



Э.В. Семенов

**УСТРОЙСТВА ПРИЕМА И
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

Литература

Основная

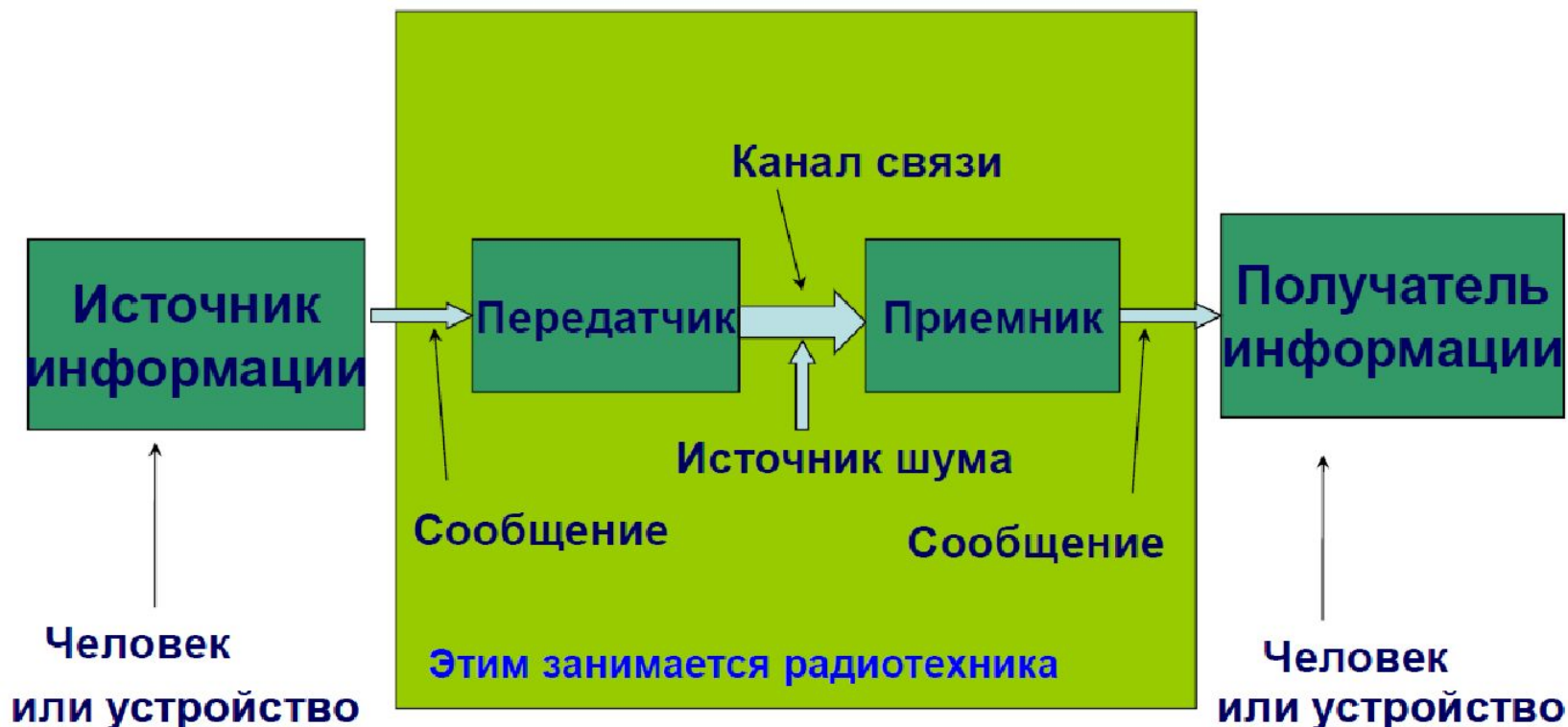
- Радиоприёмные устройства: учебник для вузов / Н. Н. Фомин, Н. Н. Буга, О. В. Головин и др. ; под ред. Н. Н. Фомина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 520 с.
- Онищук А.Г., Забеньков И.И., Амелин А.М. Радиоприемные устройства. – М.: Новое знание, 2006. – 240 с.

Дополнительная

- Колосовекий Е. А. Устройства приема и обработки сигналов. Учебное пособие для вузов. – М: Горячая линия – Телеком, 2007. – 456 с.
- Румянцев К. Е. Радиоприемные устройства: учебник для студ. сред. проф. образования / К. Е. Румянцев. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 336 с.
- Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Издание второе, исправленное. – Издательский дом «Вильямс», 2003.
- Flexible Digital Modulation Analysis Guide (на английском)
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/E4440-90351.pdf>
- ГОСТ 24375-80 Радиосвязь. Термины и определения

Тема 1. Области применения, виды принимаемых сигналов и задачи УПОС

Место приемного устройства в системе связи



Основные области применения УПОС

- широковещательные системы (один передатчик – несколько приемников): радиовещание, телевидение (в том числе спутниковое вещание);
- радиорелейные системы (один направленный передатчик – один приемник);
- системы сотовой связи;
- системы беспроводного доступа к компьютерной информации;
- системы микросотовой связи (маломощные системы для локальной связи с отдельными устройствами);
- системы навигации;
- радиолокационные системы.

Задачи устройств приема и обработки сигналов

- Радиоприем – выделение сигналов из радиоизлучения (ГОСТ 24375-80 Радиосвязь. Термины и определения)
- Зачем что-то выделять? Эфир – среда общего пользования, в которую излучает множество передатчиков, и в которой существует множество помех различного происхождения. Следовательно, интересующий нас сигнал должен иметь информативные признаки, отличающие его от сигналов других передатчиков и помех. Существуют следующие варианты:
 - FDMA (frequency division multiple access) – частотная селекция. **В подавляющем большинстве случаев для селекции принимаемого сигнала используются частотно-разделительные фильтры.** Главный параметр приемников в таких системах **избирательность** (частотная).
 - TDMA (time division multiple access) – каждому передатчику выделяется свой интервал времени для работы. Селекция осуществляется при помощи стробирующих устройств.
 - CDMA (code division multiple access) – каждый передатчик использует уникальную форму (код) несущего сигнала, ортогональную несущим сигналам других передатчиков. Селекция осуществляется при помощи корреляторов или согласованных фильтров.

Задачи устройств приема и обработки сигналов

- Вторая задача УПОС – усиление сигнала. 1 канал телевидения с останкинской телебашни передается с мощностью 40 кВт. Радиус зоны покрытия составляет 130 км. На этом расстоянии в предположении изотропной передачи плотность мощности составляет около 0.2 мкВт/м^2 .
- Таким образом, второй главный параметр приемника: **чувствительность – мера способности радиоприемника обеспечивать прием слабых сигналов (ГОСТ 24375-80).**
- Сложности усиления радиосигналов:
 - несущие частоты могут достигать нескольких десятков ГГц. Непосредственно на этих частотах реализовать все необходимое усиление сложно. Чаще всего прибегают к переносу частоты.
 - сложно построить усилитель, шумы которого были бы в заданное число раз меньше слабого входного сигнала.

Задачи устройств приема и обработки сигналов

- Большинство современных систем связи цифровые, т.е. информация передается в виде дискретных во времени информационных символов.
- Недостаточно всего лишь осуществить селекцию такого сигнала, нужно еще правильно определить временное положение информационных символов.
- Специального канала для передачи сигнала синхронизации как правило не организуют. Поэтому **третья задача** приемного устройства состоит в том, чтобы правильно и точно восстановить синхросигнал непосредственно из информационного потока.
- Сложности:
 - не каждый переход от одного символа к другому хоть как-то маркируется. Например в последовательности **00000000** не будет никаких сигнальных признаков перехода от одного символа к другому;
 - в высокоскоростных системах связи время, отводимое на передачу одного информационного символа, измеряется наносекундами. Таким образом, допуск на временную нестабильность (джиттер) систем синхронизации оказывается в пикосекундном диапазоне.

Задачи устройств приема и обработки сигналов

- Четвертая задача УПОС: осуществлять прием сигналов с минимальными искажениями. Искажения бывают:
 - линейными (отклонения передаточной функции приемного устройства от равномерной или оптимальной). Требование малых линейных искажений, как правило, находится в определенном противоречии с требованием обеспечения избирательности;
 - нелинейными (эффекты насыщения и отсечки в усилительных и преобразовательных элементах).
- УПОС в этой части характеризуют, в частности, полосой пропускания, коэффициентом интермодуляционных искажений, динамическим диапазоном.

Задачи устройств приема и обработки сигналов

- Пятая задача УПОС: обеспечить возможность перестройки на сигналы различных передатчиков. Как правило, это означает возможность перестройки по диапазону частот с сохранением основных характеристик (прежде всего избирательности и чувствительности) неизменными.

Виды принимаемых сигналов

Процесс модуляции

Модуляция- это процесс изменения несущего сигнала в соответствии с формой модулирующего сигнала.

Различают:

- амплитудную модуляцию;
- частотную модуляцию;
- фазовую модуляцию;
- импульсно-кодированную модуляцию;
- спектральную модуляцию;
- поляризационную модуляцию.

$$v(t) = V(t) \cos(2\pi f(t)t + \theta(t))$$

**Амплитудная
модуляция
(AM)**

**Частотная
модуляция
(FM)**

**Фазовая
модуляция
(PM)**

угловой
аргумент

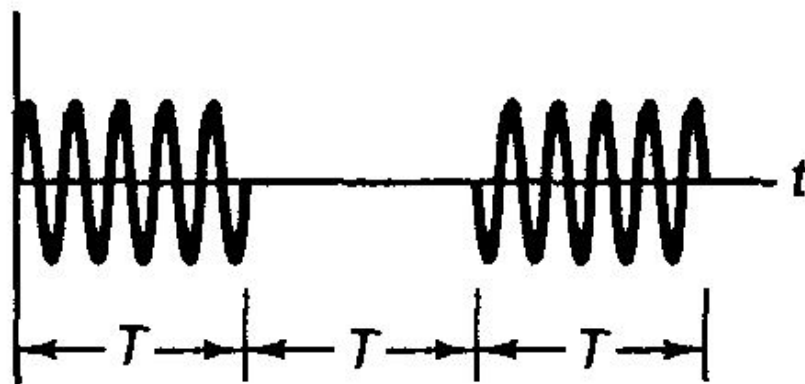
Виды принимаемых сигналов

Семейство форматов	Формат модуляции
Амплитудная модуляция	Обычная амплитудная модуляция в аналоговых системах
	ASK (Amplitude Shift Keying) – амплитудная манипуляция
	QAM (Quadrature Amplitude modulation) – квадратурная амплитудная модуляция. 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM – квадратурная амплитудная модуляция с 16, 32, 64, 128, 256 квантовыми уровнями
Фазовая модуляция (манипуляция)	Обычная фазовая модуляция в аналоговых системах
	BPSK (Binary Phase Shift Keying) – двухуровневая фазовая манипуляция
	QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) – квадратурная фазовая манипуляция
	8PSK – фазовая манипуляция с 8-ю дискретными значениями фазы
	DQPSK (Differential QPSK) – дифференциальная фазовая манипуляция
	$\pi/4$ DQPSK – дифференциальная фазовая манипуляция с дискретом по фазе $\pi/4$
	D8PSK – дифференциальная фазовая манипуляция с 8-ю дискретными значениями фазы

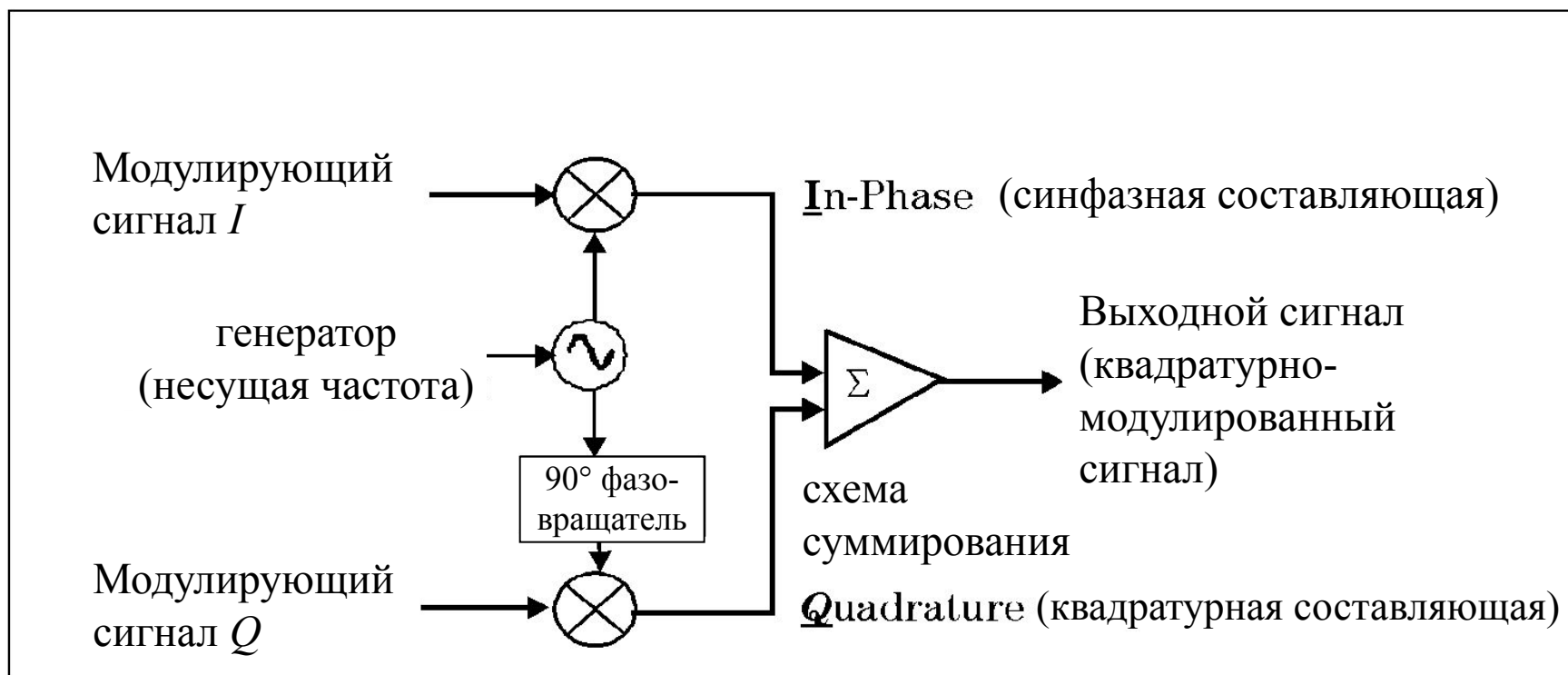
Виды принимаемых сигналов

Семейство форматов	Формат модуляции
CPM (Continuous Phase Modulation) – модуляция без разрыва фазы	Offset DQPSK – смещенная дифференциальная фазовая манипуляция
	MSK (Minimum Shift Keying) – манипуляция с минимальным сдвигом
Частотная модуляция (манипуляция)	Обычная частотная модуляция в аналоговых системах
	FSK (Frequency Shift Keying) – частотная манипуляция 2 FSK, 4FSK, 8FSK – частотная манипуляция с 2, 4, 8 дискретными значениями частоты
Time-Hopping Modulation – время-импульсная модуляция	
Модуляция с расширением спектра (spread spectrum) / связь с шумоподобными сигналами	

