

Министерство образования и науки Российской Федерации

Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет

Кафедра радиоэлектроники и информационно-измерительной техники

Теория радиотехнических сигналов

Цифровая модуляция

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

Сагдиев Р.К., Базлов Е.Ф.

Казань 2013 г.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.

Модуляцией называется изменение одного или нескольких параметров несущего сигнала по закону модулирующего сигнала.

Особенностью цифровой модуляции является то, что модулирующий сигнал является двоичным, т.е. его амплитуда может принимать только два значения: 0 или 1 (рис. 1). На этом рисунке модулирующий сигнал обозначен через $b(t)$, а модулированный — через $u(t)$. В предлагаемом на рис. 1 варианте единице модулирующего сигнала соответствует наличие несущего колебания, нулю — отсутствие несущего колебания.

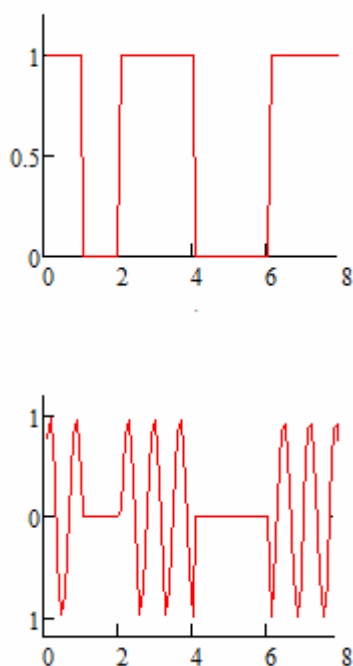


Рис.1 Иллюстрация цифровой модуляции сигнала

Модуляцию несущих колебаний при цифровом сообщении называют также манипуляцией сигнала, а устройство, реализующее этот процесс как модулятором, так и манипулятором. Процесс манипуляции называют также телеграфным режимом работы и заменяют аббревиатуру ЧМ на ЧТ, ФМ на ФТ, АМ на АТ. Три перечисленных метода манипуляции высокочастотного сигнала имеют разный уровень помехоустойчивости.

Метод амплитудной манипуляции (АМ) по помехоустойчивости существенно уступает двум другим, поэтому в современных системах радиосвязи используют, в основном, только частотную и фазовую манипуляции.

В качестве ФМ обычно используют ее разновидность — относительную фазовую модуляцию (ОФМ), называемую также фазоразностной. При ОФМ

