

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова
Кафедра динамики электронных систем

М. А. ДУБОВ
А. И. ТОПНИКОВ

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

Практикум

Ярославль
ЯрГУ
2016

УДК 621.391(076)
ББК 3811я73
Д79

Рекомендовано
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2016 года

Рецензент
кафедра динамики электронных систем ЯрГУ

Дубов, Михаил Андреевич.
Д79 Компьютерное моделирование радиотехнических систем передачи информации : практикум / М. А. Дубов, А. И. Топников ; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. — Ярославль : ЯрГУ, 2016. — 36 с.

В практикуме приводятся краткие теоретические сведения по теории радиотехнических систем передачи информации с аналоговыми и цифровыми видами модуляции, а также практические задания, предполагающие проведение аналитических расчетов и компьютерного моделирования.

Предназначен для студентов, изучающих дисциплины «Радиотехнические и телекоммуникационные системы», «Радиотехнические системы передачи информации».

УДК 621.391(076)
ББК 3811я73

© ЯрГУ, 2016

Введение

Современные радиотехнические системы передачи информации (РТСПИ) используют самые разные виды радиосигналов: от исторически первых аналоговых модуляций до сложных цифровых сигнально-кодовых конструкций.

Модуляцией сигнала называется процесс преобразования одного или нескольких параметров несущего колебания по закону информационного сигнала. В большинстве случаев несущей является высокочастотное гармоническое колебание, содержащее три параметра, в которые может быть заложена информация: амплитуда, частота и фаза. Информационный сигнал может иметь как аналоговую, так и цифровую природу, что приводит к появлению соответствующих видов модуляции.

Сама необходимость модуляции связана в первую очередь с необходимостью разделять частотный ресурс между всеми радиосистемами путем выбора различных радиочастот для передачи информации. Также линейные размеры и тип используемых антенн напрямую связаны с частотой несущей.

Появление цифровых видов модуляции позволяет в совокупности с использованием помехоустойчивого кодирования обеспечить значительный выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с аналоговыми, а с учетом применения кодирования источника — повысить эффективность использования радиочастотного спектра.

В пособии рассматриваются основные аналоговые и цифровые виды модуляции сигналов, частотное разделение каналов. Особое внимание уделяется компьютерному моделированию систем передачи информации. Часть исследований предлагается провести с реальными информационными сигналами (речь, данные) для повышения наглядности происходящих процессов. Анализируется качество передачи информации в зависимости от шума в канале.

В заключительной главе приводятся тестовые задания для проверки полученных знаний.

1. Системы с аналоговыми видами модуляции

1.1. Амплитудные виды модуляции

Выражение для *классической амплитудной-модуляции* (AM — *amplitude modulation*) колебание $u_{AM}(t)$ можно записать в виде:

$$u_{AM}(t) = (U_H + x(t)) \cdot \cos(2\pi f_H t + \varphi_0), \quad (1.1)$$

где U_H — амплитуда несущей, $x(t)$ — информационный сигнал, f_H — частота несущей, φ_0 — начальная фаза несущей. В большинстве случаев начальной фазой можно пренебречь.

Выражение (1.1) можно переписать в более удобной форме, введя нормировку информационного сигнала и вынеся амплитуду несущей за скобку:

$$u_{AM}(t) = U_H \left(1 + \frac{U_x}{U_H} \cdot x_0(t)\right) \cdot \cos(2\pi f_H t + \varphi_0), \quad (1.2)$$

где $U_x = \max(|x(t)|)$ — максимальное по модулю значение информационного сигнала, $x_0(t) = x(t)/U_x$ — нормированный информационный сигнал. Величина

$$m = \frac{U_x}{U_H} \quad (1.3)$$

носит название *коэффициента (глубины) модуляции*. Может меняться в пределах от 0 до бесконечности, однако на практике — до 1 из-за наступления *перемодуляции* и невозможности демодулировать такой сигнал с помощью *детектора огибающей*.

Например, нормированный информационный сигнал является гармоническим колебанием с частотой 1 кГц (*однотональная модуляция*):

$$x_0(t) = \cos(2\pi \cdot 10^3 \cdot t),$$

частота несущей 10 кГц, амплитуда несущей 1 В. Тогда значение U_x численно равно глубине модуляции.

На рис. 1.1 приведены осциллограммы исходных и модулированных сигналов при различных значениях m . Пунктиром изображены огибающие сигналов. На последней осциллограмме наблюдается явление перемодуляции (переход огибающей через ноль).

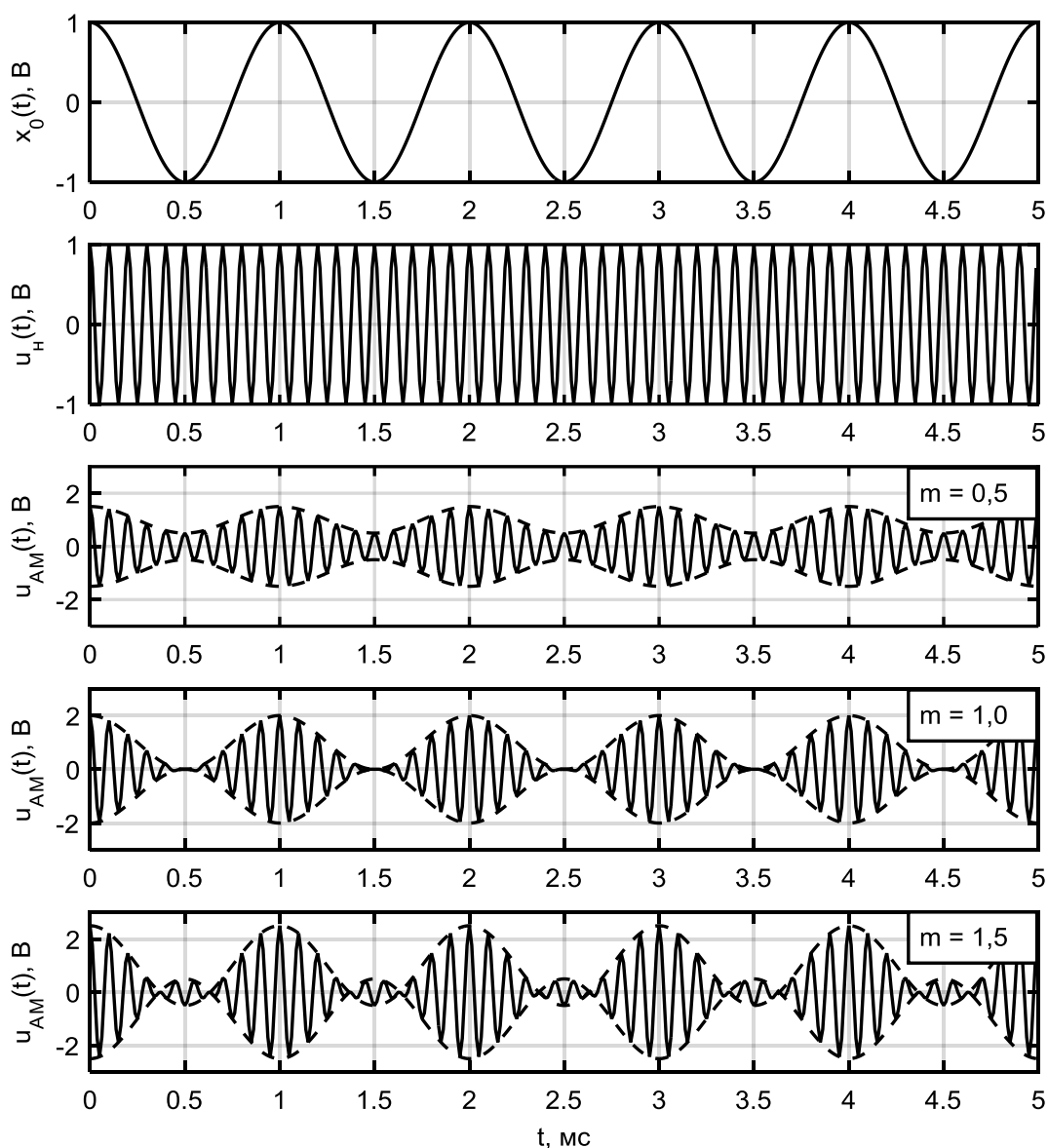


Рис. 1.1. Осциллограммы информационного сигнала, несущего колебания, и АМ-сигналов при различных m

Переход в спектральную область показывает, что спектр АМ-сигнала состоит из составляющей, отвечающей за несущее колебание, и копии спектра исходного сигнала, перенесенной на частоту несущей (рис. 1.2). Изменений внутри самого спектра информационного сигнала не происходит, меняется только его положение на оси частот. Поэтому такой вид модуляции называют *линейным*. Основная мощность приходится на несущее колебание, что говорит о низкой энергоэффективности такого вида модуляции. Ширина полосы равна удвоенной верхней частоте в спектре информационного сигнала: $\Delta f_{\text{AM}} = 2f_{\text{в}}$.

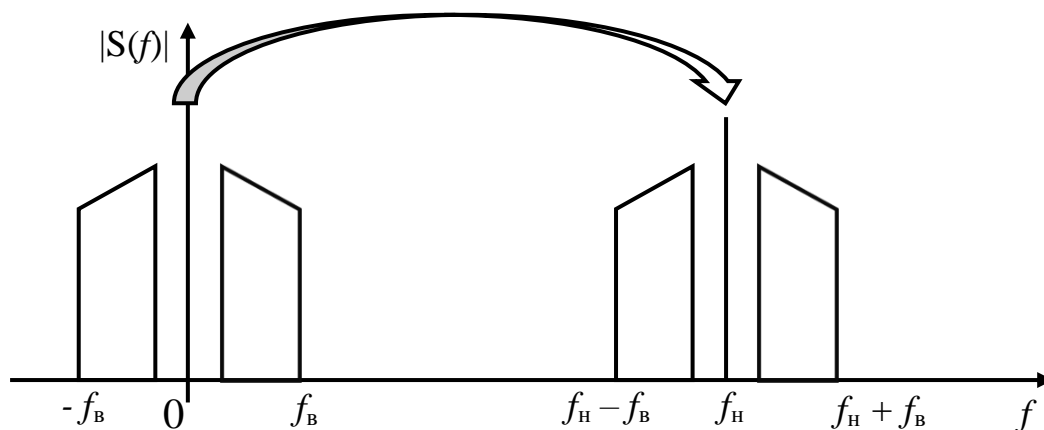


Рис. 1.2. Преобразование спектра при амплитудной модуляции

Повысить энергоэффективность можно, подавив саму несущую, сохранив расположение боковых полос. Такой вид модуляции носит название *балансной*, или *АМ с подавленной несущей* (*DSB — double side band*):

$$u_{\text{DSB}}(t) = U_{\text{H}} \cdot x(t) \cdot \cos(2\pi f_{\text{H}} t) \quad (1.4)$$

Такой вид модуляции является частным случаем преобразования частоты. По сути происходит просто перенос спектра низкочастотного сигнала на более высокую радиочастоту. Ширина полосы при этом по-прежнему $\Delta f_{\text{DSB}} = 2f_{\text{B}}$.

