

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач анализа и синтеза систем передачи информации наряду с аппаратно-программными комплексами широко используется моделирование систем передач. Данное учебное пособие представляет собой инструмент для совершенствования учебного процесса путем введения практических работ, при выполнении которых учащиеся задействуют методы численного моделирования.

В учебном пособии рассматриваются задачи генерации модулированных сигналов, синтеза многоканальных систем, оценки помехозащищенности каналов связи с ИКМ в среде *Matlab Simulink*. Изучение данных вопросов является частью учебного плана студентов, обучающихся по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и смежных с ним направлений.

В первой главе излагаются особенности формирования и модуляции сигналов в программной среде *Matlab Simulink*. Во второй главе рассматриваются особенности импульсной модуляции сигналов, изучаются свойства и разрабатываются схемы модуляции и демодуляции таких сигналов. В третьей главе изложены основы проектирования многоканальных систем передачи с частотным и временным разделением каналов, приведены особенности обработки сигналов в таких системах. Четвертая глава посвящена шумовой составляющей сигналов и оценке помехозащищенности многоканальных систем связи.

В конце каждой главы представлены практические задания, которые содержат необходимую для освоения материала структуру, а также контрольные вопросы для детального понимания вопросов проектирования систем передач.

1 МОДУЛЯЦИЯ СИГНАЛОВ

1.1 Введение в спектральный анализ. Представление сигналов в частотной области

Принято давать сигналу следующее определение: сигнал – физический носитель сообщения (информации), предназначенного для передачи. В качестве сигнальной информации могут выступать различные величины: параметры физических процессов (давление, температура), электрических колебаний (напряжение и ток), и других периодических и непериодических процессов. Для теоретического изучения вводится математическая модель сигнала, аргументом функции которой, как правило, является время – $s(t)$, $x(t)$ и др.

Математическая модель позволяет абстрагироваться от физической природы носителя сообщения и описывает наиболее существенные свойства сигнала. Также введение математической модели позволяет провести классификацию сигналов.

Любая физическая величина по характеру изменения ее значения может быть постоянной (если она имеет только одно фиксированное значение), дискретной (если она может иметь два или более фиксированных значений), или аналоговой (если она может иметь бесчисленное множество значений). Все эти величины могут быть преобразованы в цифровую форму.

Аналоговым называют сигнал, произвольный по величине и непрерывный во времени. Аналоговый сигнал $x(t)$ описывается непрерывной или кусочно-непрерывной функцией времени. Дискретный сигнал принимает мгновенные значения сигнала $x(t)$ в дискретные моменты времени, расположенные друг от друга на расстоянии, называемом периодом дискретизации, T_d . Выбор периода дискретизации производится в соответствии с Теоремой Котельникова, согласно которой, функцию $x(t)$, частотный спектр которой ограничен частотой f , можно представить при помощи ее мгновенных значений, следующих друг за другом через $1/2f$ секунд. Таким образом, период дискретизации составляет $1/2f$. Дискретизация сигнала представлена на рис. 1.1.

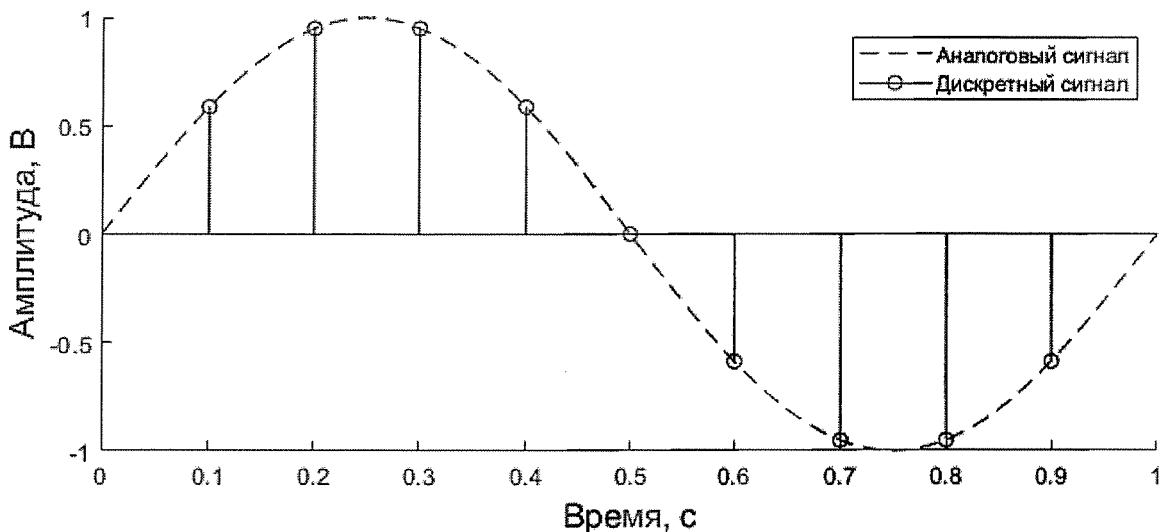


Рис. 1.1. Дискретизация сигнала

В представленном примере период дискретизации T_d составляет 0,1 секунды, что соответствует десяти отсчетам дискретного сигнала на один период аналогового. Листинг кода *Matlab*, производящего дискретизацию сигнала, как на рис. 1.1, представлен в прил. 1.1.

Следует отметить, что формируемый в листинге периодический сигнал не является аналоговым. Все сигналы, представляемые в компьютере, являются цифровыми и этот сигнал не исключение. Но для моделирования мы будем считать его «псевдоаналоговым», так как выбираем для него период дискретизации (0,0001) много меньший периода дискретизации дискретного сигнала d_sig .

Помимо представления во временной области, сигнал может быть представлен в частотной области. Как правило, в обработке сигналов используют для анализа сигнала в частотной области амплитудный и фазовый спектр. Особенности формирования спектров рассматриваются студентами в курсе цифровой обработки сигналов и общей теории связи и в рамках данного учебного пособия не затрагиваются.

Спектры сигнала, сгенерированного в листинге прил. 1.1, представлены на рис. 1.2. Для отображения частота сигнала увеличена до 10 Гц. В прил. 1.2 приведен листинг программного кода, рассчитывающего спектр этого сигнала.

Анализируя амплитудный спектр, можно заметить ярко выраженный пик на графике, расположенный по шкале частот на частоте, равной частоте сигнала, 10 Гц. Это говорит о том, что сигнал представлен одной гармонической составляющей этой частоты, и составляющих на других частотах в данном сигнале нет.

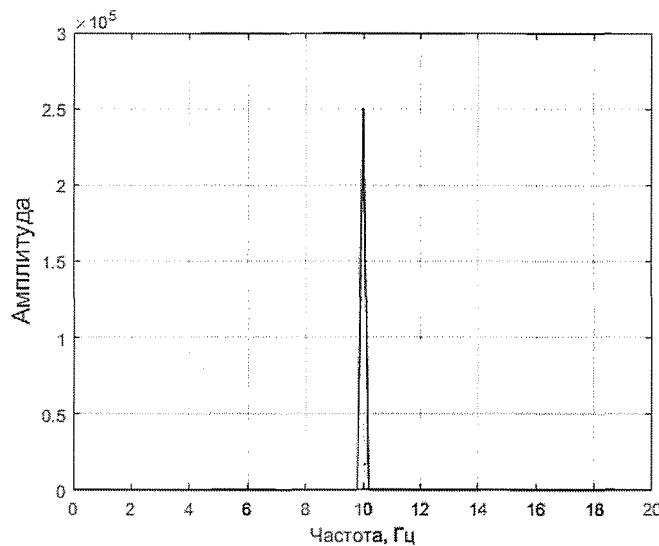


Рис. 1.2. Амплитудный спектр периодического сигнала с частотой 10 Гц

Рассмотрим сложный сигнал, состоящий из суммы двух синусов разной амплитуды и частоты (рис. 1.3). Пунктирной линией на графике отображены две периодические составляющие, из которых состоит рассматриваемый сложный сигнал, с частотами 10 и 20 Гц и амплитудами 1 и 0,5 В соответственно.

Генерация периодических сигналов в среде *Simulink* может быть осуществлена с помощью блока *Sine Wave* для гармонического сигнала и *Pulse Generator* для прямоугольного сигнала. Отображение временных диаграмм возможно с помощью использования блока *Scope*, который является аналогом цифрового осциллографа (рис. 1.4).

Отображение сигнала в частотной области можно получить с помощью блока *Spectrum Analyzer* (рис. 1.5). Реализация сложного сигнала, аналогичного изображенному на рис. 1.3, и его спектр изображены на рис. 1.6.

Одним из свойств спектров сигналов, следующих из преобразований Фурье, является спектр суммы сигналов.

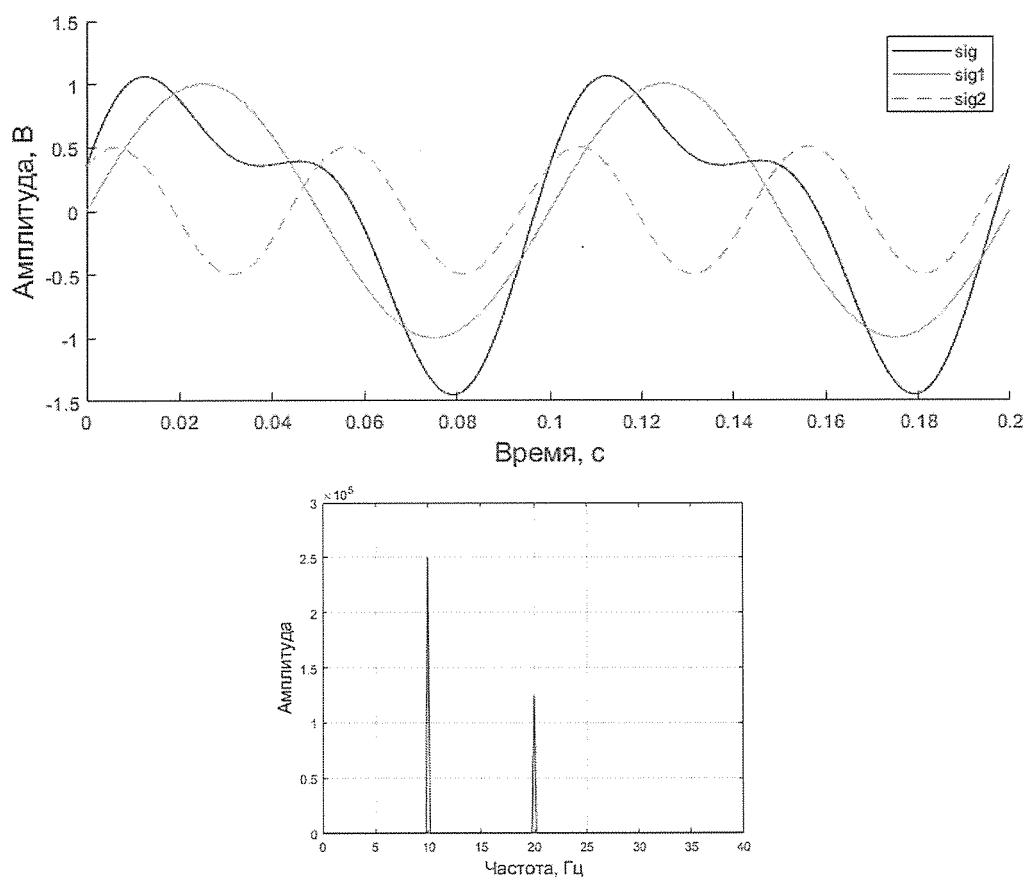


Рис. 1.3. Сложный сигнал и его амплитудный спектр

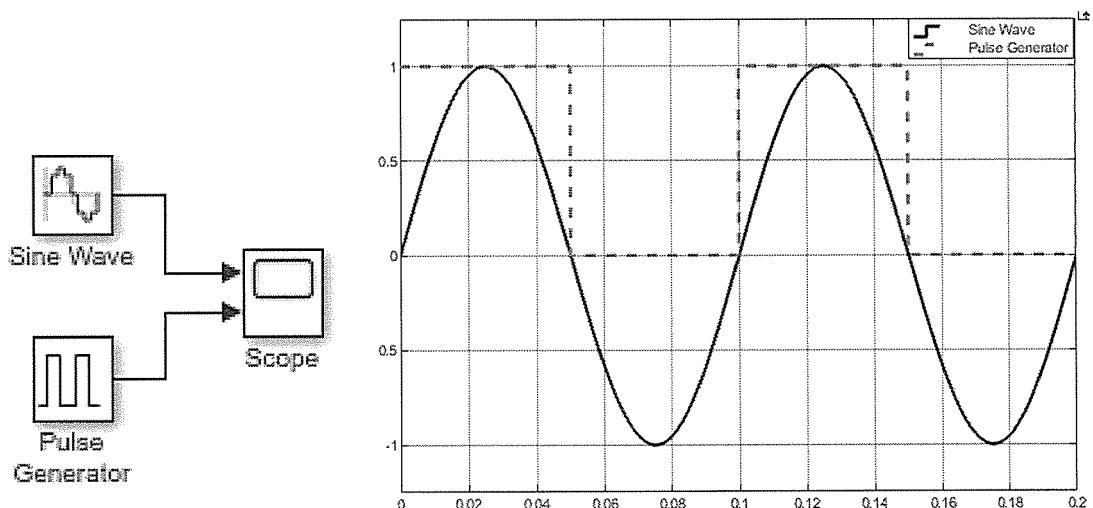


Рис. 1.4. Генерация периодических сигналов в среде Simulink

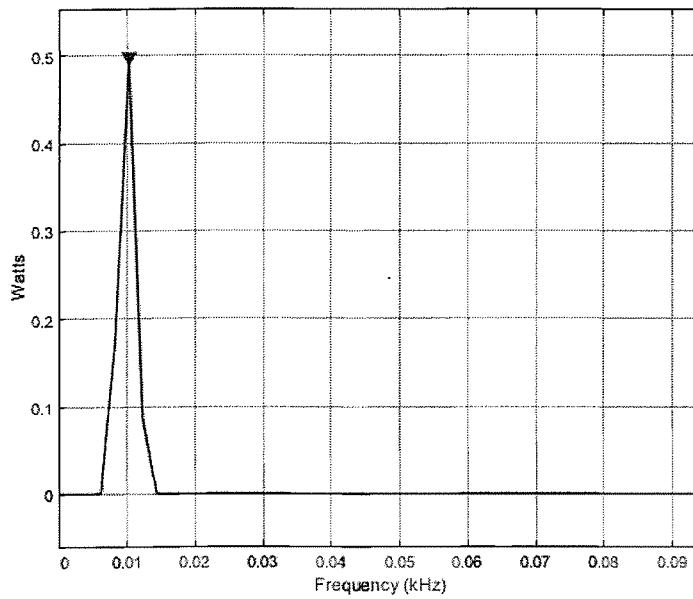


Рис. 1.5. Амплитудный спектр гармонического сигнала с частотой 10 Гц

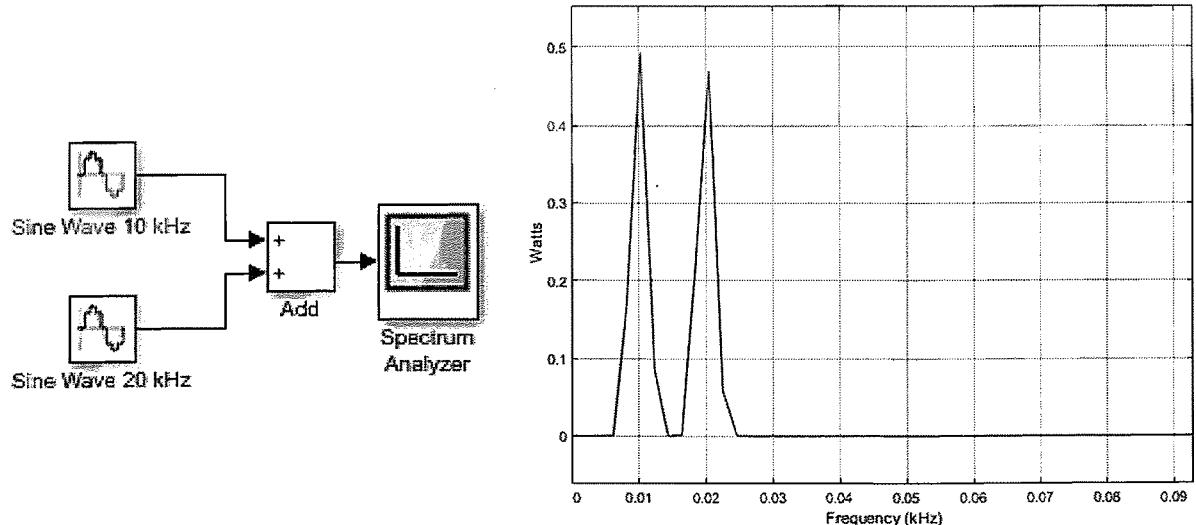


Рис. 1.6. Реализация сложного сигнала в среде Simulink и его спектр

Исходя из теоремы сложения, спектр суммы сигналов равен сумме их спектров, что можно увидеть на рис. 1.6.

1.2 Методы аналоговой модуляции

Для эффективной передачи электрических информационных сигналов с минимально возможными искажениями сигналы должны быть адаптированы к физическим характеристикам канала передачи. С этой целью полезным сигналом (речью, музыкой, данными) производится изменение амплитуды, частоты или фазового угла несущего сигнала, обеспечивая эффективное использование канала передачи. Этот процесс называется модуляцией.

В методах модуляции в качестве несущей используется непрерывный сигнал, в частности, синусоидальное колебание. К двум разновидностям методов непрерывного времени относятся модуляция непрерывными значениями и модуляция дискретными значениями. Воздействие непрерывного значения на непрерывную во времени несущую называется аналоговой модуляцией, в то время как воздействие дискретного значения называется цифровой модуляцией.

