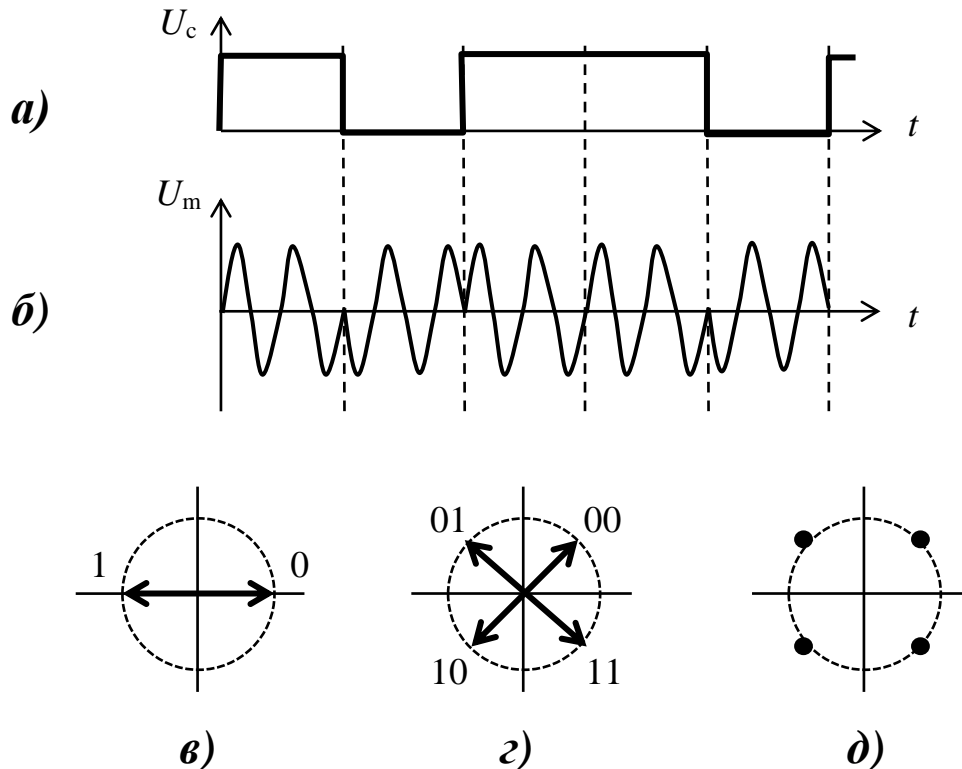


Рис. 1. Фазовая модуляция (PSK):

а) модулирующий сигнал; б) модулированный сигнал; в) векторная диаграмма модуляции 2-PSK; г) векторная диаграмма модуляции 4-PSK или QPSK 4QAM; д) отмеченные точками положения конца вектора при модуляции 4-PSK

Число возможных состояний фазы может быть больше двух. Например, широко используется четырехпозиционная фазовая манипуляция **4-PSK**, она же **QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)**, векторная диаграмма которой показана на рис. 1,г. Набор возможных состояний передаваемого сигнала здесь уже равен четырем, и каждый символ содержит в себе два бита информации. На векторной диаграмме модулированного сигнала часто показывают только положение концов вектора, отмечая его точкой (рис. 1,д).

Количество передаваемой одним символом информации можно увеличить – путем выбора большего количества возможных состояний фазы передаваемого сигнала. Например, при способе модуляции **8-PSK** каждый символ (каждое возможное состояние передаваемого сигнала) содержит в себе три бита информации. Однако передача сигнала в реальных условиях

связана с наличием в канале связи многочисленных помех, поэтому амплитуда и фаза передаваемого сигнала на приемной стороне может быть определена лишь с ошибкой. Если эту ошибку для серии измерений нанести на векторную диаграмму (рис. 2), то станет понятно, что при определенной величине ошибки произойдет ошибочное декодирование сигнала на приемной стороне.