Поскольку боковые полосы несут одинаковую информацию, дополнительно можно подавить одну из них. В таком случае получается АМ с *одной боковой полосой* (*SSB — single side band*): *верхней* (*USB — upper side band*) или *нижней* (*LSB — lower side band*). Математически такие сигналы можно записать так:

$$u_{\text{SSB}}(t) = U_{\text{H}} (x(t) \cdot \cos(2\pi f_{\text{H}} t) \pm \tilde{x}(t) \cdot \sin(2\pi f_{\text{H}} t)), \quad (1.5)$$

где $\tilde{x}(t)$ — сопряженный по Гильберту сигнал к $x(t)$, знак «+» выбирается для LSB, знак «−» выбирается для USB.

Такие сигналы обладают максимальной энергоэффективностью, т. к. вся излучаемая энергия прямопропорциональна только информационному сигналу. Кроме того, занимаемая полоса минимально возможная и равна верхней частоте информационного сигнала: $\Delta f_{\text{SSB}} = f_{\text{B}}$.

На рис. 1.3. и 1.4 приведены осциллограммы и амплитудные спектры сигналов с классической АМ при $m = 1$ и со всеми аль-

тернативными видами при нормированном входном сигнале $x_0(t)$, полученном из:

$$x(t) = \sin(2\pi \cdot 10^3 t) + 0,5 \sin(2\pi \cdot 2 \cdot 10^3 t). \quad (1.6)$$

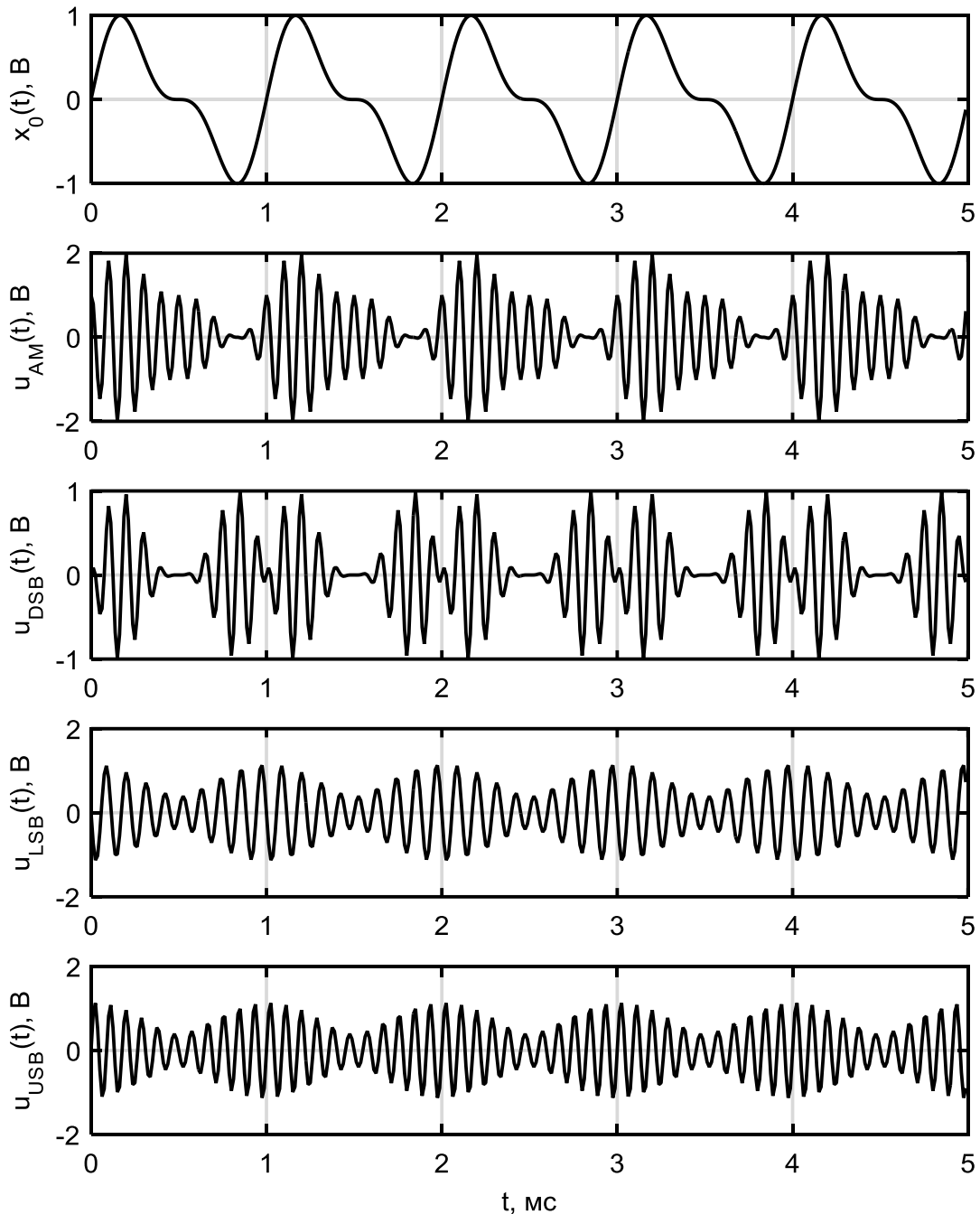


Рис. 1.3. Осциллограммы сигналов с различными видами амплитудной модуляции

Видно, что лишь в случае классической АМ огибающая повторяет форму информационного сигнала, поэтому только в этом

случае может быть использован простой детектор огибающей. Для всех других видов АМ обычно применяется более сложный *синхронный детектор*, осуществляющий перенос модулированного колебания с радиочастоты на нулевую путем домножения его на несущее колебание. При этом классическая АМ также может быть демодулирована синхронным детектором (даже при глубине модуляции больше 1), что позволяет назвать его универсальным решением.

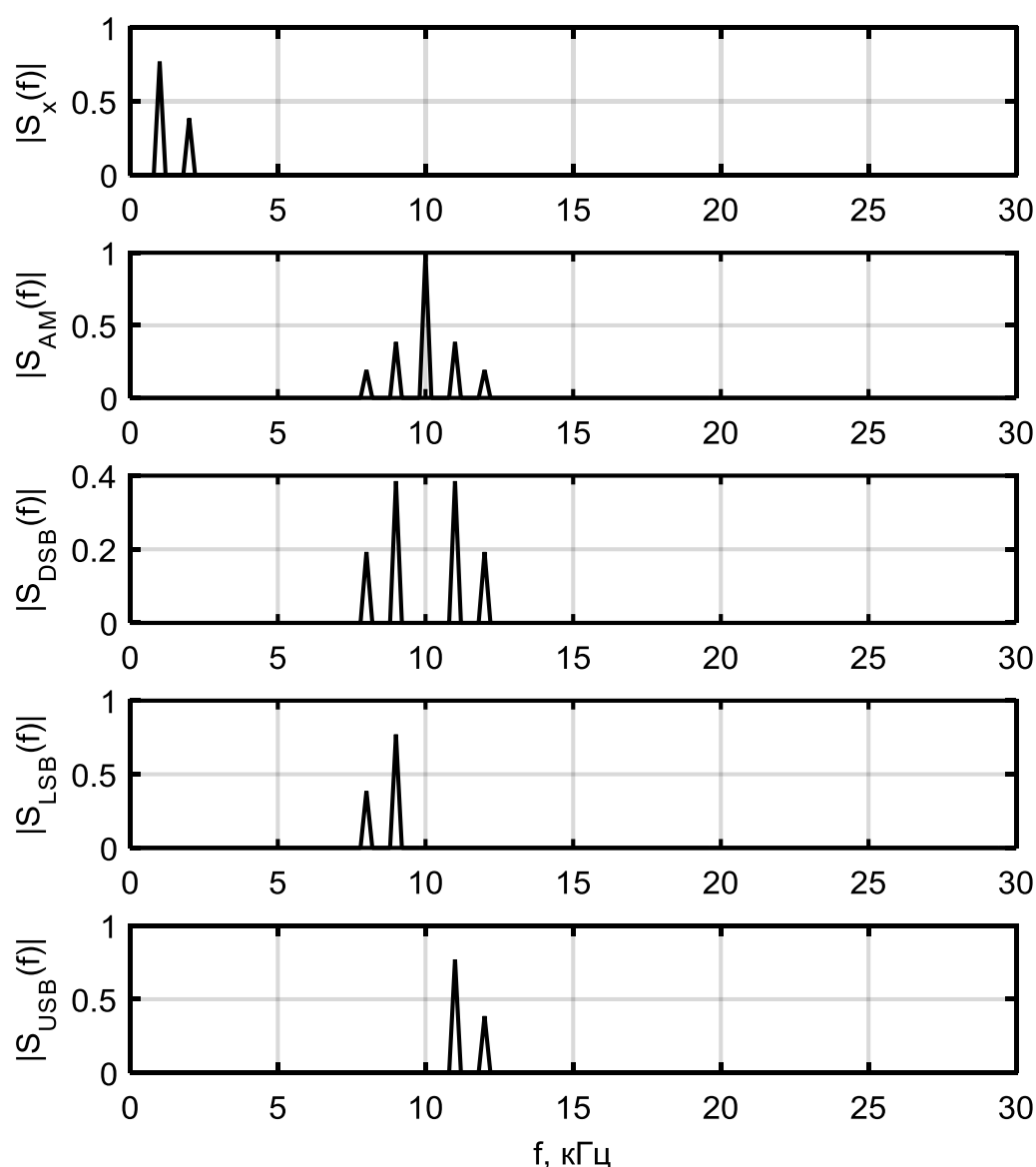


Рис. 1.4. Спектры сигналов с различными видами амплитудной модуляции

1.2. Угловые виды модуляции

В несущем колебании помимо амплитуды есть еще два параметра, которые могут использоваться для передачи информации: частота и фаза. Полная фаза гармонического колебания в случае передачи информационного сигнала через фазу (*фазовая модуляция, РМ — phase modulation*) может быть записана так:

$$\Psi(t) = \omega_{\text{н}}t + \varphi(t) = \omega_{\text{н}}t + \varphi_{\text{д}} \cdot x_0(t), \quad (1.7)$$

где $\varphi_{\text{д}}$ — *девиация фазы*, $\omega_{\text{н}} = 2\pi f_{\text{н}}$ — циклическая частота несущей. Таким образом, выражение для РМ сигнала можно записать как:

$$u_{\text{РМ}}(t) = U_{\text{н}} \cos(2\pi f_{\text{н}}t + \varphi_{\text{д}} \cdot x_0(t)), \quad (1.8)$$

Девиация фазы означает максимальное отклонение полной фазы от номинального значения, равного $\omega_{\text{н}}t$. Иногда носит название *коэффициента фазовой модуляции* $k_{\text{РМ}}$ и может принимать значения от 0 до бесконечности. Мгновенную частоту РМ-колебания можно найти, продифференцировав полную фазу:

$$\omega(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = \omega_{\text{н}} + \varphi_{\text{д}} \cdot \frac{dx_0(t)}{dt}. \quad (1.9)$$

Это означает, что при фазовой модуляции меняется и частота сигнала, причем максимальное отклонение частоты будет происходить при максимальных значениях производной информационного сигнала.