Сущность, преимущества, недостатки и область применения различных видов модуляции. Амплитудная манипуляция (ASK)

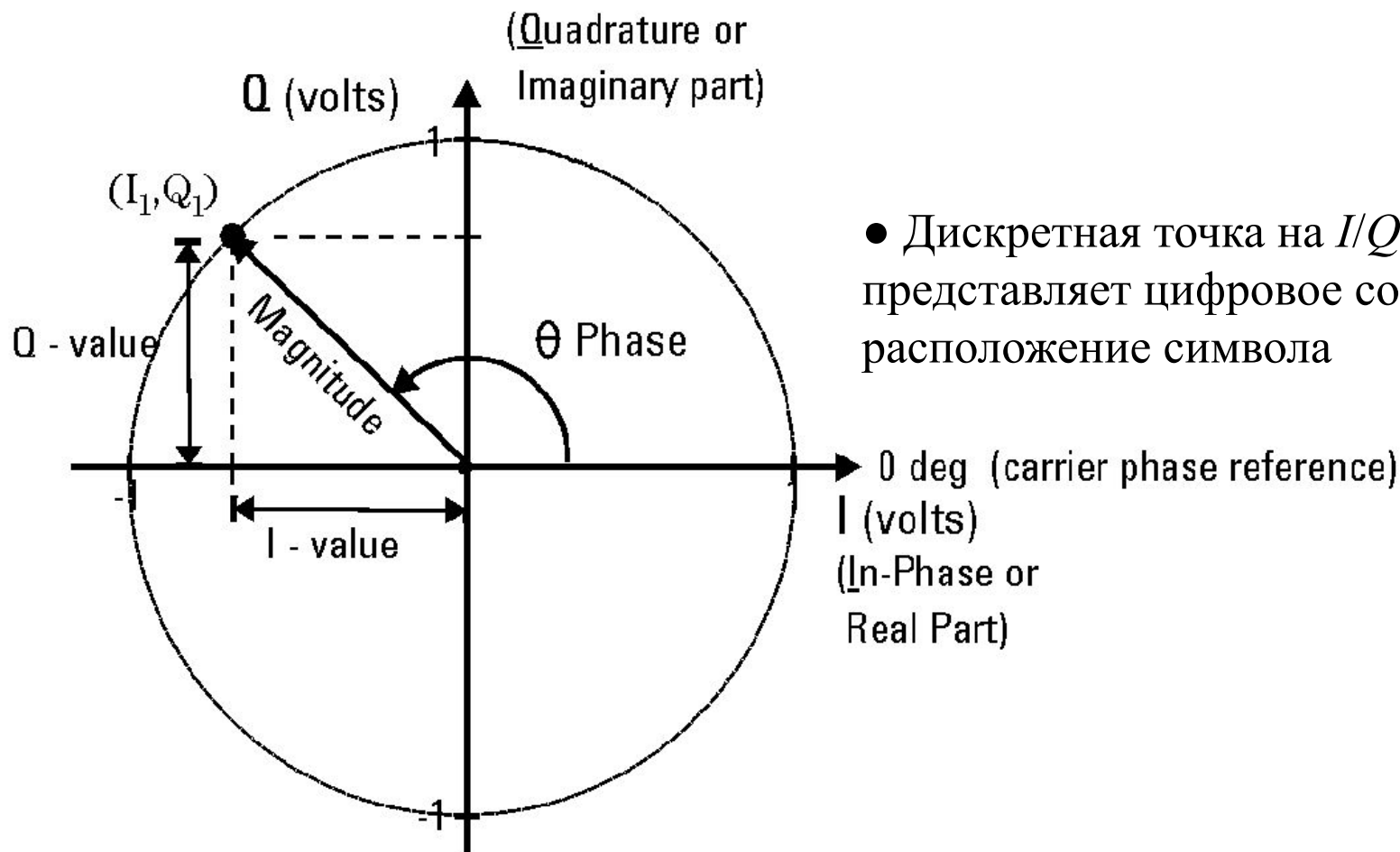


Квадратурная модуляция – основа семейства эффективных цифровых видов модуляции



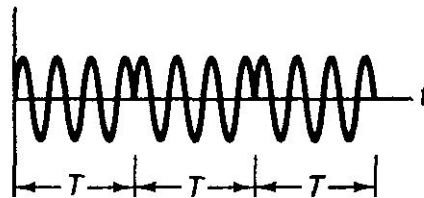
Квадратурный модулятор

I/Q диаграмма («созвездие») – наглядное представление особенностей конкретных видов модуляции

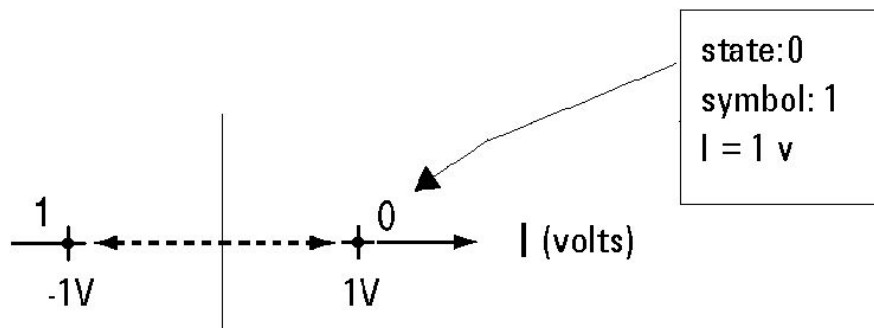


- Дискретная точка на I/Q диаграмме представляет цифровое состояние или расположение символа

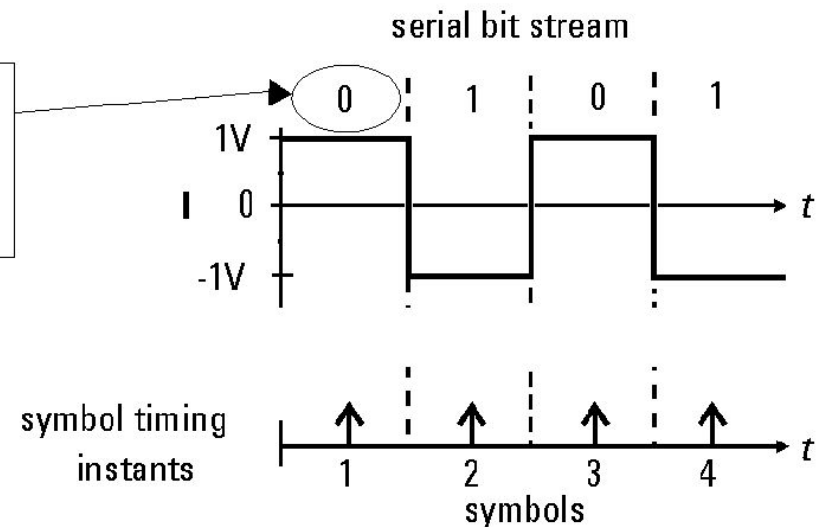
Фазовая манипуляция (PSK). Частный случай: двухуровневая фазовая манипуляция (Binary Phase Shift Keying (BPSK))



Constellation Diagram



Symbol Mapping to I Voltages



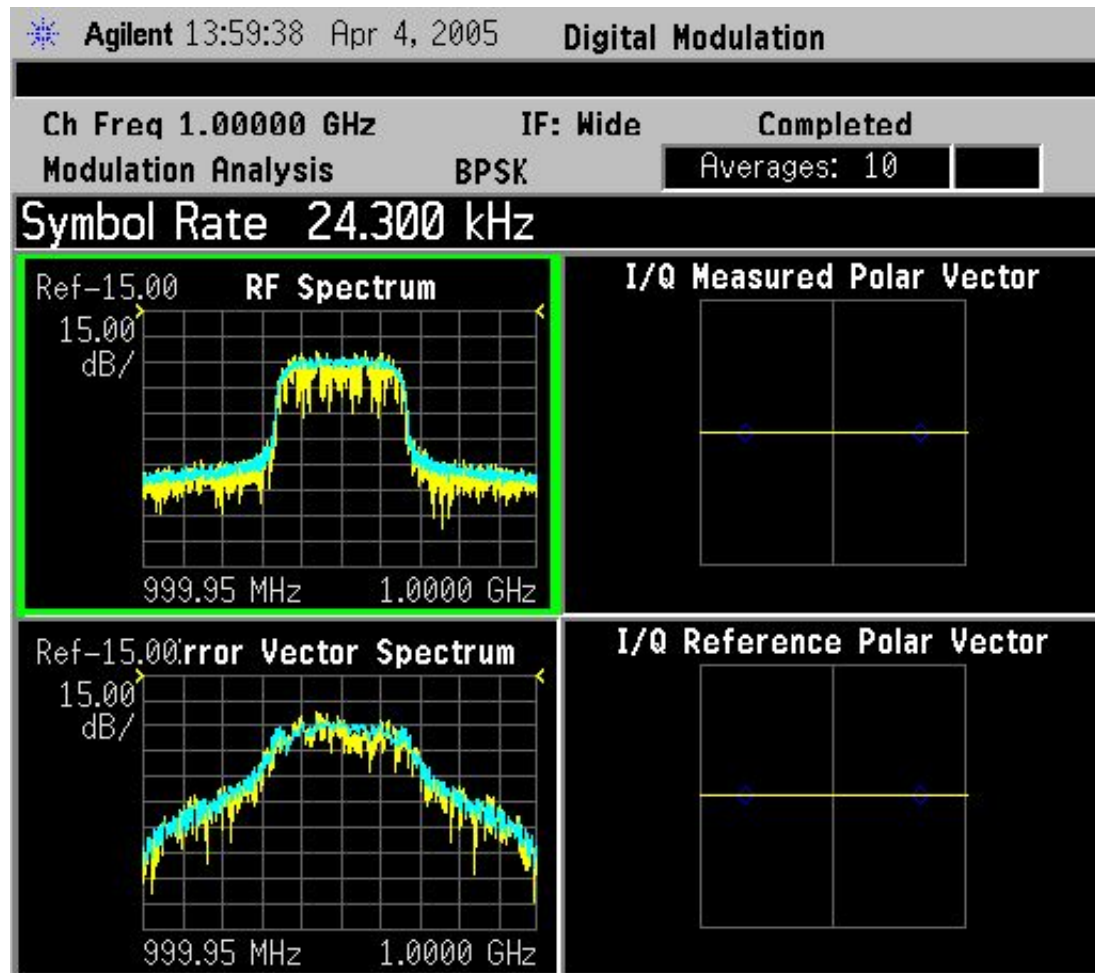
In binary phase shift keying (BPSK) there are two symbols, 0 and 1.

Both are on the I axes.

There is no Q axes component.

Двухуровневая фазовая манипуляция

Спектр и векторная диаграмма («созвездие») на экране спектроанализатора Agilent PSA E4440A

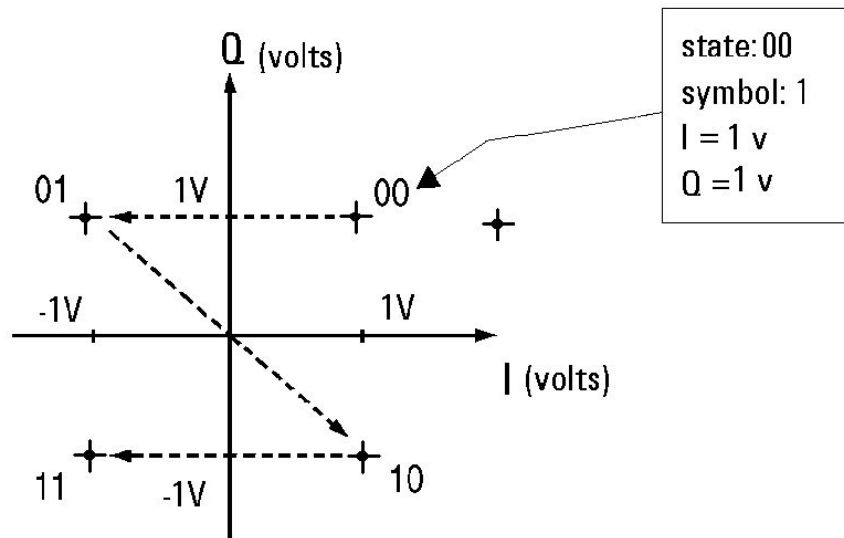


Двухуровневая фазовая манипуляция

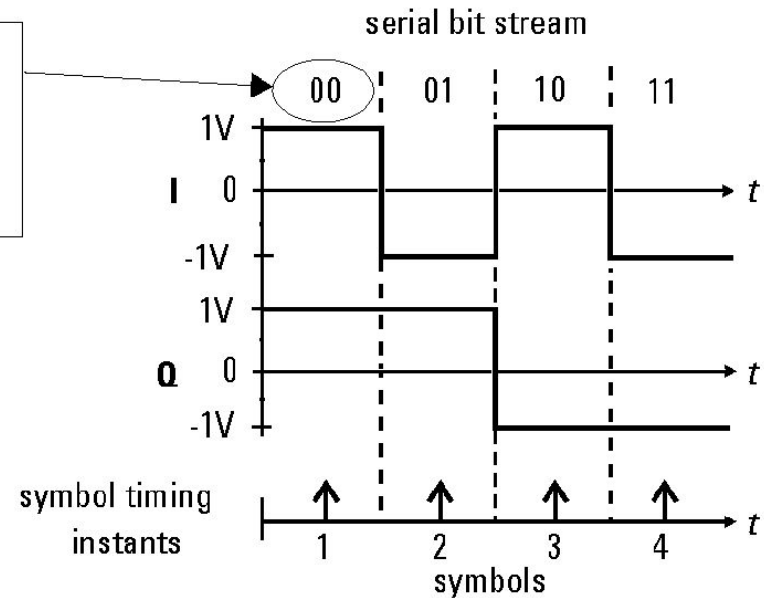
- Недостаток: неполное использование пропускной способности канала связи за счет наличия двух боковых полос, несущих идентичную информацию.
- Область использования: системы не требующие большой пропускной способности канала данных, либо не налагающие ограничений на ширину спектра, занимаемого в эфире. Например: телеметрия дальнего космоса, кабельные модемы.