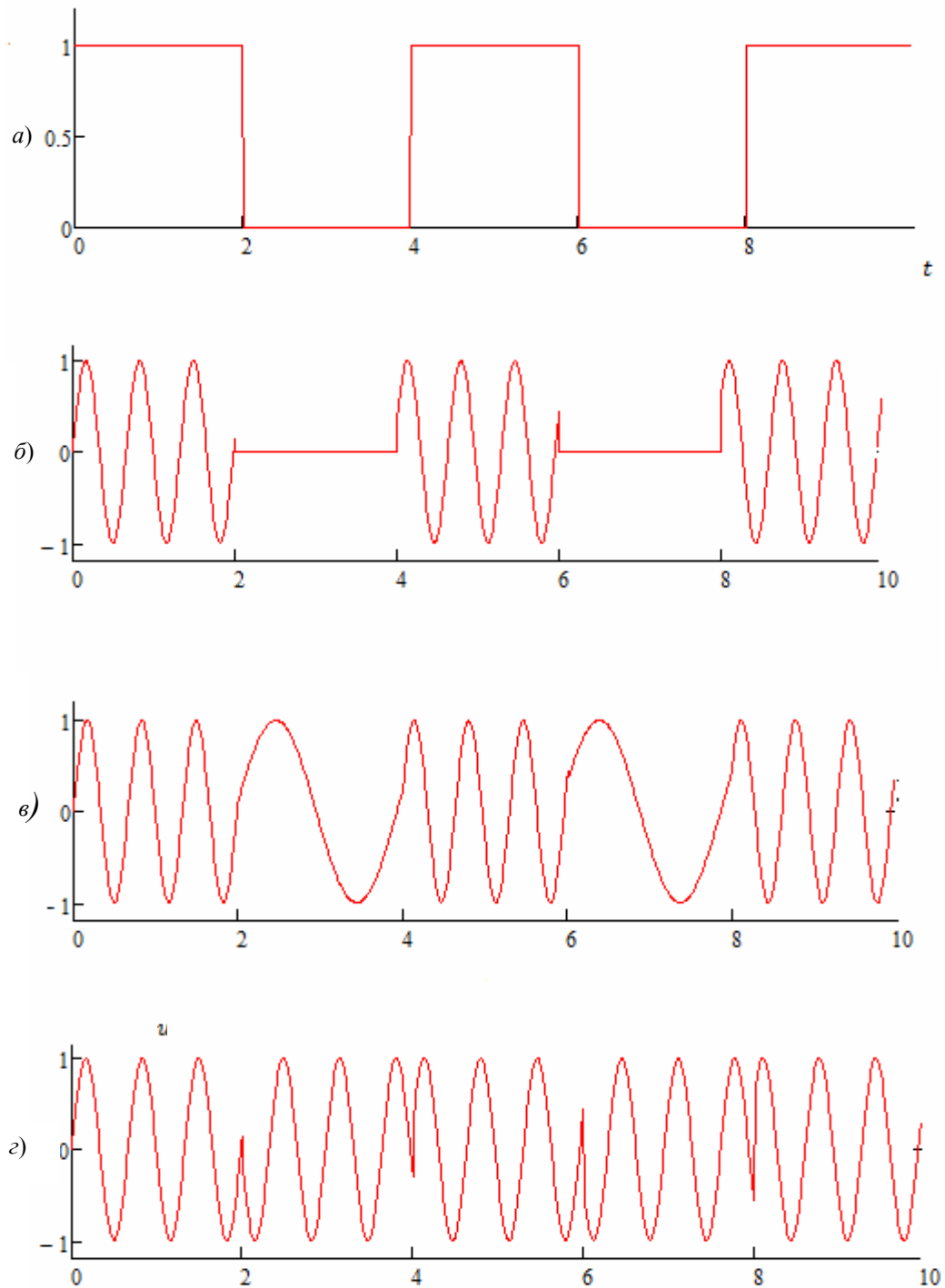


Рис. 2. Сигналы: а) модулирующий; б) при амплитудной модуляции; в) при частотной модуляции; г) при фазовой модуляции

при передаче логической «1» фаза несущего колебания скачком изменяется на $\Delta\varphi$, например на π , по отношению к фазе предыдущего бита, а при передаче логического «0» \square фаза остается той же, что и у предыдущего бита.

ЧМ характеризует дискрет частоты $\Delta F = F_1 - F_2$, а ФМ — девиация или дискрет фазы $\Delta\varphi$, позволяющие различать логические «1» и «0».

На рис.2 показаны все три вида цифровой модуляции, причем в качестве модулирующего сигнала выбран меандр.

Рассмотрим фазовую и частотную манипуляции.

Фазовая манипуляция (ФМ). В зависимости от дискрета фазы $\Delta\varphi$, наиболее часто используются следующие разновидности ФМ:

Значение $\Delta\varphi$	Русское название	Международное название	Сокращенное название
π	Бинарная ФМ	Binary Phase Shift Keying	BPSK
$\pi/2$	Квадратурная ФМ	Quadrature Phase Shift Keying	QPSK
$\pi/2$	Квадратурная ФМ со смещением	Offset Quadrature Phase Shift Keying	OQPSK

При бинарной ФМ возможны два значения начальной фазы сигнала: 0 или π . Это позволяет различить единичный бит информации: «1» или «0».

При квадратурной модуляции возможны четыре значения начальной фазы сигнала: 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ или при смещении первого значения фазы на $\pi/4$ другая комбинация: $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$, $7\pi/4$. При квадратурной ФМ можно различать комбинацию из двух битов информации:

Кодовая комбинация	ФМ без смещения	ФМ при смещении на $\pi/4$	ЧМ
11	0	$\pi/4$	F_1
01	$\pi/2$	$3\pi/4$	F_2
10	π	$5\pi/4$	F_3
00	$3\pi/2$	$7\pi/4$	F_4

В общем случае количество значений информационного сигнала может быть и другим. Количество этих значений называется позиционностью модуляции m . Число позиций, как правило, является степенью двойки: $m = 2^n$. В этом случае каждая позиция модулированного сигнала соответствует целому числу бит исходной двоичной последовательности: $n = \log_2 m$. Чем больше число уровней m , тем большее число бит n отображает каждый уровень, тем выше битовая скорость передачи при одном и том же значении интервала дискретизации T_0 :

$$V_b = V_0 \log_2 m = \frac{\log_2 m}{T_0}$$

В результате при квадратурной ФМ можно по сравнению с бинарной ФМ в два раза увеличить объем передаваемой информации за тот же по длительности сеанс связи.

Частотная манипуляция (ЧМ). Во многих случаях преимущества ЧМ и ФМ не удастся реализовать при применении одноступенчатой модуляции. Это связано с тем, что в идеальном случае полоса пропускания радиоприемника должна быть равна спектру принятого сигнала. Практически это требование из-за нестабильности частоты несущей радиопередатчика и частоты гетеродина радиоприемника реализовать не удастся: полосу пропускания из-за этих нестабильностей частоты приходится расширять, а это приводит к снижению помехоустойчивости. Поэтому более продуктивной оказывается двухступенчатая модуляция, при которой логические «1» и «0» модулируют сначала поднесущую сравнительно низкой частоты, а затем этой поднесущей модулируют частоту несущей радиопередатчика.

