

Министерство образования и науки Российской Федерации

Казанский Национальный Исследовательский
Технический Университет

Кафедра радиоэлектроники и информационно-измерительной техники

Теория радиотехнических сигналов

**Цифровая модуляция.
Исследование энергетической эффективности
различных видов модуляции**

*Методические указания к лабораторным работам по дисциплине
«Теория радиотехнических сигналов».*

Сагдиев Р.К.

Казань 2013 г.

В настоящее время подавляющее большинство систем радиосвязи и радиовещания являются цифровыми. Те системы, которые в данный момент являются в основном аналоговыми (например, телевидение и радиовещание), чаще всего имеют четкую, закреплённую нормативными документами тенденцию перехода на цифровую основу.

В качестве примеров систем цифровой связи можно привести следующие: сотовая связь (GSM, CDMA, системы 3-го поколения (CDMA-2000, UMTS(WCDMA), мобильный интернет (GPRS и др.), беспроводные локальные сети(IEEE 802.11 Wi-Fi), беспроводные сети городского покрытия(IEEE 802.16 WiMax), системы подвижной связи(TETRA и др.). В России планируется развертывание вещательных сетей цифрового телевидения(DVB) и радиовещания(Eureka). Цифровая радиосвязь используется в навигации, спутниковом вещании, телефонии(DECT), специальных задачах.

Достоверность передачи информации в цифровых системах характеризуется статистической величиной – **вероятностью ошибки на бит (BER – Bit Error Rate)**. BER является вероятностью ошибочного приема при передаче одного бита информации, усредненной для статистически большого объема передаваемой информации.

Теоретически, величиной, характеризующей эффективность цифровой системы связи, является пропускная способность [бит/с]. Пропускная способность характеризует количество информации, которое может быть передано в системе связи в единицу времени (со 100% достоверностью). Верхняя граница пропускной способности в системе при заданном отношении сигнал/шум и доступной полосе передачи устанавливается **теоремой Шеннона [1,2]:**

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (1)$$

где C – пропускная способность (бит/с), W – доступная ширина полосы пропускания системы (Гц), S – средняя мощность принятого сигнала, N – средняя мощность шума. Соотношение выведено в предположении воздействия аддитивного белого гауссова шума. Однако средняя мощность шума зависит от ширины полосы:

$$N = N_0 \cdot W, \quad (2)$$

где N_0 – спектральная плотность мощности шума.

При исследовании систем связи, наряду с отношением сигнал/шум, часто используют величину E_b/N_0 – **отношение энергии бита к плотности мощности шума**, т.к. получаемые при этом соотношения содержат минимальное количество вторичных величин. Энергия бита – энергия, необходимая для передачи одного бита

информации, равная произведению мощности передатчика на длительность бита.

Соотношение(2) преобразуется к эквивалентному виду:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W}{C} (2^{C/W} - 1) \quad (3)$$

и устанавливает зависимость C/W – отношения пропускной способности к доступной полосе от энергетической характеристики системы E_b/N_0 . Соотношение (3) изображена графически на рис.1 [1].