При закладывании информации непосредственно в частоту, мгновенная частота меняется по закону:

$$\omega(t) = \omega_{\text{н}} + \omega_{\text{д}} \cdot x_0(t), \quad (1.10)$$

где $\omega_{\text{д}} = 2\pi f_{\text{д}}$ — *девиация частоты*, равная максимальному отклонению мгновенной частоты от частоты несущей, а полная фаза равна:

$$\Psi(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau = \omega_{\text{н}}t + \omega_{\text{д}} \cdot \int_0^t x_0(\tau) d\tau, \quad (1.11)$$

соответственно уравнение сигнала с *частотной модуляцией (FM — frequency modulation)* может быть записано так:

$$u_{\text{FM}}(t) = U_{\text{H}} \cos(\omega_{\text{H}} t + \omega_{\text{д}} \int_0^t x_0(\tau) d\tau). \quad (1.12)$$

Величина, равная отношению девиации к верхней частоте в спектре информационного сигнала, называется *коэффициентом частотной модуляции*: $k_{\text{FM}} = \omega_{\text{д}} / \omega_{\text{В}} = f_{\text{д}} / f_{\text{В}}$.

В отличие от АМ при угловых видах модуляции происходит изменение спектрального состава внутри спектра информационного сигнала, перенесенного на несущую частоту. Поэтому такие виды модуляции называются *нелинейными*.

На рис. 1.5 и 1.6 приведены осциллограммы и амплитудные спектры для ФМ и ЧМ с разными значениями девиации при информационном сигнале, описываемым выражением (1.6).

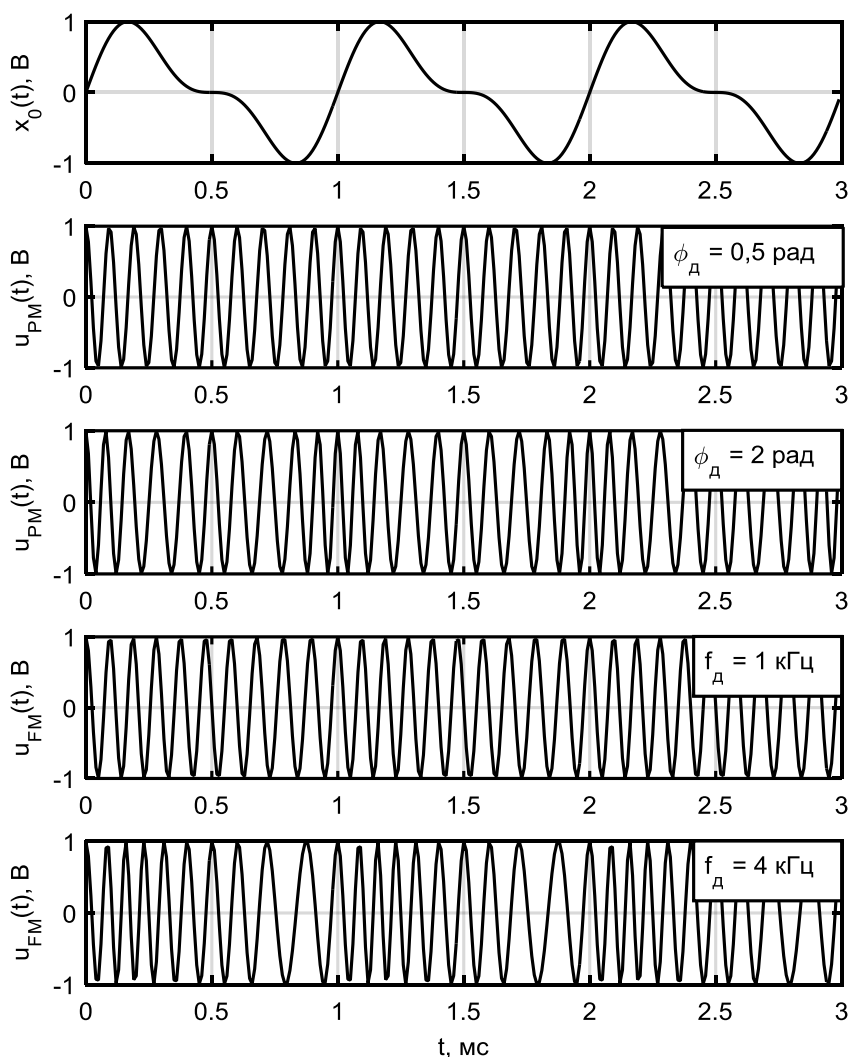


Рис. 1.5. Осциллограммы сигналов с различными видами угловой модуляции

При небольших значениях девиации отклонение частоты несущей от своего номинального значения на осциллограмме практически незаметно, а амплитудный спектр напоминает случай с классической АМ. С ростом девиации отклонение частоты становится заметно во временной области, а в спектре появляются дополнительные составляющие, он становится шире. При этом спектр не обязательно симметричен относительно несущей, а сама несущая уменьшается с ростом девиации.

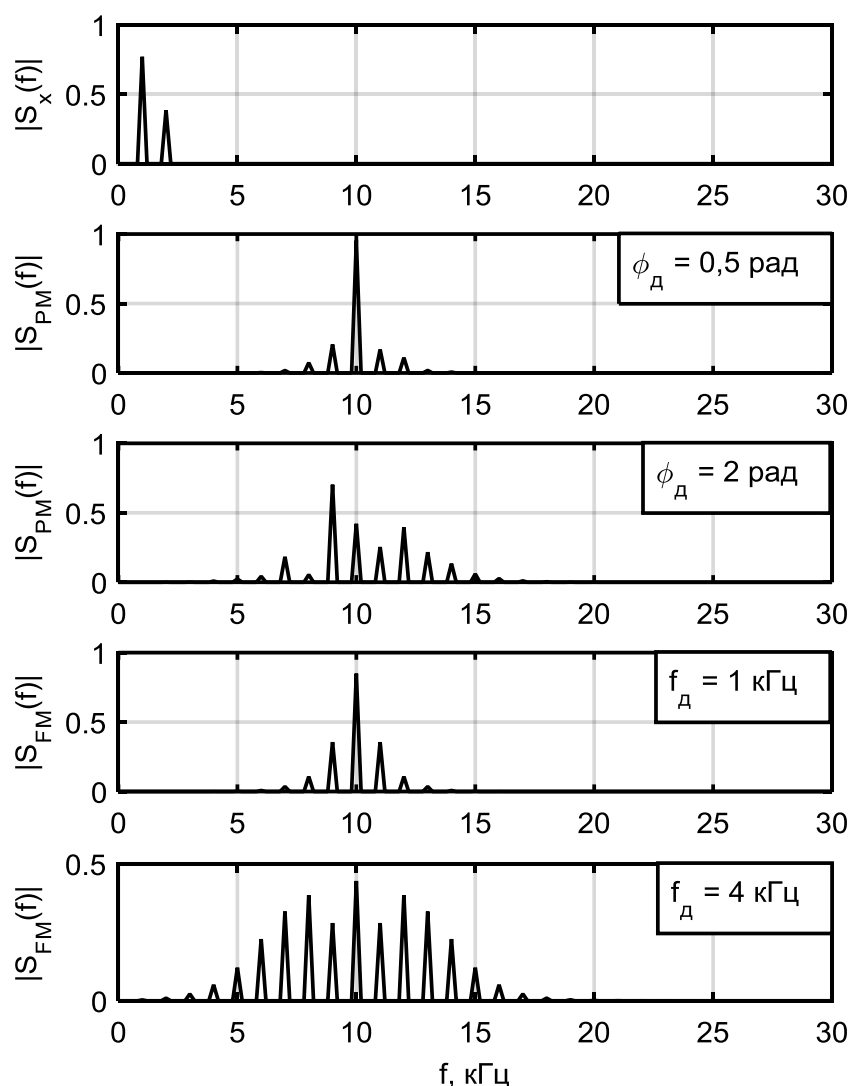


Рис. 1.6. Спектры сигналов с различными видами угловой модуляции

Ширина полосы определяется примерным выражением $\Delta f_{PM} \approx \Delta f_{FM} \approx 2f_v(1 + k_{PM,FM} + \sqrt{k_{PM,FM}})$. При $k \leq 1$ модуляция называется узкополосной, при $k > 1$ — широкополосной.