Рассмотрим этот метод на примере ЧМ □ ЧМ, осуществляемой по схеме рис. 3.

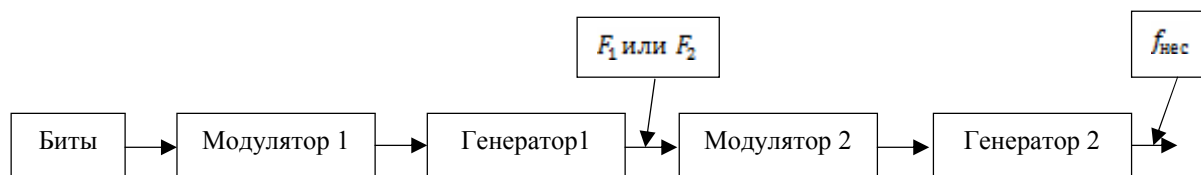


Рис. 3. Структурная схема при двухступенчатой частотной модуляции

В первой ступени модуляции логической «1» присваивается частота F_1 , а логическому «0» □ F_2 . Получившийся сигнал во второй ступени модулирует с девиацией Δf_d частоту несущей радиопередатчика. В радиоприемнике такой сигнал дважды проходит процедуру демодуляции: сначала выделяется частота поднесущей, а затем □ исходное цифровое сообщение □ битовая последовательность. При такой двухступенчатой модуляции полосы пропускания фильтров, устанавливаемых в канале поднесущей частоты, удастся сузить до ширины спектра передаваемого сообщения и тем самым повысить помехоустойчивость.

При выборе частот F_1 и F_2 необходимо обеспечить «плавный» переход, т.е. без скачка фазы, от сигнала с частотой F_1 к сигналу с частотой F_2 , как показано на рис. 2в. Это вызвано тем, что при скачке фазы происходит «размытие» мгновенного спектра сигнала, что снижает помехоустойчивость радиоприема и создает помехи другим системам радиосвязи. Кроме того, значения этих частот, а точнее соотношение между ними, должно быть таково, чтобы энергетический спектр промодулированного сигнала был бы сконцентрирован в возможно узкой полосе или, иначе говоря, не был бы «размыт».

Сигнальное созвездие.

Известно, что модулированный сигнал с произвольным видом модуляции можно представить в виде:

$$u(t) = I(t) \cos(f_0 t) - Q(t) \sin(f_0 t),$$

где $I(t)$ и $Q(t)$ называются синфазной и квадратурной составляющими модулирующего сигнала соответственно. Низкочастотные сигналы $I(t)$ и $Q(t)$ формируются из исходного сообщения аппаратным или программным способом. Закон, по которому выполняется это преобразование, определяет вид модуляции сигнала.

В простейшем случае m равно 2. Например, при амплитудной манипуляции значение амплитуды несущей, соответствующее логической "1" будет равно U_0 , логическому "0" будет соответствовать нулевая амплитуда (отсутствие сигнала). Соответственно число возможных значений квадратурных компонент $I(t)$ и $Q(t)$ для формирования $b(t)$ ограничено тем же числом значений. Множество возможных значений квадратурных компонент принято отображать на декартовой плоскости (Рис. 4), где по оси абсцисс отложены значения синфазной составляющей $I(t)$, а по оси ординат – квадратурной $Q(t)$. Такую диаграмму называют сигнальным созвездием.

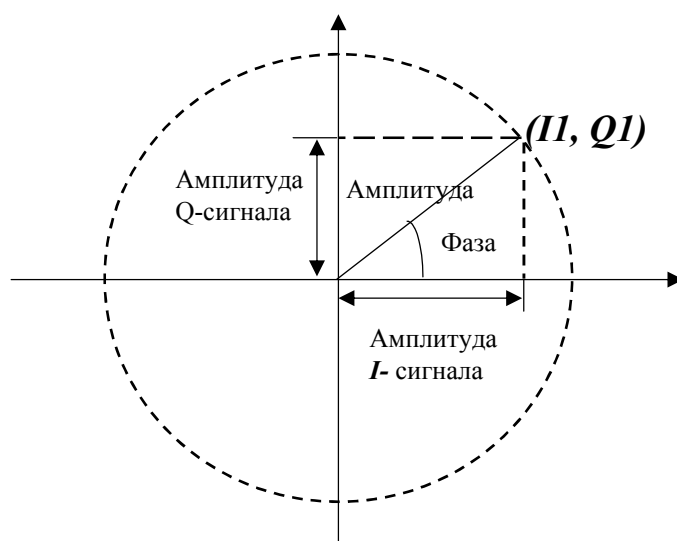


Рис.1. Формирование сигнального созвездия в I - Q пространстве

Для частотной модуляции сигнальное созвездие не используется, о чем будет сказано ниже.

Рассмотрим сигнальные созвездия для амплитудной и фазовой модуляции.