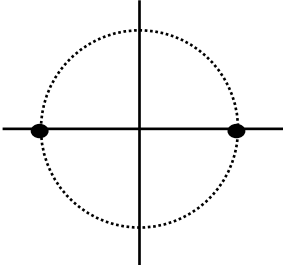
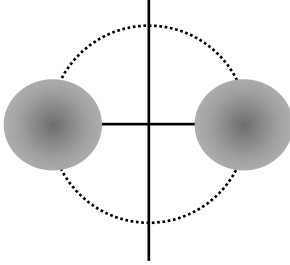
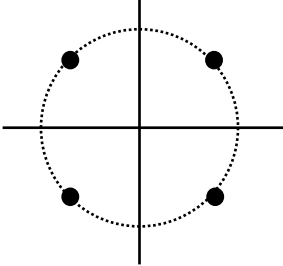
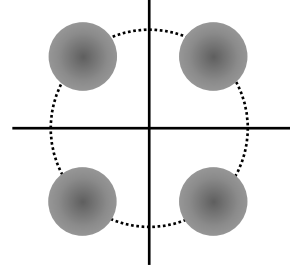
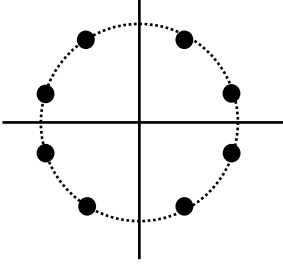
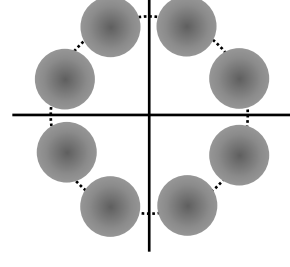
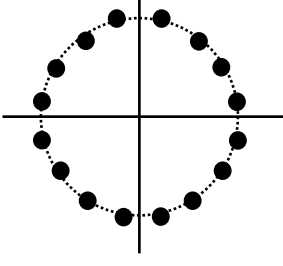
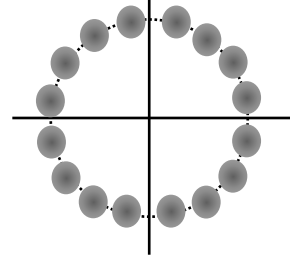
Тип Модуляции	Передача в отсутствие помех	При наличии помех
2-PSK		
4-PSK		
8-PSK		
16-PSK		

Рис. 2. Векторные диаграммы для различных типов модуляции PSK в условиях помех

Способ модуляции PSK используется в тех случаях, когда необходимо сохранить постоянной амплитуду передаваемого сигнала или исключить

амплитуду из числа параметров, изменяемых в процессе модуляции. Такие условия характерны при передаче информации со спутника.

## 2. Квадратурная амплитудная модуляция

При квадратурной амплитудной модуляции *QAM (Quadrature Amplitude Modulation)* модулируемыми параметрами несущего колебания являются и фаза, и амплитуда. Модуляция их производится одновременно и независимо друг от друга.

Если немодулированная несущая описывается формулой

$$u(t) = U_m \cos \omega t,$$

то в результате квадратурной амплитудной модуляции ее сигналами  $u_I$  (*Inphase*) и  $u_Q$  (*Quadrature*) передаваемый сигнал будет выглядеть так:

$$u(t) = u_I \cos \omega t + u_Q \sin \omega t.$$

Такой вид модуляции можно проиллюстрировать с помощью векторной диаграммы, на которой в декартовой системе координат с вертикальной осью  $Q$  и горизонтальной осью  $I$  изображают положение конца вектора промодулированного сигнала. Векторная диаграмма сигнала для случая четырехпозиционной квадратурной амплитудной модуляции, которая обозначается аббревиатурой 4-QAM, показана на рис. 3.