1.3. Компьютерное моделирование

Пример 1. Для моделирования сигналов с аналоговой модуляции в среде Matlab предусмотрены функции библиотеки Communication System Toolbox: `ammod()`, `ssbmod()`, `fmmod()`, `pmmod()`. Ниже приведен скрипт, позволяющий для заданного информационного сигнала и несущей получить ЧМ-сигнал и вывести соответствующие графики. Результат работы скрипта приведен на рис. 1.7.

```
% закрываем все окна, очищаем переменные и командную строку
close all; clear all; clc;

Fs = 180e3; % частота дискретизации для моделирования
Fc = 10e3; % частота несущей
Tsim = 5*1e-3; % время моделирования в мс
t = 0:1/Fs:Tsim-1/Fs; % ось времени
n = length(t); % количество отсчетов
f = 0:Fs/n:Fc*3; % ось частот
flim = length(f); % количество спектральных составляющих
f1 = 1e3; % основная частота информационного сигнала
An = 1; % амплитуда несущей
Ax = 1; % амплитуда информационного сигнала
% информационный сигнал
x = Ax*(cos(2*pi*f1*t) + 0.5*cos(2*pi*3*f1*t));
x0 = x/max(abs(x)); % нормировка информационного сигнала
uN = An*cos(2*pi*Fc*t); % несущее колебание
Fd = 4e3; % девиация частоты

uM = fmmod(x0, Fc, Fs, Fd); % модулированный сигнал

% амплитудный спектр информационного сигнала
sx = abs(fft(x)); sx = sx(1:flim)/n*2;
% амплитудный спектр модулированного сигнала
sM = abs(fft(uM)); sM = sM(1:flim)/n*2;

% осциллограмма нормированного сигнала
subplot(5, 1, 1); plot(t*1e3, x0)
ylabel('x_0(t), В')
grid on
title('Информационный сигнал')
% осциллограмма несущего колебания
subplot(5, 1, 2); plot(t*1e3, uN)
ylabel('uN(t), В')
grid on
title('Несущее колебание')
% осциллограмма модулированного сигнала
subplot(5, 1, 3); plot(t*1e3, uM)
ylabel('uM(t), В')
```

```

xlabel('t, мс')
title('Модулированный сигнал')
grid on
% амплитудный спектр нормированного сигнала
subplot(5, 1, 4); plot(f*1e-3, sx)
ylabel('|S_x(f)|, В')
grid on
title('Амплитудный спектр информационного сигнала')
% амплитудный спектр модулированного сигнала
subplot(5, 1, 5); plot(f*1e-3, sM)
ylabel('|S_M(f)|, В')
xlabel('f, кГц')
grid on
title('Амплитудный спектр модулированного сигнала')

```

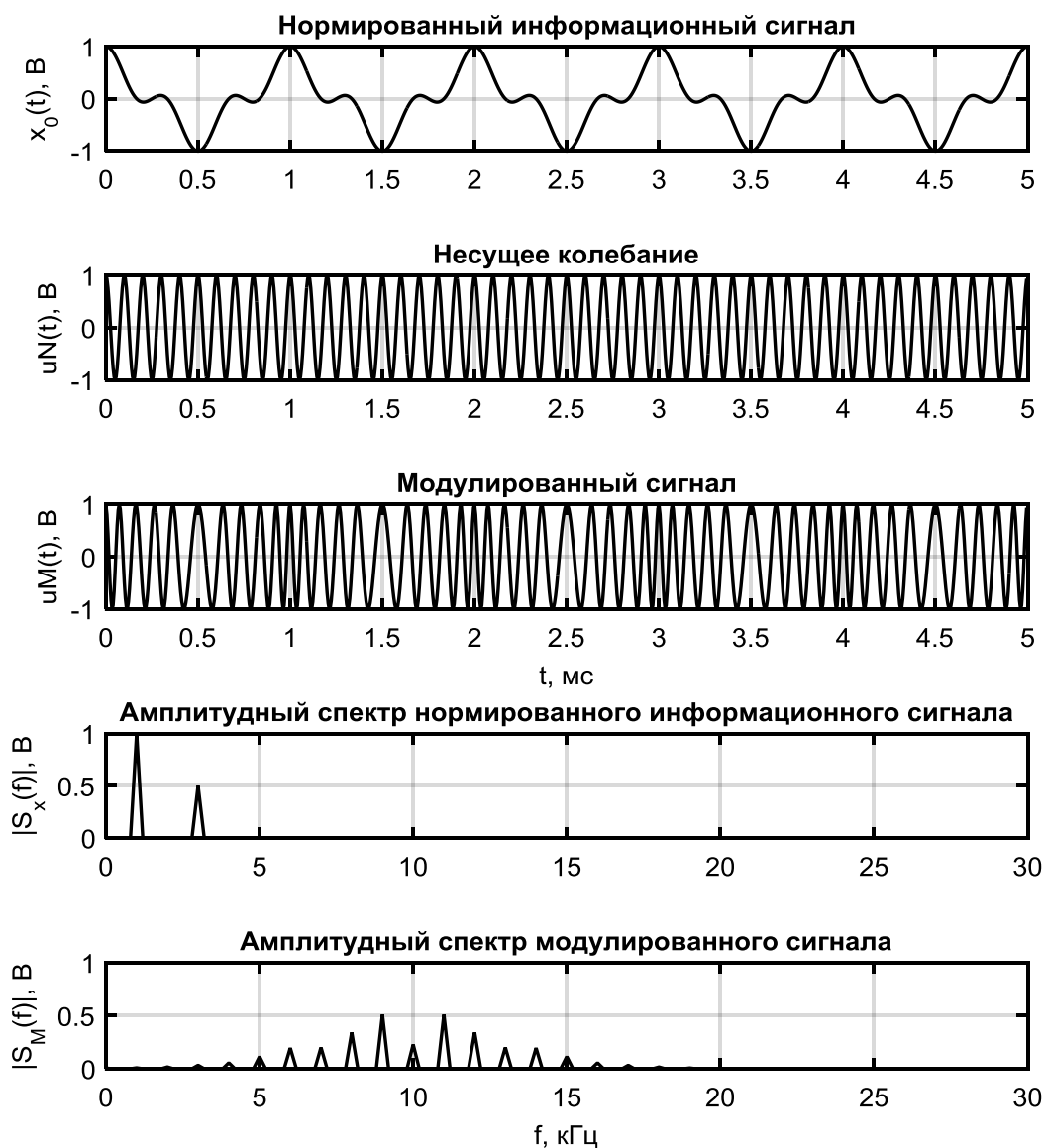


Рис. 1.7. Результат работы скрипта

Наиболее удобно осуществлять анализ радиосигналов с помощью *спектрограммы (сонограммы или водопада)*, которая позволяет наблюдать изменение спектра сигнала во времени. Для приведенного выше примера получить ее можно командой

```
spectrogram(uM, 32, 0, 1024, Fs);
```

при этом временное окно составляет 32 отсчета, окна без наложений, в каждом окне рассчитывается преобразование Фурье по 1024 точкам. Результат выполнения команды (при несущей 30 кГц, времени моделирования 20 мс, девиации 9 кГц) представлен на рис. 1.8.

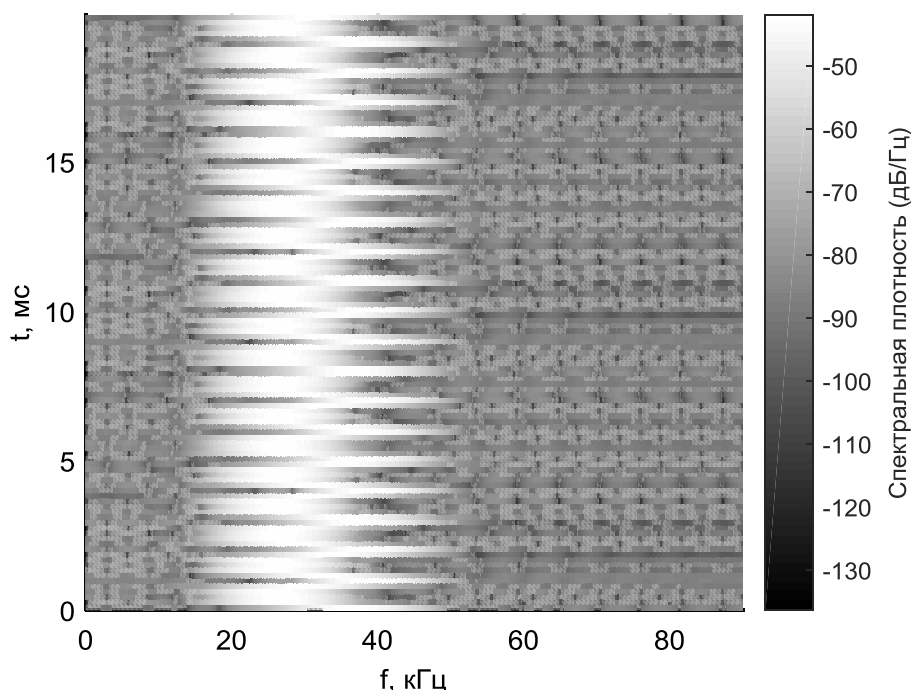


Рис. 1.8. Спектрограмма сигнала с ЧМ

Моделирование может быть проведено также в среде Simulink. Для этого используются блоки библиотек Communication System Toolbox и DSP System Toolbox. Частоту дискретизации в таком случае удобно задать блоком «Zero Order Hold» после формирования сигнала. Дискретизация необходима для компьютерного моделирования несмотря на то, что моделируются аналоговые системы. Саму частоту рекомендуется выбирать минимум в 4 раза больше частоты несущей, при этом полоса частот, занимаемая модулированным сигналом должна полностью укладываться в первую зону Найквиста.