При аналоговых видах модуляции осуществляется непрерывная обработка таких аналоговых сигналов, как голосовые, музыкальные или видеосигналы без оцифровки значений сигнала передачи. Существует два основных вида аналоговой модуляции: амплитудная модуляция и угловая модуляция. Основные виды аналоговой модуляции приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Обзор важнейших видов аналоговой модуляции

Вид модуляции	Сокращение
Амплитудная модуляция	AM
Однополосная (с одной боковой полосой)	SSB-AM (ОБП)
С частично подавленной боковой полосой	VSB-AM (ЧПБП)
С двумя боковыми полосами и подавленной несущей	DSBSC-AM (ДБП)
Частотная модуляция	FM (ЧМ)
Фазовая модуляция	PM (ФМ)

Преимущества модуляции (по сравнению с немодулированным сигналом):

1. Возможность увеличения каналов на одной линии связи.
2. Рост достоверности передаваемой информации при использовании помехоустойчивых методов модуляции.
3. Повышение эффективности излучения сигнала при передачи по радиоканалу.
4. Повышение эффективности каналов связи и удешевление передачи сообщений.

1.3 Амплитудная модуляция

При амплитудной модуляции (АМ) информация из полезного сигнала непрерывно преобразуется в колебания амплитуды передаваемого сигнала. Пусть $U_c(t) = U_\Omega \cos(\Omega t)$ - сигнал сообщения, $U_n(t) = U_{w_0} \cos(w_0 t)$ – несущая.

Под воздействием сообщения на амплитуду несущей $U_{\text{ам}}(t)$ образуется новое колебание, в котором изменяется только амплитуда (рис. 1.7):

$$U_{\text{ам}}(t) = U_{\text{ам}}(t) \cos(w_0 t).$$

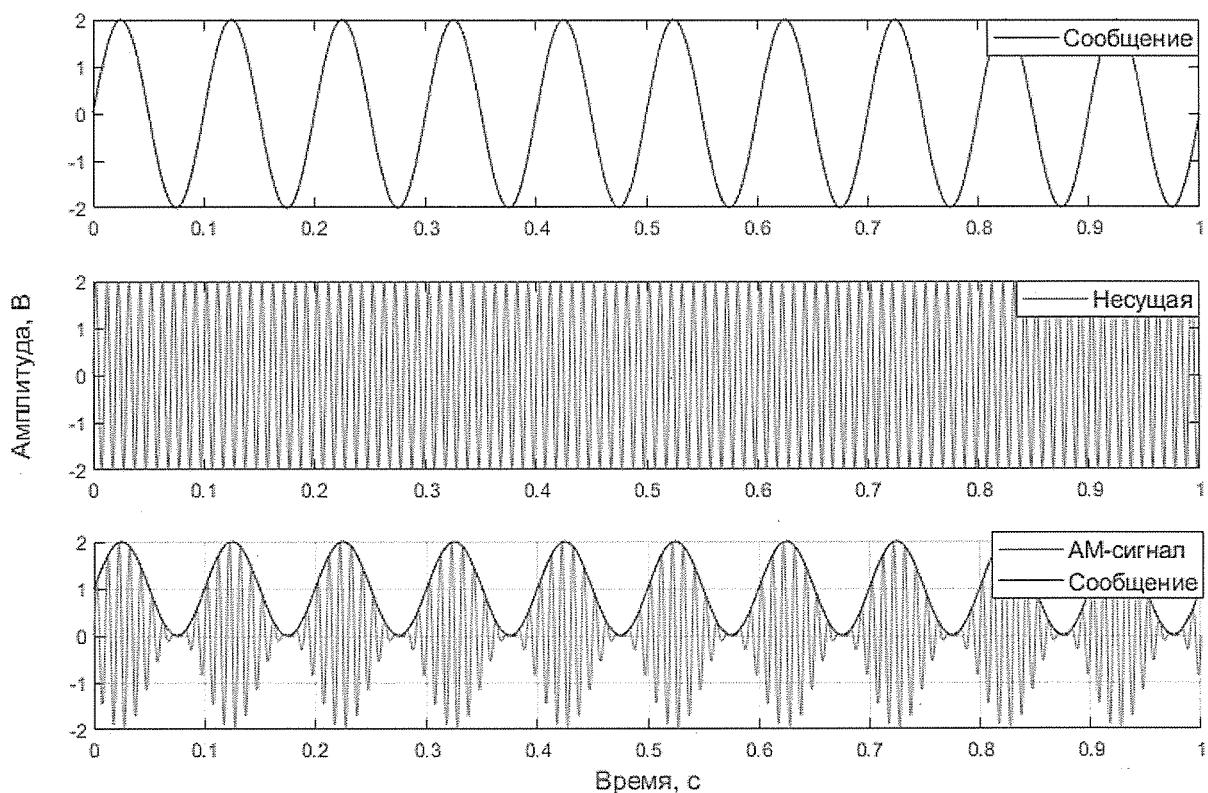


Рис. 1.7. Амплитудная модуляция

Листинг программного кода, реализующего модуляцию, приведен в прил. 1.3.

Для оценки АМ-сигнала используют коэффициент модуляции, имеющий также глубиной модуляции. Этот параметр определяет относительное изменение амплитуды несущей:

$$m = k \frac{U_{\Omega}}{U_{\omega_0}} = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}},$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Согласно свойствам спектров, спектр произведения сигналов, которым является АМ-сигнал, находится путем проведения операции свертки над спектрами этих сигналов. Спектр АМ-сигнала состоит из трех гармоник, частота одной из которых соответствует частоте несущей. Две другие составляющие называются боковыми частотами, верхней и нижней, и отстоят от несущей частоты на $-f$ и f соответственно, то есть, на частоту сигнала-сообщения (рис. 1.8).

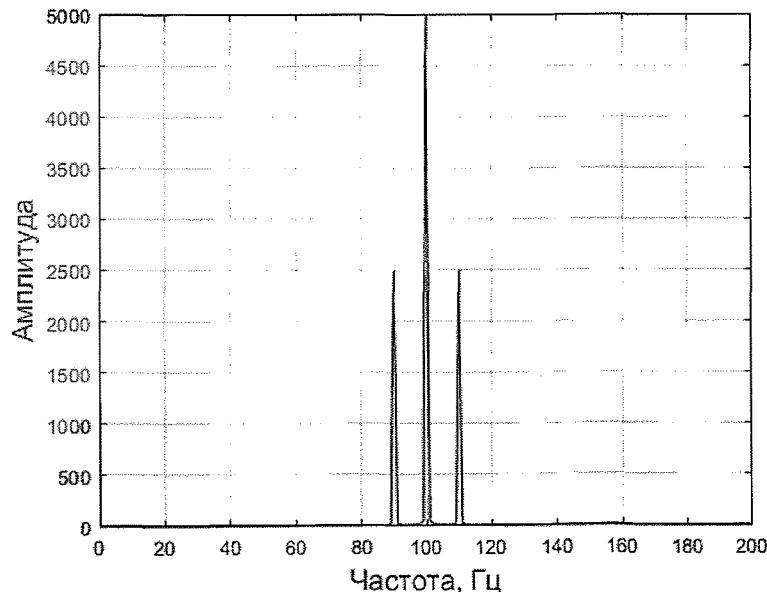


Рис. 1.8. Спектр АМ-сигнала

Реализация АМ в среде *Simulink* производится путем генерации двух гармонических колебаний и их последующего умножения с помощью блока *Product* (рис. 1.9). Для упрощения схемы, генерация информационного

сигнала с переносом в положительную область перенесена в отдельный блок *Signal* с помощью механизма создания *Subsystems*.

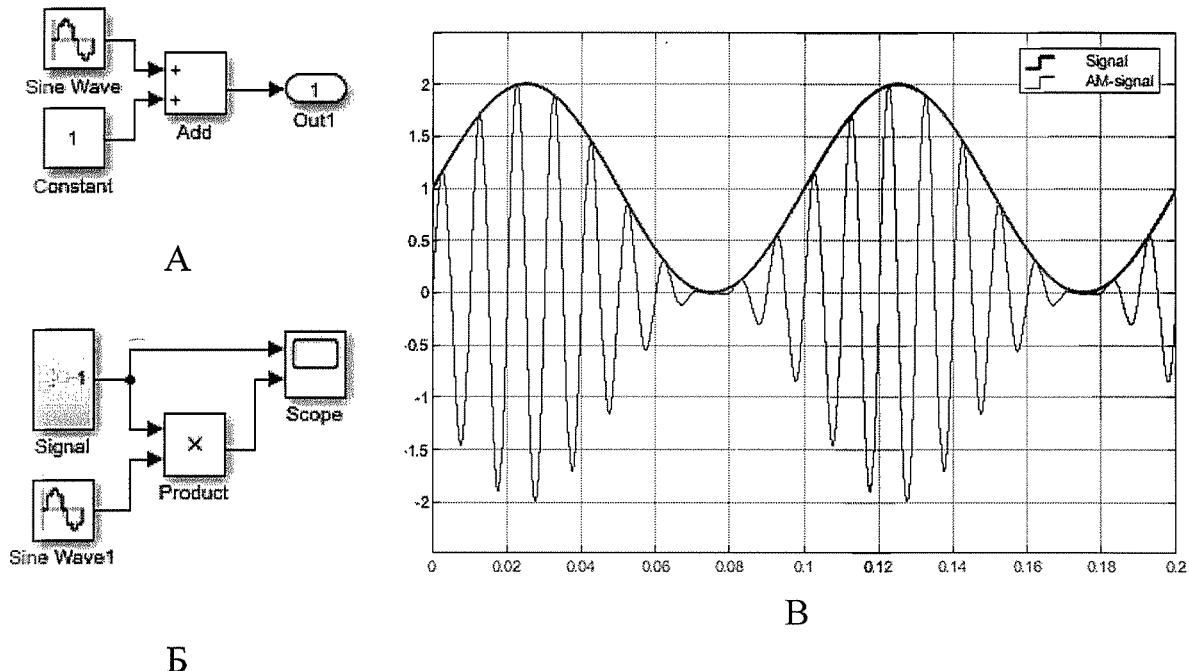


Рис.1.9. Реализация амплитудной модуляции в среде Simulink: А – информационный сигнал; Б – схема модуляции; В – осциллограмма

Блок *SineWave1* настроен в соответствии с прил. 1.3 и генерирует несущее колебание с частотой 100 Гц. Осциллограмма АМ-сигнала может быть получена с помощью уже известного блока *Spectrum Analyzer*.

Демодуляция, то есть выделение сообщения из сложного модулированного сигнала, при амплитудной модуляции осуществляют путем выделения огибающей сигнала-переносчика при его детектировании и последующей фильтрации низких частот на выходе детектора (устройства детектирования). Операция умножения, используемая для реализации амплитудной модуляции, приводит к переносу спектра низкочастотного сигнала в полосы, окружающие положительную несущую частоту ($+f_{нес}$) и отрицательную несущую частоту ($-f_{нес}$). В спектрограммах, приложенных выше, отображается только область положительных частот, на самом деле спектр симметричен относительно частоты 0 Гц. Таким образом, мы можем думать об амплитудной модуляции как о сдвиге исходного спектра вверх на величину $f_{нес}$ и вниз на величину $f_{нес}$. Из этого следует, что умножение модулированного сигнала на несущую частоту будет возвра-

щать спектр обратно в исходное положение, т.е. будет смещать спектр вниз на $f_{\text{нес}}$ таким образом, чтобы он снова был отцентрирован вокруг 0 Гц.

Для смоделированного выше сигнала, не подверженного воздействию помех, выделение огибающей можно свести к делению АМ-сигнала на несущий сигнал. Зачастую, при передаче по линиям связи, детектируемый сигнал подвергается помехам и приходит с временной задержкой. Любые задержки могут привести к сдвигу фазы и деление сигналов не даст необходимого результата. Поэтому в обработке сигналов применяют математические методы выделения огибающей, например, преобразование Гильbertа. Результат преобразования Гильbertа для АМ-сигнала, полученного при модуляции последовательности прямоугольных импульсов скважности 0,5 (то есть длительность импульса равна длительности паузы), приведен на рис. 1.10.

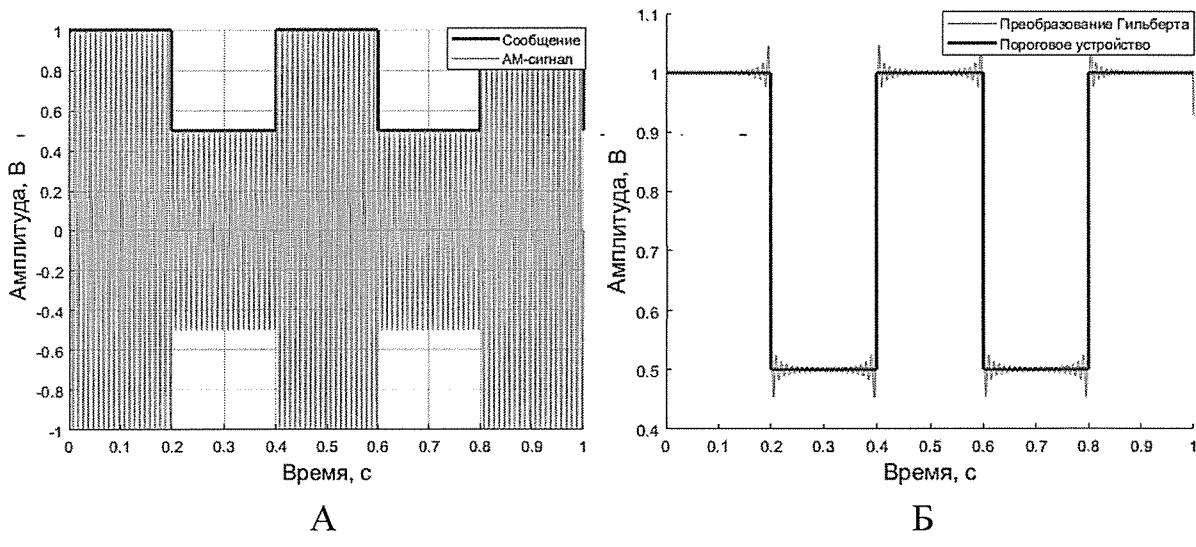


Рис. 1.10. Амплитудная модуляция импульсной последовательности:

А – модулированный сигнал;

Б – демодуляция сигнала

Дальнейшее приведение сигнала к импульсной форме возможно с применением порогового устройства. Прил. 1.4 предоставляет листинг программного кода *Matlab*, организующего данные манипуляции.

1.4 Частотная модуляция

Частотная модуляция (англ. FM - *frequency modulation*) – вид модуляции, при котором сигнал-сообщение управляет частотой несущего колебания.

При частотной модуляции (ЧМ) мгновенные значения сигнала сообщения (тока или напряжения) изменяют частоту несущей, оставляя неизменной его амплитуду:

$$\omega = \omega_0 + m_q \Omega \cos(\Omega t),$$

где $m_q = \Delta\omega/\Omega$ – коэффициент частотного отклонения, или глубина частотной модуляции; $\Delta\omega$ – девиация угловой частоты, или максимальное отклонение частоты несущей (в одну сторону) от исходного значения; ω_0 – среднее значение угловой частоты переносчика. Относительное изменение частоты несущей, вызванное сообщением, называется девиацией. Девиация частоты зависит от амплитуды модулирующего сообщения. При увеличении амплитуды сообщения частота несущей $F\omega_0$ возрастает, при уменьшении – снижается. Полагая, что начальная фаза равна нулю (в момент времени $t = 0$), можно записать уравнение сигнала при частотной модуляции:

$$U_{\text{ЧМС}}(t) = U_{\omega_0} \cos[(\omega_0 + m_q \sin(\Omega t))t].$$

Девиация частоты и индекс модуляции связаны соотношением

$$F_{\text{дев}} = m_q F_{\Omega}.$$

Синтез ЧМ-сигнала в среде *Matlab* может быть выполнен с помощью кода, представленного в прил. 1.5. На рис. 1.11 приведена временная диаграмма, сгенерированная при выполнении кода в *Matlab*.

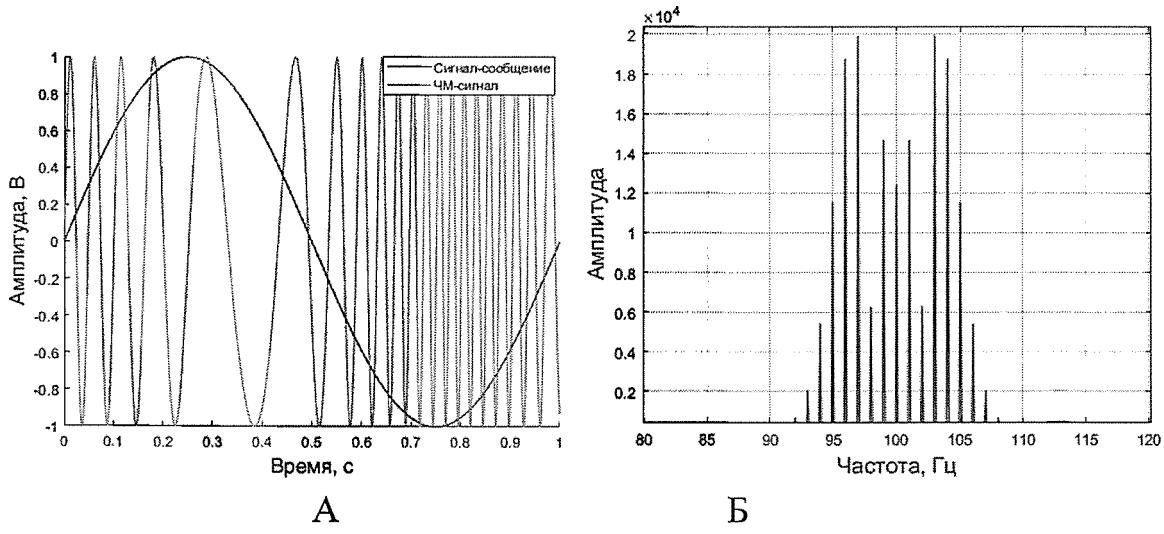


Рис. 1.11. Синтез ЧМ-сигналов: А – временная диаграмма; Б – амплитудный спектр ЧМ-сигнала

Для генерации ЧМ-сигнала импульсной последовательности следует сгенерировать сигнал-сообщение в виде импульсов, например так, как это представлено в прил. 1.6. Результат частотной модуляции импульсного сигнала приведен на рис. 1.12.