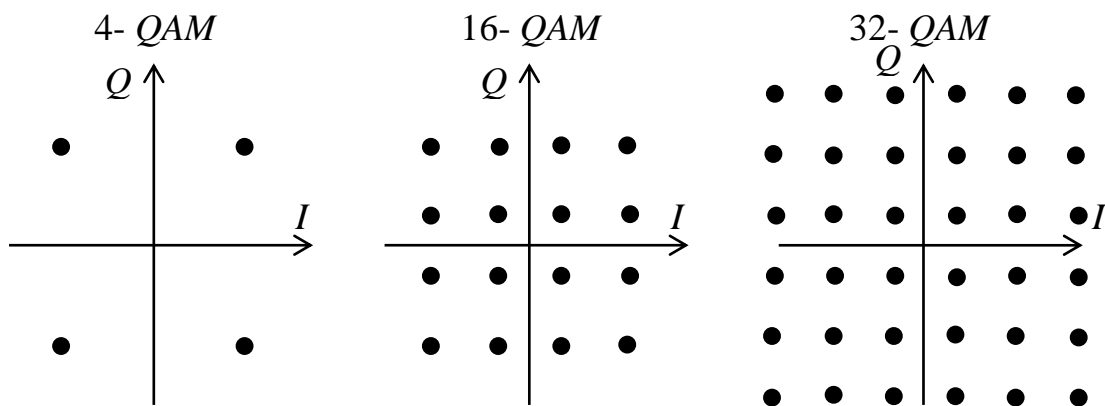


Рис. 3. Векторные диаграммы сигналов при различных видах квадратурной амплитудной модуляции *QAM*

Набор точек, показывающих возможное положение конца вектора сигнала на плоскости  $IQ$ , принято называть *созвездием*. Каждая точка характеризуется своим сочетанием амплитуды и фазы сигнала, поэтому соответствующий каждой точке символ содержит информацию в количестве

$$I = \log_2 N,$$

где  $I$  – число битов информации, соответствующее каждому символу;

$N$  – число возможных позиций конца вектора, или точек на векторной диаграмме.

Нетрудно заметить, что в случае модуляции 4-QAM амплитуда сигнала не меняется, поэтому такой случай полностью эквивалентен четырехпозиционной фазовой манипуляции (4-PSK или QPSK).

Векторные диаграммы сигнала для способов модуляции 4-QAM, 16-QAM и 32-QAM показаны на рис. 3.

При использовании многопозиционной модуляции, разумеется, можно передать больше информации, но в реальных условиях при наличии помех в канале передачи, различимых двух сходных по параметрам символов значительно ухудшается, и на приемной стороне возможно ошибочное определение амплитуды и фазы передаваемого сигнала. Это обстоятельство и ограничивает количество информации, передаваемое одним символом. Тем не менее, основное преимущество QAM перед другими видами модуляции – ее хорошая помехозащищенность. Рис. 4 иллюстрирует преимущество модуляции 16-QAM перед модуляцией 16-PSK.

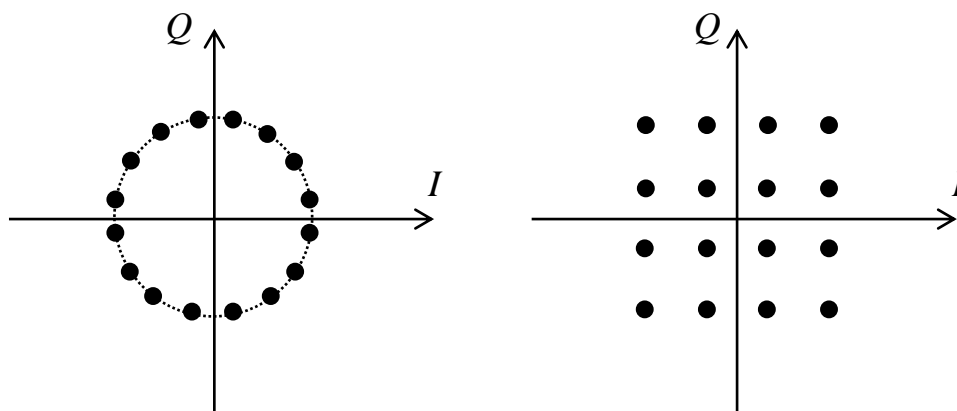


Рис. 4. Сравнение помехоустойчивости двух видов модуляции: 16-PSK (слева) и 16-QAM (справа). Видно, что расстояние между соседними точками, соответствующими позициям векторов, при использовании модуляции 16-QAM больше

Многопозиционная квадратурная амплитудная модуляция успешно используется, например, в кабельных каналах, где можно значительно увеличить число позиций модуляции, поскольку при передаче информации по кабелю обеспечивается достаточно высокое отношение сигнал/помеха.