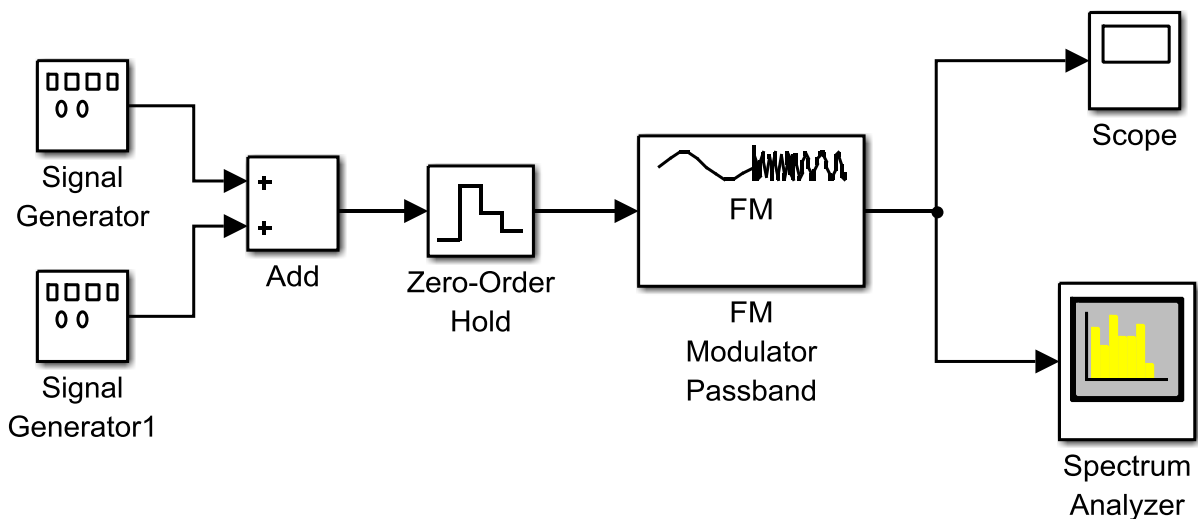


Рис. 1.9. Модель в среде Simulink

Пример 2. Следующий скрипт позволяет взять данные из звукового файла и подать их на модулятор. Затем модулированный сигнал проходит через канал с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) с заданным отношением «сигнал — шум» (ОСШ). После чего демодулируется и снова записывается в звуковой файл в таком же формате, как исходный. Результат позволяет сравнить на слух звучание исходного звука и восстановленного после прохождения канала связи с заданными параметрами.

```
% закрываем все окна, очищаем переменные и командную строку
close all; clear all; clc;

Fc = 64e3; % частота несущей
FsRF = Fc*4; % частота дискретизации радиосигнала
% открытие фрагмента файла с сигналом
[x, FsLF] = audioread('Rum1.wav', [1 5*1e4]);
% повышение частоты дискретизации для моделирования
x = resample(x, FsRF, FsLF);
Fd = 8e3; % девиация частоты
uM = fmmmod(x, Fc, FsRF, Fd); % модулированный сигнал
% зашумление модулированного сигнала с ОСШ 10 дБ
uM = awgn(uM, 10, 'measured', 123);
x = fmdemod(uM, Fc, FsRF, Fd); % демодуляция
% уменьшение частоты дискретизации до исходной
x = resample(x, FsLF, FsRF);
% запись демодулированного сигнала в файл
audiowrite('Rum1out.wav', x, FsLF);
```

1.4. Практические задания

1. Исследуйте влияние ошибки по фазе и частоте при синхронной демодуляции сигналов со всеми видами амплитудной модуляции (AM, DSB, USB, LSB):

- получите теоретические выражения;
- проверьте предположения, написав скрипт на языке Matlab, используя в качестве информационного сигнала выражение (1.6);
- повторите эксперимент со звуковым файлом, объясните возникающие эффекты.

Демодуляция осуществляется функциями `amdemod()`, `ssbdemod()`.

2. Разработайте в среде Simulink систему радиосвязи с тремя каналами, предварительно обосновав выбор вида модуляции и ее параметров, при условии, что заданы исходные звуковые файлы и шаг сетки частот:

- частота дискретизации файлов 8 кГц, сетка 10 кГц;
- частота дискретизации файлов 44,1 кГц, сетка 200 кГц;
- и т. д.

3. Постройте экспериментальные зависимости для всех видов аналоговой модуляции коэффициента нелинейных искажений (КНИ) по первым пяти гармоникам и ОСШ в демодулированном сигнале от ОСШ в канале. Параметры модуляции выбираются самостоятельно. В качестве информационного сигнала используется однотональный гармонический сигнал с частотой 1 кГц. Для расчета КНИ и ОСШ используется функции `thd()` и `snr()` соответственно.

4. Постройте экспериментальные зависимости качества звука от ОСШ в канале при различных видах аналоговой модуляции. Например, для AM ($m = 1$), FM ($k_{\text{FM}} = 1$), FM ($k_{\text{FM}} = 4$). Качество звука оценивается на слух по пятибалльной шкале, где «5» означает отличную разборчивость и отсутствие посторонних шумов, «4» — отличную разборчивость при небольшом уровне фонового шума, «3» — хорошую разборчивость при высоком уровне фонового шума, «2» — фоновый шум начинает забивать полезный сигнал, «1» — полезный сигнал с трудом прослушивается, «0» — только шум, полезный сигнал не слышен.

2. Системы с цифровыми видами модуляции

2.1. Особенности цифровой модуляции

Замена аналогового информационного сигнала $x(t)$ цифровым (импульсным) позволяет получить такой же набор видов модуляции, который описан в предыдущей главе. При этом такие виды модуляции называются цифровыми (*цифровой манипуляцией*): *ASK* (*amplitude shift keying*), *PSK* (*phase shift keying*), *FSK* (*frequency shift keying*). Основными характеристиками информационного сигнала становится не амплитуда и спектральный состав, а скорость передачи информации и количество уровней сигнала на один символьный интервал. Вводится понятие *символьной (бодовой) скорости* R_s как количество передаваемых информационных символов в единицу времени. Совокупность всех возможных символов образует *алфавит* размера M . Каждый символ состоит из одного или нескольких *бит* — k бит/символ. Обычно $M = 2^k$. *Битовая скорость* $R_b = R_s \cdot k$.

На рис. 2.1 представлен четырехуровневый информационный сигнал со скоростью передачи информации 10 кбод (ксимволов/с) и соответствующие ему амплитудная ($m = 1$) и частотная ($k_{FM} = 20$ кГц) модуляции при частоте несущей 50 кГц. В данном случае алфавит состоит из 4 символов и представляет собой набор {00, 01, 10, 11}. Таким образом, на каждый символ приходится 2 бита, а битовая скорость равна 20 кбит/с.

Наибольшее распространение получили *квадратурные виды модуляции*, в которых используется не одна, а две ортогональные несущие (синус и косинус). Сигнал при этом делится на *синфазную* I (*in phase*) и *квадратурную* Q (*quadrature*) составляющие, каждая из которых модулирует свою несущую. Использование такого подхода позволяет передавать в два раза больше информации в той же полосе частот. Примером таких видов модуляции служат: квадратурная амплитудная — *QAM-M* (*quadrature amplitude modulation*), квадратурная фазовая — *M-PSK*, где M означает размер алфавита. Распространены частные случаи фазовой модуляции: *BPSK* (*binary*), *QPSK* (*quadrature*), *OQPSK* (*offset*), $\pi/4$ -*QPSK*. Отдельный класс представляют разновидности

частотной модуляции с непрерывной фазой, например, *MSK* (*minimum shift keying*).

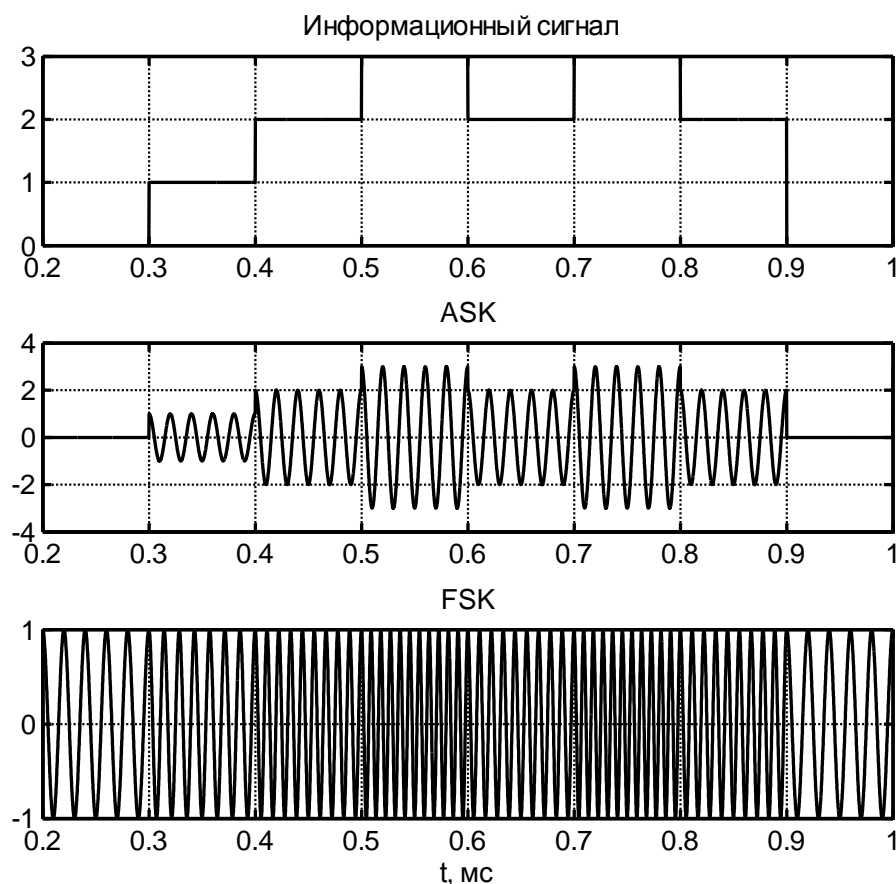


Рис. 2.1. Примеры цифровых видов модуляции

Квадратурные виды модуляции наглядно можно представить в виде созвездия точек. Под точкой подразумеваются мгновенные значения квадратур сигнала в моменты прохождения центров символьных интервалов. Дополнительно на созвездии может быть изображена траектория движения сигнала от точки к точке. На рис. 2.2 приведены сигнальные созвездия для некоторых видов модуляции.

Для ограничения ширины полосы используется фильтрация. Чаще всего фильтры Найквиста (для QAM, PSK) или Гаусса (для FSK, MSK). При использовании этих фильтров практически не происходит наложения соседних символов друг на друга в моменты времени, соответствующие центрам символов. Другими словами, *межсимвольная интерференция*, обусловленная фильтрацией, сводится к нулю, при этом полоса сужается до минимально теоретически возможной.