Квадратурная фазовая манипуляция (QPSK)

Constellation Diagram



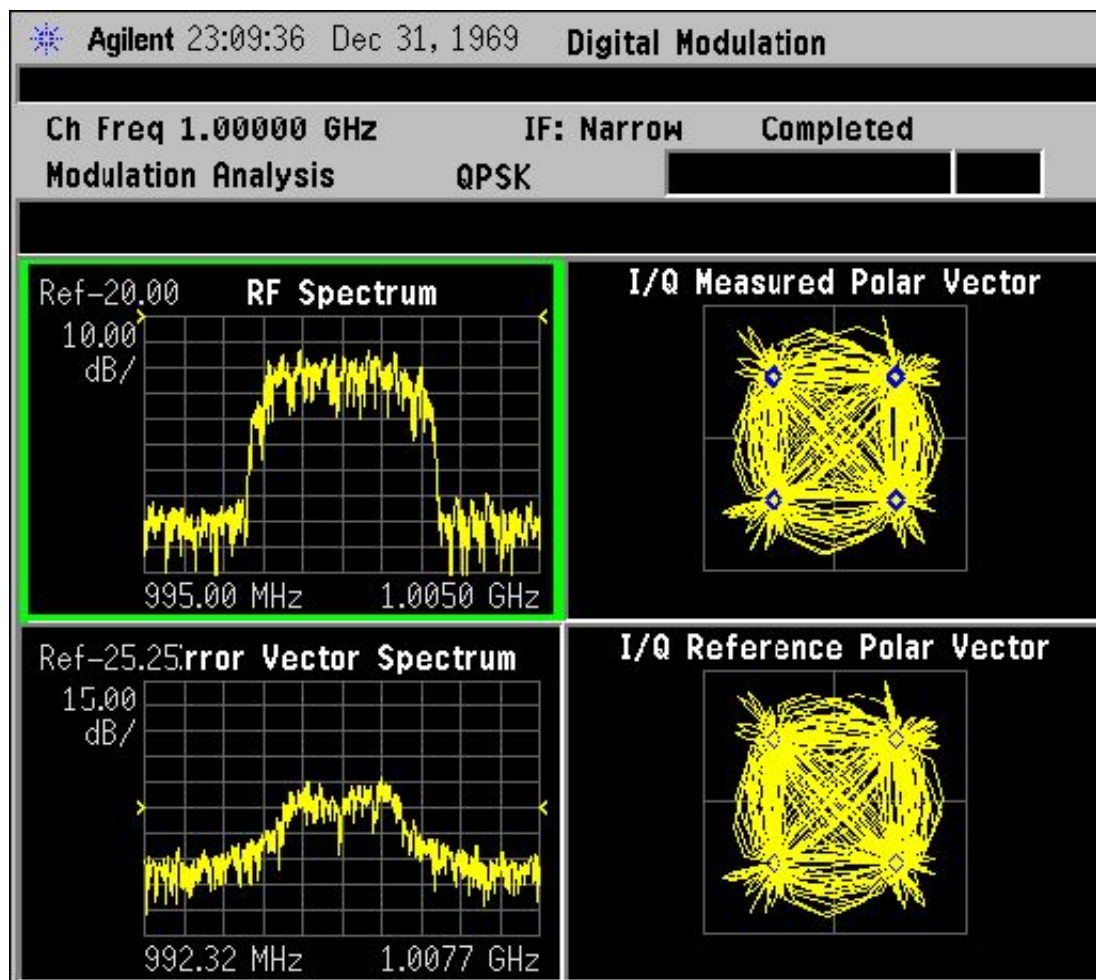
Symbol Mapping to IQ Voltages



Each position or state in the constellation diagram represents a specific bit pattern (symbol) and symbol time.

Квадратурная фазовая манипуляция

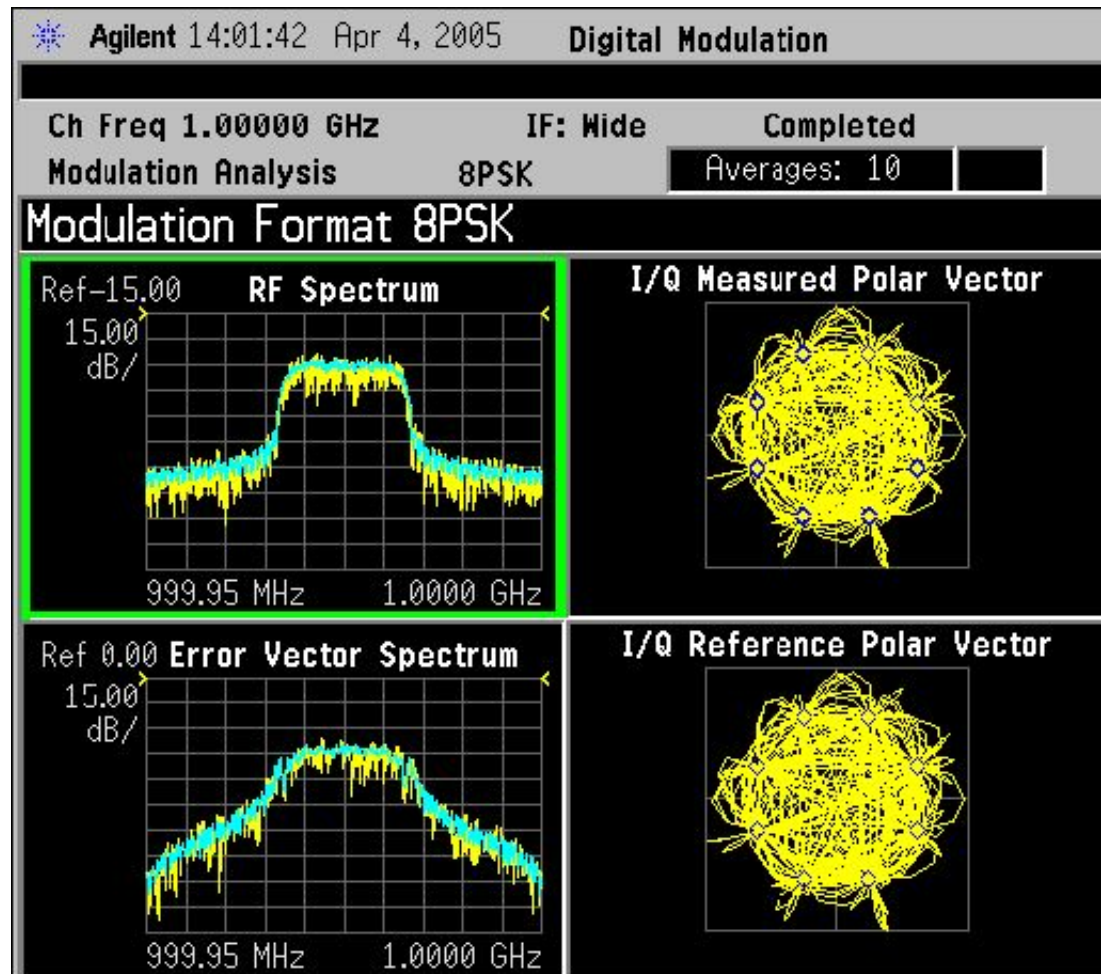
Спектр и векторная диаграмма («созвездие») на экране спектроанализатора Agilent PSA E4440A



Квадратурная фазовая манипуляция

- Область использования: спутниковые системы, сотовые системы CDMA, DVB-S (спутниковое цифровое телевизионное вещание), кабельные системы (обратное направление), кабельные модемы.

8PSK – фазовая манипуляция с 8-ю дискретными значениями фазы





8PSK

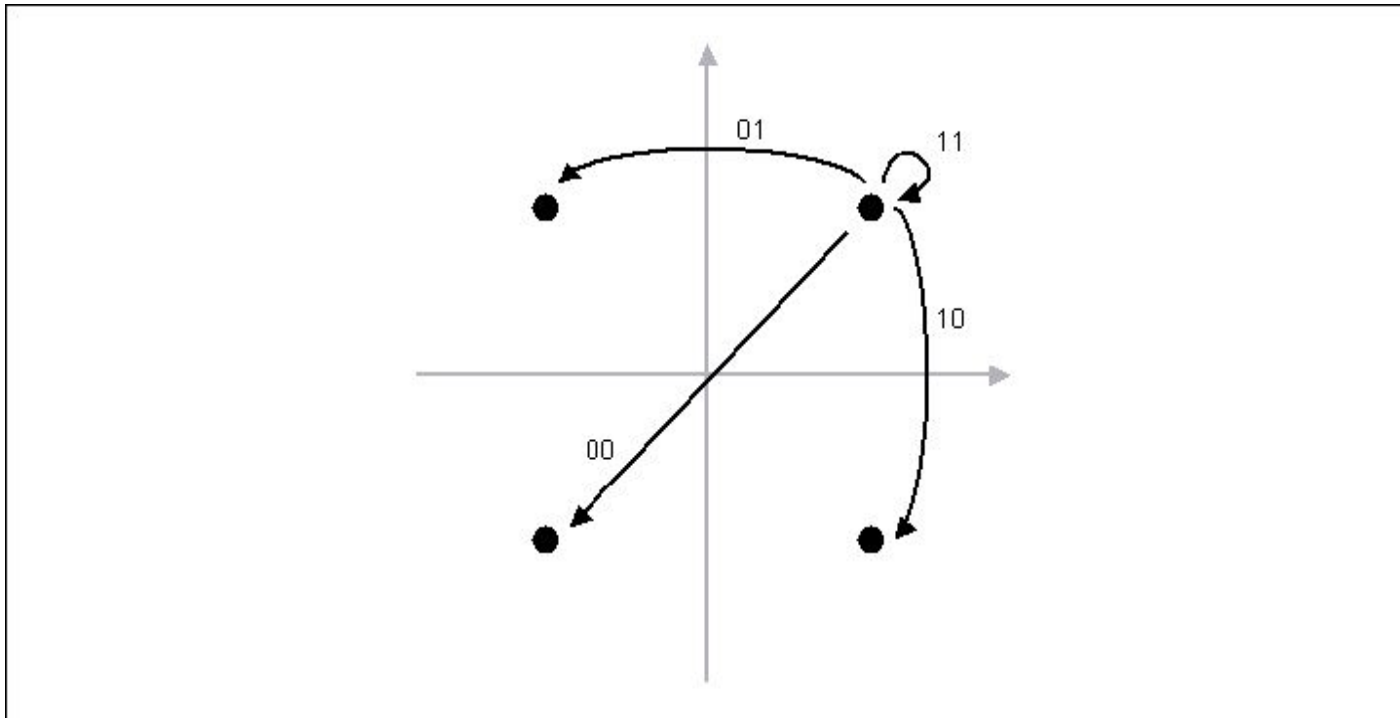
Области применения: спутниковые системы,
авиация

Дифференциальная фазовая манипуляция (DQPSK)

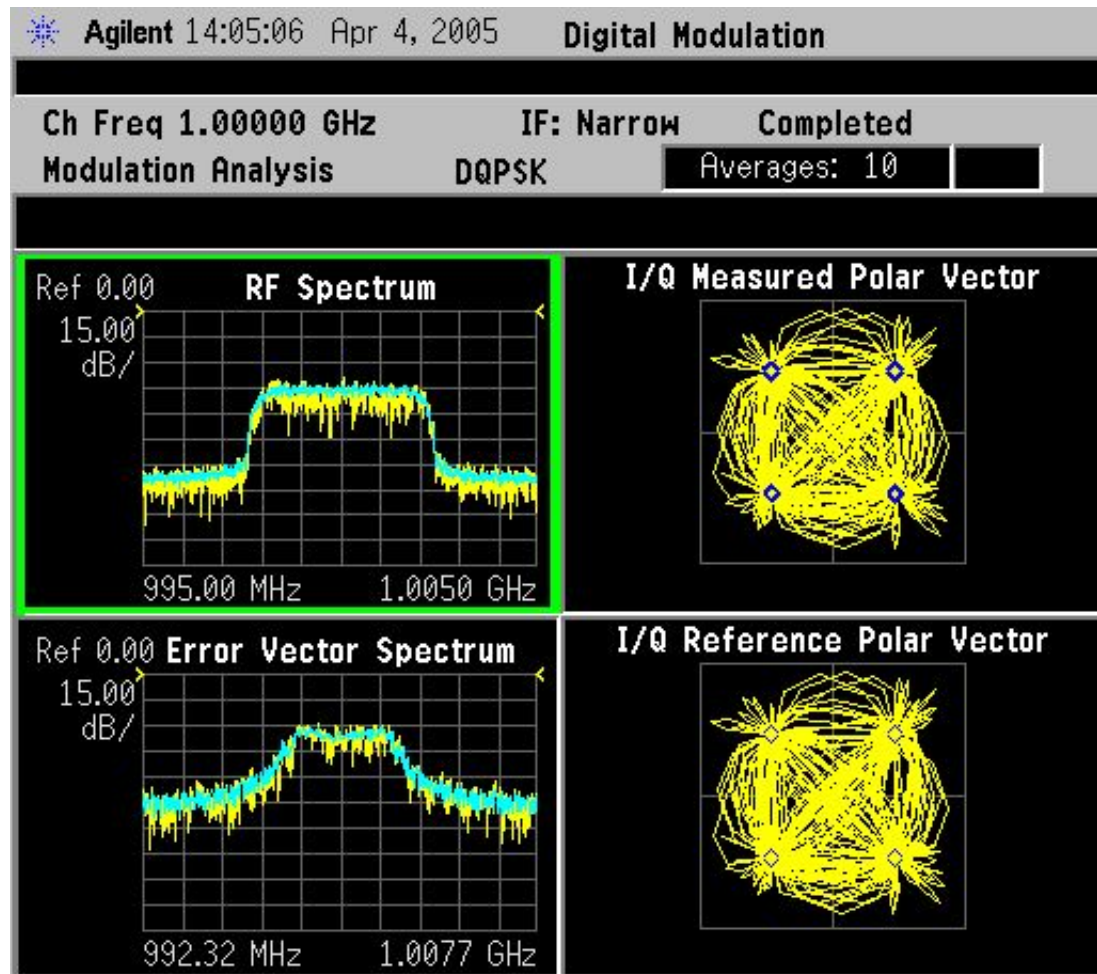
«Дифференциальная» – означает, что информация передается не абсолютным установившимся значением, а переходом между установившимися значениями.