Как правило, при использовании многопозиционной QAM расстояние между соседними точками, обозначающими положение конца вектора сигнала, выбирается одинаковым. Однако выбор расположения этих точек позволяет осуществить так называемую **неоднородную квадратурную амплитудную модуляцию**. С ее помощью реализуют «иерархичность» в передаче информации. На рис. 5 показана векторная диаграмма для способа квадратурной амплитудной модуляции 16-QAM: на рис. 5,а – обычная модуляция 16-QAM, на рис. 5,б и 5,в – неоднородная 16-QAM. Как видно из рисунка, при неоднородной модуляции допустимые положения вектора сигнала расположены на диаграмме неравномерно. При наличии помех затруднительно декодировать сигнал, у которого возможные положения вектора отделяются небольшими расстояниями на фазовой плоскости. Поэтому было найдено остроумное решение – изменять амплитуду и фазу

несущей частоты в процессе модуляции таким образом, чтобы возможные положения вектора сигнала оказывались расположенными на векторной диаграмме не равномерно, а на различных расстояниях друг от друга. При этом, очевидно, для одной части передаваемой информации при наличии помех условия декодирования улучшатся, а для другой, наоборот, осложнятся. Но при этом появится важное преимущество – в сложных условиях приема сигнала можно заранее определить, какая именно часть информации, имеющая высший приоритет, в первую очередь должна попасть в приемное устройство. Величина неравномерности оценивается коэффициентом  $\alpha$ , показывающим отношение расстояния между группами точек-концов вектора на диаграмме к расстоянию между соседними точками.

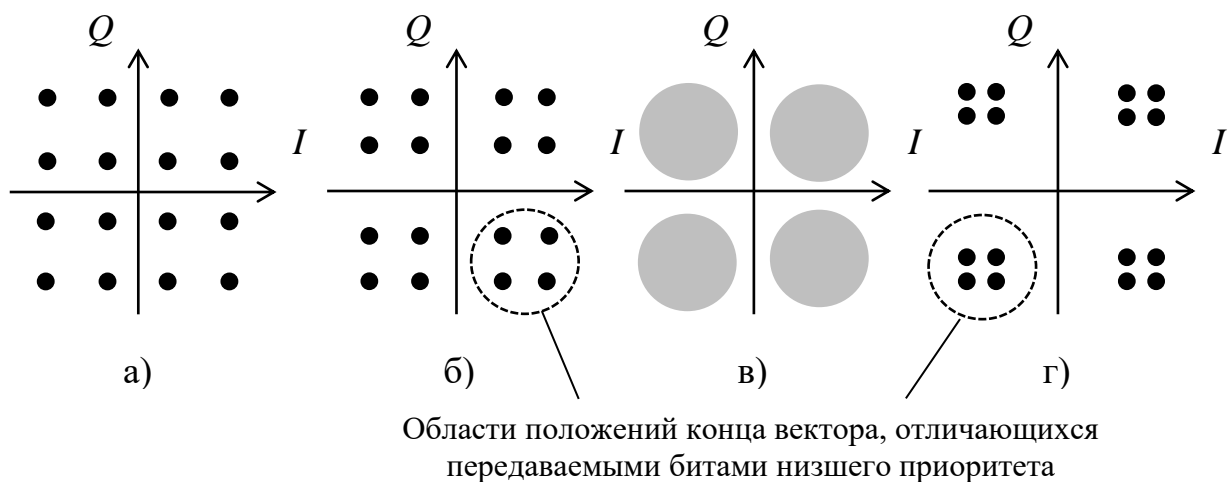


Рис. 5. Векторные диаграммы сигнала 16-QAM при иерархической передаче информации: а – обычная модуляция 16-QAM; б – неоднородная модуляция 16-QAM,  $\alpha = 2$ ; в – декодирование модуляции только высшего приоритета; г - неоднородная модуляция 16-QAM,  $\alpha = 4$

На рис. 5,б и в штриховой линией обведены области, внутри которых изменения положения вектора сигнала могут быть зафиксированы в приемном устройстве лишь при помехоустойчивом приеме. При ухудшении условий приема детектор может выделить лишь меньшую, заранее определенную часть информации, имеющую высший приоритет. В примере, показанном на рис. 5, такой объем информации эквивалентен случаю 4-QAM и показан на рис. 5,г. Это позволяет строить приемники с различными возможностями, способные наиболее качественно принять ту долю передаваемой информации, которую они смогут воспроизвести при данных условиях приема.

### 3. Модуляция OFDM

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.