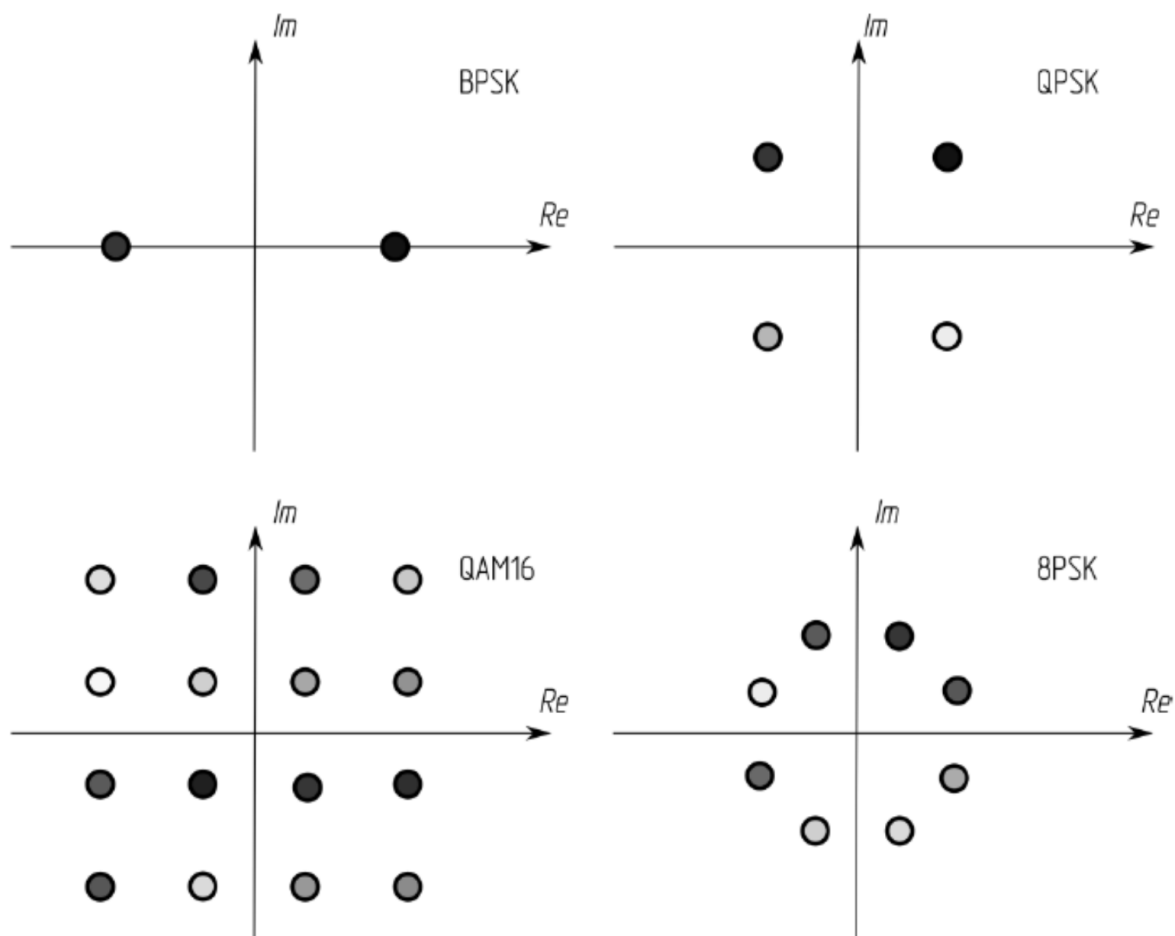


Рис. 2.2. Примеры сигнальных созвездий

Ширина радиополосы, необходимая для передачи информации с заданной символьной скоростью, определяется согласно теореме Найквиста: $\Delta f = R_S / (1 + r)$, где r — коэффициент сглаживания фильтра (*roll-off factor*), который может изменяться в пределах от 0 до 1.

Величина, равная отношению символьной скорости к полосе частот, называется *спектральной эффективностью*. Следствием теоремы Найквиста является ограничение максимальной теоретически возможной спектральной эффективности для радиосигналов в 1 символ/с/Гц. Битовая скорость может быть увеличена за счет повышения числа бит/символ, однако при этом будет уменьшаться помехоустойчивость сигнала.

Основным критерием качества при передаче цифровой информации является *коэффициент битовых (или символьных)*

ошибок — *BER (SER) bit (symbol) error ratio*. Поскольку в радиоканале помеховая обстановка гораздо хуже, чем в проводном, то в чистом виде информация, как правило не передается, а используется *помехоустойчивое кодирование*. Таким образом, задача передачи информации по радиоканалу в цифровом виде сводится к поиску компромисса при выборе метода модуляции и кодирования между шириной полосы и требуемым ОСШ в канале.

2.2. Низкочастотная и радиочастотная модуляции

Обычно на практике несущая в цифровом виде не создается, т. к. это значительно увеличивает необходимую частоту дискретизации, а для создания сигнала используется комплексная огибающая, спектральная плотность мощности которой сосредоточена вокруг нулевой частоты. Такой сигнал носит название низкочастотной модуляции — *baseband modulation*. Затем сформированный комплексный сигнал переносится на несущую частоту квадратурным модулятором и обратно квадратурным демодулятором. Сформированный на несущей частоте сигнал называется радиочастотной модуляцией — *passband modulation*.

Таким образом, если исходный сигнал можно представить как:

$$x(t) = I(t) + jQ(t), \quad (2.1)$$

комплексную несущую как:

$$u(t) = \cos(\omega_H t) + j \sin(\omega_H t), \quad (2.2)$$

тогда перенос на радиочастоту можно математически задать как:

$$u_{QM}(t) = \operatorname{Re}\{x(t) \cdot u(t)\} = I(t) \cos(\omega_H t) - Q(t) \sin(\omega_H t). \quad (2.3)$$

Обратная демодуляция описывается выражением

$$y(t) = 2 * \operatorname{LPF}\{u_{QM}(t) \cdot u^*(t)\}, \quad (2.4)$$

где $u^*(t)$ — комплексная сопряженная несущая, $\operatorname{LPF}\{\}$ — фильтр нижних частот, выделяющий полезную низкочастотную

составляющую после перемножения. В идеальном канале связи восстановленный сигнал равен переданному $y(t) = x(t)$.

Так же, как и в случае систем передачи информации с аналоговой модуляцией, использование различных несущих для различных источников информации позволяет реализовать *частотное разделение каналов*. Стоит заметить, что зачастую при рассмотрении методов организации множественного доступа также используют схожие по смыслу термины «уплотнение» и «мультиплексирование» (от англ. «*multiplexing*»). Последние чаще употребляются при описании проводных систем связи. Аналогичное явление можно заметить и в англоязычной литературе, где встречаются следующие обозначения: *FD* (*frequency division* — *частотное разделение*), *FDM* (*frequency division multiplexing* — *уплотнение с частотным разделением*), *FDMA* (*frequency division multiple access* — *множественный доступ с частотным разделением*).

Рассмотрим обобщенную схему многоканальной системы с частотным разделением каналов. Сигналы отдельных источников с помощью индивидуальных модуляторов преобразуются в каналные сигналы. Их совокупность на выходе устройства объединения образует групповой сигнал. Как правило, объединение подразумевает простое суммирование. Получившийся сигнал переносится на нужную частоту и излучается антенной. На приемной стороне последовательность действий заменяется на обратную с некоторыми логичными изменениями. Например, модуляторы заменяются на демодуляторы, а устройство объединения — на достаточно сложную систему выделения каналов. С некоторыми изменениями описанная схема может быть обобщена и для других методов множественного доступа.

2.3. Компьютерное моделирование

Пример 1. Ознакомление с особенностями моделирования РТСПИ с цифровыми видами модуляции в среде Simulink удобнее начать с простой одноканальной системы. На рис. 2.3 представлена модель такой системы. В данном примере используется модуляция с минимальным сдвигом MSK.

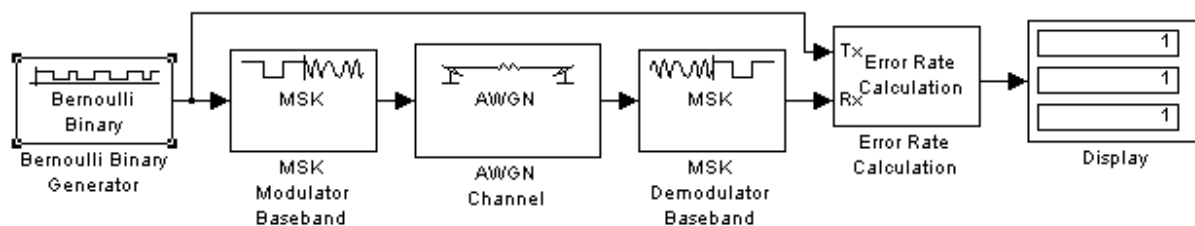


Рис. 2.3. Модель одноканальной системы связи в среде Simulink

Блок «*Bernoulli Binary Generator*» позволяет генерировать случайные бинарные последовательности, отвечающие распределению Бернулли. Основным параметром распределения является вероятность нуля («Probability of a zero»), которая может задаваться в интервале от 0 до 1. Задание разных значений параметра «Initial seed», инициализирующего генератор случайных последовательностей, позволяет получать разные реализации случайных процессов. Этот параметр встречается в настройках многих блоков, и общей рекомендацией является выставление разных значений этого параметра в разных блоках одной модели. Параметр «Sample time» позволяет регулировать время между генерируемыми случайными значениями. В данной модели его значение выбирается как величина обратная к битовой скорости R_b .

Блок «*MSK Modulator Baseband*» осуществляет модуляцию цифровой последовательности с использованием модуляции минимального сдвига. Параметр «Samples per symbol» определяет число отсчетов, приходящихся на каждый передаваемый символ (для данного вида модуляции каждый символ передает один бит данных). В числе задаваемых параметров нет частоты несущей, т. к. рассматриваемый блок генерирует модулированный сигнал со спектром, сосредоточенным около нуля оси частот. По сути, синтезируется комплексная огибающая модулированного сигнала, что является не индивидуальной особенностью данного блока, а проявлением общей концепции, заложенной при создании «Communication Blockset». Данное упрощение позволяет моделировать работу множества радиосистем без осуществления переноса сигнала на высокую несущую частоту. В то же время некоторые задачи требуют моделирования переноса на несущую. Этот вопрос будет рассмотрен далее.

Блок «*AWGN Channel*» позволяет зашумлять сигнал аддитивным белым гауссовским шумом. Возможно несколько вариантов задания параметров шума (раздел «Mode» в настройках блока), но наиболее удобным для широкого круга телекоммуникационных задач является режим, соответствующий вкладке «Signal to noise ratio (SNR)». При его выборе необходимо задать требуемое отношение «сигнал/шум» в дБ (параметр «SNR») и мощность входного сигнала (параметр «Input signal power», который по умолчанию равен 1 Вт).

Блок «*MSK Demodulator Baseband*» осуществляет демодуляцию сигнала с модуляцией минимального сдвига. Для правильной демодуляции необходимо задать значение параметра «Samples per symbol» таким же, как и в блоке «*MSK Modulator Baseband*».

Блок «*Error Rate Calculation*» позволяет измерять битовую ошибку (BER — Bit Error Rate). Для правильной работы блока необходимо задать величину задержки, вносимой исследуемой схемой (параметр «Receive delay»). Для ее измерения можно воспользоваться блоком «*Find delay*». Для отображения результатов измерений, осуществляемых блоком «*Error Rate Calculation*», необходимо в настройках в разделе «Output data» выбрать вариант «Port» и затем воспользоваться блоком «*Display*», визуализирующим измеряемые значения.