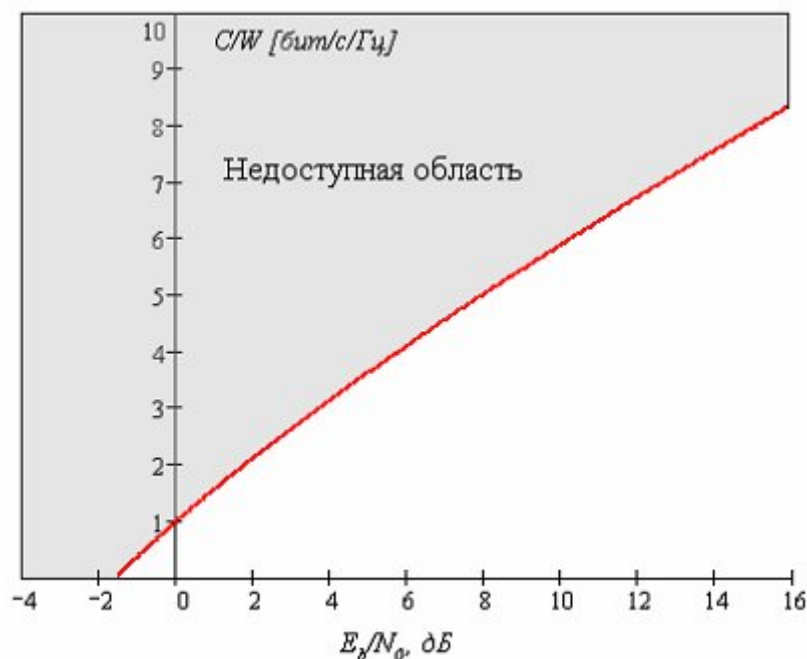


Рис.1. Зависимость пропускной способности в полосе от E_b/N_0 , согласно теореме Шеннона

Видно, что чем больше E_b/N_0 , тем больше информации можно передавать в одной и той же полосе. Чем меньше E_b/N_0 , тем большая полоса потребуется для передачи одинакового количества информации в единицу времени. При приближении E_b/N_0 к -1.6 дБ отношение W/C стремится к нулю. Следовательно, при отношениях $E_b/N_0 < -1.6$ дБ передача информации (со 100% достоверностью) невозможна ни при какой ширине полосы. Это значение E_b/N_0 называется пределом Шеннона.

Следует отметить, что в практических системах не требуется передавать информацию со 100%-ной достоверностью. Всегда достаточно достичь некоторого заданного уровня достоверности. Например, для передачи речи принимается уровень $BER \leq 10^{-3}$. Трудно представить, что искажение одного бита из тысячи будет различимо на слух. Поэтому вместо величины пропускной способности, характеризующей достоверную передачу информации, следует оперировать величиной “скорость передачи при заданном уровне битовой ошибки”.

Основными критериями эффективности различных видов модуляции являются критерии спектральной и энергетической эффективности. Энергетическая эффективность характеризует энергию, которую необходимо

затратить для передачи информации с заданной достоверностью (вероятностью ошибки). Спектральная эффективность характеризует полосу частот, необходимую для того, чтобы передавать информацию с определенной скоростью. Кроме данных критериев, виды модуляции сравниваются по устойчивости к различным типам помех и искажений и сложности аппаратной реализации. Существуют также специфические критерии, существенные для отдельных систем связи, отражающие особенности канала связи.

Было показано [1, 2, 3], что увеличение позиций (уровней) модуляции (модуляции M-ASK, M-PSK и M-QAM) увеличивает спектральную эффективность в $k = \log_2 M$ раз. Также было отмечено, что MSK (частотная модуляция с минимальным сдвигом) является спектрально в 2.6 раза менее эффективной, чем QPSK (квадратурная модуляция) и в 1.3 раза менее эффективной, чем BPSK (двоичная фазовая модуляция).

Сравним виды модуляции по критерию энергетической эффективности.

В [1, 2] показано, что с увеличением позиционности модуляции, вероятность битовой ошибки увеличивается. Таким образом, как правило, при увеличении спектральной эффективности энергетическая эффективность уменьшается.

Сравним двухуровневые OOK, BPSK и MSK. Соответствующие графики были получены в [1] и показаны на рис.2. Как видно из рис.2 OOK (бинарная амплитудная манипуляция) и MSK имеют одинаковую эффективность и уступают BPSK (и, соответственно, QPSK) по энергетической эффективности приблизительно 3 дБ.