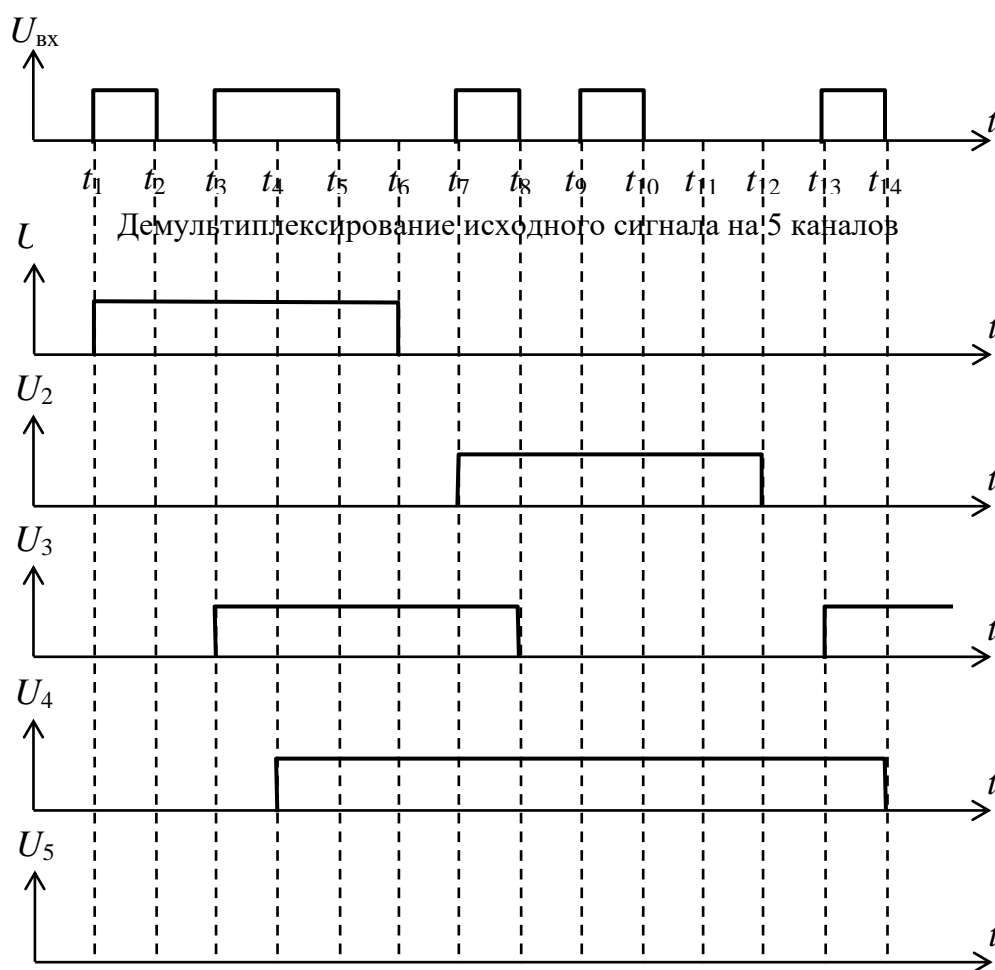


Рис. 6. Пример демультимплексирования информационного сигнала

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.

На рис. 6 показан пример преобразования («распараллеливания») одного последовательного цифрового сигнала в пять отдельных сигналов путем демультиплексирования, что позволяет увеличить длительность передачи каждого символа в каждом из пяти сигналов в пять раз. Далее, каждый из полученных таким образом сигналов с уменьшенной скоростью передачи символов модулирует соответствующую несущую, число которых равно числу модулирующих сигналов. При этом можно использовать фазовую (PSK) или квадратурную амплитудную (QAM) модуляцию каждой несущей.