В некоторых случаях накладываются ограничения на допустимые переходы. Например, при модуляции $\pi/4$ DQPSK траектория сигнала не проходит через начало координат.

Дифференциальная фазовая манипуляция

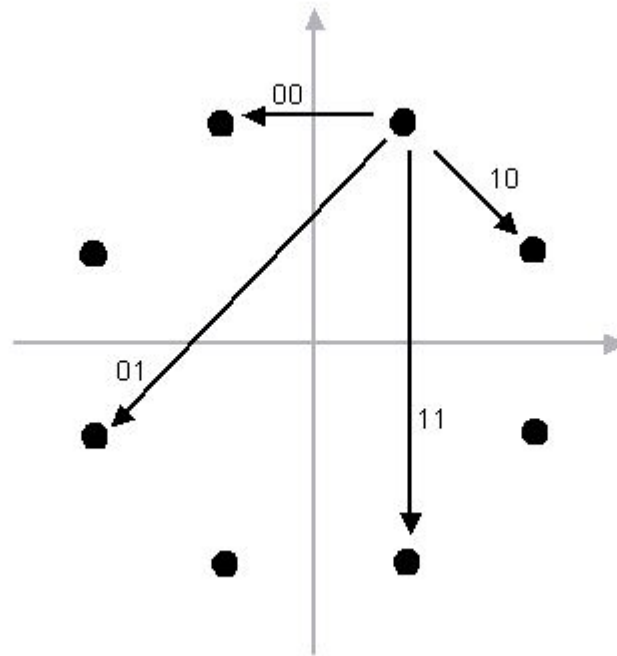


Дифференциальная фазовая манипуляция

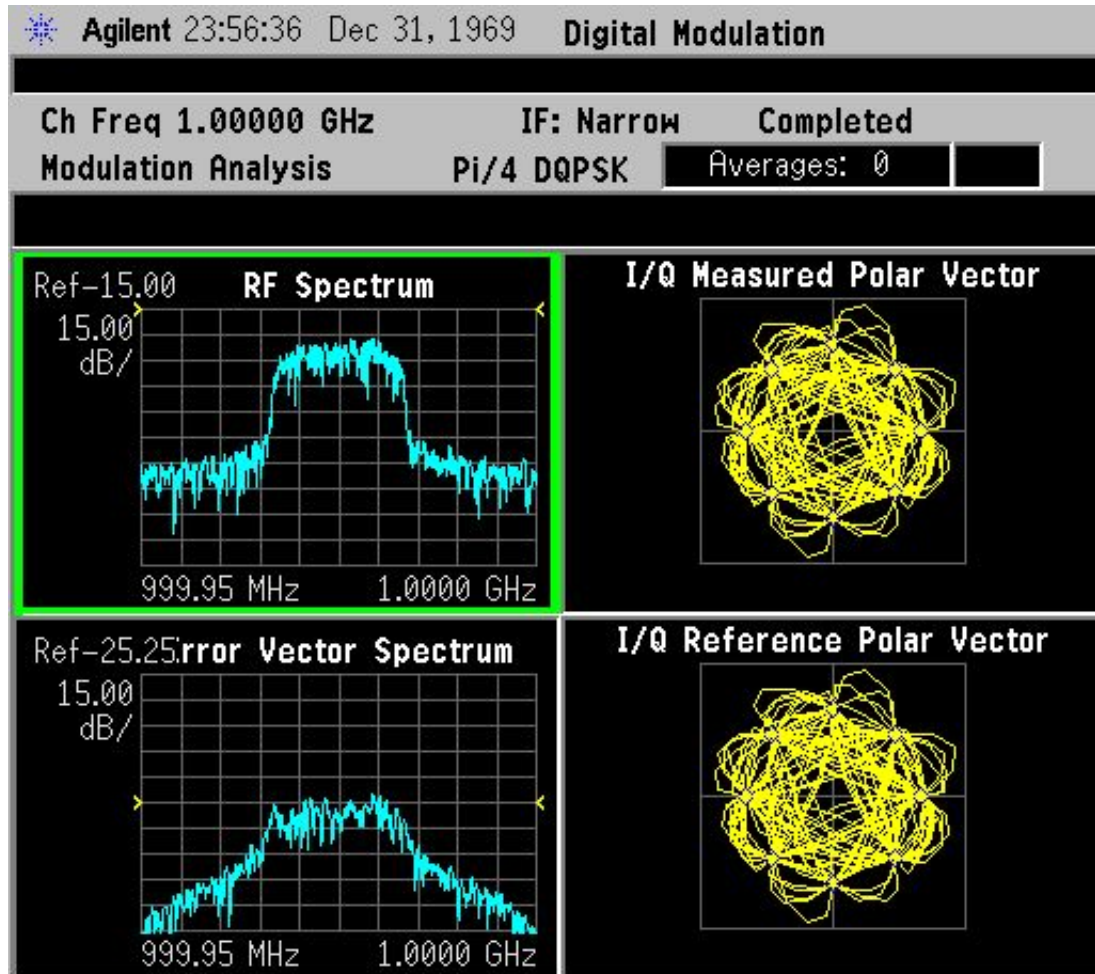


$\pi/4$ DQPSK – дифференциальная фазовая манипуляция с дискретом по фазе $\pi/4$

Диаграмма расположения битов



$\pi/4$ DQPSK – дифференциальная фазовая манипуляция с дискретом по фазе $\pi/4$



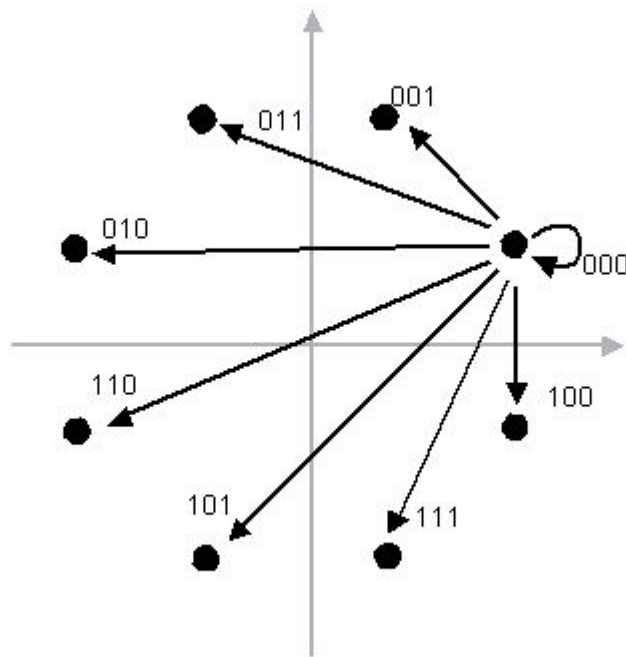
$\pi/4$ DQPSK – дифференциальная фазовая манипуляция с дискретом по фазе $\pi/4$

Широко используется в различных системах. Например:

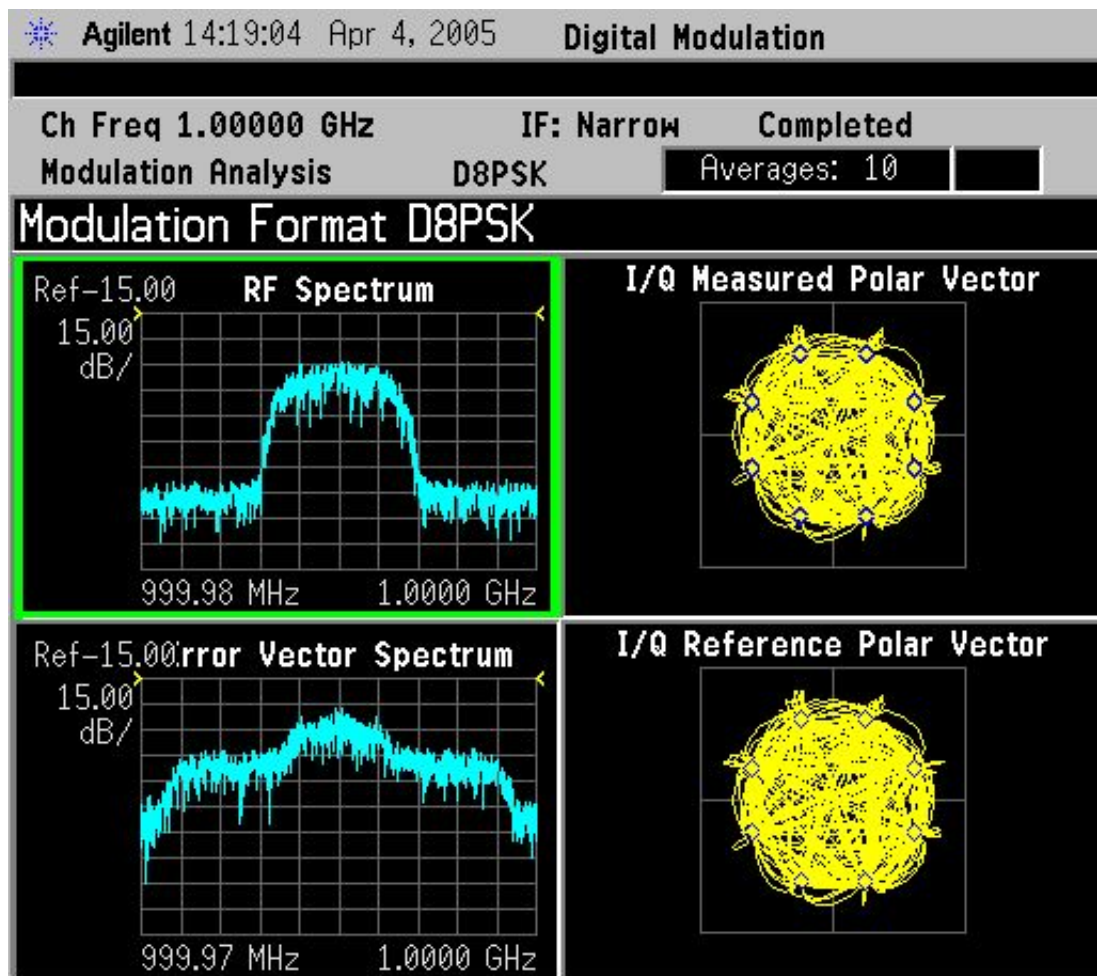
- Сотовые системы NADC- IS-54 (North American digital cellular) и PDC (Pacific Digital Cellular)
- Беспроводные системы PHS (personal handyphone system)
- Транковые системы TETRA (Trans European Trunked Radio)

D8PSK – дифференциальная фазовая манипуляция с 8-ю дискретными значениями фазы

Диаграмма расположения битов



D8PSK – дифференциальная фазовая манипуляция с 8-ю дискретными значениями фазы



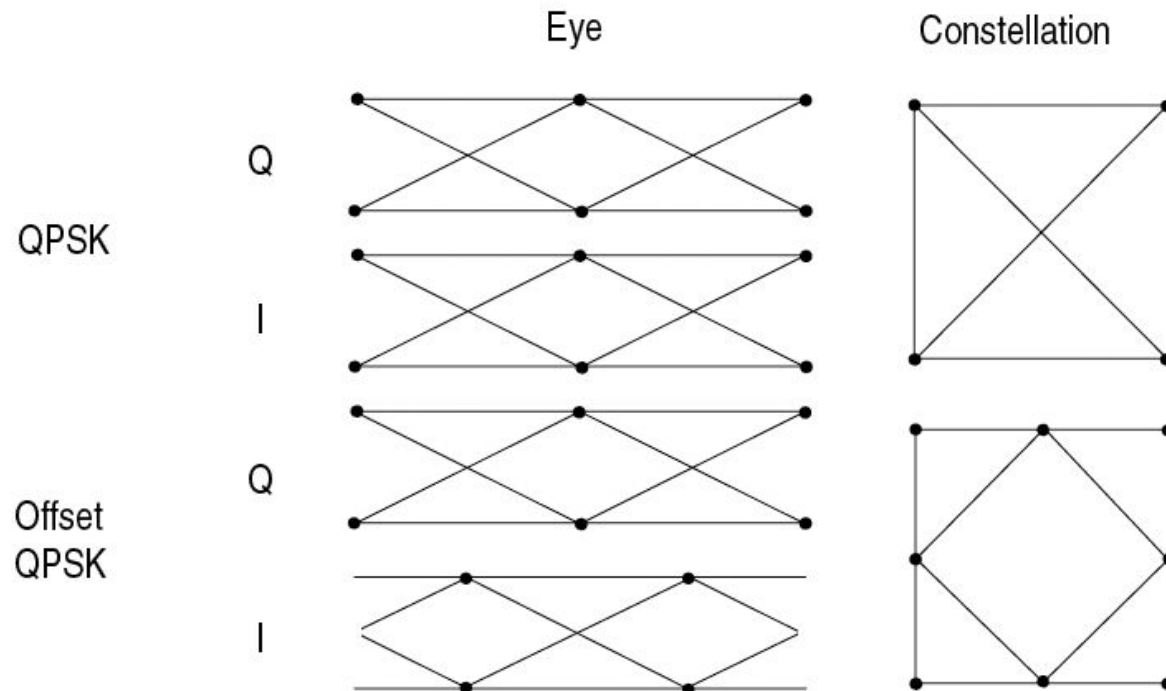
Семейство форматов модуляции без разрыва фазы (Continuous Phase Modulation (CPM))

Offset QPSK (OQPSK) – смещенная фазовая манипуляция.