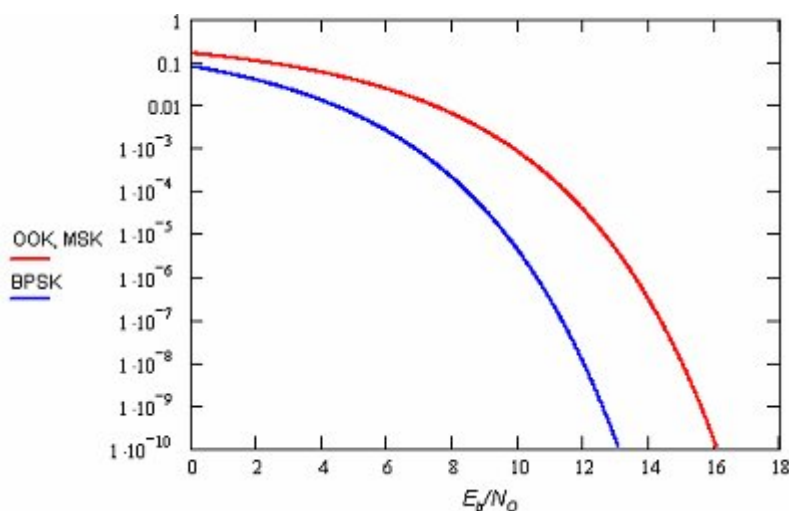


Рис.2. Сравнение энергетической эффективности модуляций OOK, MSK, BPSK

По результатам приведенного сравнения можно сделать вывод о том, что при числе уровней до 4 включительно QPSK является спектрально и энергетически наиболее эффективным видом модуляции.

Сравним теперь модуляции с числом уровней $M > 4$. На рис.3, полученного в [1], изображено сравнение энергетической эффективности для амплитудной, фазовой и амплитудно-фазовой манипуляции при $M=16$ и $M=64$.

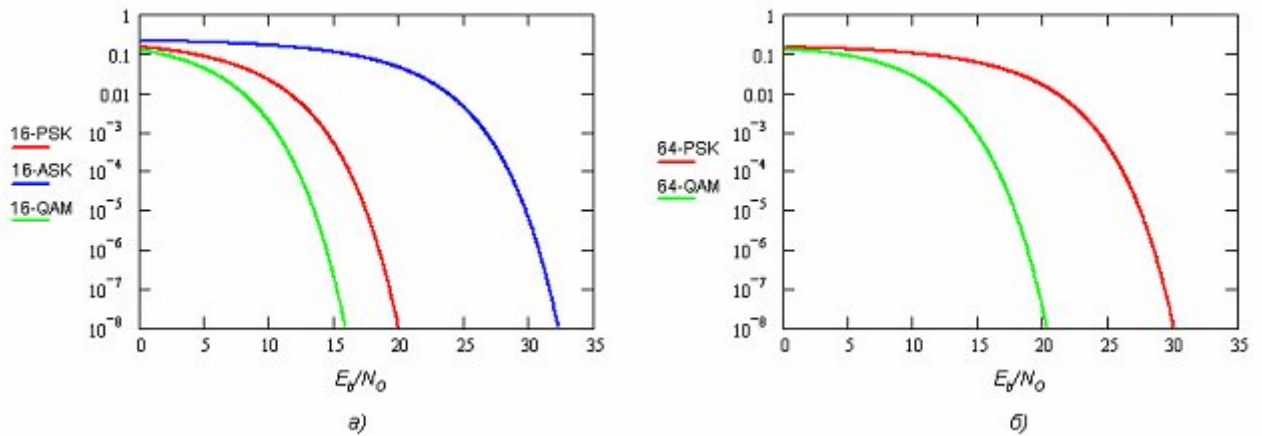


Рис.3. Сравнение энергетической эффективности модуляций M-ASK, M-PSK и M-QAM:
а) $M = 16$, б) $M = 64$

Как видно из рис.3 амплитудная модуляция существенно более 10 дБ при $M=16$ уступает фазовой и амплитудно-фазовой, поэтому при $M=64$ сравнение с ней не проводится.

При сравнении M-PSK с M-QAM видно, что M-QAM превосходит по эффективности M-PSK, причем энергетический выигрыш M-QAM увеличивается с ростом M . Например, для $M=16$ выигрыш составляет около 4 дБ, а при $M=64$ около 10 дБ.

Физически это объясняется тем, что расстояние между соседними точками в сигнальном созвездии M-PSK меньше, чем M-QAM. Сигнальное созвездие M-PSK представляет собой окружность с равномерно распределенными на ней точками, а созвездие M-QAM – квадрат с равномерно распределенными по его площади точками. Чем больше расстояние между точками в созвездии, тем менее вероятна ошибка в детектировании соседнего символа.