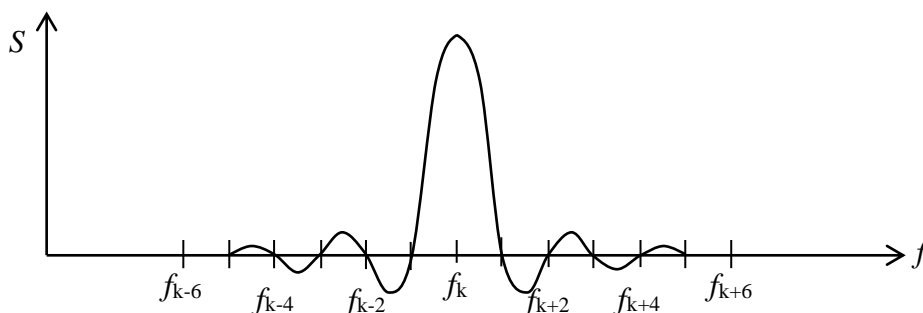


Рис. 7. Огибающая спектра одной несущей с номером  $k$  при модуляции OFDM

На рис. 7. показан спектр одной несущей в результате модуляции ее сигналом прямоугольной формы.

Исходя из условия ортогональности, частоты несущих должны располагаться на оси частот с шагом, обратным величине  $T_S$  – времени передачи одного символа. При этом значения каждой частоты определяются выражением:

$$f_k = f_0 + k \frac{1}{T_S},$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots, n-1, N$ .

Таким образом, получается ряд частот, расположенных равномерно и с общим спектром, достаточно близко приближающимся к прямоугольной форме, что позволяет эффективно использовать полосу частот канала передачи (рис. 8).

Важным фактором при таком способе модуляции является так называемая **межсимвольная интерференция** (*Intersymbol Interferention, ISI*),

или, по существу, перекрестные искажения. Модуляция OFDM позволяет применить простой прием для борьбы с этим явлением: при увеличении количества несущих частот время на передачу одного символа также увеличивается. Этого увеличения оказывается достаточно для того, чтобы ввести между передаваемыми символами так называемый **защитный интервал** (*Guard Interval, GI*) (рис. 9). Введение защитного интервала позволяет уменьшить межсимвольные помехи и снизить влияние различных **эхо-сигналов**, возникающих из-за многолучевости распространения радиоволн. Главное назначение защитного интервала, таким образом, состоит в повышении помехоустойчивости передачи полезной информации.