1. **Амплитудная модуляция (АМ).** В этом случае по закону модулирующего сигнала изменяется амплитуда несущей:

$$u(t) = U(t)\cos(2\pi f_0 t).$$

При двоичной амплитудной модуляции (АМ-2) число позиций $m = 2$, и имеется всего два уровня: $U_0 = 0$ и $U_1 = 1$ (здесь и далее сигнал полагается нормированным). Амплитуда $U_0 = 0$ («пауза») соответствует передаче нуля ($b(t) = 0$), амплитуда $U_1 = 1$ («посылка») соответствует передаче единицы ($b(t) = 1$). Модулированный сигнал

$$u(t) = b(t)\cos(2\pi f_0 t).$$

При многопозиционной АМ ($m > 2$) уровни располагаются симметрично относительно начала координат на равных расстояниях друг от друга, и их число равняется m . Например, при $m = 4$ получаем 4 уровня: U_0 , U_1 , $U_2 = -U_1$ и $U_3 = -U_0$ (рис. 4)

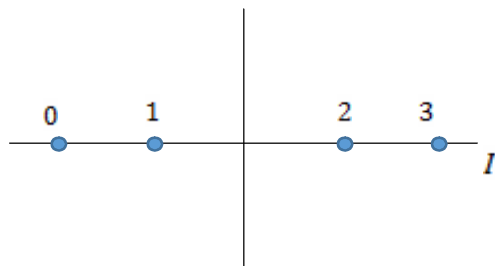


Рис. 4. Сигнальное созвездие при АМ-4

При АМ все значения (уровни) амплитуды действительные и располагаются вдоль оси x . Десятичные номера на рис. 3 соответствуют номерам уровней, а их двоичные представления — битам исходной двоичной последовательности. При АМ $\square 4$

$$m = 4,$$

и число бит, отображаемых одним уровнем модулированного сигнала,

$$m = \log_2 4 = 2.$$

2. **Квадратурная амплитудная модуляция (КАМ).** Квадратурная амплитудная модуляция получается как алгебраическая сумма двух сигналов АМ, сдвинутых по отношению друг к другу на угол $(\pi/2)$:

$$u(t) = I(t)\cos(2\pi f_0 t) - Q(t)\sin(2\pi f_0 t),$$

В простейшем случае имеются 2 уровня $I(t)$ и 2 уровня $Q(t)$. Сумма двух сигналов АМ-2 даёт сигнал КАМ с $m = 4$ (КАМ-4, рис. 5). Сигнальное созвездие КАМ всегда симметрично относительно начала координат.

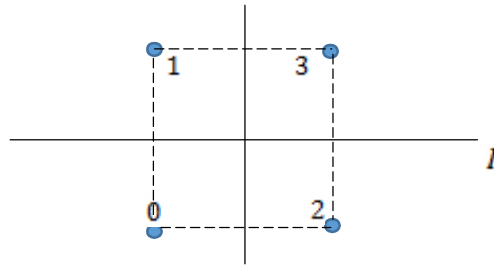


Рис. 5. Сигнальное созвездие при КАМ-4

В современных цифровых модуляторах, особенно при большом числе позиций m , сигнал КАМ получают как действительную часть от произведения комплексной амплитуды $\dot{U}(t)$ на комплексную несущую:

$$u(t) = \text{Re}[\dot{U}(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t}].$$

Значения комплексной амплитуды обычно задаются в виде таблицы, где каждому индексу (комбинации двоичных бит исходной последовательности) соответствует пара чисел x и y .

Недостатками АМ и КАМ являются

- скачки фазы и/или амплитуды на границах тактовых интервалов, приводящие к расширению спектра;
- непостоянство амплитуды модулированного сигнала (кроме КАМ-4), приводящее к увеличению пик-фактора.

3. Цифровая фазовая модуляция (ФМ). При фазовой модуляции по закону модулирующего сигнала изменяется начальная фаза несущей:

$$u(t) = \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t)).$$

Цифровая ФМ, аналогично КАМ, в современных цифровых модуляторах получается как действительная часть от произведения комплексной амплитуды на комплексную несущую

Комплексная амплитуда $\dot{U}(t) = e^{j\varphi_i}$, где $\varphi_i = \frac{2\pi}{m} \cdot i$ — позиции фазы на комплексной плоскости (рис. 6).

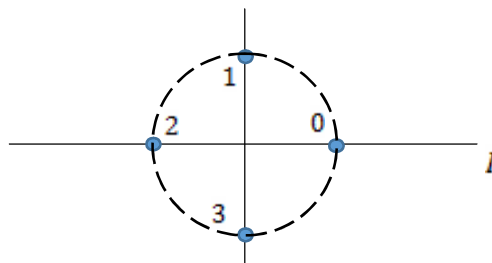


Рис. 6. Пример сигнального созвездия ФМ при $m=4$

Преимуществом ФМ является постоянство амплитуды модулированного сигнала и, как следствие, низкий пик-фактор, недостатком — скачки фазы на границах тактовых интервалов, приводящие к расширению спектра.