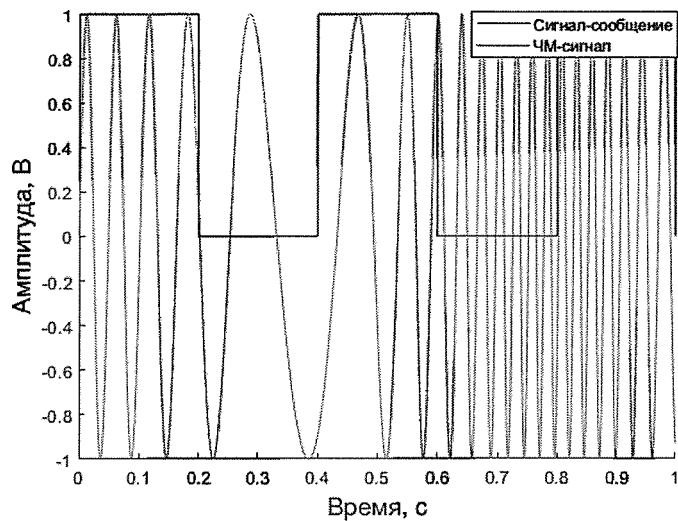


Рис. 1.12. Синтез ЧМ-сигнала из последовательности прямоугольных импульсов

Схема частотной модуляции и демодуляции в среде *Simulink* представлена на рис. 1.13. Частота несущей в схеме модулятора выставляется блоком *Const* и составляет 2 кГц. Девиация частоты устанавливается с помощью блока *Gain*, выбрана для наглядности и составляет 1,5 кГц. При последовательном соединении с сигналом-сообщением и суммировании со значением несущей частоты, с выхода блока *Add* можно снять осциллограмму изменения частоты ЧМ-сигнала.

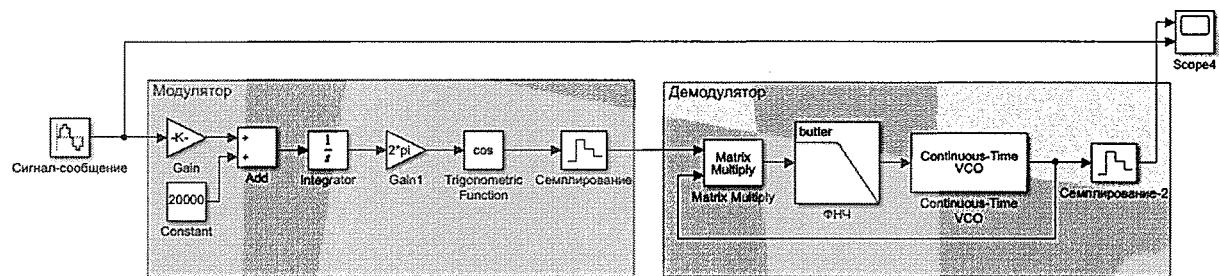


Рис. 1.13. Схема ЧМ-модулятора и демодулятора, собранная в среде *Simulink*

Блок *Gain1* осуществляет перевод значений в радианы (значение усилителя установлено в 2π). Блок интегратора осуществляет нахождение функции, пропорциональной входной функции. Интегрирование модулирующего сигнала позволяет задать девиацию частоты, при его исключении из схемы выполняется девиация фазы, что позволяет создать ФМ-модулятор.

Демодуляцию ЧМ-сигнала можно провести путем организации петли фазовой автоподстройки частоты (*phase lock loop* или ФАПЧ). Структурная схема ФАПЧ приведена на рис. 1.14.

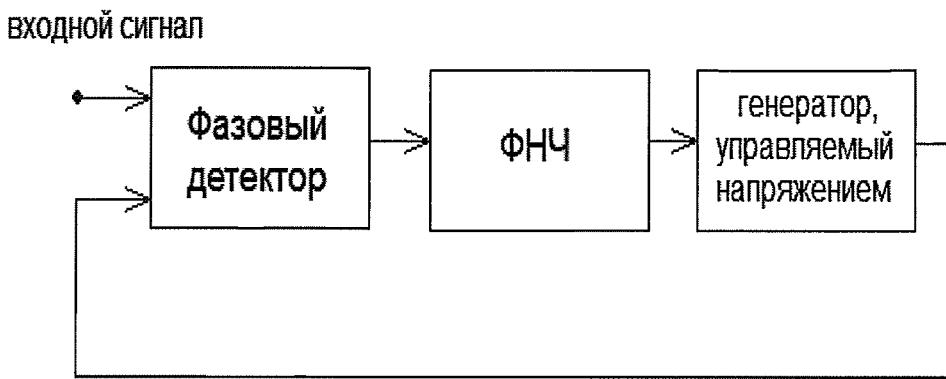


Рис. 1.14. Структурная схема ФАПЧ

В демодуляторе (рис. 1.13) роль фазового детектора отведена блоку *Matrix Multiply*, роль генератора, управляемого напряжением, – блоку *Continuous-Time VCO*. Параметры блока *Continuous-Time VCO* выбираются в соответствии с параметрами сигнала-сообщения. Осциллограммы прохождения сигнала через ЧМ-модулятор и демодулятор приведены на рисунке 1.15.

В телеметрических оптимальное значение частотной девиации зависит от требуемой точности передачи. Как правило, при точности 0,1% выбирают индекс ЧМ, равный 15 и более.

В России девиация частоты при высококачественном радиовещании принята равной 50 кГц, тогда при $F_{min} = 50$ Гц полоса частот, занимаемая радиосигналом $\Pi_{f_{min}} = 103$ кГц, а при $F_{max} = 15$ кГц $\Pi_{f_{max}} = 183$ кГц, то есть

при изменении модулирующей частоты в 300 раз полоса частот, занимаемая модулированным по частоте сигналом, увеличивается приблизительно

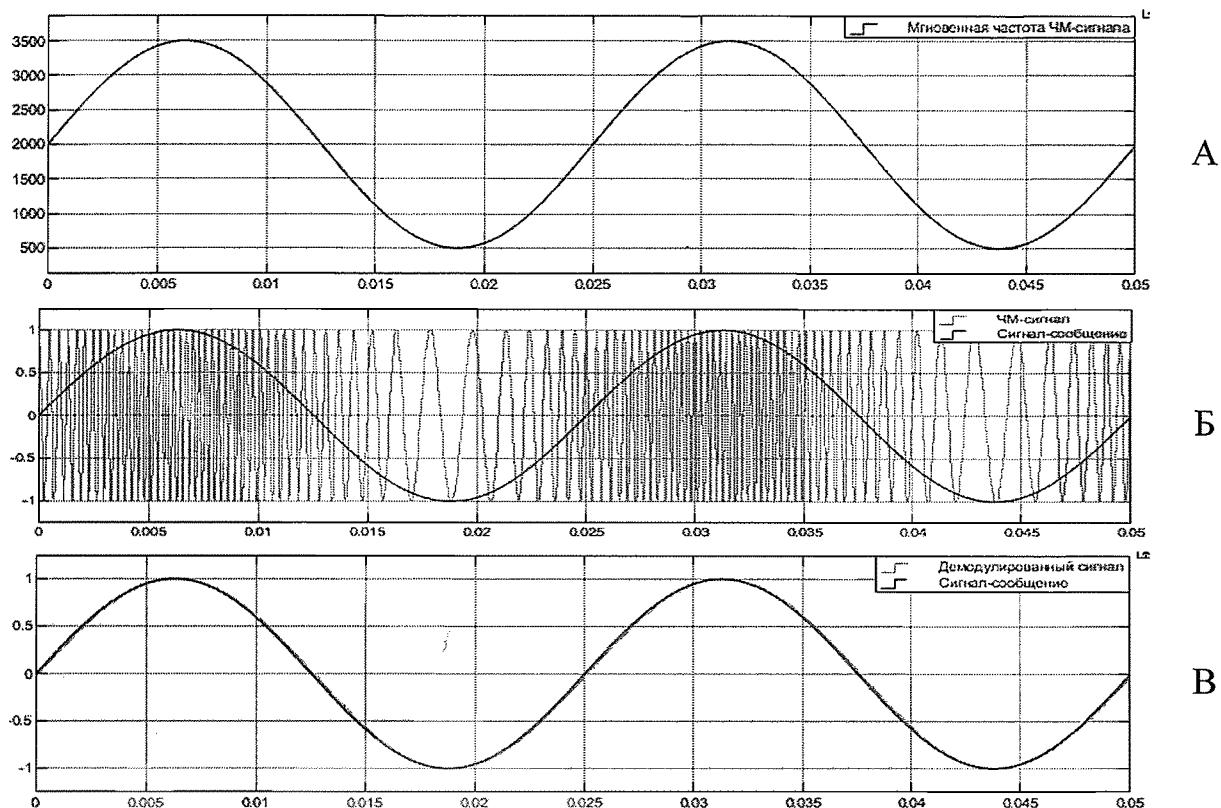


Рис. 1.15. Осциллограммы работы схемы частотной модуляции, А – изменение частоты ЧМ-сигнала во времени, Б – исходный и модулированный сигнал, В – демодулированный сигнал

на 80%, то есть менее, чем вдвое. На практике для передачи сигнала с частотной модуляцией при высококачественном радиовещании отводится канал шириной 250кГц, т.е. он во много раз шире полосы сигнала с амплитудной модуляцией. По этой причине частотная модуляция используется в диапазоне ультракоротких волн.

1.5 Фазовая модуляция

По характеристикам фазовая модуляция (ФМ, англ. *Phase Modulation*) близка к частотной модуляции. При фазовой модуляции передаваемое сообщение изменяет значение фазы φ несущей (рис. 1.16). Таким образом, фаза «несущей» φ изменяется пропорционально мгновенным значениям тока или напряжения модулируемого сообщения:

$$\varphi = \Delta\varphi \sin(\Omega t).$$

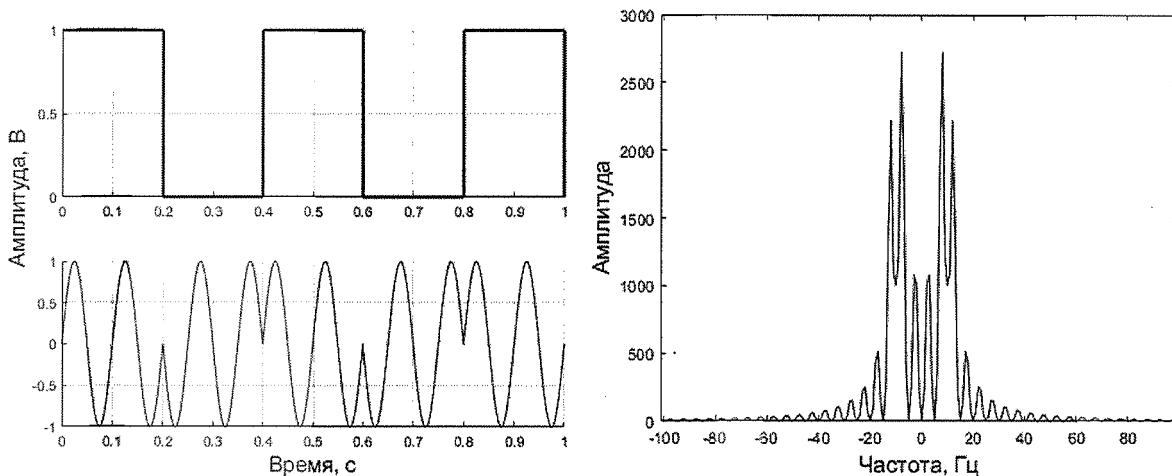


Рис. 1.16. Фазовая модуляция и спектр ФМ-сигнала

При увеличении значений тока и напряжения (сообщения) частоты возникает опережение по фазе $\Delta\varphi \sin(\Omega t)$, где $\Delta\varphi$ – максимальный сдвиг по фазе или девиация фазы. Уравнение ФМ-колебания

$$U_{\text{фмс}}(t) = U_{\omega_0} \cos(\omega_0 t + m_\phi \sin(\Omega t)),$$

где m_ϕ – индекс модуляции, равный девиации фазы $\Delta\varphi$. При ФМ изменяется не только фаза, но и мгновенная частота «несущей». Точно так же при ЧМ изменяется и фаза несущей.

Если при ЧМ индекс сообщений уменьшается с увеличением частоты сигнала-сообщения, то при ФМ он не зависит от нее, а значит, ширина полосы частот при ФМ оказывается больше, чем при ЧМ. При $m_\phi \gg 1$ спектр частот ФМ схож со спектром ЧМ.

Листинг программы, реализующей ФМ-модуляцию импульсной последовательности со сдвигом фазы на π , приведен в прил. 1.7.

Модель такого сигнала в среде *Simulink* можно создать путем использования двух периодических сигналов, сдвинутых друг от друга на 180 градусов, и порогового устройства, срабатывающего на импульс или паузу импульсной последовательности, (рис. 1.17).

В качестве порогового устройства используется блок *Switch*, который имеет три входа, один из которых – средний – управляющий. В зависимости от поступающих на управляющий вход данных, происходит переклю-

чение ключа и поступление на выход блока сигнала с начальной фазой 0 или 180 градусов.

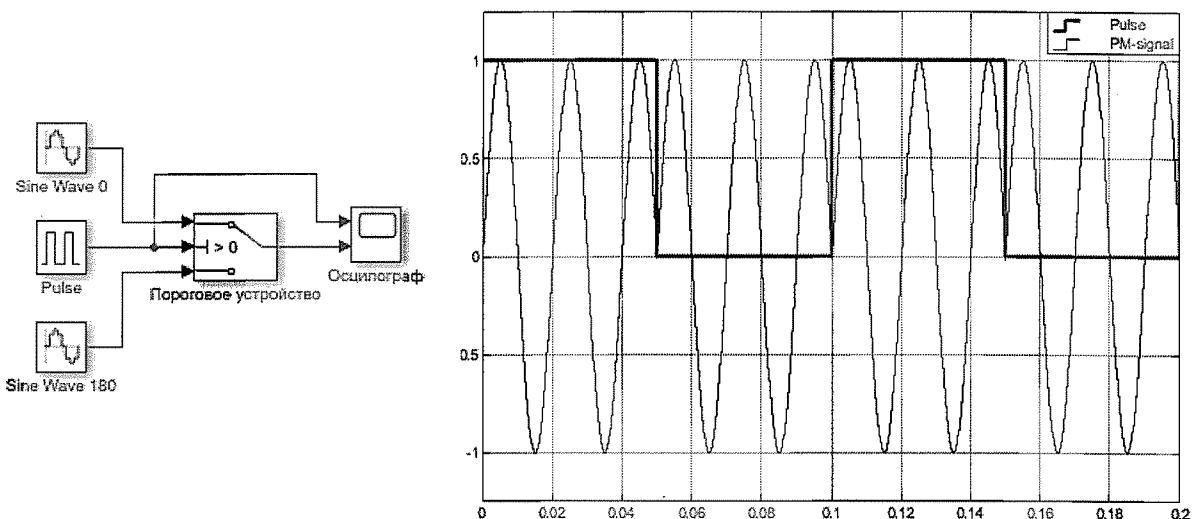


Рис. 1.17. Реализация фазовой модуляции в среде Simulink

Демодуляция такого ФМ-сигнала может быть осуществлена путем сложения модулированного сигнала и несущей: в таком случае, амплитуда части сигнала удвоится, амплитуда оставшейся части сигнала станет равной нулю. Далее, с помощью известного математического аппарата выделения огибающей восстановить последовательность импульсов не составит труда.

Представленная выше модель работает только в частном случае, при использовании в качестве сигнала-сообщения последовательности импульсов. Изменим модель (прил. 1.7), сделав ее универсальной и подходящей для сигналов-сообщений, распространяющихся по гармоническому закону. Для этого достаточно заменить блок программного кода, отвечающий за формирование ФМ-сигнала (прил. 1.8). Временные диаграммы результатов работы такой модели ФМ-сигнала приведены на рис. 1.18. Для наглядности, значение девиации фазы было выбрано в 200 градусов.

При ФМ изменяется не только фаза, но и мгновенная частота «несущей». Точно также при ЧМ изменяется и фаза несущей. Таким образом, ФМ и ЧМ в какой-то мере аналогичны и отличаются друг от друга методами осуществления.