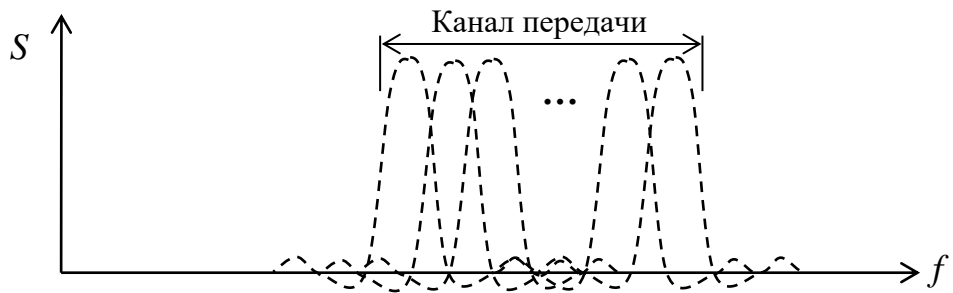


Рис. 8. Спектр передаваемого сигнала при модуляции OFDM

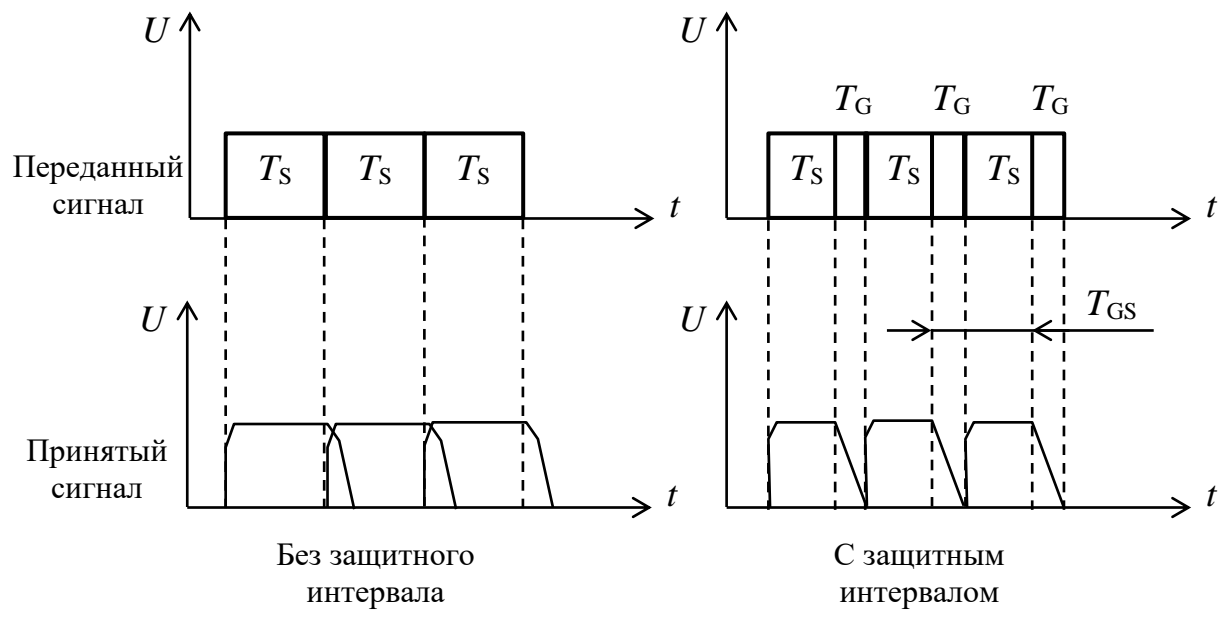


Рис. 9. Иллюстрация действия защитного интервала при модуляции OFDM

Таким образом, время, затрачиваемое на передачу одного символа OFDM, состоит из интервала передачи полезной информации и защитного интервала:

$$T_{GS} = T_G + T_S$$

где  $T_{GS}$  – время, затрачиваемое на передачу одного символа;  $T_G$  - защитный интервал;  $T_S$  - время передачи полезной информации.



Структурная схема модулятора OFDM показана на рис. 10. Для формирования каждой из используемых несущих частот необходим свой задающий генератор. Однако такое построение модулятора удобно при относительно небольшом количестве несущих. При передаче же сигналов цифрового ТВ или цифрового радиовещания количество несущих частот на выходе модулятора может достигать нескольких тысяч. Поэтому для построения модулятора в подобных условиях было найдено другое решение, не связанное с необходимостью использования такого большого количества генераторов несущих и модуляторов. Дело в том, что каждая несущая формирует соответствующую часть общего спектра сигнала на выходе модулятора. В радиотехнике известен метод синтеза сложного сигнала из отдельных гармонических составляющих с помощью обратного преобразования Фурье. Существуют хорошо отработанные алгоритмы, позволяющие использовать такие преобразования за минимальное время и с минимальным количеством вычислительных операций.