4. **Цифровая частотная модуляция.** При частотной модуляции по закону модулирующего сигнала изменяется частота несущей:

$$\omega(t) = 2\pi f(t).$$

Позиции частоты при цифровой модуляции фиксированы, а их число равно m . Модулированный сигнал

$$u(t) = \cos[2\pi(f + \Delta f_i)t],$$

где Δf_i — девиация (отклонение) от несущей частоты i -й позиции. Минимальное значение девиации частоты, при котором сохраняется ортогональность в усиленном смысле сигналов различных позиций

$$\Delta f_{\min} = \frac{1}{2T_0}$$

Соответственно, минимальное расстояние между поднесущими (сигналами с частотами $(f + \Delta f_i)$) равняется $2\Delta f_{\min} = \frac{1}{T_0}$ (рис. 6).

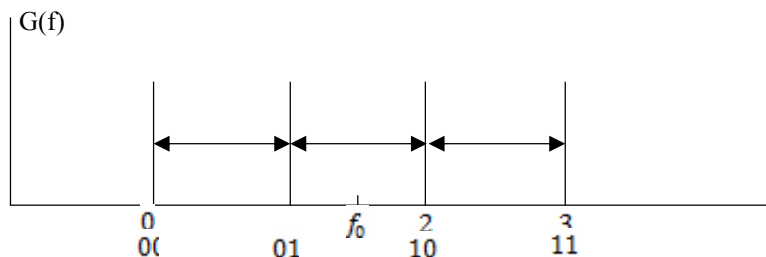


Рис. 6 Поднесущие сигнала ЧМ при $m = 4$

Цифровую ЧМ также можно представить через произведение комплексной амплитуды на комплексную несущую:

$$u(t) = \operatorname{Re}[\dot{U}(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t}] = \operatorname{Re}[e^{j2\pi \Delta f_i t} \cdot e^{j2\pi f_0 t}]$$

Комплексная амплитуда $U(t) = e^{j2\pi \Delta f_i t}$ при ЧМ зависит от времени, поэтому её отображение в виде сигнальных созвездий на комплексной плоскости невозможно — это будет вектор, вращающийся с частотой Δf_i . При ЧМ, так же, как и при ФМ, амплитуда модулированного сигнала постоянна, т.е. ЧМ также имеет малый пик-фактор. Однако, с увеличением m при ЧМ быстро растёт занимаемая полоса частот.

5. **Спектры сигналов при цифровой модуляции.** Поскольку исходная двоичная последовательность, представленная сигналов $b(t)$ является случайной, модулированный сигнал $u(t)$ также будет случайным. Поэтому надо рассматривать энергетические спектры сигналов (распределение мощности по частотам). По определению, энергетический спектр случайного сигнала

$$G(f) = \frac{1}{T} \cdot \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2(f)}{N},$$

где $S_i(f)$ — амплитудный спектр одной реализации случайного модулированного сигнала длительностью T . Данная формула хорошо подходит для эксперимен-

тального определения $G(f)$, в теоретических же расчётах используется формула Винера-Хинчина:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau) \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau = 2 \int_0^{\infty} B(\tau) \cos 2\pi f\tau d\tau,$$

где $B(\tau)$ — корреляционная функция модулированного сигнала.

Рассмотрим спектры при различных видах модуляции. Рассмотрим спектры при различных видах модуляции на примере прямоугольных импульсов модулирующего сигнала $b(t)$.

- В спектре двоичной АМ содержится несущая и сдвинутый на величину f_0 оси частот спектр первичного сигнала $G_b(f)$:

$$G_u(f) = K \text{sinc}^2[\pi(f - f_0)T_0] + G_0 \delta(f - f_0).$$

Здесь K и G_0 — нормировочные коэффициенты, $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$, $\delta(x)$ — дельта-функция.

- В спектрах сигналов многопозиционной АМ ($m > 2$) и КАМ несущая отсутствует, т.к. сигнальные точки симметричны относительно начала координат:

$$G_u(f) = K \text{sinc}^2[\pi(f - f_0)T_0]$$

Следовательно, спектр радиосигнала с АМ является двухполосным, симметричным относительно f_0 и занимает в два раза большую полосу частот, чем передаваемый низкочастотный сигнал.