Пример 2. Ключевой особенностью моделирования многоканальной системы с частотным разделением в среде Simulink является недостаточность низкочастотных (baseband) версий модулированных сигналов. Перенос таких сигналов на поднесущие может быть осуществлен несколькими способами. Рассмотрим два варианта реализации этой операции. Первый способ основывается на использовании специального блока «*Phase/Frequency Offset*». Для переноса комплексного сигнала по частоте необходимо в настройках блока ввести значение параметра «Frequency offset», отвечающего за величину смещения в Гц. Процедура обратного переноса на нулевую частоту осуществляется с использованием этого же блока, однако значение параметра «Frequency offset» заменяется на такое же, но с противоположным (отрицательным) знаком. Важно понимать, что при этом сигнал остается комплексным, однако все общие закономерности сохраняются.

Второй способ основан на выражениях (2.3) и (2.4). Умножение сигнала на комплексную несущую с последующим извлечении действительной части продукта перемножения приведено на рис. 2.4 а. Обратная процедура осуществляется аналогичным образом, но дополнительно требует выполнения операции комплексного сопряжения (рис. 2.4 б).

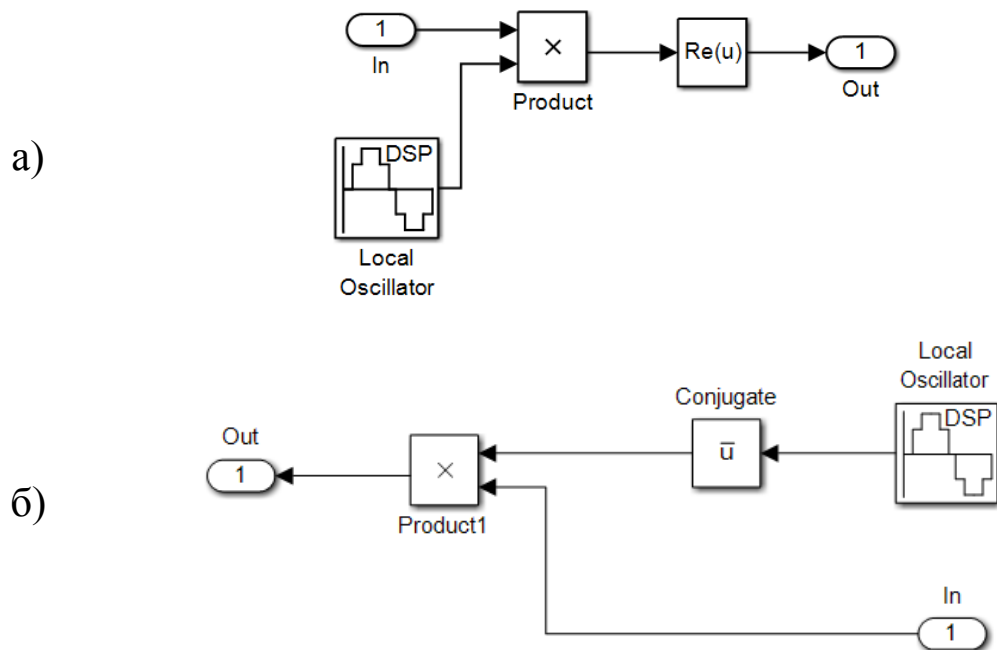


Рис. 2.4. Реализация схемы переноса модулированного сигнала вверх (а) и вниз (б) по частоте

Рассмотрим пример синтеза группового сигнала для 3-канальной системы с частотным разделением сигналов, использующей модуляцию минимального сдвига (рис. 2.5).

Настройка блоков «*Bernoulli Binary Generator*» и «*MSK Modulator Baseband*» осуществляется аналогично настройке для одноканальной модели в предыдущем примере. Однако при задании параметра «Samples per symbol» для блока «*MSK Modulator Baseband*» стоит проверять выполнение требования, следующего из теоремы Котельникова, т. к. полоса группового сигнала многократно превышает полосу отдельного сигнала одноканальной системы. Разные частоты несущих отдельных каналов подразумевают задание в рассматриваемой схеме отличных значений параметра «Frequency offset» для каждого из трех блоков «*Phase/Frequency Offset*».

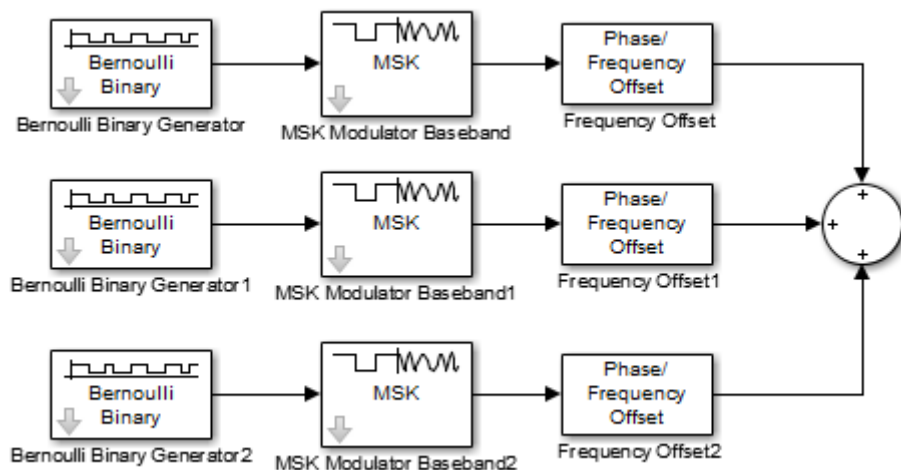


Рис. 2.5. Синтез группового сигнала для системы с частотным разделением в среде Simulink

2.4. Практические задания

1. В среде Simulink постройте модель одноканальной системы связи, использующей один из видов цифровой модуляции по указанию преподавателя. Настраивая параметры каждого блока, добейтесь правильной работы модели. В качестве подтверждения работы модели могут служить осциллограммы и спектрограммы сигналов. Исследуйте качественные изменения амплитудного спектра сигнала в зависимости от параметров, задаваемых в блоках генератора Бернулли и канала АБГШ. Для более глубокого анализа необходимо снять зависимость коэффициента битовой ошибки (BER) от отношения «сигнал/шум». Сравните полученный график с теоретическим, полученным для модуляции минимального сдвига. Сделайте выводы об адекватности полученной модели. В случае необходимости внесите изменения.

2. На основе опыта, полученного при выполнении предыдущего задания, разработайте модели для видов модуляции QPSK, OQPSK, $\pi/4$ -QPSK и MSK. Добавьте в модели необходимые фильтры Найквиста и Гаусса (для MSK), произведите их настройку. Получите траектории движения сигналов между точками созвездия, рассчитайте пик-фактор полученных сигналов (отношение пиковой мощности к средней). Сделайте выводы

о влиянии настроек фильтров на полученные результаты. Что можно сказать о форме огибающей каждого из видов модуляции?

3. Модернизируйте одну из созданных моделей, взяв в качестве источника битов не генератор случайных чисел, а звуковой файл. В случае идеального канала добейтесь безошибочной передачи данных и корректного сохранения файла на приемной стороне. Добавьте канал с АБГШ и пронаблюдайте зависимость качества звука от ОСШ в канале, пользуясь методикой из задания 4 раздела 1.4.

4. В среде Simulink постройте и проведите исследование модели многоканальной системы связи с частотным разделением каналов, использующей модуляцию минимального сдвига. Число каналов может варьироваться в пределах от 3 до 8, а скорость передачи в каждом канале от 2,4 до 256 кбит/с. Исследуйте влияние параметров цифровых разделяющих фильтров и соседних каналов на качество работы моделируемой системы связи. Сравните работу модели с разными значениями защитных полос между каналами.

3. Итоговые тесты

3.1. Вариант 1

1. При одинаковом и достаточно большом отношении «сигнал — шум» наилучшее качество передачи аналоговой информации (речь, музыка) будет достигаться при использовании:

- а) АМ с глубиной 0,5 в) ЧМ с коэффициентом 5,0
б) ЧМ с коэффициентом 1,0 г) АМ с глубиной 1,0

2. Аналоговая система связи с классической амплитудной модуляцией. Передается речь, глубина модуляции 1. Какая доля мощности приходится на полезную информацию?

- а) 33 % б) 50 % в) 75 % г) 100 %

3. Аналоговая система связи с однополосной амплитудной модуляцией. Передается речь. Как меняется мощность на выходе передатчика при переходе от пауз к активному речевому обмену?

- а) от нулевой до максимальной в) от 33 % до максимальной
б) от средней до максимальной г) не меняется

4. Аналоговая система связи с частотной модуляцией. Передается речь. Как меняется мощность на выходе передатчика при переходе от пауз к активному речевому обмену?

- а) от нулевой до максимальной в) от 33 % до максимальной
б) от средней до максимальной г) не меняется

5. Исторически первый способ разделения каналов:

- а) по времени б) по частоте в) по номеру г) по коду

6. Система связи, в которой в одном канале можно передавать и принимать информацию, но не одновременно, а поочередно, называется:

- а) симплексной б) дуплексной в) полудуплексной г) смешанной

7. Причина «порогового эффекта» аналоговых систем связи:

- а) ограниченная исправляющая способность декодера*
- б) преобладание нелинейных искажений над линейными*
- в) принципиально другой радиус действия по сравнению с цифровыми*
- г) устаревшие методы модуляции*

8. Есть битовый поток со скоростью 256 кбит/с. Какой вид манипуляции следует использовать для его передачи в радиоканале с полосой 100 кГц?