Область использования: обратный канал (телефон → база) в сотовой системе CDMA.

В QPSK каналы I и Q переключаются одновременно. В OQPSK битовые потоки I и Q смещены на половину периода

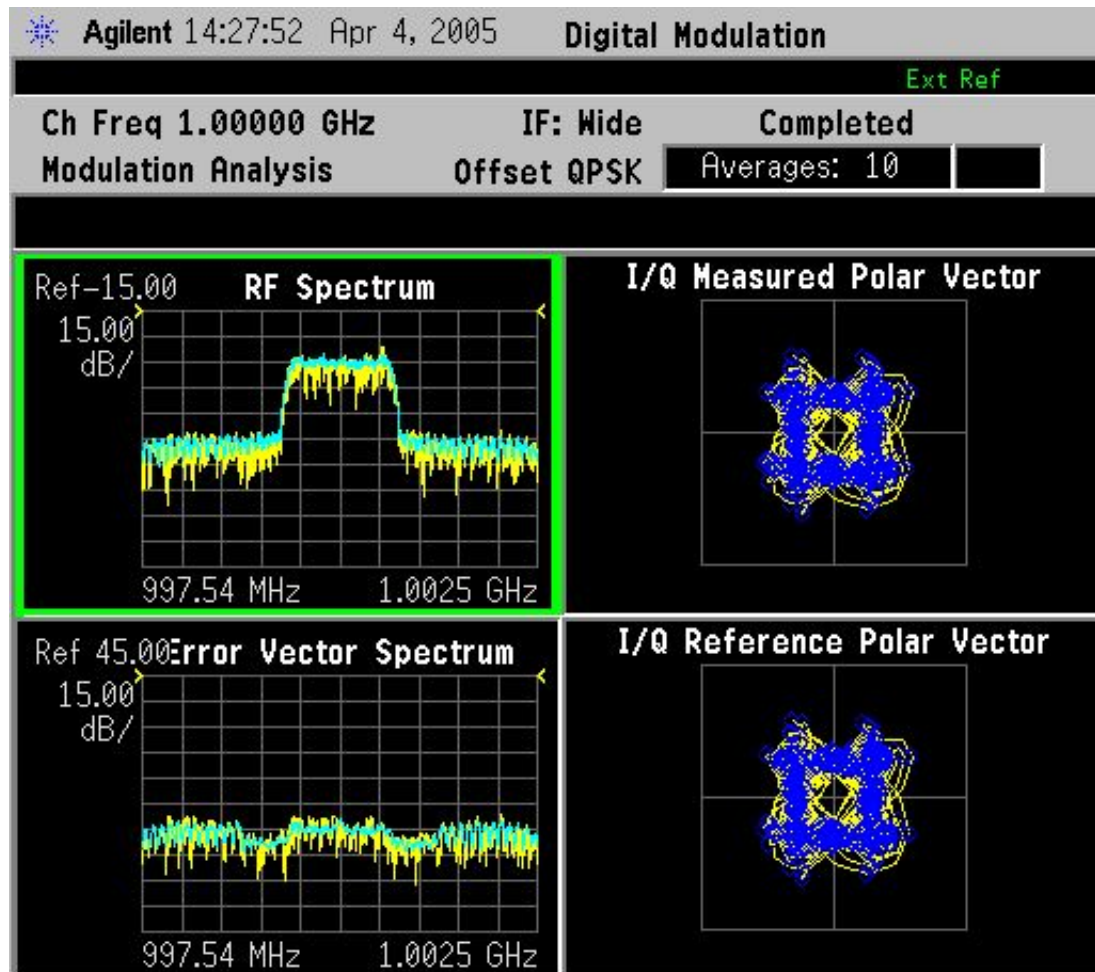
СИМВОЛ



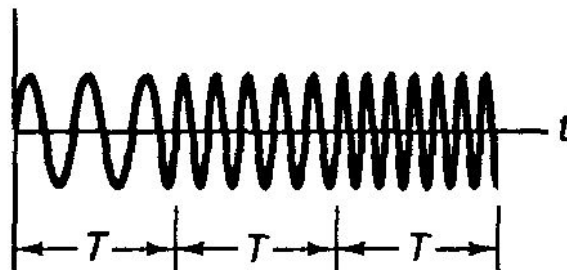
OQPSK

В любой момент времени только один из битовых потоков изменяет значение. При этом амплитуда сигнала не принимает нулевых значений (изменение амплитуды составляет около 3 дБ против 30...40 дБ у QPSK). Это позволяет применять менее линейный передатчик с большим КПД.

OQPSK. Диаграмма «созвездие»



Частотная манипуляция (FSK)

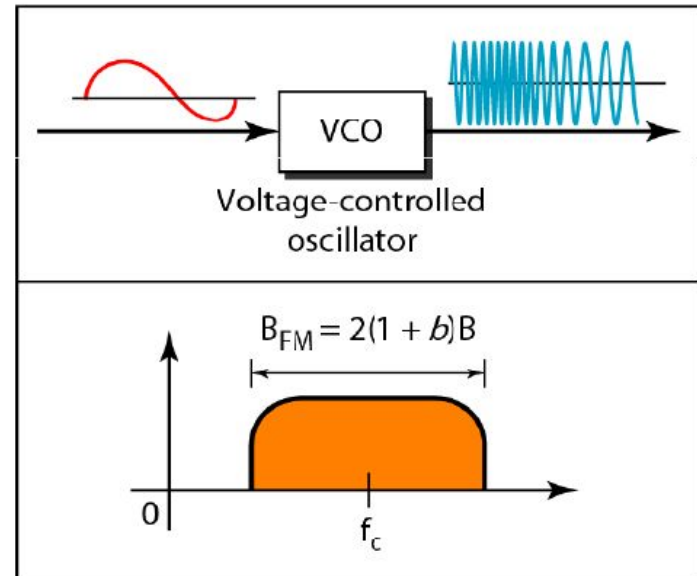
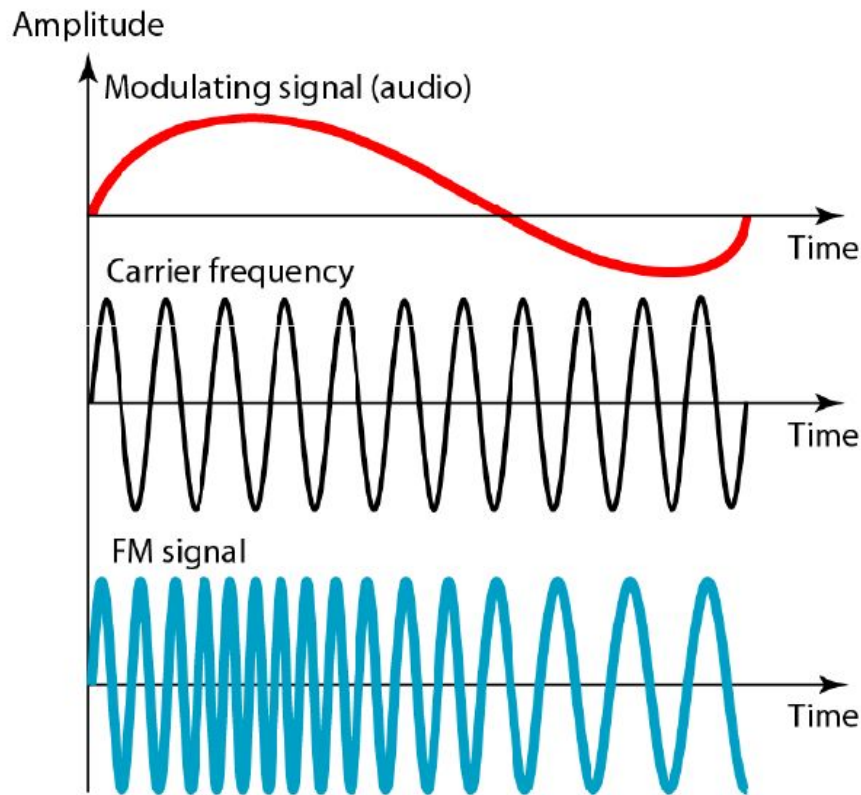


При FSK частота несущей изменяется как функция модулирующего сигнала (т.е. передаваемого).

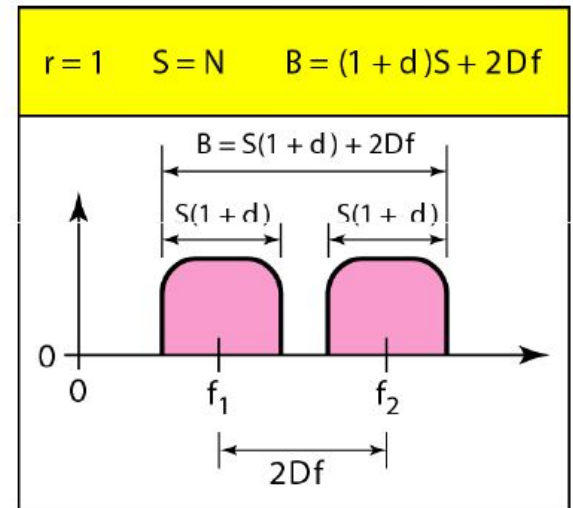
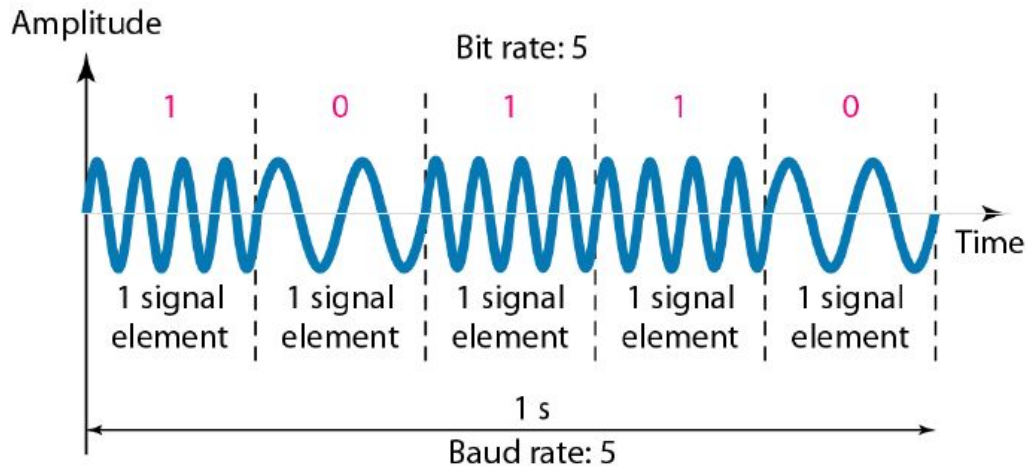
Область использования: беспроводные DECT (Digital Enhanced Cordless Telephone), CT2 (Cordless Telephone 2) и пейджинговые системы.

Частотная и фазовая модуляция связаны. Постоянное отклонение частоты на $+1$ Гц означает, что фаза постоянно увеличивается на 360° в секунду относительно сигнала с исходной частотой.

Частотная модуляция сигнала



Частотная модуляция цифрового сигнала



Ширина спектра ЧМ-сигнала

Выражение для ЧМ - сигнала :