ФМ и ЧМ связаны, поэтому они могут быть объединены как угловая модуляция:

$$\Delta\omega = \Omega \Delta\varphi.$$

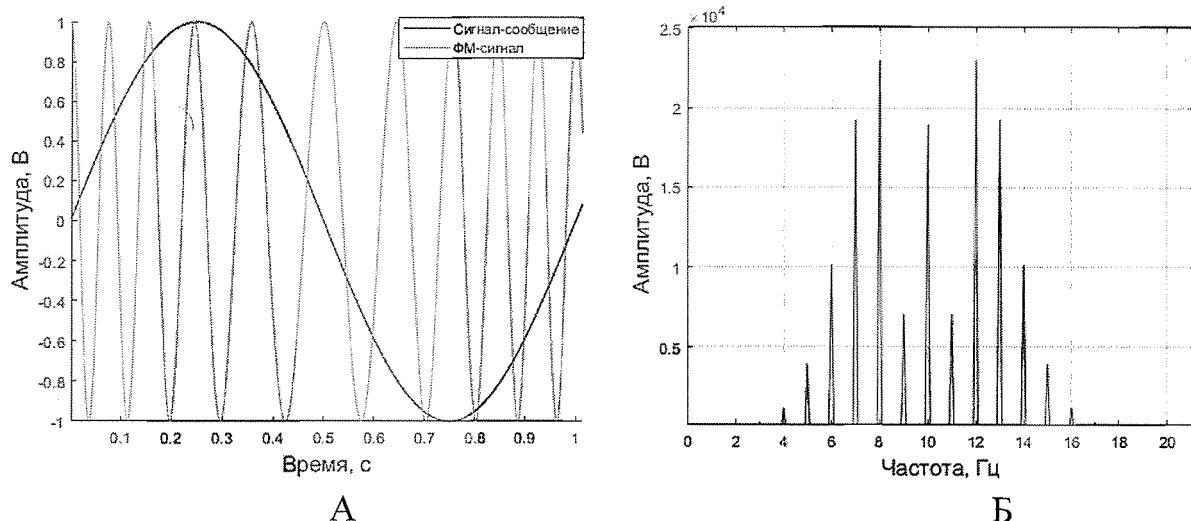


Рис. 1.18. Фазовая модуляция сигнала-сообщения, распространяющегося по гармоническому закону, А – ФМ-сигнал, Б – амплитудный спектр.

Учитывая эту взаимосвязь, ФМ-модулятор в среде *Simulink* может быть разработан на основе ЧМ-модулятора, и наоборот. Схема фазовой модуляции, разработанная в среде *Simulink*, представлена на рис. 1.19. На вход подается модулирующий сигнал, усиливающийся на усилителе, тем самым задается девиация фазы. После этого, формируется квадратурная и синфазная составляющая и умножается на составляющие несущего колебания.

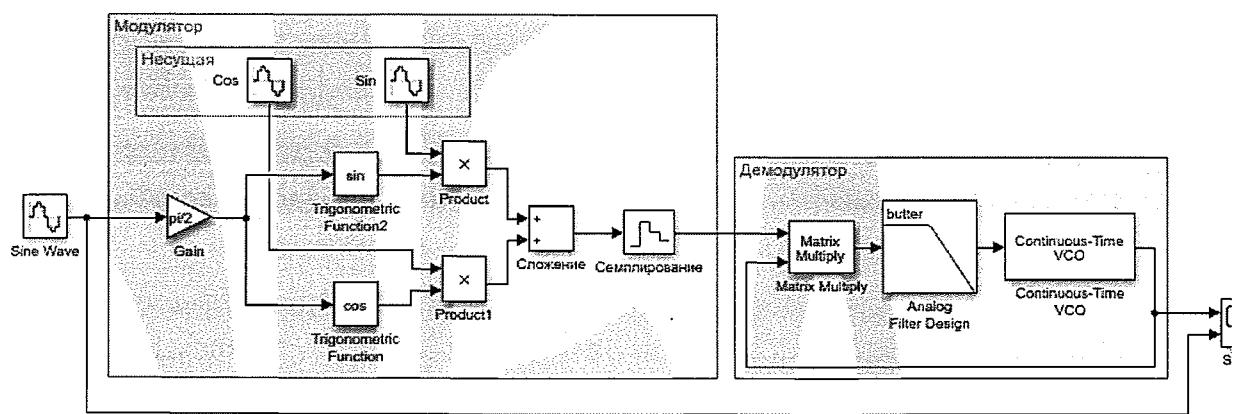


Рис. 1.19. Схема фазовой модуляции и восстановление сигнала в среде *Simulink*

Осцилограммы работы разработанной схемы ФМ-модулятора приведены на рис. 1.20.

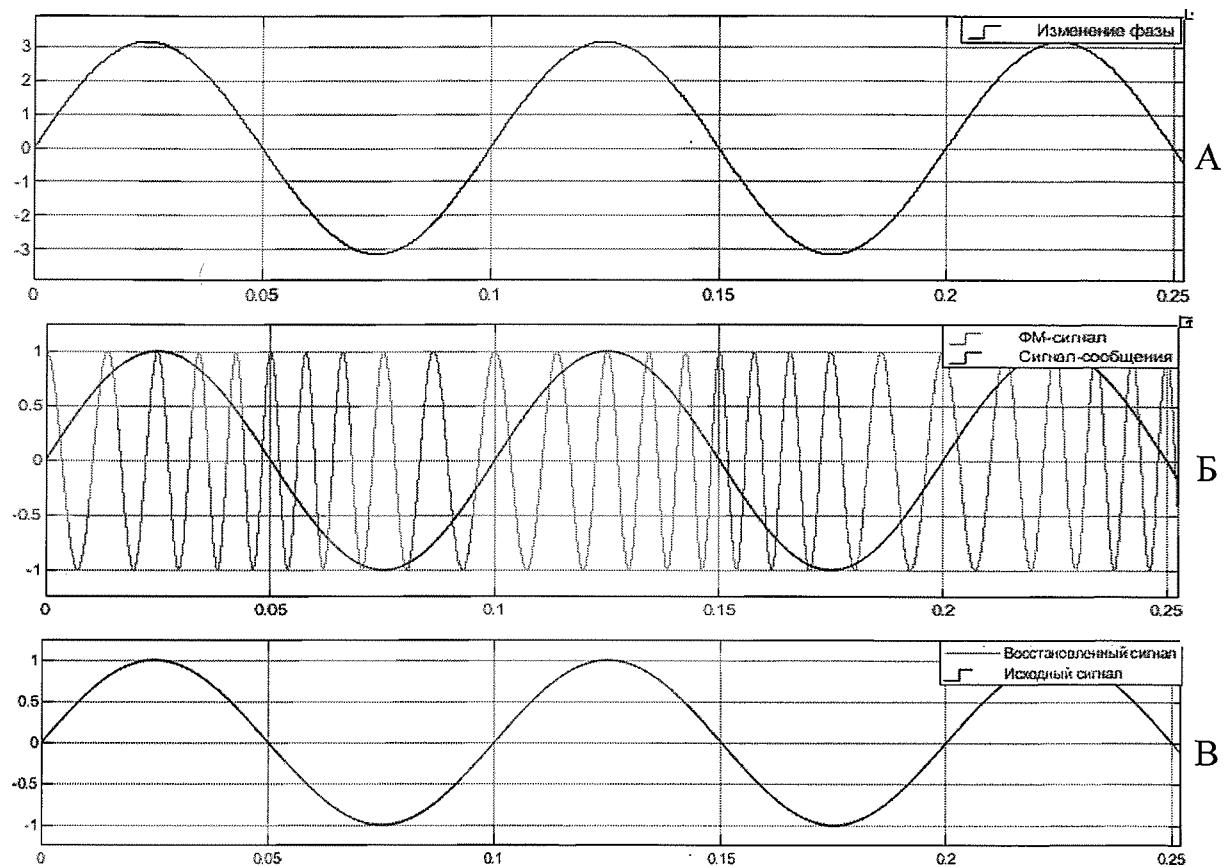


Рис. 1.20. Осцилограммы работы ФМ-модулятора в среде *Simulink*: А – изменение фазы; Б – ФМ-сигнал; В – демодулированный сигнал

В реальности больше применяют термин фазовая манипуляция, т.к. в основном производят модуляцию дискретных сигналов.

1.6 Практические задания

Цель работы: исследование характеристик сигналов и систем с различными типами модуляции.

Задачи работы:

1. Освоение методик генерации и модулирования сигналов в среде *Matlab* и *Simulink*.
2. Изучение на модели амплитудных спектров сигналов.

3. Проведение демодуляции сигналов, разработка схемы демодуляции в среде *Simulink*.

Порядок выполнения работы

1. Сгенерировать в среде *Simulink* сигнал с параметрами согласно варианту. Для этого в модели *Simulink* необходимо выставить параметры блока *Sine Wave*. Окно параметров сигнала представлено на рис. 1.21.

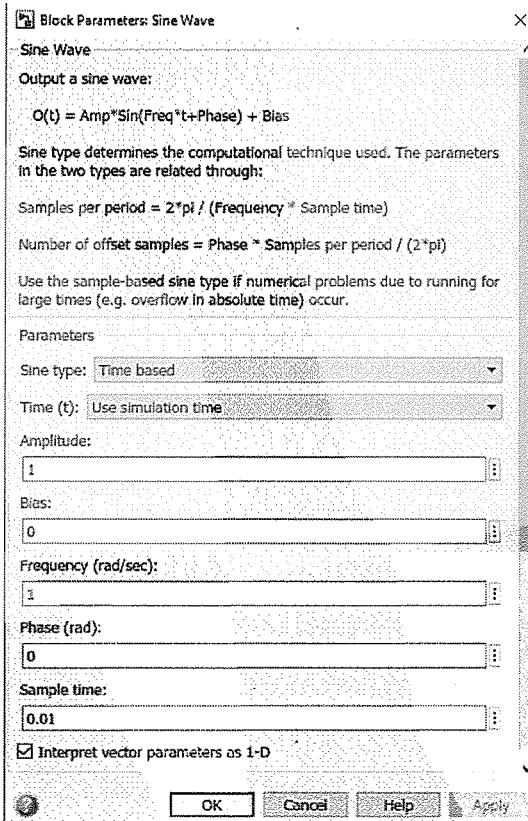


Рис. 1.21. Окно параметров блока *Sine Wave*

При синтезе сигнала, следует учитывать, что частота сигнала в данном блоке принимается в радианах в секунду. Также необходимо выставить параметр Sample Time – это величина периода дискретизации, как известно, обратная частоте дискретизации.

2. Используя блок *Spectrum Analyzer* из библиотеки *DSP System Toolbox*, построить амплитудный спектр. По умолчанию данный блок настроен на вывод амплитудного спектра в децибелах, для привычного отображения следует в настройках панели *Trace option* параметр *Units* выбрать «Watts».

3. Снять осцилограммы сгенерированного сигнала и его амплитудный спектр.

4. Сгенерировать сложный сигнал с параметрами, согласно варианту. Построить его амплитудный спектр и снять осцилограмму. Проанализировать полученные спектры и отразить в отчете вывод о виде спектра для периодического и сложного сигналов.

5. Используя блок *Pulse Generator* сгенерировать импульсную последовательность с параметрами, согласно варианту. Настройки блока приведены на рис. 1.22. Для импульсной последовательности следует указать период дискретизации сигнала, длительность периода, а также длительность импульса (*Pulse width*) в процентах.

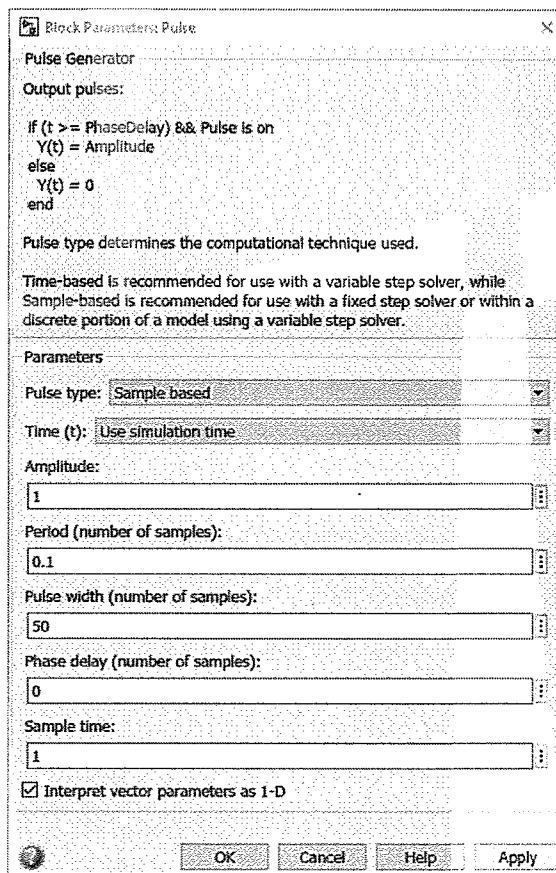


Рис. 1.22 Окно параметров блока *Pulse Generator*

6. Провести модуляцию данного сигнала с типом модуляции, согласно варианту, для модуляции сигнала использовать параметры несущей, согласно варианту (табл. 1.2). Снять амплитудный спектр данного сигнала и отразить осцилограмму в отчете.

7. Выполнить демодуляцию полученного в пункте 6 сигнала любым способом.

8. Выполнить все описанные выше манипуляции в среде *Matlab*. В отчете также отразить осциллограммы и амплитудный спектр.

Таблица 1.2

Варианты заданий

Номер Параметр \	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$A_1, \text{В}$	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
$f_1, \text{Гц}$	1	1,25	1,5	1,75	1	1,25	1,5	1,75	1	1,25
$\varphi_1, \text{град.}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_2, \text{В}$	3	3,5	4	4,5	5	5,5	1	1,5	2	2,5
$f_2, \text{Гц}$	1,5	1,25	1	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5
$\varphi_2, \text{град.}$	15	30	-15	-30	45	60	-45	-60	0	0
$f_n, \text{Гц}$	100	125	150	175	200	225	250	275	300	150
Тип модуляции	ФМ	ЧМ	АМ	АМ	ФМ	ЧМ	АМ	ЧМ	ФМ	АМ

Номер Параметр \	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$A_1, \text{В}$	5,5	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
$f_1, \text{Гц}$	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	1,25	1,5	1,75
$\varphi_1, \text{град.}$	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
$A_2, \text{В}$	2,5	2	1,5	1	5,5	5	4,5	4	3,5	3
$f_2, \text{Гц}$	1	1,25	1,5	1,75	1	1,25	1,5	1,75	1	1,25
$\varphi_2, \text{град.}$	0	0	-30	-30	-60	-60	-30	-30	30	30
$f_n, \text{Гц}$	200	225	250	275	300	150	125	100	75	50
Тип модуляции	ФМ	ЧМ	ФМ	АМ	ЧМ	ФМ	ФМ	ЧМ	АМ	АМ

Контрольные вопросы

1. Дайте определения аналогового и дискретного сигналов и сферы использования.
2. Амплитудный спектр периодического и сложного сигнала.
3. Каковы особенности амплитудного спектра АМ-сигнала?

4. Дайте определение коэффициента модуляции.
5. В чем заключается преобразование Гильберта?
6. Взаимосвязь частотной и фазовой модуляции.
7. Что такое угловая модуляция?
8. Спектр АМ-, ФМ- и ЧМ-сигналов.
9. Особенности генерации ЧМ- и ФМ-сигналов в среде Simulink.
10. Демодуляция ЧМ-и ФМ-сигналов на примере ФАПЧ.
11. Объясните процесс фазовой и частотной модуляции, приведите временные диаграммы.

Приложения к гл. 1

Приложение 1.1 Листинг формирования дискретного сигнала

```

T=1;           %временной отрезок, в котором рассматривается сигнал, 1 с
t=0:0.0001:T; %временная шкала
A=1;           %амплитуда сигнала, 1 Вольт
f=1;           %частота сигнала, 1 Гц
sig=A*sin(t*f*2*pi);      %формирование периодического сигнала
d_sig(1:1:length(t))=0;    %создание пустого массива, состоящего из 0,
                           %для заполнения его дискретными значениями
fd=10;          %частота дискретизации, 10 Гц
                  %отношение fd/f определяет количество отсчетов
                  %дискретного сигнала на период сигнала
td=1/fd;        %период дискретизации
for i=1:td/0.0001:length(t)-1
    d_sig(i)=sig(i);    %выборка мгновенных значений сигнала в цикле
end
figure; cla; hold on;
plot(t,sig, '--', 'color', [0 0 0]/255);      %отображение исходного сигнала
                                                 %пунктиром
plot(t, d_sig, 'color', [0 0 0]/255);          %отображение дискретных отсчетов

```

Приложение 1.2 Листинг формирования спектра периодического сигнала

```

sig=A*sin(t*f*2*pi);      %формирование периодического сигнала
spA=abs(fftshift(fft(sig))); %расчет амплитудного спектра
c %применением преобразования Фурье
scale=linspace(-fd_i/2, fd_i/2, length(sp)); %расчет шкалы частот, где

```

```

fd_i - %частота дискретизации
figure(1); plot(scale, spa,'color',[0 0 0]/255);
xlim([0 40]); %границы отображения графика

```

Приложение 1.3 Реализация амплитудной модуляции в Matlab

```

%генерация сигнала-сообщения
T=1; %временной отрезок, в котором рассматривается сигнал, 1 с
f=10; %частота сигнала
A=1; %амплитуда сигнала
fd_i=f*1000; %частота дискретизации
k=1/fd_i;
t=0:k:T; %временная шкала
w=2*pi*f; %аргумент
signal=A*sin(w*t)+A; %сигнал смещен в положительную область

%генерация сигнала-несущей
f_n=100; %частота несущей
A_n=1; %амплитуда несущей
w_n=2*pi*f_n; %аргумент несущей
sig_n=A_n*sin(w_n*t);

%генерация АМ-сигнала
sig_AM=signal.*sig_n;

%отображение сигналов на одном графике
subplot(3,1,1);
plot(t,signal,'color',[0 0 0]/255);
subplot(3,1,2);
plot(t,sig_n,'color',[100 100 100]/255);
subplot(3,1,3); cla; hold on;
plot(t,sig_AM,'color',[120 120 120]/255);
plot(t,signal, 'color',[0 0 0]/255);

```

Приложение 1.4 Генерация, модуляция и демодуляция импульсной последовательности в среде Matlab

```

%генерация прямоугольного сигнала
n_s=2000; %длительность импульса
n_p=2000; %длительность паузы
T_pulse=n_s+n_p; %период (все единицы в отсчетах дискретного сигнала)
pulse_signal=[]; %массив прямоугольного сигнала
A1=1; %амплитуда импульса
A2=A1/2; %амплитуда паузы
for i=1:T_pulse:length(t) %заполнение сигнала импульсами и паузами
    pulse_signal(i:i+n_s)=A1; %в цикле