- а) BPSK*
- б) QPSK*
- в) PSK-8*
- г) QAM-16*

9. Теоретически предельная спектральная эффективность QAM-16:

- а) 2 Гц/бит/с*
- б) 2 бит/с/Гц*
- в) 4 бит/с/Гц*
- г) 4 Гц/бит/с*

10. Максимальная скорость передачи данных в канале без шума с полосой 100 кГц при использовании BPSK:

- а) 100 кбит/с*
- б) 50 кбит/с*
- в) 200 кбит/с*
- г) без шума не ограничена*

11. Переход с модуляции BPSK на QPSK приведет:

- а) к росту спектральной эффективности в 2 раза*
- б) расширению полосы сигнала в 2 раза*
- в) улучшению помехоустойчивости*
- г) уменьшению пик-фактора радиосигнала*

12. Переход с модуляции QPSK на OQPSK приведет:

- а) к росту спектральной эффективности в 2 раза*
- б) расширению полосы сигнала в 2 раза*
- в) улучшению помехоустойчивости*
- г) уменьшению пик-фактора радиосигнала*

13. Наихудшее значение вероятности битовой ошибки (BER) равно:

- а) 1*
- б) 0,5*
- в) 2*
- г) 0*

14. Скорость потока данных от источника информации равна 64 кбит/с, коэффициент компрессии кодера источника 4, скорость

используемого помехоустойчивого кода $1/2$, тогда скорость выходного потока равна:

- а) 128 кбит/с б) 32 кбит/с в) 64 кбит/с г) 8 кбит/с

15. Фильтры Найквиста, Гаусса и им подобные используются в цифровых системах связи:

- а) для минимизации межсимвольной интерференции
- б) увеличения помехоустойчивости
- в) предотвращения наложения спектров
- г) устранения переходов огибающей через ноль

16. Отношение «сигнал — шум» равно 6 дБ. Тогда максимальная пропускная способность канала (по теореме Шеннона — Хартли) с полосой 1 МГц составит:

- а) 2,3 Мбум/с
б) 8,5 Мбум/с
в) 7 Мбум/с
г) 2,8 Мбум/с

17. Скорость передачи информации 10 Бод. Это значит, что:

- а) символьная скорость 10 символов/с, битовая 10 бит/с
 б) символьная скорость 10 символов/с, битовую определить нельзя
 в) символьную скорость определить нельзя, битовая 10 бит/с
 г) символьная скорость 10 символов/с, битовая 20 бит/с

18. На снятии зависимости битовой ошибки от отношения «сигнал — шум» от 0 дБ до 20 дБ экспериментальный график повторяет теоретический, а начиная с 20 дБ битовая ошибка перестает зависеть от ОСШ и остается на достигнутом уровне. Это говорит:

- а) о наличии нелинейных искажений в сигнале
- б) наличии межсимвольной интерференции
- в) достижении предела Шеннона
- г) появлении порогового эффекта.

3.2. Вариант 2

1. При очень плохом отношении «сигнал — шум» голосовая связь будет возможна только:

- а) при классической амплитудной модуляции*
- б) однополосной модуляции*
- в) узкополосной ЧМ* *г) широкополосной ЧМ*

2. Аналоговая система связи с классической амплитудной модуляцией. Каков КПД (теоретический) такой системы при глубине модуляции 0,5?

- а) 11 %* *б) 33 %* *в) 50 %* *г) 75 %*

3. Аналоговая система связи с балансной модуляцией. Передается речь. Как меняется мощность на выходе передатчика при переходе от пауз к активному речевому обмену?

- а) от нулевой до максимальной* *в) от 33 % до максимальной*
- б) от средней до максимальной* *г) не меняется*

4. Аналоговая система связи с частотной модуляцией. КПД (теоретический) такой системы при коэффициенте модуляции 2:

- а) 33 %* *б) 50 %* *в) 75 %* *г) 100 %*

5. Среди аналоговых видов модуляции пороговый эффект менее всего свойствен:

- а) амплитудной* *в) фазовой*
- б) частотной* *г) однополосной*

6. Система связи, в которой в одном канале можно передавать и принимать информацию одновременно в обе стороны, называется:

- а) симплексной* *б) дуплексной* *в) полудуплексной* *г) смешанной*

7. Речевой сигнал с полосой 300... 3000 Гц передается с помощью аналоговой амплитудной модуляции и с помощью QAM-16 после оцифровки с частотой дискретизации 8 кГц и разрядностью 8 бит без использования сжатия и кодирования

при использовании фильтра Найквиста к коэффициентом сглаживания 0,5. Тогда отношение занимаемой полосы при цифровой модуляции к занимаемой аналоговой будет

- а) в 4 раза больше*
- б) в 2 раза больше*
- в) в 2 раза меньше*
- г) одинаковой*

8. При использовании QPSK без кодирования битовая ошибка 10^{-5} достигалась при некотором ОСШ равном X дБ. После введения кодирования это значение ошибки стало достигаться при $X - 1,6$ дБ. Разница в ОСШ носит название:

- а) предел Шеннона*
- б) энергетический выигрыш*
- в) порог устойчивости*
- г) предел чувствительности*

9. Увеличение коэффициента сглаживания фильтра Найквиста приведет

- а) к расширению полосы и увеличению пропускной способности*
- б) сужению полосы без увеличения пропускной способности*
- в) уменьшению пик-фактора без потери пропускной способности*
- г) увеличению пик-фактора и увеличению пропускной способности*

10. Максимальная пропускная способность канала без шума с полосой 100 кГц при использовании размера алфавита $M=16$:

- а) 1600 кбит/с*
- б) 3200 кбит/с*
- в) 400 кбит/с*
- г) без шума не ограничена*

11. Наименее требовательный к линейности усилителя вид модуляции:

- а) QPSK*
- б) QAM-16*
- в) GMSK*
- г) $\pi/4$ -QPSK*

12. Переход с модуляции FSK на GFSK приведет:

- а) к уменьшению полосы сигнала*
- б) расширению полосы сигнала*
- в) улучшению помехоустойчивости*
- г) увеличению пропускной способности*

13. Использование кода Грея вместо обычного двоичного при многопозиционной модуляции приведет к тому, что:

- а) символьная и битовая ошибки уменьшатся*
- б) символьная ошибка не изменится, а битовая уменьшится*
- в) битовая ошибка не изменится, а символьная уменьшится*
- г) ни символьная ни битовая ошибки не изменятся*

14. Скорость потока данных от источника информации равна 64 кбит/с, коэффициент компрессии кодера источника 4, скорость используемого помехоустойчивого кода $1/4$, тогда скорость выходного потока равна

- а) 128 кбит/с*
- б) 32 кбит/с*
- в) 64 кбит/с*
- г) 8 кбит/с*

15. При переходе с BPSK на QPSK при одинаковом отношении «сигнал — шум»

- а) битовая ошибка уменьшится*
- б) битовая ошибка не изменится*
- в) зависит от отношения «сигнал — шум»*
- г) битовая ошибка увеличится*

16. Отношение «сигнал — шум» по мощности равно 15 раз. Тогда максимальная пропускная способность канала (по теореме Шеннона — Хартли) с полосой 1 МГц составит:

- а) 4 Мбит/с*
- б) 1,2 Мбит/с*
- в) 3,8 Мбит/с*
- г) 16 Мбит/с*

17. Скорость передачи информации 10 Бод. Это значит, что

- а) символьная скорость 10 символов/с, битовая 10 бит/с*
- б) символьная скорость 10 символов/с, битовую определить нельзя*
- в) символьную скорость определить нельзя, битовая 10 бит/с*
- г) символьная скорость 10 символов/с, битовая 20 бит/с*

18. При превышении некоторого значения мощности сигнала на входе приемника битовая ошибка начинает расти и быстро достигает максимума. Это говорит:

- а) о наличии нелинейных искажений*
- б) наличии межсимвольной интерференции*
- в) достижении предела Шеннона*
- г) появлении порогового эффекта.*

Контрольные вопросы

1. Объясните необходимость использования модуляции при передаче информации по радиоканалу и понятие «несущая».
2. Перечислите достоинства и недостатки классической амплитудной модуляции. Какие преимущества имеют альтернативные виды амплитудной модуляции?
3. От чего зависит ширина полосы частот, занимаемая модулированным сигналом при АМ и ЧМ?
4. Можно ли по осциллограмме отличить частотную модуляцию от фазовой, не зная передаваемый сигнал?
5. Почему для коммерческого радиовещания в УКВ-диапазоне применяется широкополосная угловая модуляция, а для профессиональной радиосвязи — узкополосная?
6. Как проявляется пороговый эффект в системах передачи информации?
7. Какие виды цифровой модуляции вам известны?
8. В чем состоит основная особенность и важное преимущество квадратурных видов модуляции?
9. Для чего используются фильтры Найквиста и Гаусса при формировании многих видов цифровых модуляций?
10. Дайте определение спектральной эффективности.
11. В чем отличие низкочастотной модуляции и радиочастотной?
12. Как определить минимально допустимую полосу частот для передачи сигнала с заданной скоростью и видом модуляции?

Список рекомендуемой литературы

1. Телекоммуникационные системы и сети : учеб. пособие : в 3 т. Т. 2 : Радиосвязь, радиовещание, телевидение / под ред. В. П. Шувалова. — М. : Горячая линия — Телеком, 2005.
2. Радиосистемы передачи информации / В. А. Васин, В. В. Калмыков, Ю. Н. Себекин и др. — М. : Горячая линия — Телеком, 2005.
3. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис ; пер. с англ. — М. : Радио и связь, 2000.
4. Феер, К. Беспроводная цифровая связь : Методы модуляции и расширения спектра / К. Феер ; под ред. В. И. Журавлева. — М. : Радио и связь, 2000.
5. Рожков, И. Т. Радиосистемы передачи информации : учеб. пособие для вузов / И. Т. Рожков. — Ярославль : Яросл. высшее зенитное ракетное училище противовоздушной обороны, 2006.
6. Ярмоленко, В. И. Сигналы в радиотехнических и телекоммуникационных системах : учеб. пособие / В. И. Ярмоленко, А. Л. Приоров. — Ярославль : ЯрГУ, 2006.
7. Ярмоленко, В. И. Сигналы в радиотехнических и телекоммуникационных системах : учеб. пособие. Ч. 2 / В. И. Ярмоленко, А. Л. Приоров. — Ярославль : ЯрГУ, 2008.

Оглавление

Введение	3
1. Системы с аналоговыми видами модуляции.....	4
1.1. Амплитудные виды модуляции	4
1.2. Угловые виды модуляции.....	9
1.3. Компьютерное моделирование	12
1.4. Практические задания.....	16
2. Системы с цифровыми видами модуляции	17
2.1. Особенности цифровой модуляции.....	17
2.2. Низкочастотная и радиочастотная модуляции	20
2.3. Компьютерное моделирование	21
2.4. Практические задания.....	25
3. Итоговые тесты.....	27
Контрольные вопросы.....	33
Список рекомендуемой литературы.....	34

Учебное издание

Дубов Михаил Андреевич
Топников Артем Игоревич

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

Практикум

Редактор, корректор М. Э. Левакова
Верстка М. Э. Леваковой

Подписано в печать 03.11.16. Формат 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,0.

Тираж 4 экз. Заказ

Оригинал-макет подготовлен
в редакционно-издательском отделе ЯрГУ

Ярославский государственный университет
им. П. Г. Демидова.
150000, Ярославль, ул. Советская, 14.