$$v(t) = A \cos(\omega_c t + \beta \sin \omega_m t)$$

где β – индекс ЧМ – модуляции : $\beta = \frac{\Delta f}{f_m}$

Узкополосный ЧМ - сигнал : $\beta \leq 0.25$

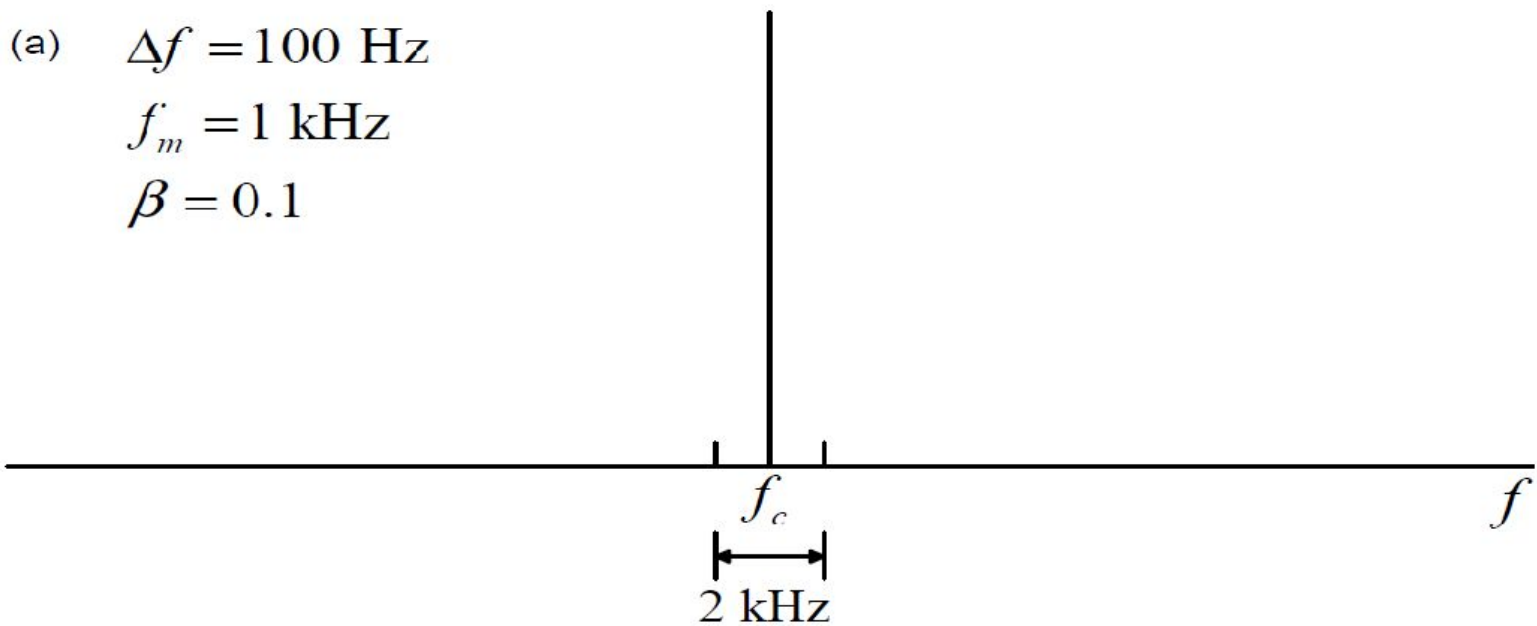
полоса _ частот : $B_T = 2f_m$

Широкополосный ЧМ - сигнал : $\beta \geq 50$

полоса _ частот : $B_T = 2\Delta f$

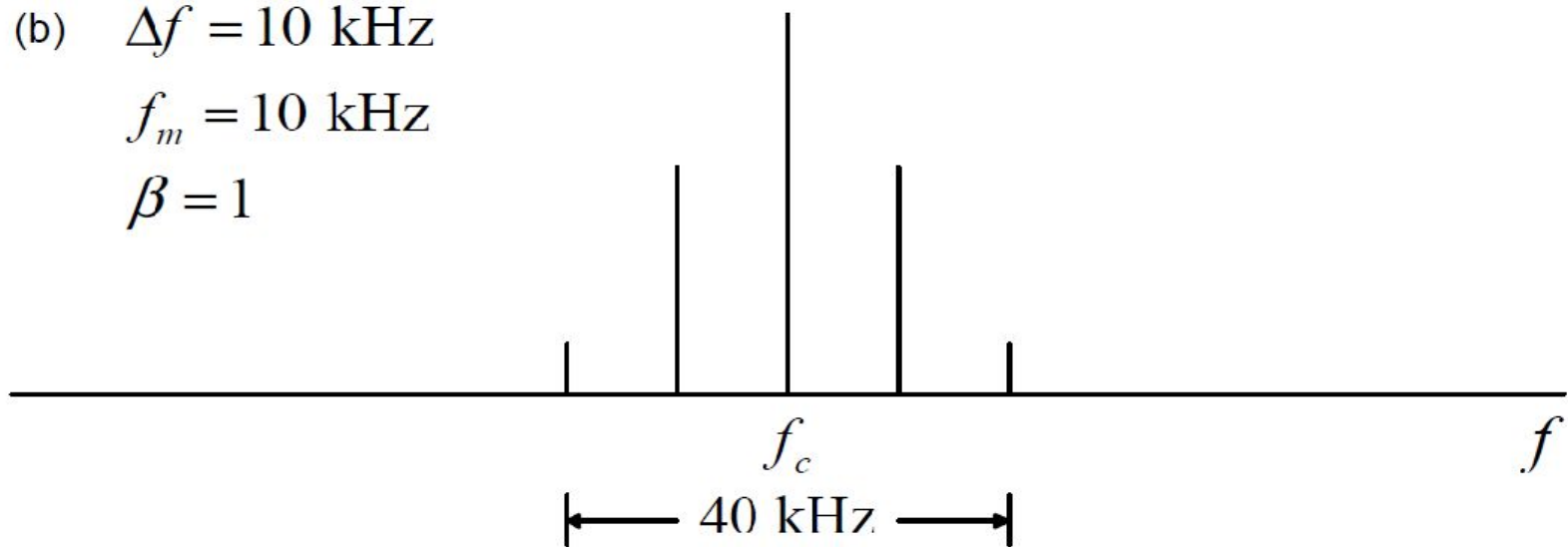
Ширина спектра ЧМ-сигнала

(a) $\Delta f = 100 \text{ Hz}$
 $f_m = 1 \text{ kHz}$
 $\beta = 0.1$



Ширина спектра ЧМ-сигнала

(b) $\Delta f = 10 \text{ kHz}$
 $f_m = 10 \text{ kHz}$
 $\beta = 1$

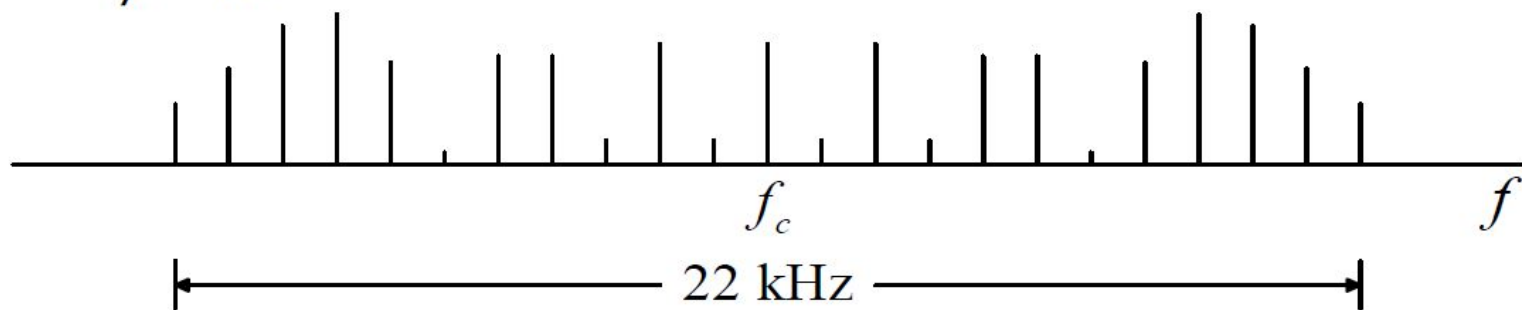


Ширина спектра ЧМ-сигнала

(c) $\Delta f = 10 \text{ kHz}$

$f_m = 1 \text{ kHz}$

$\beta = 10$



Ширина спектра ЧМ-сигнала

$$B_T = 2(1 + \beta)f_m$$

$$B_T = 2(\Delta f + f_m)$$

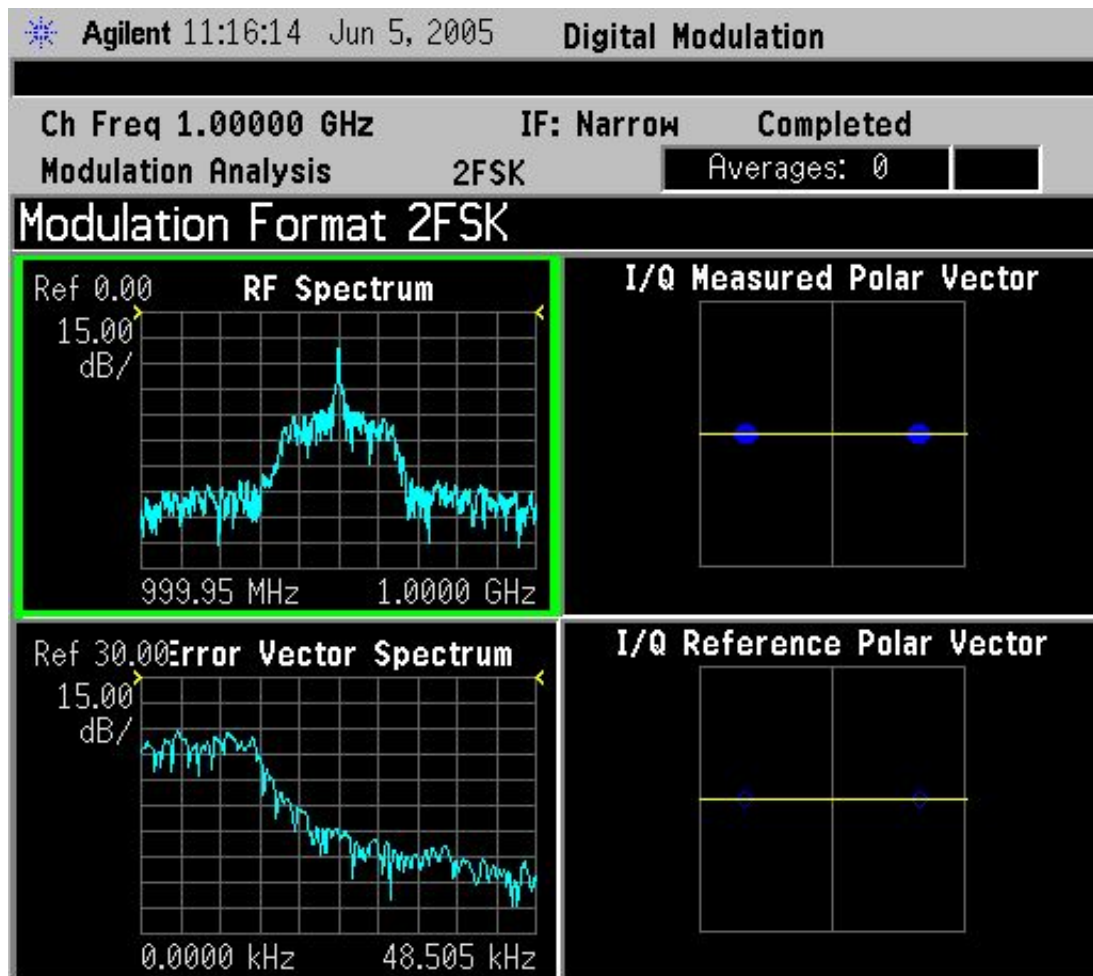
- With FM, the maximum frequency deviation is fixed, and the deviation ratio D is used to estimate bandwidth:

$$D = \text{minimum value of } \beta = \frac{\Delta f}{W}$$

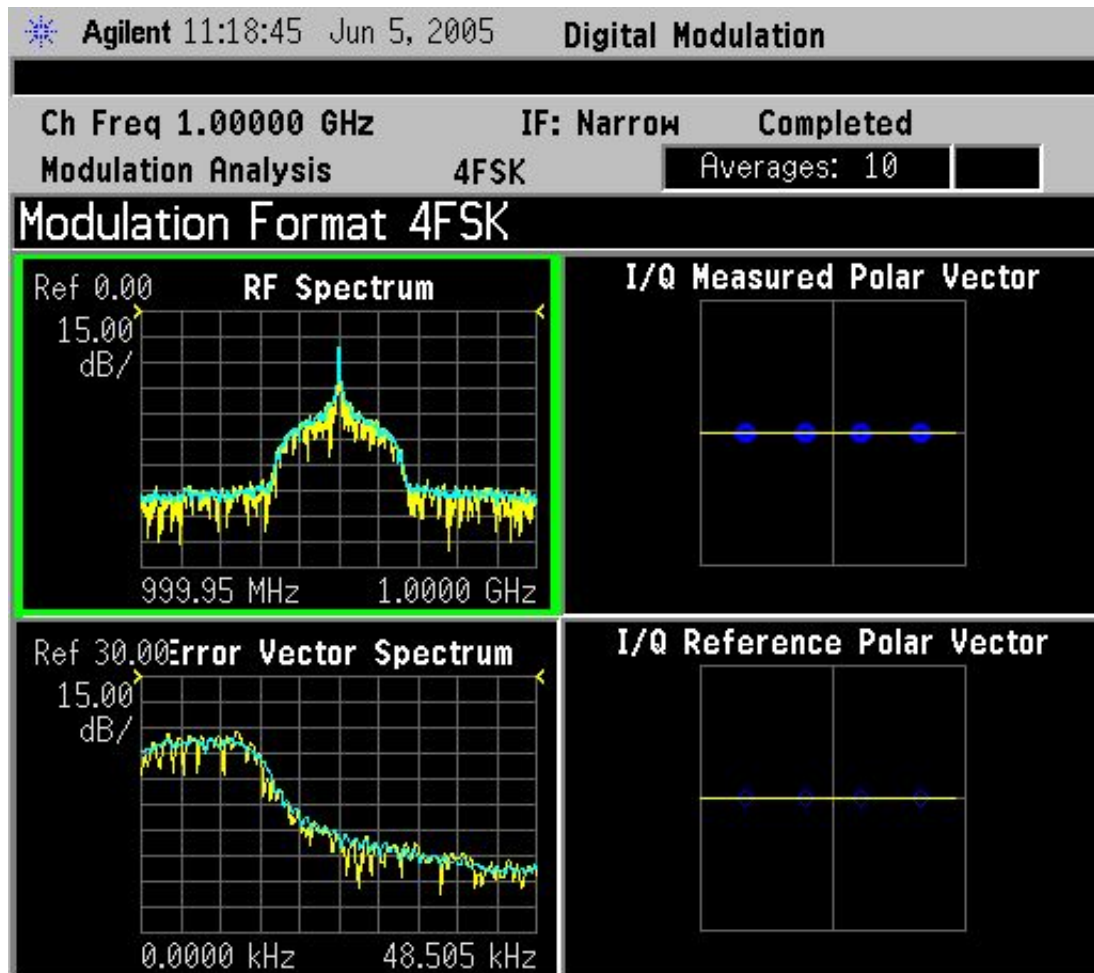
$$B_T = 2(1 + D)W = 2(\Delta f + W)$$

2FSK или BFSK (Binary FSK)

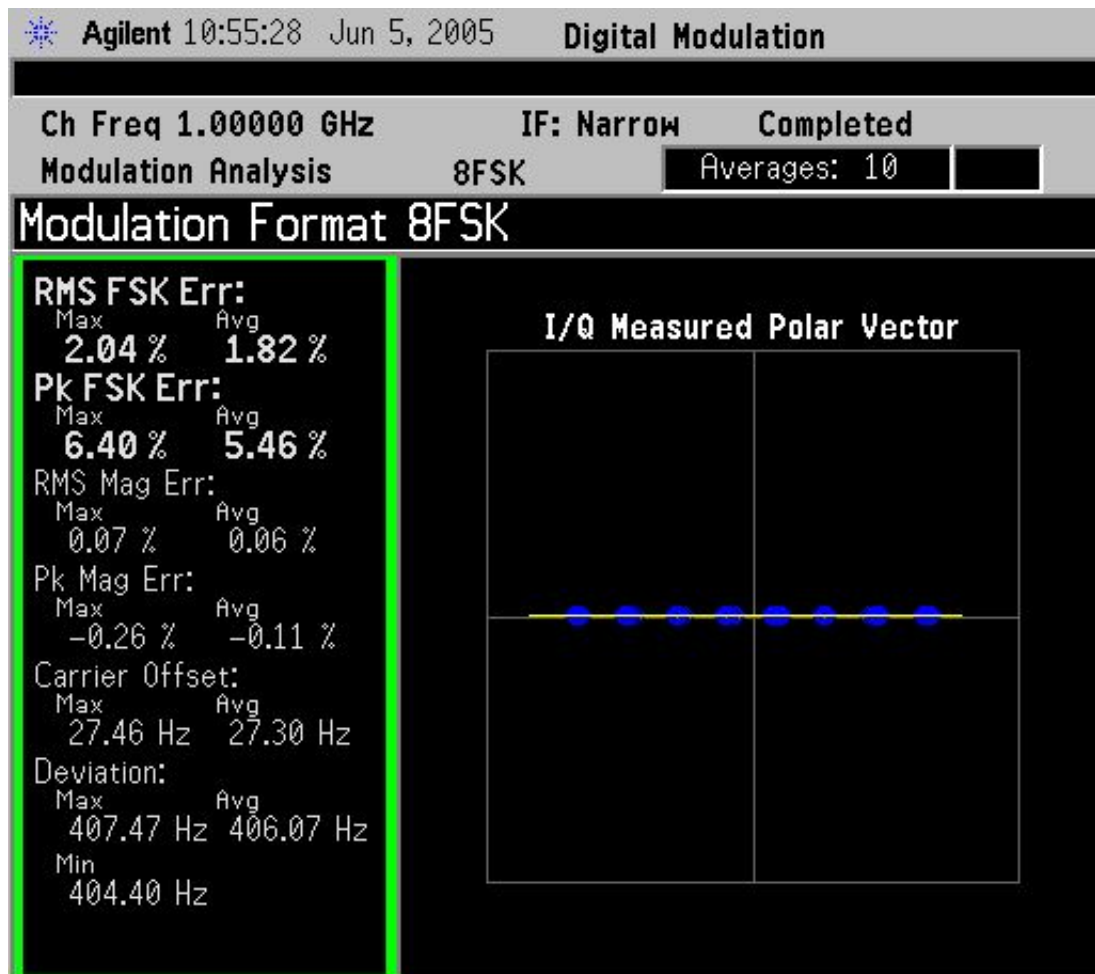
«1» представляется одной частотой и «0» другой.