```

```

pulse_signal(i+n_s:i+n_s+n_p)=A2;
end

```

Окончание прил. 1.4

```

%AM-сигнал
AM_pulse=pulse_signal(1:length(t)).*sig_n;

%преобразование Гильберта
hil_signal=abs(hilbert(AM_pulse)); %модуль от результата преобразования
Гильберта

%пороговое устройство
B=(A1-A2)/2+A2; %значение порога (по амплитуде)
d_pulse=[]; %массив демодулированного сигнала
for i=1:length(t)
    if hil_signal(i)>=B %сравнение с порогом в цикле
        d_pulse(i)=A1;
    else
        d_pulse(i)=A2;
    end
end

%отображение AM-сигнала
figure(1);cla; hold on;
plot(t,pulse_signal(1:length(t)), 'color',[0 0 0]/255, 'LineWidth', 2);
plot(t,AM_pulse, 'color',[150 150 150]/255);

%
%отображение огибающей сигнала
figure(2);cla; hold on;
plot(t,hil_signal, 'color',[150 150 150]/255);
plot(t,d_pulse, 'color',[0 0 0]/255, 'LineWidth', 2);

```

Приложение 1.5 Синтез ЧМ-сигналов в среде Matlab

```

%генерация сигнала-сообщения
clear all;
T=1; %временной отрезок, в котором рассматривается сигнал, 1 с
f=1; %частота сигнала
A=1; %амплитуда сигнала
fd_i=f*10000; %частота дискретизации
k=1/fd_i; %период дискретизации
t=0:k:T; %временная шкала
w=2*pi*f; %аргумент
signal=A*sin(w*t); %сигнал-сообщение

```

%ЧМ

Окончание прил. 1.5

```
fn=100; %средняя частота несущей
dF=30; %девиация частоты, 30%
m=dF/w; %коэффициент частотного отклонения
fm_signal= cos(2*pi*fn*t+m*signal(1:length(t)));

%отображение
figure(1);cla; hold on;
plot(t,signal,'color',[0 0 0]/255);
plot(t,fm_signal,'color',[150 150 150]/255);

sp=abs(fftshift(fft(fm_signal))); %расчет спектра с применением
                                    %преобразования Фурье
scale=linspace(-fd_i/2, fd_i/2, length(sp)); %расчет шкалы частот
figure(3); cla; plot(scale, sp,'color',[0 0 0]/255);grid on;
```

Приложение 1.6 Генерация импульсной последовательности в среде Matlab

```
%генерация прямоугольного сигнала
n_s=2000; %длительность импульса
n_p=2000; %длительность паузы
T_pulse=n_s+n_p; %период (все единицы в отсчетах дискретного сигнала)
pulse_signal=[]; %массив прямоугольного сигнала
A=1; %амплитуда импульса
for i=1:T_pulse:length(t) %заполнение сигнала импульсами и паузами
    signal (i:i+n_s)=A; %в цикле
    signal (i+n_s:i+n_s+n_p)=0;
end
```

Приложение 1.7 Реализация фазовой модуляции импульсной последовательности в среде Matlab

```
%генерация прямоугольного сигнала
n_s=2000; %длительность импульса
n_p=2000; %длительность паузы
T_pulse=n_s+n_p; %период (все единицы в отсчетах дискретного сигнала)
pulse_signal=[]; %массив прямоугольного сигнала
A=1; %амплитуда импульса
for i=1:T_pulse:length(t) %заполнение сигнала импульсами и паузами
    pulse_signal(i:i+n_s)=A; %в цикле
    pulse_signal(i+n_s:i+n_s+n_p)=0;
```

Окончание прил. 1.7

```
end
%Фазовая модуляция
phi=0;           %начальная фаза
fn=10;           %частота несущего колебания
pm_signal=[];    %массив для ФМ-сигнала
for i=1:length(t)
    if pulse_signal(i)==A %проверка отсчета сигнала-сообщения
        phi=0;             %на импульс или паузу
    else                  %и изменение фазы
        phi=pi;            %на 180 градусов
    end
    pm_signal(i)=A*sin(fn*2*pi*t(i)+phi); %формирование отсчета ФМ-сигнала
end

%отображение на одном графике
subplot(2,1,1);;cla; hold on;
plot(t, pulse_signal(1:length(t)), 'color', [0 0 0]/255, 'LineWidth', 2);
subplot(2,1,2);;cla; hold on;
plot(t,pm_signal, 'color', [0 0 0]/255);

sp=abs(fftshift(fft(pm_signal)));           %расчет спектра
scale=linspace(-fd_i/2, fd_i/2, length(sp)); %расчет шкалы частот
figure(3); cla; plot(scale, sp,'color',[0 0 0]/255);
```

Приложение 1.8 Синтез ФМ-сигналов в среде Matlab

```
%фазовая модуляция
fn=10;      %частота несущей
dP=90;      %девиация фазы, в градусах
pn=dP*pi/180*sin(w*t); %изменение фазы ФМ-сигнала во времени
pm_signal=cos(2*pi*fn*t+dP*pi/180.*signal(1:length(t))); %ФМ-сигнал
```

2 ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Использование цифровых каналов связи для передачи информации потребовало разработки особых методов преобразования непрерывных сигналов в дискретные. В начале 60-х годов прошлого века были разработаны амплитудно-импульсная (АИМ) и импульсно-кодовая модуляции (ИКМ).

2.1 Амплитудно-импульсная модуляция

Амплитудно-импульсная модуляция (*Pulse Amplitude Modulation, PAM*) заключается в преобразовании непрерывного сигнала в совокупность дискретных сигналов (импульсов) с определенной амплитудой. Данный вид модуляции получил широкое применение в многоканальных системах передачи информации.

Для получения АИМ-сигнала исходная непрерывная функция $x(t)$ подвергается дискретизации по времени, частота дискретизации определяется в соответствии с теоремой Котельникова, которая была рассмотрена в предыдущей главе. Переносчиком сообщения в АИМ является серия прямоугольных импульсов, амплитуда которых меняется под воздействием мгновенных значений сообщения (рис. 2.1). Листинг кода *Matlab*, иллюстрирующего данный пример, приведен в прил. 2.1.

Выражение для амплитуды модулированных импульсов можно записать следующим образом:

$$U_m = U(1 + m_A \sin \Omega t),$$

где U – амплитуда немодулированных импульсов, m_A – глубина модуляции при АИМ, Ω – угловая частота сигнала-сообщения.

Различают амплитудно-импульсную модуляцию первого рода (АИМ-1) и модуляцию второго рода (АИМ-2). При АИМ-1 амплитуда импульса следует изменением модулирующей функции в течение всего времени существования этого импульса. В случае АИМ-2 амплитудная модуляция импульсов определяется мгновенными значениями функции сообщения.

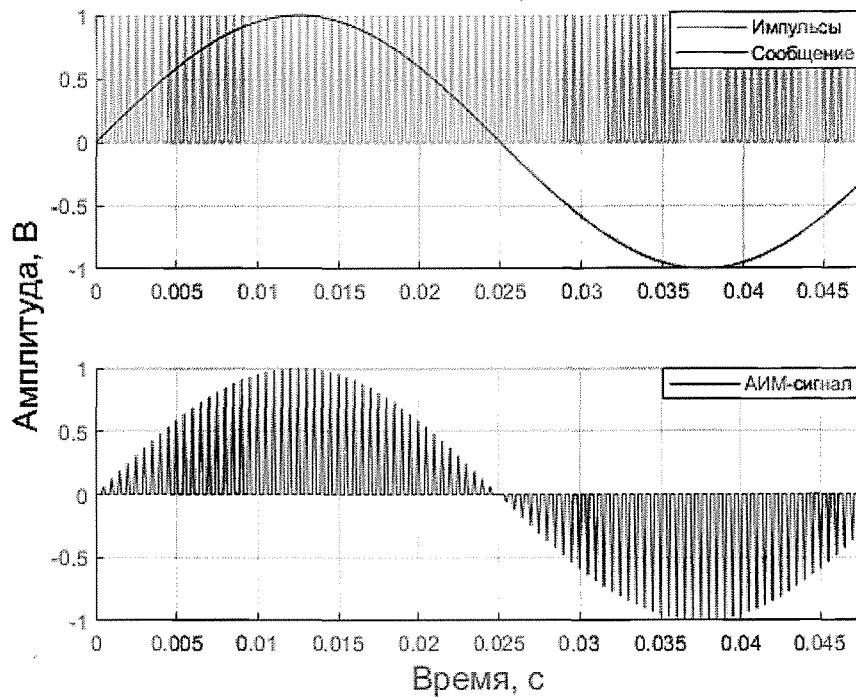


Рис. 2.1. АИМ-модуляция

Представленный выше пример АИМ-сигнала нельзя однозначно отнести к АИМ-1 или АИМ-2, так проанализировав код, можно заметить, что период стробирующего импульса представлен четырьмя точками дискретного сигнала, а длительность импульса – всего одной. Изменим код формирования АИМ-1 и АИМ-2 так, как представлено в прил. 2.2. Для этого увеличим количество дискретных отсчетов на период импульса до 40, длительности импульса – до 10. Временные диаграммы представлены на рис. 2.2.

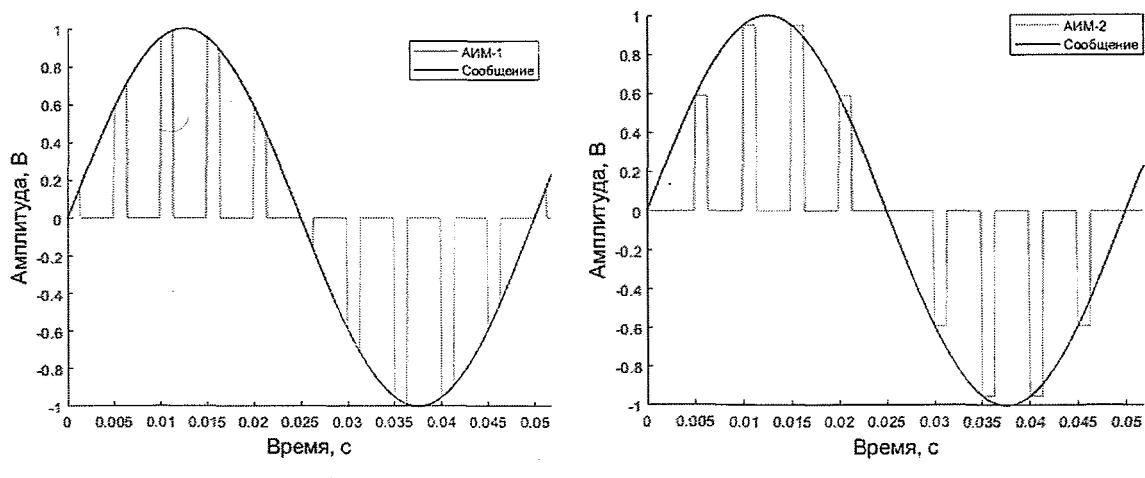


Рис. 2.2. Осциллограммы АИМ-сигнала: А – АИМ-1; Б – АИМ-2

Известно, что спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов представляет собой множество гармоник с огибающей вида $S(w) = A \frac{\sin(w\tau/2)}{w\tau/2}$, где A - амплитуда импульсов; τ - длительность импульса; T - период импульса, w - частота гармоник. Импульсы, модулированные по амплитуде, обладают спектром, отличающимся от немодулированной последовательности тем, что вокруг каждой составляющей спектра немодулированной последовательности появляются боковые частоты $f_k \pm f_{\text{сообщ}}$ (рис. 2.3).

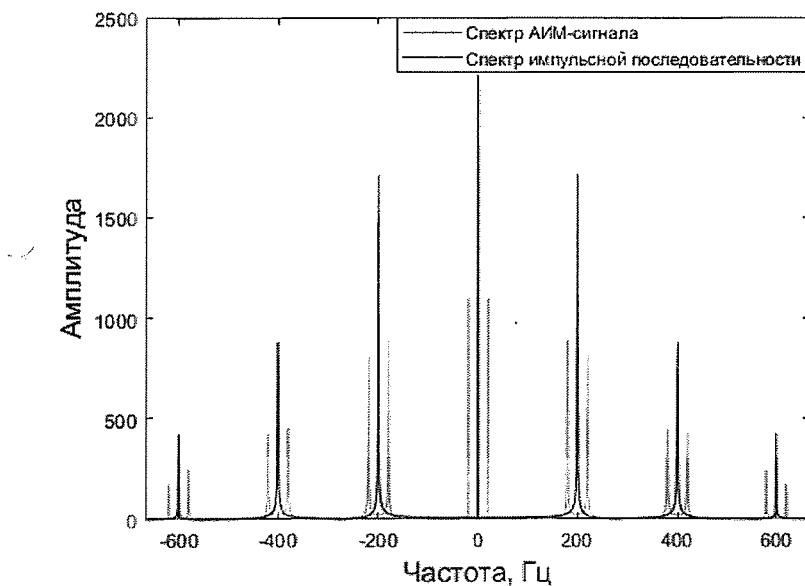


Рис. 2.3. Фрагмент амплитудного спектра АИМ-сигнала

Выполнить демодуляцию АИМ-сигнала можно с помощью фильтра нижних частот, так как частота несущего колебания (прямоугольных импульсов) выбирается гораздо большей, чем частота сигнала-сообщения. Еще одной особенностью спектра АИМ-сигнала (как и всех сигналов импульсной модуляции) является наличие около $f = 0$ составляющих, соответствующих частотам передаваемых сообщений. Для сигнала сообщения, в качестве которого выступает периодический сигнал, выполнить фильтрацию можно с помощью зануления всех гармоник, кроме первой, на амплитудном спектре и выполнения обратного преобразования Фурье над полученным спектром.

Зачастую, демодуляция АИМ-сигналов происходит с использованием фильтра нижних частот. Для проведения демодуляции в среде *Simulink* была создана схема (рис. 2.4).

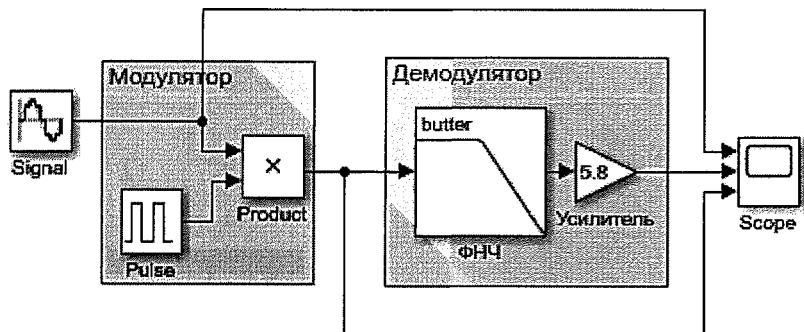


Рис. 2.4. Схема амплитудно-импульсной модуляции в среде Simulink

Модулятор состоит из устройства, генерирующего импульсы – *Pulse*, и умножителя *Product*. *Демодулятор* состоит из *ФНЧ* и *усилителя*, так как энергия сигнала, проходящего через фильтр, изменяется и на выходе сигнала, как правило, имеет меньшую амплитуду. В качестве усилителя используется блока *Gain*, настроенный под требования данной системы. Осциллограммы, снятые с блока *Scope*, представлены на рис. 2.5.

Рассматриваемая ситуация не предполагает наличие помех, поэтому демодуляция синтезированного АИМ-сигнала происходит без значительных изменений формы и параметров сигнала. Существенным недостатком АИМ при передаче оцифрованных данных по каналу связи является сложность корректного восстановления сигнала-сообщения на приемном конце, что обусловлено непропорциональностью изменения (затухания) амплитуд импульсов в процессе передачи по каналу связи. В связи с этим, в телемеханике АИМ применяется, как правило, в качестве промежуточного вида модуляции, например, в системах АИМ-ЧМ и проч.

2.2 Импульсно-кодовая модуляция

Преобразование аналоговых сигналов в цифровые осуществляется в два этапа: дискретизация и квантование. В предыдущей главе был рассмотрен процесс преобразования непрерывного во времени сигнала в дис-

крайний. Такой вид импульсной модуляции, как АИМ, основывается на работе с дискретными сигналами – отсчеты которого взяты в строго регламентированные моменты времени.