Таким образом, при ограниченной полосе, при $M \leq 4$ наиболее эффективной является модуляция QPSK, а при $M > 4$ – QAM. QPSK является частным случаем QAM при $M=4$. Можно считать QAM наиболее эффективным видом модуляции при любом числе уровней.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ.

Работа выполняется в программной среде LabVIEW. Для выполнения лабораторной работы используются программы ask_noise.exe; psk_noise.exe; qam_noise.exe.

Лицевая панель программы qam_noise.exe. показана на рис.4.

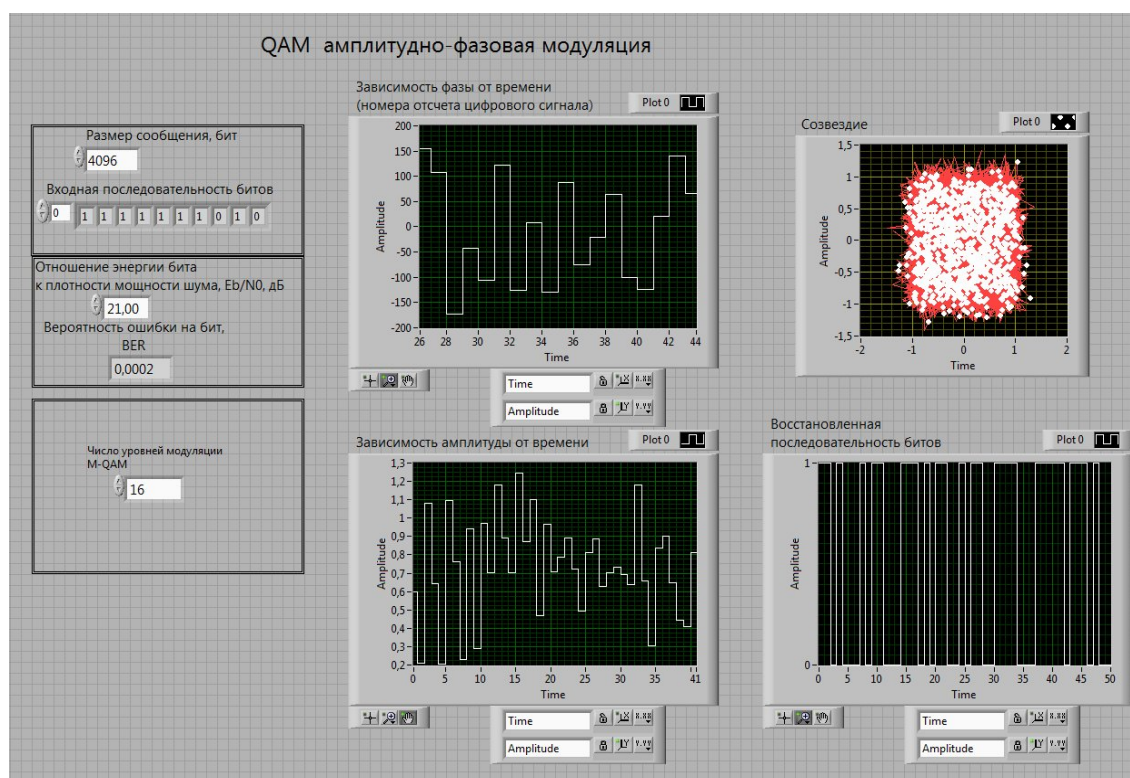




Рис. 4. Лицевая панель программы qam_noise.exe



Запуск программы осуществляется путем нажатия кнопки .




Во время работы программы кнопка пуска  приобретает вид , а после окончания выполнения выбранных процедур приобретет первоначальный вид. В случае возникновения ошибок работы программа может не остановиться, выдав сообщение об ошибке.

После изменения контролирующих параметров программы необходимо запускать ее выполнение. Остановка программы происходит автоматически или путем нажатия кнопки



Приведем назначение органов управления и отображения графиков в таблице. 1.
Таблица 1.