4FSK



8FSK

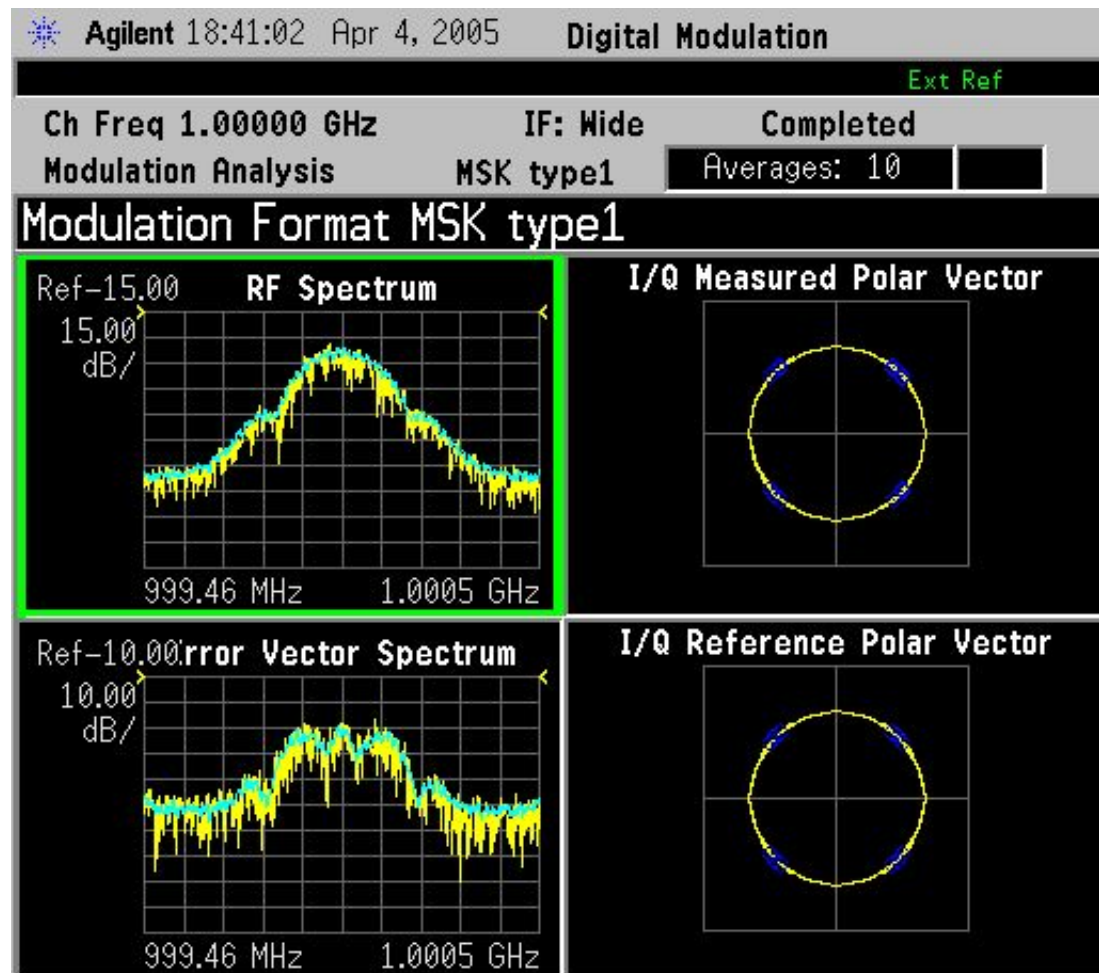


Манипуляция с минимальным СДВИГОМ

- Т.к. отклонение частоты означает опережение или отставание фазы, частотный сдвиг может детектироваться посредством регистрации фазы на каждом битовом интервале. Фазовый сдвиг на $(2N + 1) \pi/2$ рад. наиболее просто детектируется с использованием квадратурного детектора. Для четных символов переданные данные отражает полярность синфазного канала (I), а для нечетных – квадратурного (Q).
- Это уменьшает потребляемую мощность в мобильных передатчиках.
- Минимальный частотный сдвиг, который обеспечивает ортогональность между I и Q каналами, это такой, при котором происходит фазовый сдвиг на $\pm\pi/2$ рад. на символ. FSK с такой девиацией называется **MSK (Minimum Shift Keying)**. Размах девиации частоты при этом равен половине битрейта.
- Область использования: стандарт сотовой связи GSM (Global System for Mobile Communications). Фазовому сдвигу на $+90^\circ$ соответствует «1» и -90° соответствует «0».

- При FSK и MSK получается сигнал несущей с постоянной огибающей.
- На практике модулирующий сигнал фильтруется при помощи фильтра Гаусса. Фильтр Гаусса не имеет выбросов во временной области, которые могут расширять спектр в связи с увеличением пиковой девиации. MSK с фильтром Гаусса называется GMSK (Gaussian MSK).

GMSK



Выбор типа фильтра (альтернативы: фильтр Найквиста / фильтр Гаусса)

Agilent 18:41:15 Apr 4, 2005 Digital Modulation

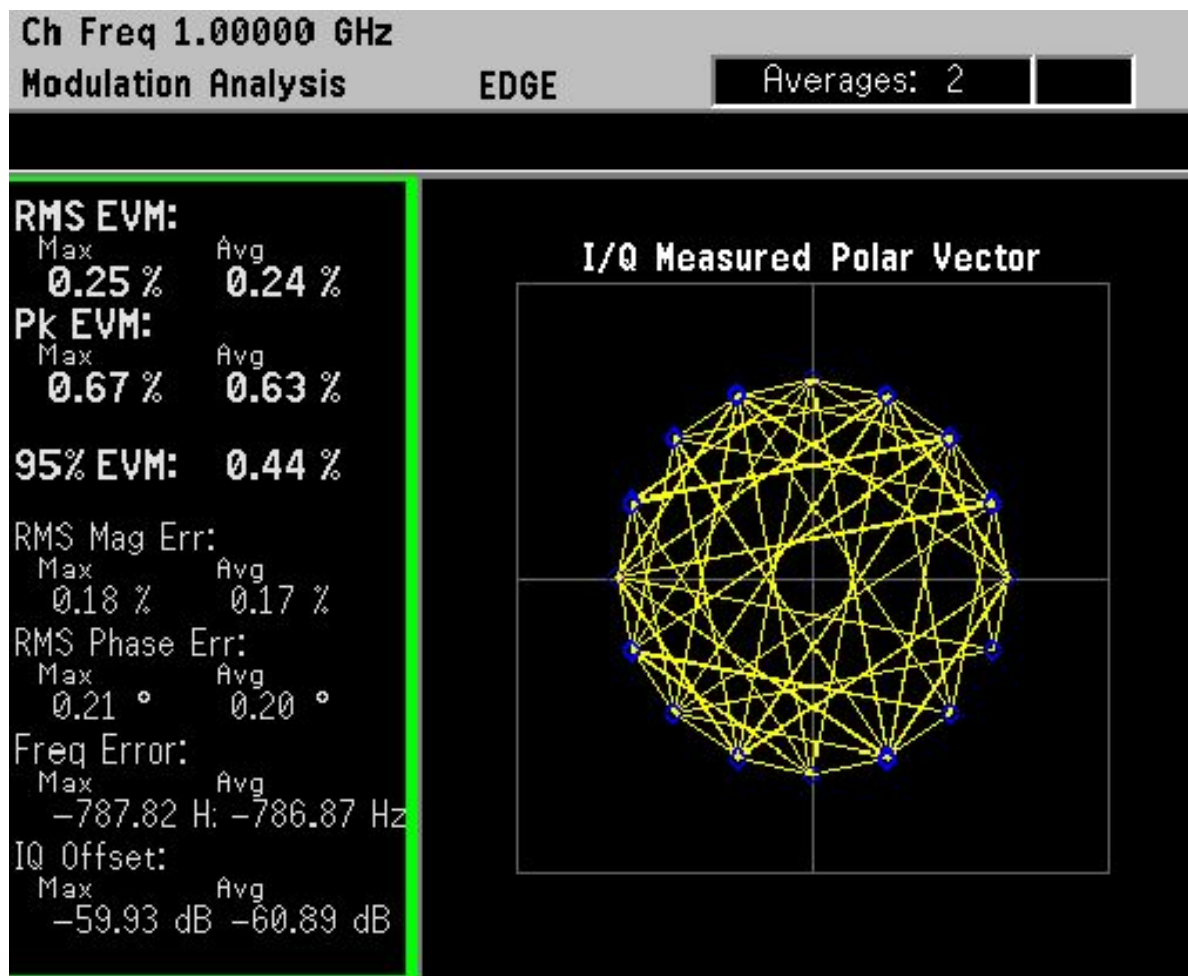
Ext Ref

Ch Freq 1.00000 GHz IF: Wide Completed
Modulation Analysis MSK type1 Averages: 10

Modulation Format MSK type1

Modulation Format	MSK type1	Average	On
Meas Filter	No Filter	Avg Number	10
Ref Filter	Gaussian	Average Mode	Repeat
Alpha/BT	0.30	Trace Avg Type	RMS
Symbol Rate	270.833 kHz	FFT Window Type	Flat Top
Meas Interval	148 symbols	Trig Source	Free Run
IF Band Width	1.083 MHz	Carrier Lock	Normal
IF Band Width Mode	Auto	Sync	None
EQ Filter	Off	Burst Search Th.	-20.00 dB
EQ Filter Length	5	Search Length	6.000000 ms
EQ Convergence	1.000000	Sync Word Length	26 symbols
EQ Hold	Off	Sync Offset	61 symbols
Sync Ptrn	0970897		

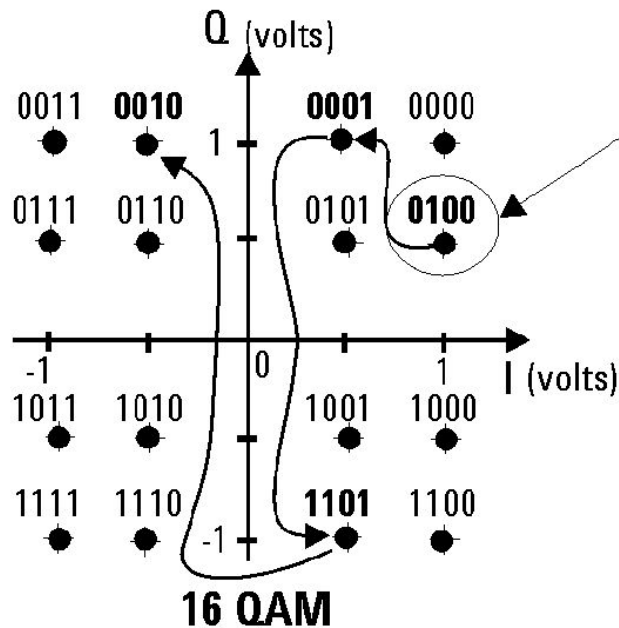
Модуляция Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)



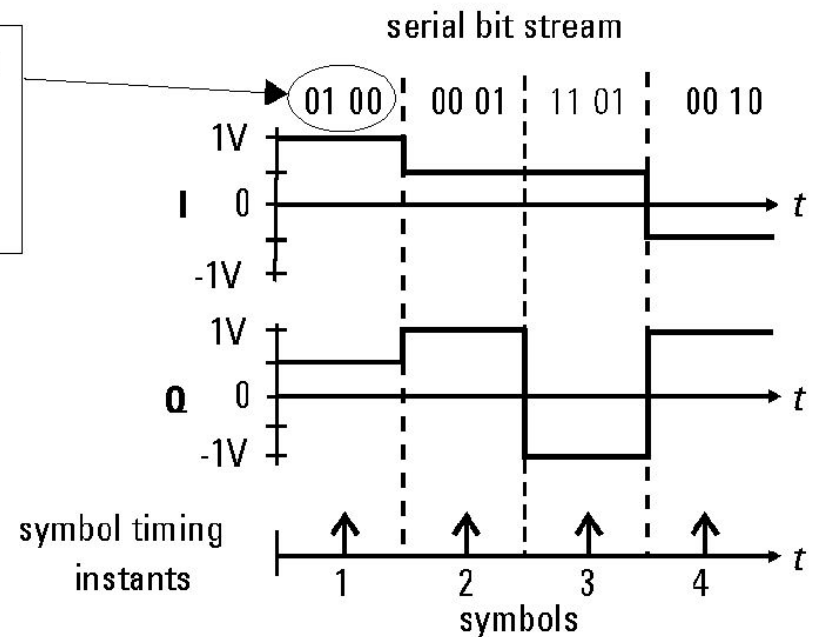
Квадратурная амплитудная модуляция (QAM)