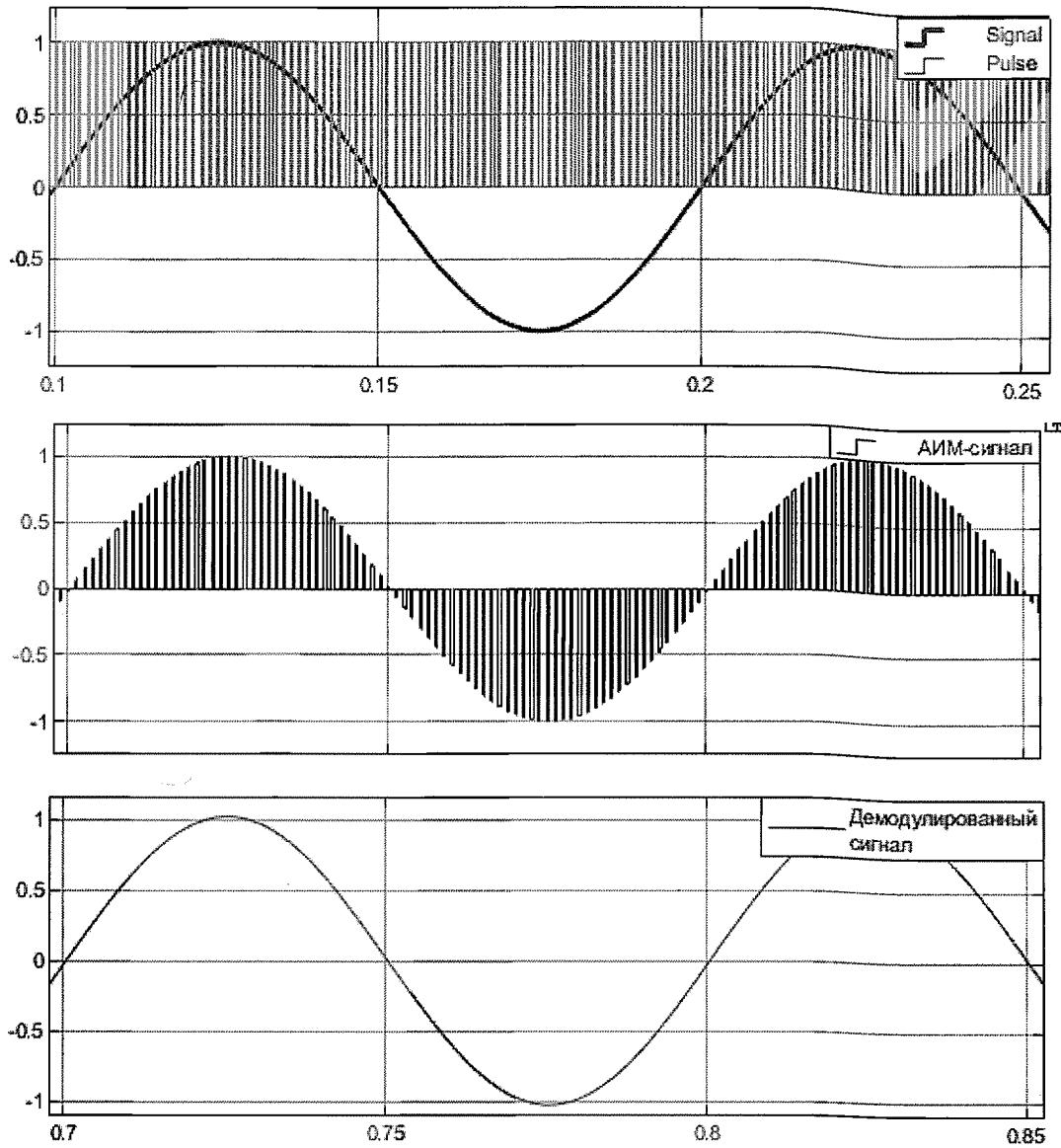


Рис. 2.5. Синтез АИМ-сигналов в среде Simulink: А – сигнал-сообщение и последовательность несущих импульсов; Б – АИМ сигнал; В – демодулированный сигнал

Под импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) понимается передача непрерывных функций при помощи двоичного кода. При кодовой модуляции каждому возможному значению отсчета присваивается двоичный код. ИКМ-сигнал представляет собой последовательность двоичных кодов,

каждый из которых отражает квантованное мгновенное значение аналогового сигнала в момент времени t .

Квантование – разбиение диапазона значений некоторой величины (в нашем случае, сигнала) на конечное число уровней. Как правило, этот процесс сопровождается округлением мгновенных значений для ближайшего уровня, либо округлением в большую сторону. Допустим, мгновенное значение сигнала находится в интервале $[0, h]$, где h – шаг квантования, тогда значение округляется до уровня $h/2$:

$$y_q = \left(\frac{y}{h} + 0,5 \right) h.$$

Если значения сигнала находятся в интервале $[-h/2, h/2]$, то оно округляется до нулевого уровня следующим образом:

$$y_q = \left\lfloor \frac{y}{h} + 0,5 \right\rfloor h,$$

где $\lfloor . \rfloor$ – операция округления до ближайшего целого.

Таким образом, можно сказать, что процесс дискретизации сохраняет временную информацию, а процесс квантования – амплитудную. Чем большая кодовая последовательность будет присвоена каждому уровню квантования, тем точнее будет оцифрован сигнал, а значит, и точнее восстановлен при обратном, цифро-аналоговом, преобразовании. Длину кодовой последовательности определяет количество уровней квантования, используемых для кодирования отсчетов сигнала. Например, 16-разрядное квантование обеспечивает $2^{16} = 65\,536$ уровней квантования отсчетов аналогового сигнала. Чем больше разрядность, тем шире динамический диапазон, меньше подверженность влиянию искажения и шумов, выше разрешающая способность по уровням.

Стоит отметить, что квантование по уровню вносит в кодируемый сигнал погрешность. Преобразование бесконечного множества значений аналоговой величины в конечное количество двоичных чисел по самой своей природе является аппроксимационным процессом. Погрешности появляются потому, что результат квантования фактически никогда не является точным представлением напряжения аналогового сигнала. Разность между фактическим значением аналогового сигнала и представляющим его двоичным числом, называется погрешностью квантования по уровню или шумом квантования.

Формирование ИКМ-сигнала для периода синусоиды приведено на рис. 2.6.

Формирование кодовой последовательности происходит по синхронизации с генератором тактовой последовательности, причем время фиксирования переднего фронта синхроимпульса совпадает с началом периода дискретизации сигнала. В рассматриваемом примере импульсно-кодовой модуляции период синхронизации составляет $t_d = 0,1$ с, каждый период дискретизации представляется 10-ю битами ИКМ-сигнала, где под кодовую последовательность выделено 5 бит. Листинг программы для моделирования ИКМ-сигнала в среде Matlab представлен в прил. 2.3.

Также известны такие разновидности ИКМ, как дельта-импульсно-кодовая модуляция (ДИКМ). ДИКМ представляет собой модуляцию, при которой кодовая последовательность присваивается не квантованному значению сигнала, а разности текущего и предыдущего измеренного значения. Также такой вид модуляции нередко называют дифференциальной (разностной) или адаптивной дифференциальной. Поскольку скорость изменения исходного аналогового сигнала меньше частоты квантования, то вероятность большого различия между соседними амплитудами чрезвычайно мала, и для кодирования этой разности достаточно 4 бит, позволяющих закодировать эту разность в интервале от 0 до 15. Тогда, при условии, что частота квантования по времени составляет 8000 раз в секунду (8 кГц), получим скорость передачи $8000 * 4 = 32$ кБит/с, что вдвое меньше стандартной скорости ИКМ.

Реализация ДИКМ представлена на рис. 2.7, код для формирования сигнала в среде *Matlab* представлен в прил. 2.4.

Демодуляция ИКМ-сигналов заключается в восстановлении значения уровней квантования по кодовой последовательности и применении фильтра нижних частот над полученным квантованным сигналом. В среде *Matlab* демодуляцию ИКМ-сигнала можно провести с помощью кода, представленного в прил. 2.5.

В среде *Simulink* генерация ИКМ-сигнала возможна с помощью блока *Uniform Encoder*, который позволяет представить все значения оцифрованного сигнала в одно из 2^B целочисленных значений, где B – это количество бит для двоичного представления каждого уровня квантования. На

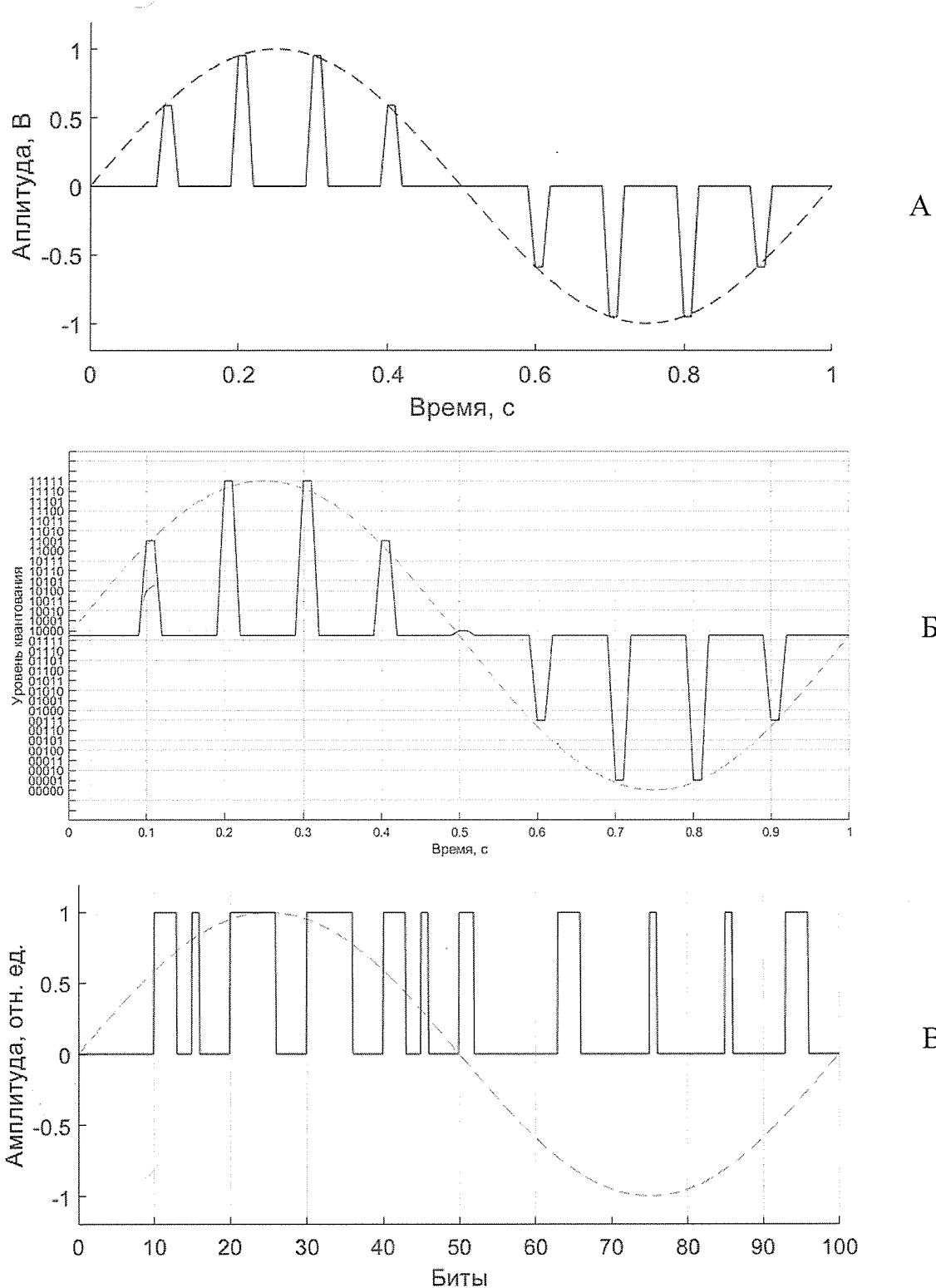


Рис.2.6.Формирование сигнала с импульсно-кодовой модуляцией: А – дискретизация сигнала; Б – квантование сигнала в 5-разрядном АЦП; В – результирующий ИКМ-сигнал

рис. 2.8 представлена схема модулятора и демодулятора ИКМ-сигнала, синтезированная в среде *Simulink* с использованием блоков *Uniform Encoder/Decoder*.

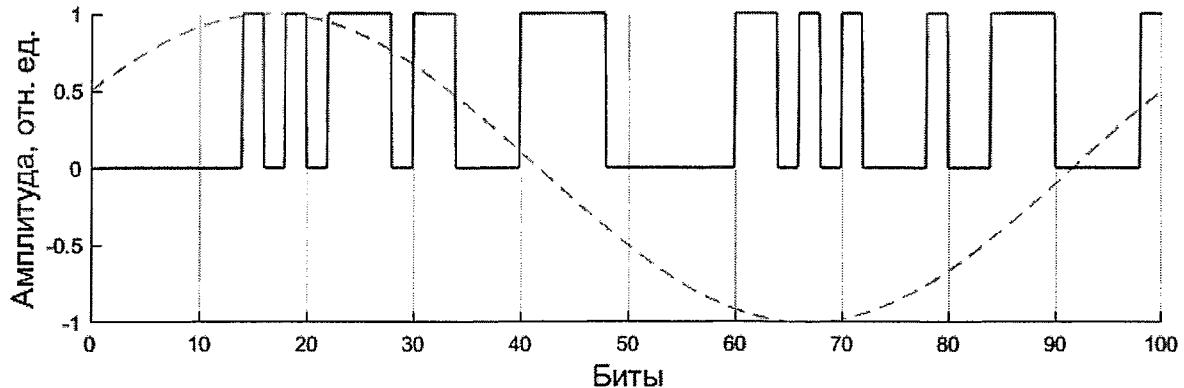


Рис. 2.7. Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция

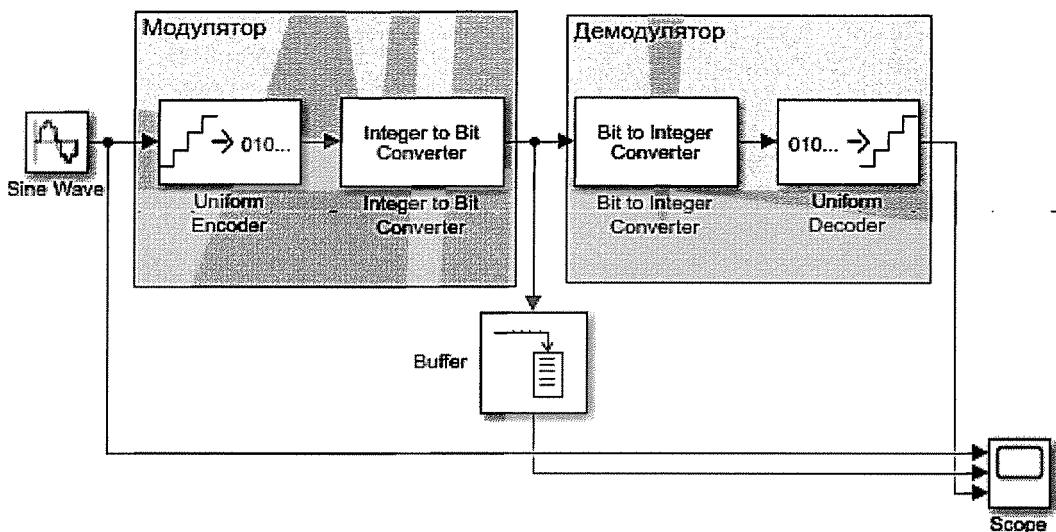


Рис. 2.8. Схема синтеза ИКМ-сигнала в среде *Simulink*

На рис. 2.9 приведены осциллограммы работы представленной выше схемы. Для моделирования выбран периодический сигнал с периодом дискретизации 0,1 с и частотой 1 рад/с. Блок *Uniform Encoder* производит квантование сигнала, поступающего на вход, в соответствии с количеством бит, выделяемых для представления одного уровня квантования. Количество бит устанавливается параметром *Bits*. Данный блок, помимо квантования, формирует на выходе сигнал с амплитудой, соответствующей уровню квантования. При установке параметра *Output type* в состояние *Signed*

Integer переноса сигнала в положительную область оси ординат не произойдет, и каждому отрицательному уровню сигнала будет присвоено отрицательное значение уровня квантования.

Блок *Integer to Bit Converter* формирует из целочисленного представления уровня квантования, поступающего на вход, битовое (кодовое) представление. В параметрах блока интерес представляют параметры *Number of Bits* (определяет величину блока), *Treat input values* (устанавливается в зависимости от параметра *Output type* блока *Uniform Encoder*) и *Output bit Order* (определяет порядок поступления кодовой последовательности на выход блока – старшими или младшими битами вперед).

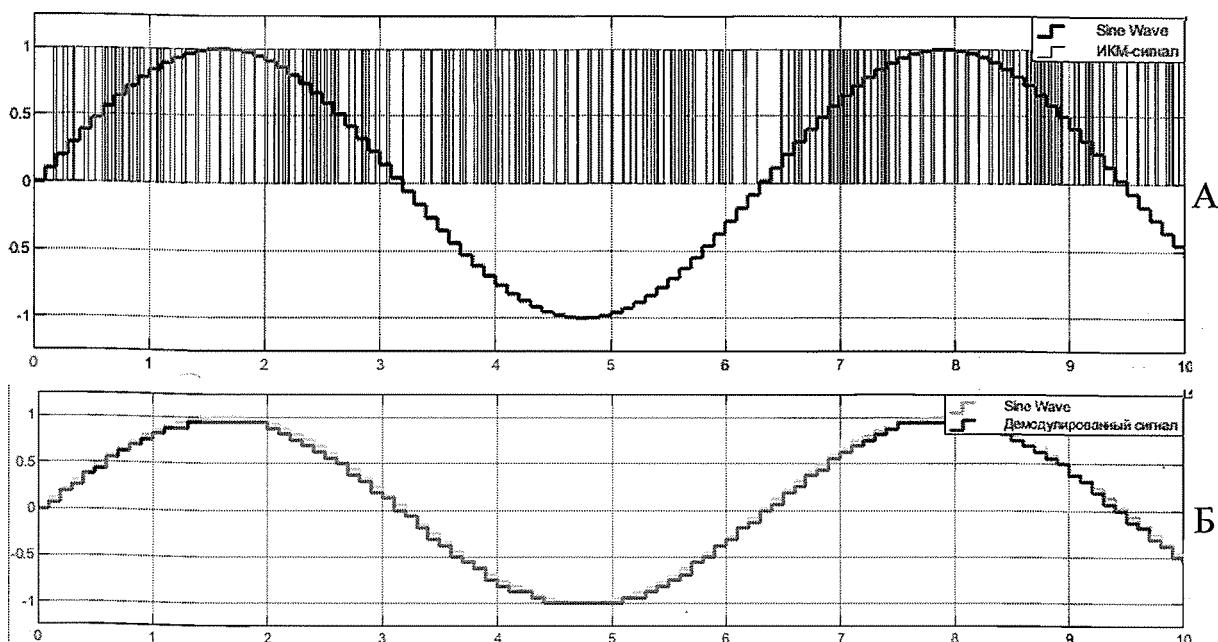


Рис. 2.9. Осциллографмы синтеза ИКМ-сигнала: А – формирование ИКМ-сигнала; Б – сигнал на выходе демодулятора

Формирование дифференциального ИКМ-сигнала подразумевает поступление на вход модулятора (рис. 2.8) разницы между исходным сигналом и сигналом, смещенным на один отсчет дискретизации. Данную манипуляцию можно осуществить с помощью блока *Delay*. Демодуляция в таком случае сводится к суммированию всех выходных отсчетов (рис. 2.10).