- Спектр сигнала ФМ при любом m имеет вид, аналогичный много-позиционной АМ и КАМ:

$$G_u(f) = K \text{sinc}^2[\pi(f - f_0)T_0].$$

- Сигнал двоичной ЧМ можно представить как сумму двух сигналов АМ-2 с частотами поднесущих $(f_0 - \Delta f)$ и $f_0 + \Delta f$. Соответственно, его спектр также будет представлять собой сумму двух спектров сигналов АМ-2:

$$G_u(f) = K \text{sinc}^2[\pi(f - f_0 + \Delta f)T_0] + G_0 \delta(f - f_0 + \Delta f) + K \text{sinc}^2[\pi(f - f_0 - \Delta f)T_0] + G_0 \delta(f - f_0 - \Delta f)$$

Шириной спектра модулированного сигнала называют полосу частот ΔF , в которой сосредоточена основная часть энергии сигнала. В различных задачах критерий определения основной части энергии сигнала может выбираться различным образом. Часто в качестве такого критерия выбрано уменьшение величины спектральной плотности до уровня -20 дБ от максимума.

Спектральной эффективностью модуляции называется отношение скорости передачи информации к полосе частот модулированного сигнала: $V_b / \Delta F$. Спектральная эффективность является одним из важных показателей качества модуляции.

(4)

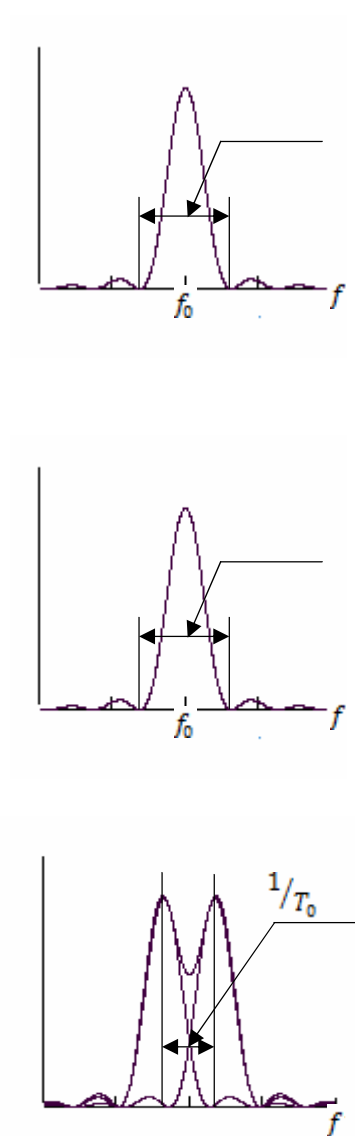


Рис. 8. Спектры сигналов двоичной АМ, ФМ и ЧМ при прямоугольной форме модулирующего сигнала $b(t)$

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ.

Работа выполняется в программной среде LabVIEW. Для выполнения лабораторной работы используются программы ask.exe; psk.exe; qam.exe.

Лицевая панель программы psk.exe показана на рис.9.