Органы управления и индикации	
	<p>При активизации пиктограммы «рука» появляется возможность перемещать изображение в окне вывода графиков при помощи манипулятора «мышь». Пиктограмма «лупа» позволяет при помощи мыши изменять масштаб вывода графиков. При ручной установке масштабов графиков курсор мыши подводится к максимальному или минимальному значению шкалы по оси X или Y, нажимается левая кнопка мыши и при помощи клавиатуры осуществляется редактирование и ввод нового значения. При изменении масштабов графиков следует отключить функцию автошкалирования (см. далее).</p> <p>Функция "курсор"  позволяет перемещать курсор по графику при помощи мыши.</p>

	<p>При выборе пиктограммы «лупа» появляется меню пиктограмм выбора функции (слева–направо, сверху–вниз): детализация окна (увеличение масштаба по осям X и Y одновременно), увеличение масштаба (детализация) по X, увеличение масштаба (детализация) по Y, возврат к предыдущему масштабу, увеличение масштаба относительно положения курсора, уменьшение масштаба относительно положения курсора.</p>
	<p>Пиктограммы «X» и «Y» позволяют принудительно установить такой масштаб по осям, при котором в окне вывода уместятся все значения точек графиков (функция автошкалирования).</p>
	<p>Для включения/отключения функции автошкалирования на ось X или Y надо закрыть/открыть замок около обозначения соответствующей оси.</p>

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задание 1

Исследовать помехозащищенность (энергетическую эффективность) амплитудной модуляции M-ASK. Для этого используйте программу ask_noise.exe.

Программа добавляет к модулированному сигналу аддитивный белый шум. Величина соотношения сигнала и шума регулируется контроллером "Отношение энергии бита к плотности мощности шума"

1.1 Построить зависимости вероятности ошибки на бит (BER) от отношения E_b/N_0 для числа уровней модуляции равного 2.

Для этого установить контроллер "число уровней модуляции M-ASK" на значение 2.

Устанавливая различные значения соотношения E_b/N_0 записать величину BER. Отображаемое в программе значение BER есть результат усреднения по 100 измерениям.

При этом наблюдайте за поведением графиков созвездия, фазы, амплитуды сигнала и восстановленной последовательности бит.

1.2. Повторить пункт 1.1 для числа уровней модуляции равное 4, 32, либо 8, 64; либо 16, 128. Вариант уточните у преподавателя.

1.3. Построить в одной координатной системе зависимость BER от E_b/N_0 для разного значения уровней модуляции.

Задание 2

Исследовать помехозащищенность (энергетическую эффективность) амплитудной модуляции M-PSK. Для этого используйте программу psk_noise.exe.

Выполните по аналогии пункты 1.1 – 1.3 для модуляции M-PSK.

Задание 3

Исследовать помехозащищенность (энергетическую эффективность) амплитудной модуляции M-QAM. Для этого используйте программу qam_noise.exe.

Выполните по аналогии пункты 1.1 – 1.3 для модуляции M-QAM.

Задание 4

Сравнивая графики, полученные в заданиях 1-3 сделайте выводы:

- 1) какая модуляция наиболее защищена от помех M-ASK, M-PSK, M-QAM.
- 2) Как влияет число уровней модуляции M на помехозащищенность.

Вопросы для самопроверки

1. Какой величиной характеризуется достоверность передачи информации?
2. Расскажите о теореме Шеннона
3. Какие выводы можно сделать по зависимости пропускной способности в полосе от E_b/N_0 , согласно теореме Шеннона?
4. Какими критериями характеризуются различные виды модуляции
5. Какая модуляция наиболее эффективна в энергетическом смысле
6. Как изменяется энергетическая эффективность при увеличении числа позиций модуляции?

Список литературы

1. Выбор оптимального метода модуляции сигнала в современных цифровых системах радиосвязи. М.: МГУ им. М.В.Ломоносова. 2008.
2. Феер К. Беспроводная цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000.
3. Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000.