Такая схема демодуляции способствует формированию накопительной ошибки демодуляции, которая с каждым периодом сигнала будет увеличиваться. Для устранения ошибок, как правило, универсальным методом

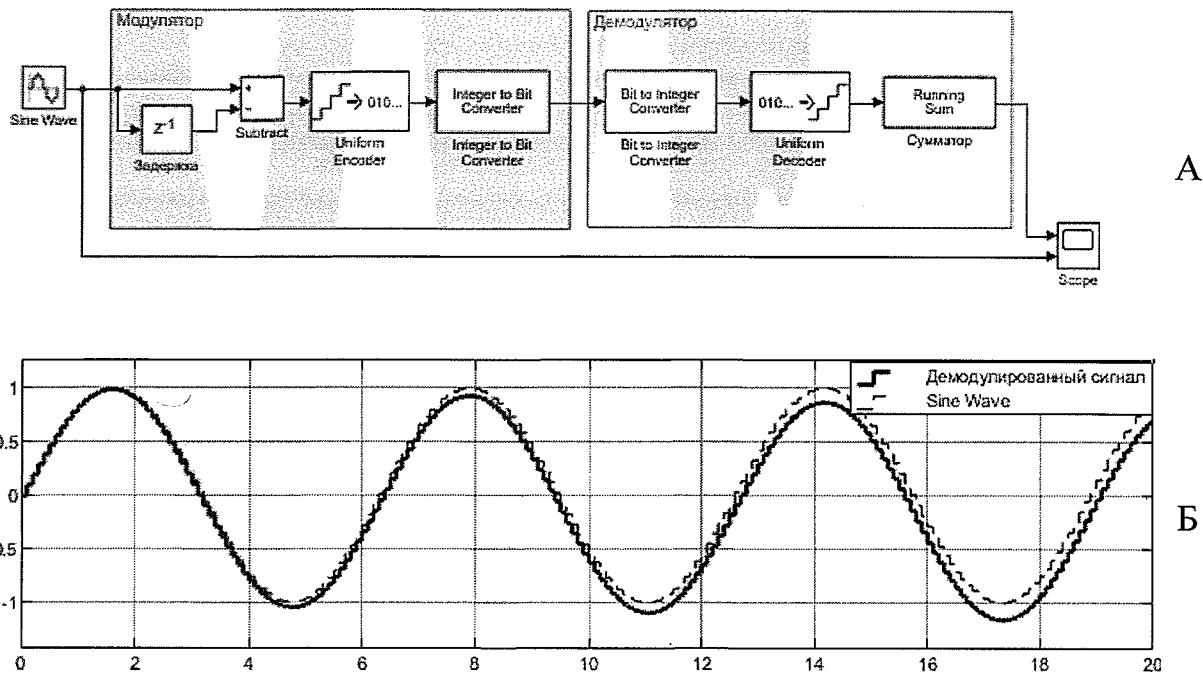


Рис. 2.10. Моделирование системы с ДИКМ в среде Simulink, А – схема системы, Б – осциллографмы исходного и демодулированного сигналов

коррекции является обратная связь, но при этом в такой системе необходимо создание двух каналов связи, прямого и обратного, что зачастую является проблематичным. Для этого в канале связи системы с ДИКМ используется прием, называемый кодированием “с утечкой”. Введение “утечки” в функцию накапливающих сумматоров снижает эффективность ДИКМ, то есть требует увеличения символьной скорости в канале связи.

2.3 Широтная импульсная модуляция

При широтно-импульсной модуляции (ШИМ) под действием мгновенных значений сообщения изменяется длительность или ширина импульсов переносчика, расширяясь при увеличении мгновенного значения сообщения и сужаясь при его уменьшении (за счёт положения заднего фронта импульса). Частота и амплитуда импульсов при ШИМ не изменяются.

ШИМ представляет собой способ снижения средней мощности, поступающей с помощью электрического сигнала, путем эффективного измельчения его на отдельные части.

При синтезе ШИМ-сигнала необходимо обозначить пропорциональную зависимость амплитуды дискретного сигнала и скважности импульса в рассматриваемом периоде времени (рис. 2.11). В среде Matlab моделирование ШИМ-системы возможно способом, представленном в прил. 2.6.

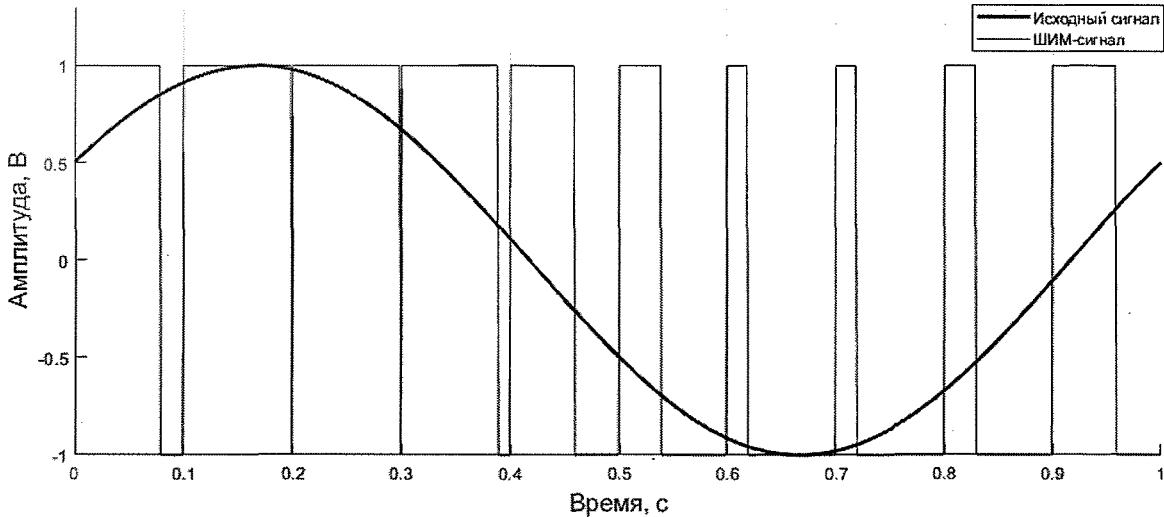


Рис. 2.11. Широтно-импульсная модуляция периодического сигнала

Спектр ШИМ (рис. 2.12) более сложен, чем спектр АИМ, при том же законе модуляции. Помимо постоянной составляющей и полезной компоненты, частота которой соответствует частоте распространения сигнала-сообщения, спектр ШИМ содержит бесконечное число гармоник частоты повторения $k f_c$, около которых имеется теоретически бесконечное множество боковых частот $k f_c \pm m f_b$, где m — коэффициент широтной модуляции импульсов, определяемый выражением

$$m = 2 \frac{\Delta t_{max}}{\tau_0},$$

где Δt_{max} — $A r_{max}$; A — крутизна характеристики модулятора ШИМ; r_{max} — максимальное значением амплитуды модулирующей функции.

В аналоговой технике ШИМ-сигнал генерируется аналоговым компаратором, на один вход (по рисунку — на инвертирующий вход компаратора) которого подаётся вспомогательный опорный пилообразный или треугольный сигнал, значительно большей частоты, чем частота модули-

рующего сигнала, а на другой — модулирующий непрерывный аналоговый сигнал.

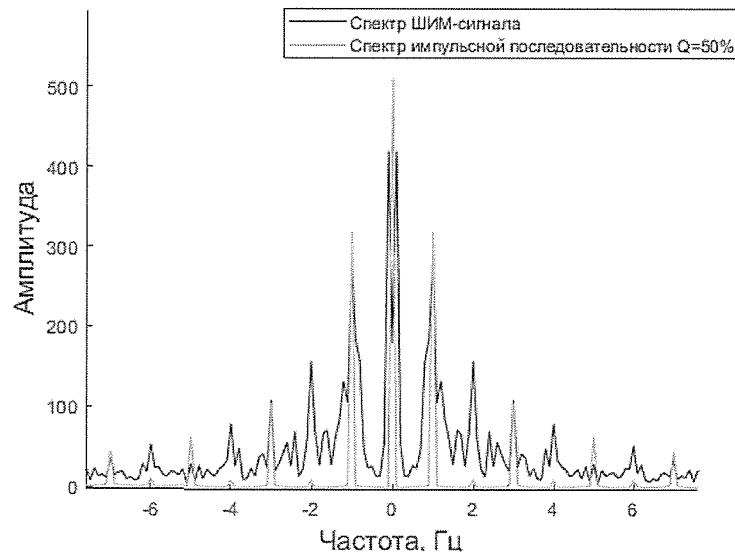


Рис. 2.12 Участок амплитудного спектра ШИМ-сигнала

Частота повторения выходных импульсов ШИМ равна частоте пилообразного или треугольного напряжения. В ту часть периода пилообразного напряжения, когда сигнал на инвертирующем входе компаратора выше сигнала на неинвертирующем входе, куда подается модулирующий сигнал, на выходе получается отрицательное напряжение, в другой части периода, когда сигнал на инвертирующем входе компаратора ниже сигнала на неинвертирующем входе — будет положительное напряжение.

В среде *Simulink* аналогичную модель можно создать с помощью блока генерации пилообразных импульсов *Triangle* и компаратора *Compare to Zero*. Такая система (рис. 2.13) работает с сигналом, изменяющимся от 0 до 1. Для более гибкой модуляции следует использовать блок *Compare to...*, который позволит работать с сигналами любой амплитуды.

Единственным и практически применимым способом демодуляции ШИМ является использование фильтра нижних частот (аналогично АИМ). Однако при этом принципиально невозможно выделить полезное сообщение без искажений, так как в полосу пропускания ФНЧ непременно попадут спектральные компоненты с частотами

$$(k f_c - m f_b) < f_b.$$

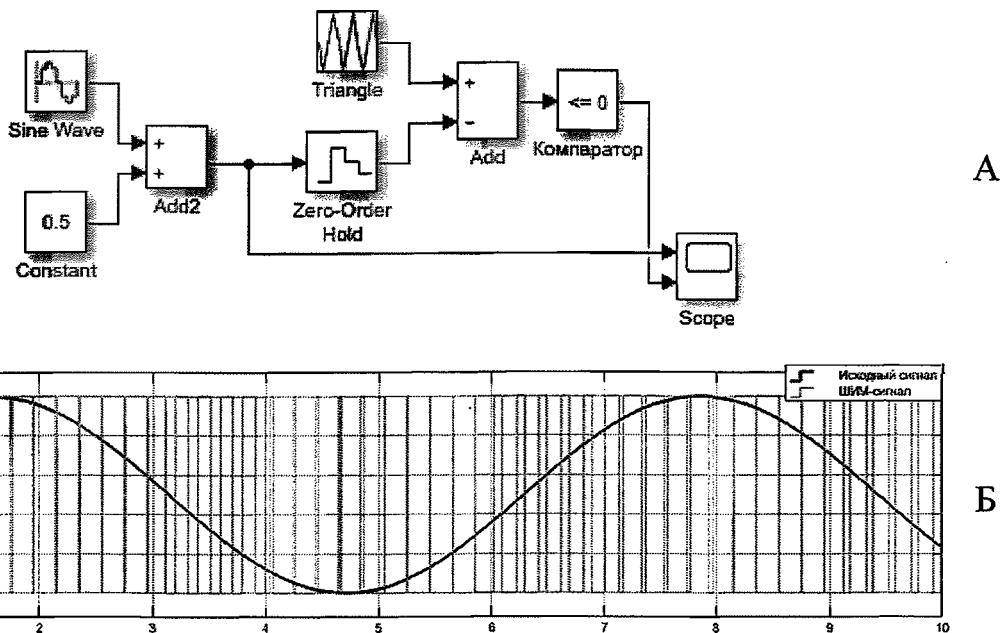


Рис. 2.13. Моделирование ШИМ-системы в среде Simulink: А – схема синтеза ШИМ-сигнала; Б – осциллограммы исходного и модулированного сигнала

При рациональном выборе параметров модуляции эти искажения можно сделать достаточно малыми.

2.4 Фазовая импульсная модуляция

Широтно-импульсная модуляция и фазоимпульсная модуляция (ФИМ) объединяются общим понятием – времяимпульсная модуляция (ВИМ). При ФИМ в зависимости от мгновенного значения сообщения: импульс сдвигается вправо на Δt при увеличении мгновенного значения и влево на Δt – при его уменьшении.

При синусоидальном сообщении сдвиг, или девиация, импульса определяется выражением

$$\Delta\tau = \Delta\tau_{max} \Omega \sin(\Omega t).$$

Таким образом, при ФИМ сдвиг импульсов относительно тактовых точек изменяется по закону изменения модулирующей функции $r(t)$, отображающей передаваемую информацию. Положение импульса можно измерить относительно канальной точки. Канальная точка – это положение импульса на оси времени при отсутствии модулирующего сигнала, т. е.

$r(t) = 0$. При этом амплитуда и длительность импульсов не изменяется. На рис. 2.14 приведены временные диаграммы ФИМ-сигнала, в прил. 2.7 – листинг кода реализации этого вида модуляции в *Matlab*.

В спектре сигнала ФИМ, помимо постоянной составляющей и незначительной по амплитуде полезной компоненты f , имеется бесконечное множество гармоник с частотами kf_c , окруженных составляющими $nf_c \pm mf$, причем симметричные относительно nf_c компоненты нижних и верхних боковых полос имеют различные амплитуды.

Демодуляция ФИМ с помощью ФНЧ возможна, однако при этом амплитуда полезной компоненты на выходе фильтра составляет 5-10% от амплитуды при демодуляции АИМ и сопровождается значительными искажениями.

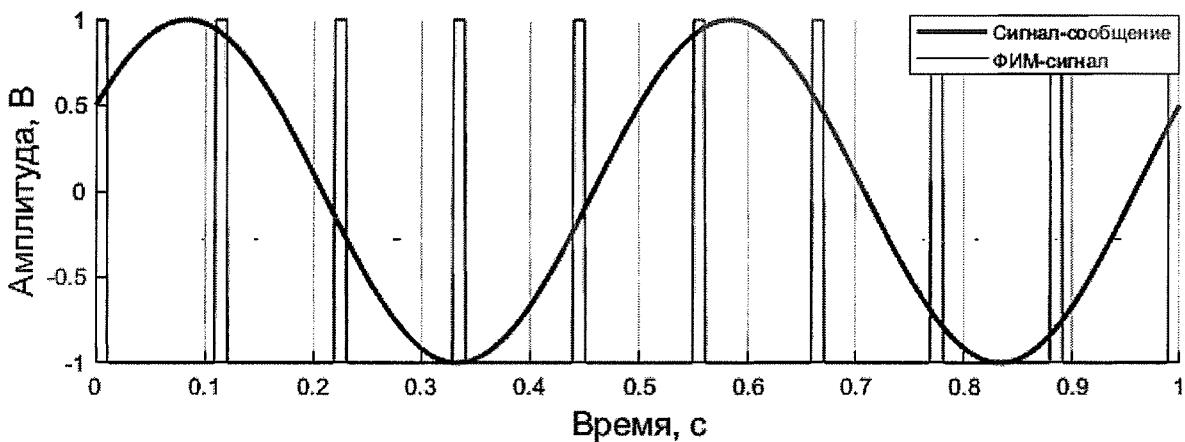


Рис. 2.14. Реализация ФИМ-сигнала в среде *Matlab*

При АИМ и ШИМ изменяется амплитуда или ширина импульса, что сопровождается соответствующим значительным изменением средней мощности передатчика, в результате в спектре модулированного сигнала создается достаточно интенсивная полезная компонента. При ФИМ передаваемая Информация заложена в положении импульсов относительно тактовых точек, поскольку все импульсы имеют одинаковую форму, а их сдвиги при модуляции невелики, среднее значение последовательности с ФИМ меняется слабо и полезная компонента в ее спектре также мала (рис. 2.15). Значительные по величине боковые составляющие, расположенные слева от f_c , приводят к искажениям демодуляции сигнала. Указанные при-

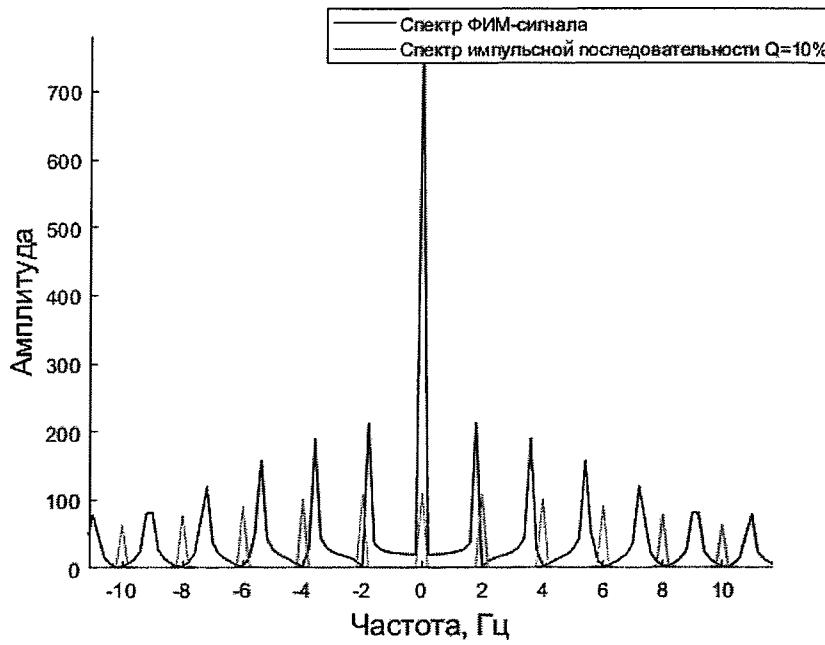


Рис. 2.15. Участок амплитудного спектра ФИМ-сигнала при частоте сигнала-сообщения 2 Гц

чины приводят к тому, что демодуляция ФИМ сигнала с помощью ФНЧ на практике не применяется.