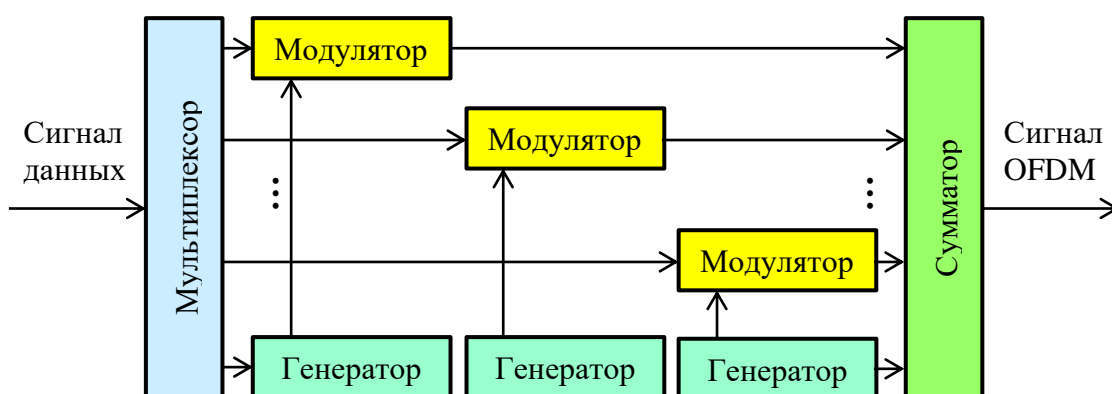


Рис. 10. Модулятор OFDM

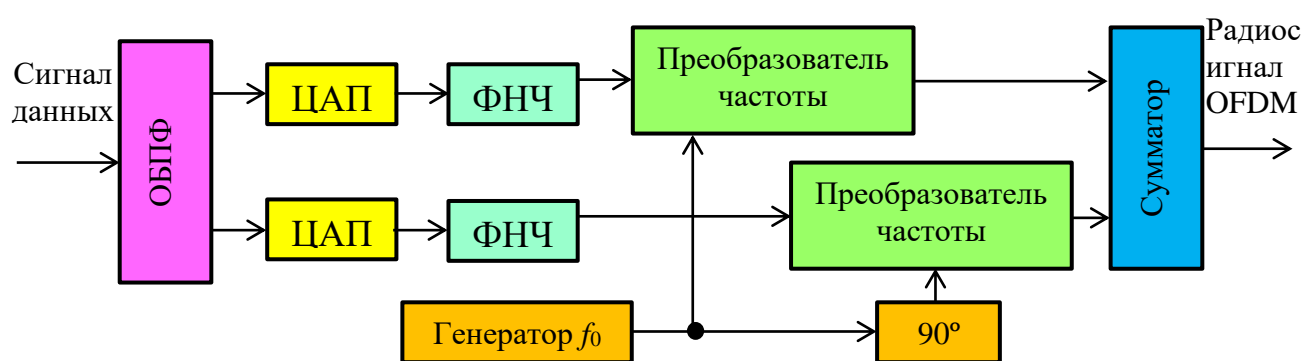


Рис. 11. Формирователь радиосигнала OFDM с помощью обратного быстрого преобразования Фурье

Пример схемы формирования сигнала OFDM с помощью обратного преобразования Фурье показан на рис. 11. Входной поток цифровых данных поступает на блок обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ), после

чего вещественная и мнимая части результата преобразования переводятся в аналоговую форму с помощью ЦАП и подаются на ФНЧ для удаления высокочастотных продуктов преобразования. Затем полученные сигналы поступают на преобразователь частоты, где умножаются на основной и квадратурный сигналы гармонического колебания  $f_0$  соответственно. Это позволяет после сумматора получить спектр сигнала OFDM, смещенный на частоту  $f_0$ . Такая операция соответствует преобразованию частоты, необходимому при формировании радиосигнала для выбранного канала вещания.

Данный способ модуляции имеет еще один резерв повышения помехоустойчивости. В процессе формирования сигнала передачи, содержащего несколько несущих, может оказаться так, что следующие последовательно друг за другом символы будут модулировать соседние по частоте несущие. Это обстоятельство неблагоприятно влияет на устойчивость такой системы передачи к помехам, поражающим сразу значительный диапазон частот (рис.12). Один из вариантов способа модуляции OFDM, известный как **COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex)**, 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 выдерживается на передающей стороне и, в обратном порядке – в приемном устройстве. такая мера позволяет сделать данный способ передачи информации практически нечувствительным к различного рода замираниям, а также помехам, исключаящим на короткое время возможность использования какого-либо участка диапазона частот.

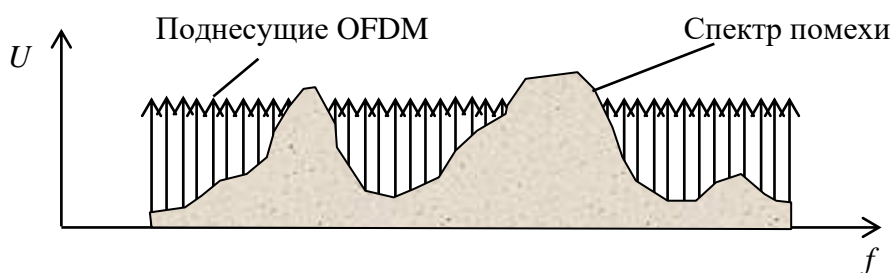


Рис. 12. Воздействие помех при передаче сигнала OFDM

В целом, рассмотренный способ модуляции OFDM, безусловно, не лишен недостатков – он достаточно сложен в технической реализации. Кроме того, при его использовании сложно решается вопрос синхронизации. Однако, как показали испытания, этот способ хорошо подходит для передачи сигналов цифрового телерадиовещания в различной местности, эффективно использует полосу частот канала связи и в настоящее время успешно применяется для передачи цифровых сигналов в системах европейского цифрового ТВ вещания.