Частный случай: 16 QAM (число соответствует количеству используемых позиций на I/Q плоскости)

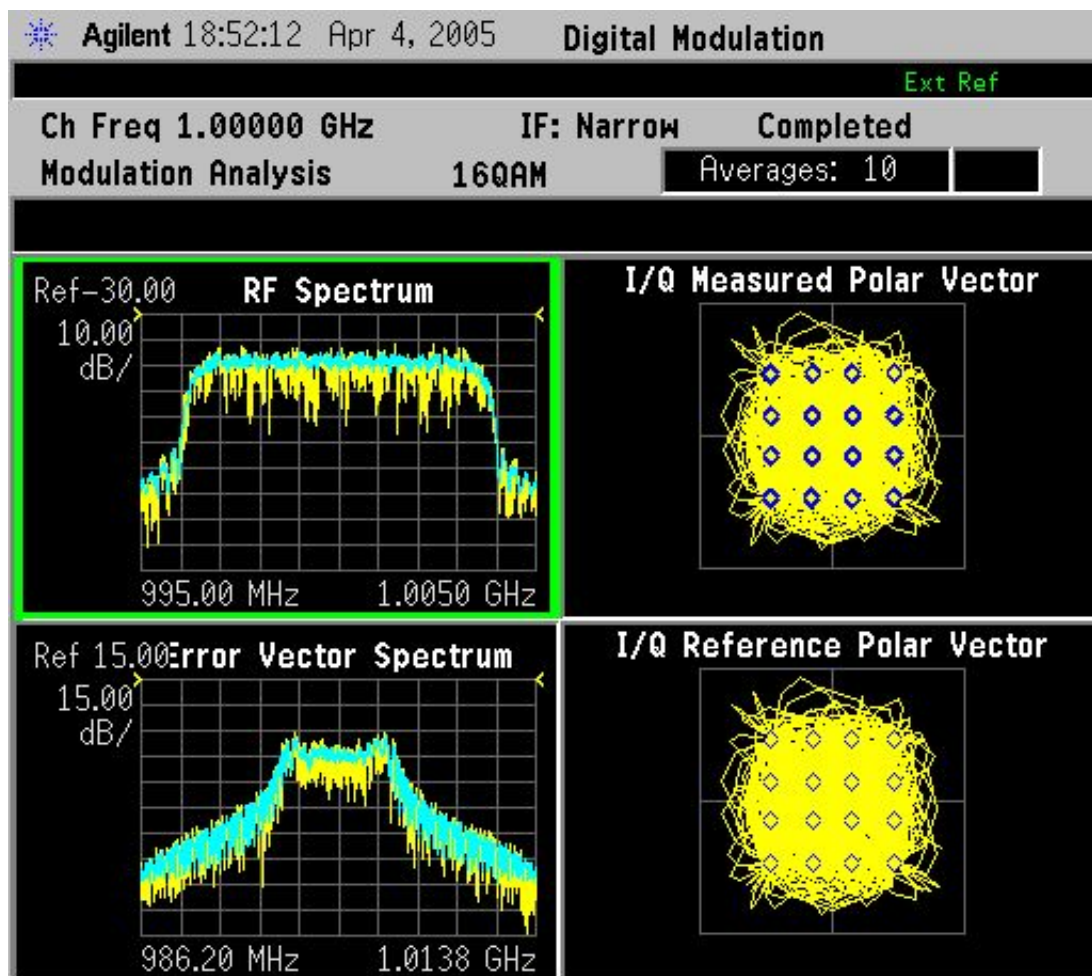
Constellation Diagram



Symbol Mapping to IQ Voltages



Квадратурная амплитудная модуляция 16 QAM на экране Agilent PSA E4440A

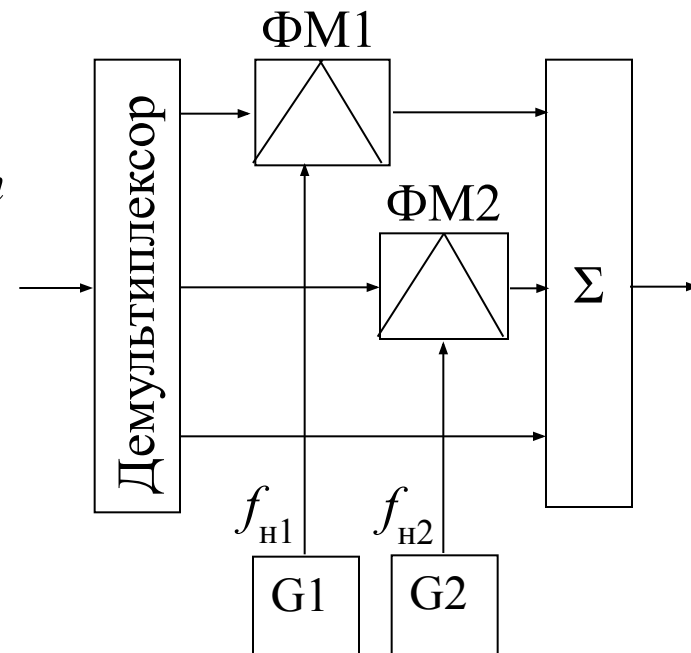


QAM. Области применения

- Области применения QAM модуляции:
DVB-C (Digital Video Broadcasting—Cable)
и модемы.

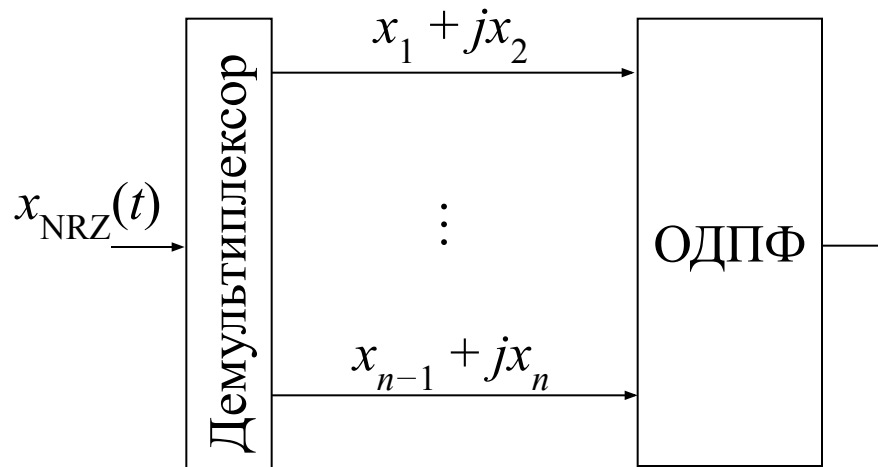
Модуляция с разделением по ортогональным частотам (Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM))

- Цифровой поток распараллеливается на n потоков демультиплексором.
- Каждый из получившихся потоков подается на модулятор отдельной несущей. При этом скорость передачи 1 символа уменьшается в n раз, а время передачи увеличивается в n раз.
- Совокупность модулированных сигналов поступает на сумматор на выходе.
- Частоты несущих выбираются так, чтобы они были ортогональны на заданном интервале времени.
- Формат модуляции несущих может быть различен, но обыкновенно используется QPSK. В этом случае число битов, переданных каждым OFDM-символом $2n$.



OFDM. Практическая реализация

Число ортогональных несущих может выбираться очень большим (до нескольких сотен или тысяч). Поэтому практически OFDM реализуется иначе, чем представлено на предыдущем слайде.



ОДПФ – обратное дискретное преобразование Фурье

OFDM. Устойчивость к многолучевому распространению

Особенность OFDM – устойчивость к многолучевости, возникающей при отражении сигнала от земной поверхности, зданий и при одновременной работе на одной частоте нескольких передатчиков (одночастотная сеть – Single Frequency Network).

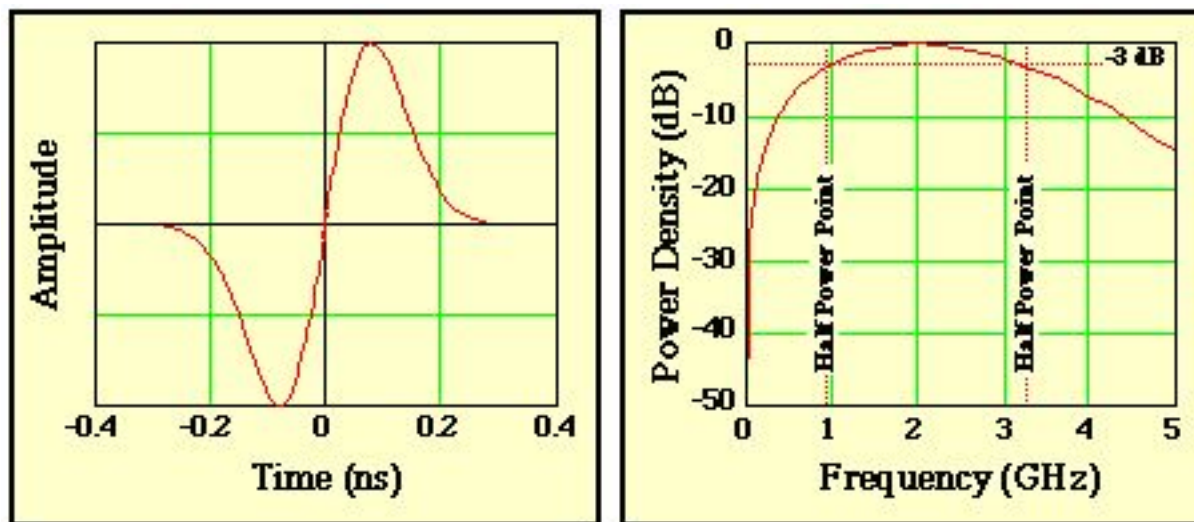
Такая устойчивость связана с тем, что интерференционные минимумы поля возникают только на отдельных частотах и способны поразить только некоторые из битов в OFDM-символе. При использовании помехоустойчивого кодирования такие ошибки корректируемы (до определенного предела).

OFDM. Область использования

Высококачественное радиовещание (Digital Audio Broadcasting) в дециметровом диапазоне длин волн. Наземное вещание в диапазоне 174...252 МГц (DAB-T), спутниковое в диапазоне 1452...1492 МГц (DAB-S), кабельное вещание (DAB-C).

Время-импульсная модуляция (Time Hopping Impulse Modulation)

Несущий импульс

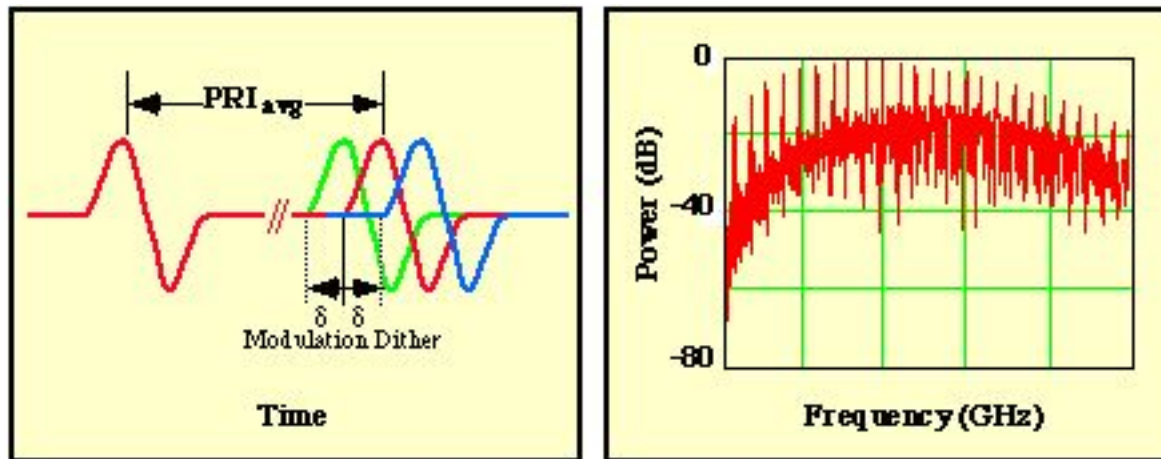


Первая производная импульса Гаусса.

Слева форма импульса, справа – спектр

Время-импульсная модуляция

Собственно модуляция

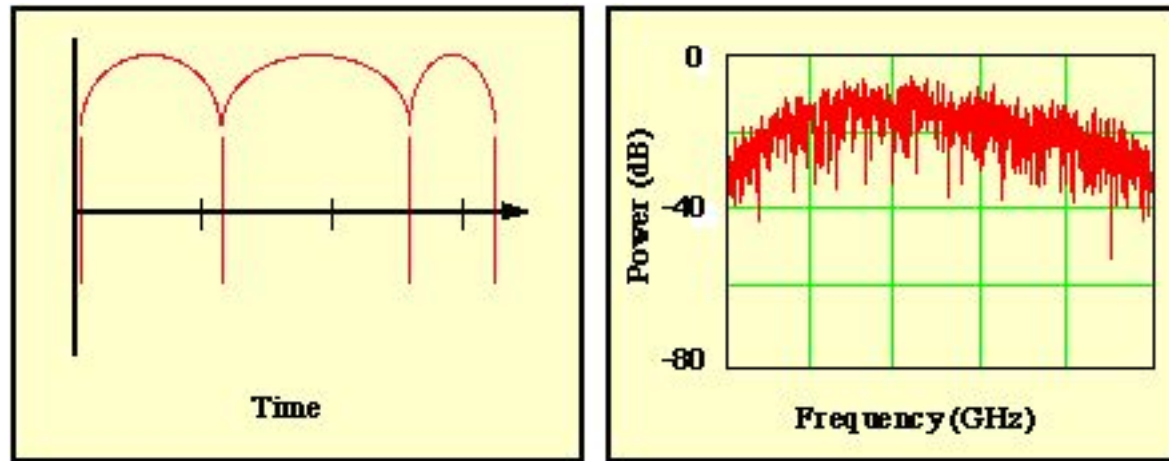


Слева – форма импульсов, справа - спектр

Время-импульсная модуляция

Кодирование псевдослучайным шумом.

Сглаживание амплитудного спектра и
разделение абонентов



Слева формы импульсов, справа – спектр