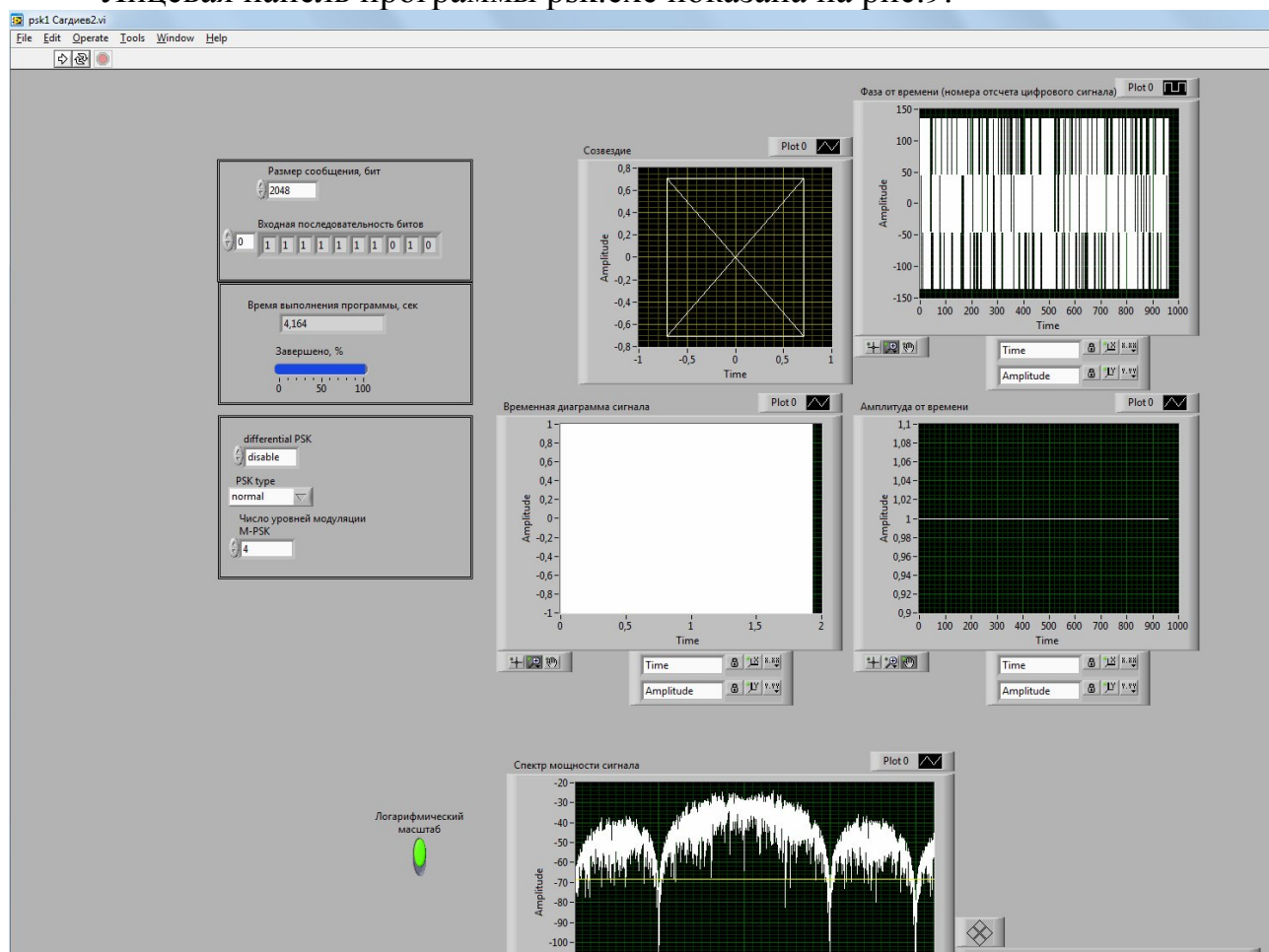




Рис. 9. Лицевая панель программы psk.exe

Запуск программы осуществляется путем нажатия кнопки .



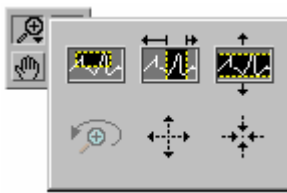


Во время работы программы кнопка пуска  приобретает вид , а после окончания выполнения выбранных процедур приобретет первоначальный вид. В случае возникновения ошибок работы программа может не остановиться, выдав сообщение об ошибке.

После изменения контролирующих параметров программы необходимо запускать ее выполнение. Остановка программы происходит автоматически или пу-

тем 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 умещаются 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>

Задание 1. Перевод потока битов в формат 4-ASK (четырёх уровневая амплитудная модуляция)

Запишите 3 последних цифры номера вашей зачетной книжки в виде последовательности битов. Для преобразования каждой цифры используйте 4 бита.

Например цифры 123 следует записать 000100100011.

Разбейте получившуюся последовательность на пары битов:

000100100011 → 00 01 00 10 00 11

Перевести полученную последовательность пар битов в символьную последовательность 4-ASK. При этом примем, что 00 переводится в сигнал амплитудой 0*

01 переводится в сигнал амплитудой 0,33

10 переводится в сигнал амплитудой 0,66

11 переводится в сигнал амплитудой 1

* максимальную амплитуду сигнала принимаем равной 1

Построить друг над другом графики зависимости амплитуды сигнала от номера символа (или бита) для исходной последовательности битов и для 4-ASK:

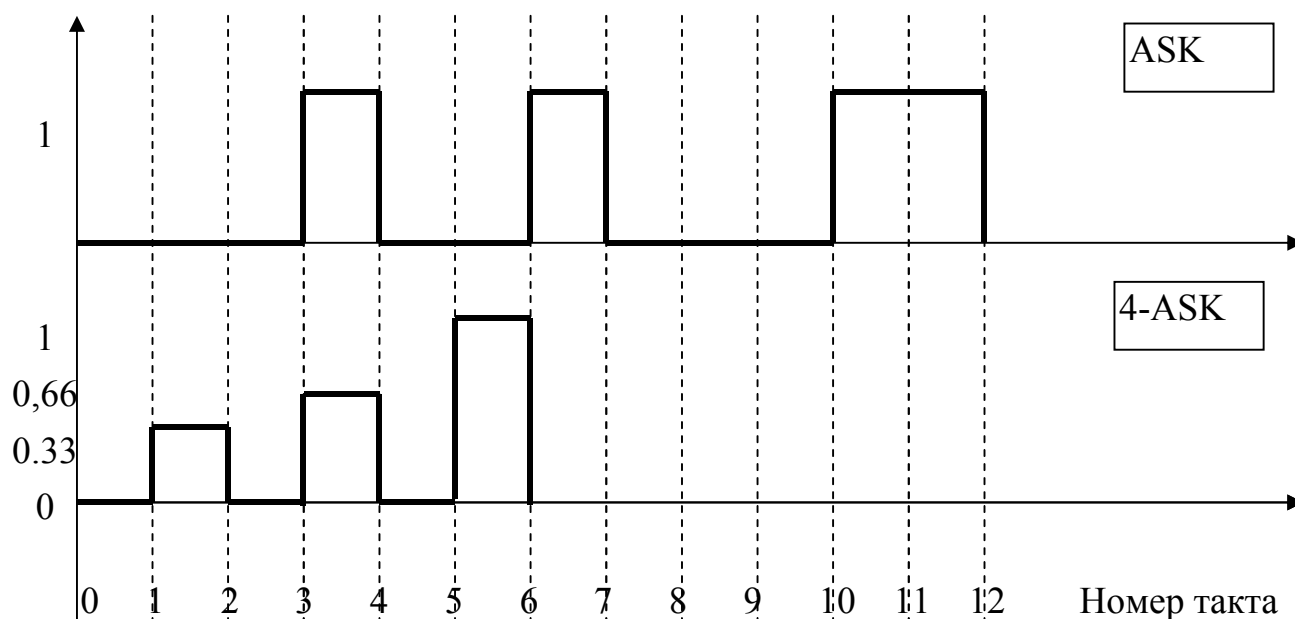


Рис. 10 Зависимость амплитуды сигнала ASK и 4-ASK от номера такта

Задание 2. Исследовать временные диаграммы для различных видов модуляции

Открыть программу ASK.exe

2.1 Исследовать графики амплитудной модуляции.

Установить изменяя число уровней модуляции $M = 4; 8; 32; 64$, проследить за изменением графиков сигнала, зависимости амплитуды и зависимости фазы сигнала от времени. При необходимости изменяйте масштабы графиков для большей наглядности. В отчете отобразите эти 3 графика для $M = 4; 8$. Длительность сигнала на графиках установите при этом равное 4 – 8 тактам.

Отобразите в отчете сигнальное созвездие для $M = 8$.

2.2. Исследовать графики фазовой модуляции.

Запустить файл PSK.exe

Выполните действия, аналогичные пункту 2.1

2.3. Исследовать графики фазовой модуляции.

Запустить файл QAM.exe

Выполните действия, аналогичные пункту 2.1

Сделайте выводы по полученным результатам.

Задание 3. Исследовать величину спектральной эффективности в зависимости от числа уровней модуляции M на примере фазовой модуляции.

Запустить файл PSK.exe

3.1 Установите число уровней модуляции $M = 2$.

В программе использован сигнал с центральной частотой 10 кГц. Тактовая частота передачи информации равна 500 Гц. Передается псевдослучайная последовательность длительностью 2048 бит.

Определите ширину спектра сигнала по графику спектра сигнала. Для упрощения ширину спектра сигнала определим по положению первых нулей спектра относительно центральной частоты. Для определения частот удобно пользоваться курсором на графике. Для этого щелкните левой кнопкой мыши на контроллере курсора, как показано на рис.11.

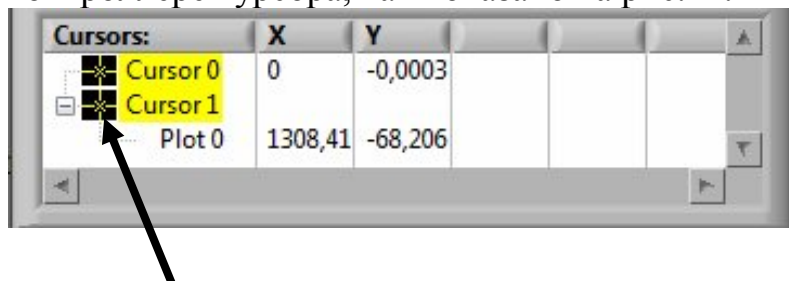



Рис.11.

Затем на этом же месте щелкните правой кнопкой мыши и выберите "Икшп to Center" в открывшемся меню.

Проследите, чтобы под графиком была включена функция "курсор" . Премещая курсор по графику нажав левую кнопку муши, определите граничные частоты и ширину спектра.

Обратите внимание на время выполнения программы (по соответствующему индикатору) при разных M . Это время прямо пропорционально времени передачи сообщения на входе (длительностью 2048 бит).

3.2. Повторите пункт 3.1. для $M = 4; 8; 16; 64; 256; 512$.

3.3. Для каждого M вычислите величину спектральной эффективности:

$$V_b / \Delta F$$

где ΔF – ширина спектра, определенная в пп. 3.1 – 3.2; V_b – битовая скорость, определяемая по формуле:

$$V_b = \frac{\log_2 M}{T_0} \quad , \quad T_0 = 1/500 = 0,002 \text{ сек}$$

Вычислите так же время, необходимое для передачи сообщения $N = 2048$ бит при разных M по формуле : $t = N \cdot V_b$

Постройте графики зависимости спектральной эффективности от числа M и времени передачи сигнала от числа M .

Сделайте выводы по полученным результатам.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист с указанием названия работы, фамилий исполнителей и номера группы.
2. Задания.
3. Осциллограммы временных функций по всем пунктам заданий.
4. Таблицы, содержащие результаты измерений.
5. Выводы по выполненной работе.