Для генерации ФИМ-сигнала в среде *Simulink* достаточно дополнить схему, изображенную на рис. 2.13, блоком *Monostable*. Этот блок генерирует импульс заданной длительности при фиксировании заданного фронта импульса, поступающего на сход системы. Для получения осциллограммы, приведенной на рисунке 2.16, параметры блока выставлены следующим образом: *Edge detection – Falling*, *Pulse duration – 0,1 с*.

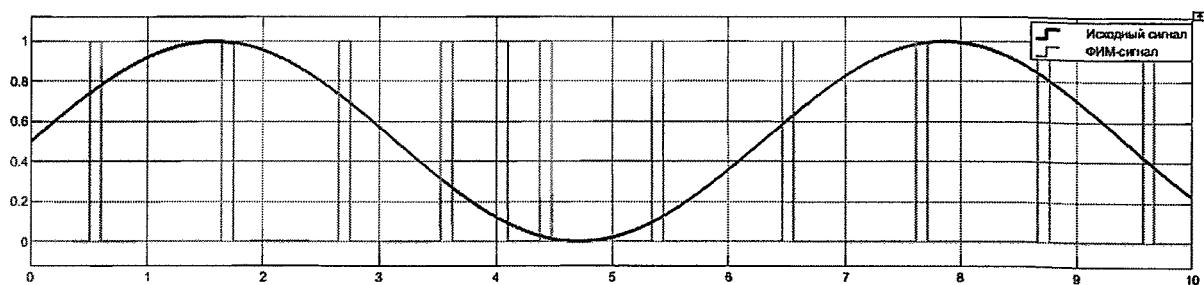


Рис. 2.16. Осциллограмма ФИМ-сигнала, сгенерированного в среде Simulink

Чтобы снизить искажение и увеличить уровень полезной составляющей на выходе демодулятора ФИМ предварительно преобразуют в ка-

кой-либо другой вид импульсной модуляции, допускающей более эффективную демодуляцию фильтром низких частот, например, в ШИМ или АИМ.

2.5 Практические задания

2.5.1 Изучение принципов генерации ИКМ-сигналов

Цель работы: моделирование процесса генерации сигналов с импульсно-кодовой модуляцией в среде *Simulink*.

- Задачи:
1. Освоение принципов импульсно-кодовой модуляции.
 2. Создание ИКМ-модулятора в среде *Matlab Simulink*.

Порядок выполнения работы.

Перед началом выполнения работы каждый студент получает свой вариант задания. Вариант задания включает в себя частоту и амплитуду сигнала, шаг квантования и период дискретизации сигнала. В качестве сигнала выступает простой периодический сигнал, генерация которого осуществляется в *Simulink* с использованием блока *Sine Wave*.

1. Сгенерировать сигнал с параметрами согласно варианту (табл. 2.1). Для этого в модели *Simulink* необходимо выставить параметры блока *Sine Wave*. Окно параметров сигнала представлено на рис. 2.17.
2. Привести временные диаграммы сгенерированного сигнала с помощью осциллографа, блок *Scope*.
3. Провести квантование сигнала с помощью блока *Quantizer*. Шаг квантования выбирается в окне параметров блока *Quantizer* (рис. 2.18).
4. Представить все значения оцифрованного сигнала в одно из 2^B целочисленных значений, где B – это количество бит для двоичного представления каждого уровня квантования. На рис. 2.19 представлен окно параметров блока *Uniform Encoder*, выполняющего операцию кодирования квантованных значений и сигнал с выхода *Uniform Encoder* при $B=8$ (диапазон значений кодированного сигнала от 0 до 255).

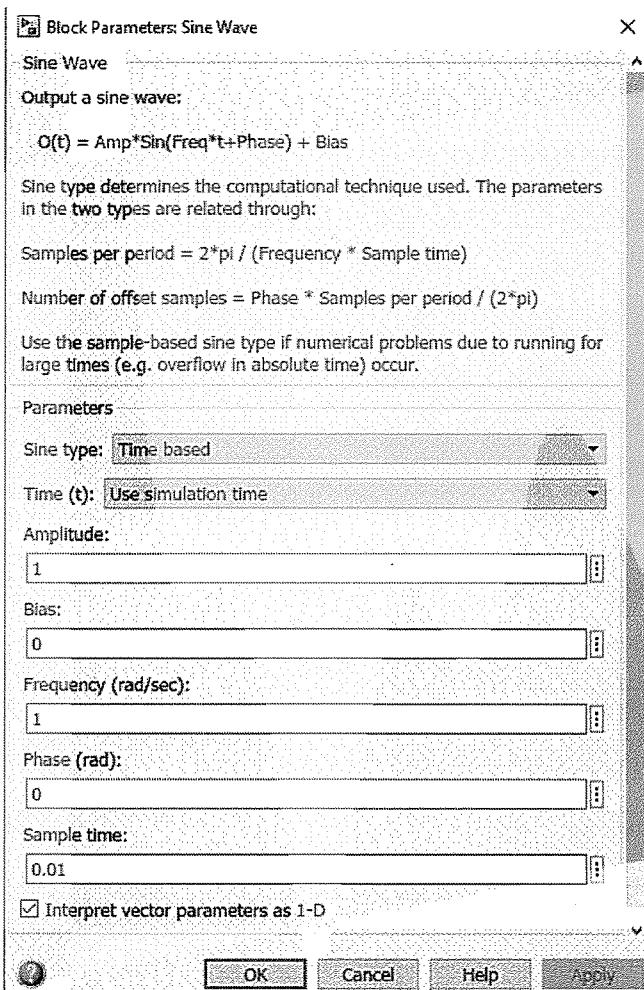


Рис. 2.17. Окно параметров блока *Sine Wave*.

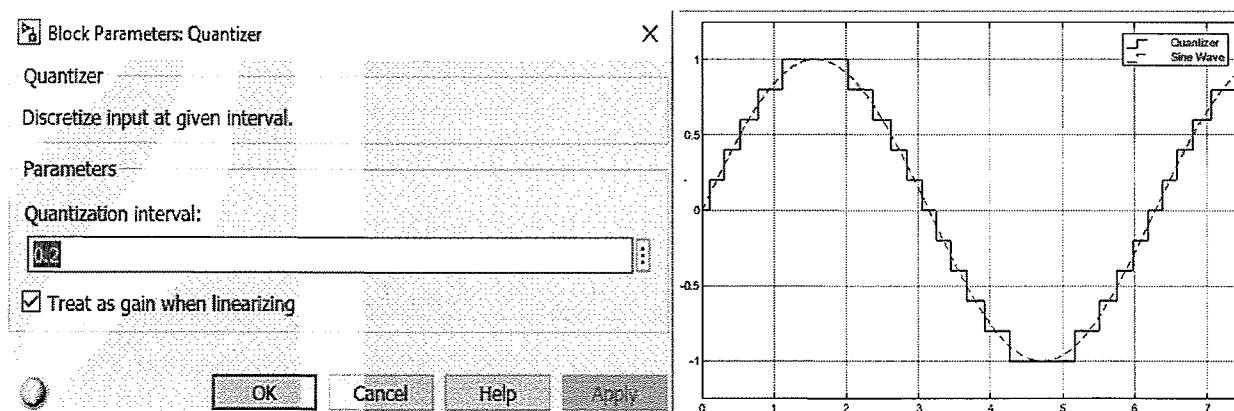


Рис. 2.18. Окно параметров блока *Quantizer* и временные диаграммы исходного и квантованного сигналов

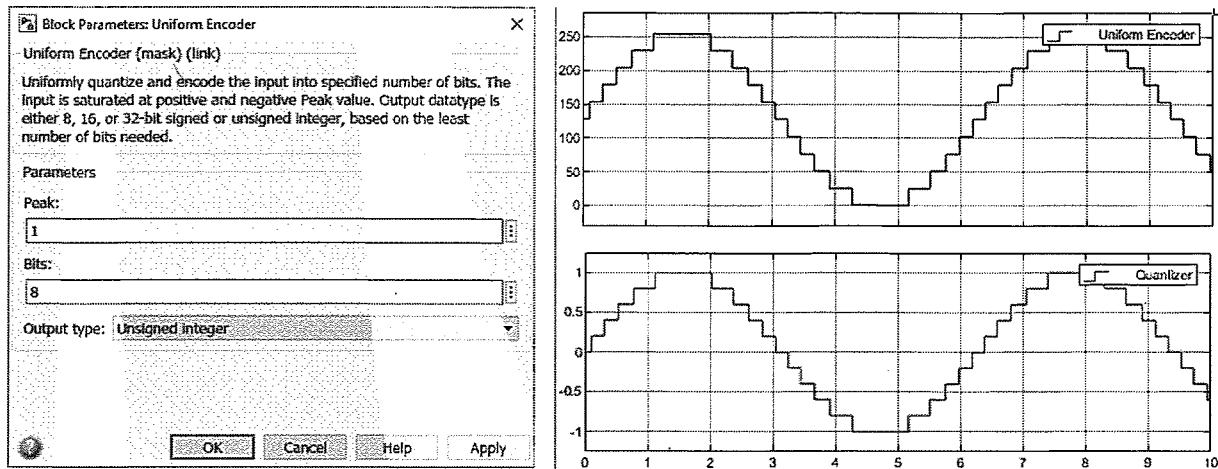


Рис. 2.19. Окно параметров блока *Uniform Encoder* и временные диаграммы квантованного сигнала и сигнала на выходе *Uniform Encoder*

5. Преобразовать целочисленные квантованные значения в кодовую последовательность. Для этого предлагается использовать блок *Integer to Bit Converter*, для обратного преобразования – *Bit To Integer Converter*. Эти блоки можно найти в библиотеке *Communication Toolbox*, начиная с *Matlab R2018* данная библиотека поставляется автоматически, для более ранних версий программного обеспечения требует отдельного скачивания. Результатом использования блока является получения ИКМ-сигнала (рис.2.20).

6. Выполнить демодуляцию ИКМ-сигнала и сравнить параметры исходного и восстановленного сигнала.

7. Повторить манипуляции в среде *Matlab*, используя листинги прил. 2.3 – 2.5.

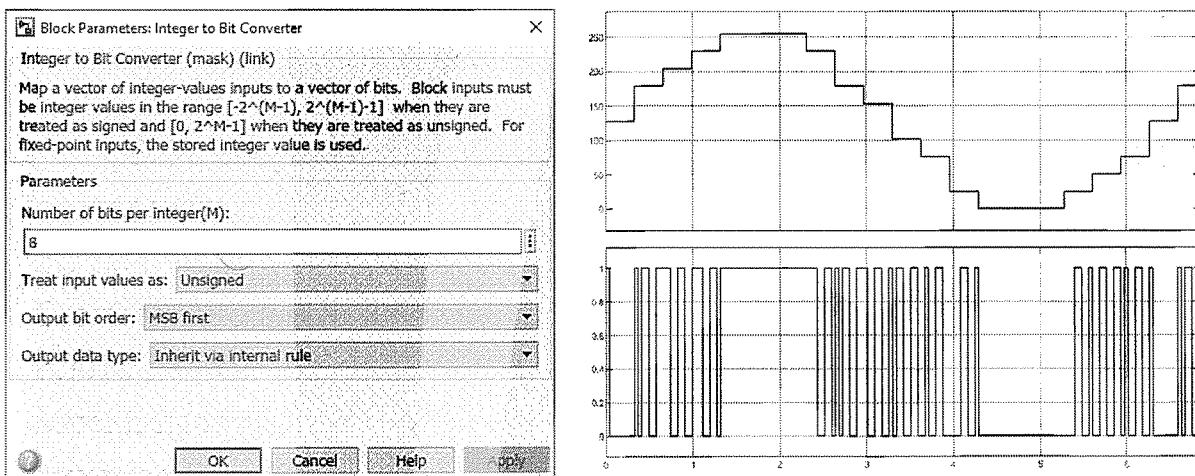


Рис. 2.20. Генерация сигнала с импульсно-кодовой модуляцией с использованием блока *Integer to Bit Converter*

Таблица 2.1

Варианты заданий

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Амплитуда, В	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
Частота, Гц	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Начальная фаза, град	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Шаг квантования, В	0,2	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1	1,5	1	0,7

Номер варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Амплитуда, В	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
Частота, Гц	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Начальная фаза, град	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105
Шаг квантования, В	0,33	0,21	0,4	0,4	0,6	0,43	1	1,5	1,25	1,1

2.5.2 Синтез ФИМ- и ШИМ-сигналов

Цель работы: получение навыков синтеза и выделения информационной составляющей из сигналов, полученных с применением импульсных видов модуляции.

- Задачи:
1. Освоение принципов ФИМ и ШИМ.
 2. Формирование ФИМ-демодулятора на основе демодуляции ШИМ-сигнала.

Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения работы каждый студент получает свой вариант задания. Вариант задания включает в себя период импульса для генерации широтно-импульсно модулированного сигнала и скважность импульсной последовательности для генерации сигнала с ФИМ.

1. Сгенерировать периодический сигнал согласно варианту, полученному в предыдущей работе (2.4.1 «Изучение принципов генерации ИКМ-сигналов») в положительной области.
2. Собрать схему с рис. 2.13 с параметрами ШИМ-модуляции, согласно варианту (табл. 2.2). В отчете отразить осциллографмы, схему и параметры блоков.
3. Изменяя параметры генератора пилообразного импульса (рис. 2.21), отразить в отчете изменения ШИМ-сигнала на выходе системы.
4. Построить амплитудный спектр полученного сигнала. Оценить его составляющие и сделайте вывод о методах демодуляции такого сигнала.
5. Выполнить демодуляцию сигнала с использованием ФНЧ (блок *Analog Filter Designer*). При необходимости, воспользуйтесь усилителем *Gain*. В отчете отразите осциллографмы, сделайте вывод об эффективности демодуляции.

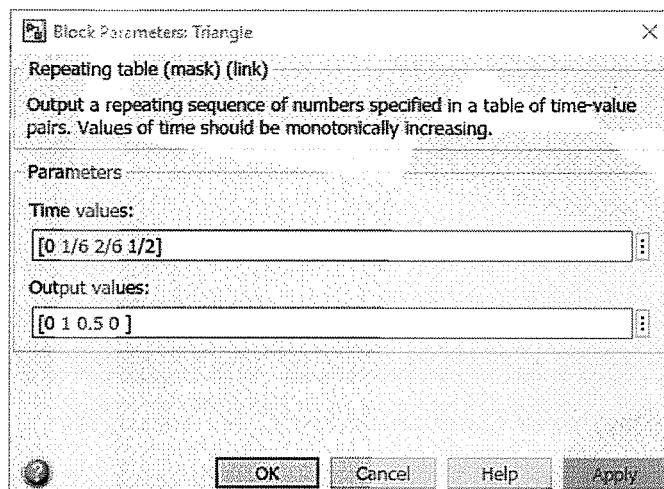


Рис. 2.21. Параметры блока *Triangle*

6. Дополнить собранную схему на выходе блоком *Monostable* (рис. 2.22), определить параметры блока в соответствии с заданием варианта. В отчете отразить схему, параметры блоков и осциллографмы ФИМ-сигнала.
7. Построить амплитудный спектр ФИМ-сигнала. Оценить его составляющие и сделайте вывод о методах демодуляции такого сигнала.

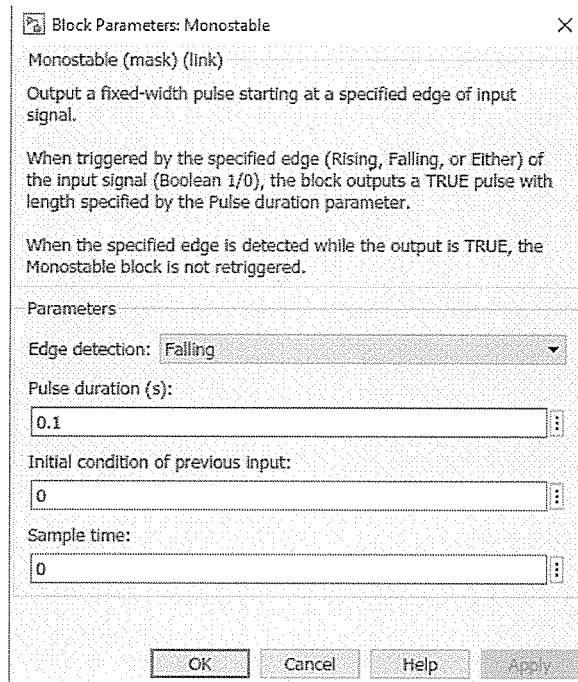


Рис. 2.22. Параметры блока *Monostable*

8. Попробуйте выполнить демодуляцию ФИМ-сигнала с помощью ФНЧ, при необходимости воспользуйтесь усилением. Обратите внимание на изменение амплитуды и фазы на протяжении сигнала, сделайте вывод о возможности демодулирования ФИМ-сигналов фильтром низких частот.

9. Предложите свой метод демодуляции ФИМ-сигнала и реализуйте его в среде *Simulink*.

Таблица 2.2

Варианты заданий

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Период импульса ШИМ, с	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28
Скважность импульса ФИМ, %	5	10	15	20	5	10	15	20	3	6
Номер варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Период импульса ШИМ, с	0,3	0,28	0,26	0,24	0,22	0,2	0,18	0,16	0,14	0,1
Скважность импульса ФИМ, %	9	12	3	6	9	12	5	10	15	20

Контрольные вопросы

1. *Какие существуют виды импульсной модуляции?*
2. *Применение импульсной модуляции.*
3. *Виды амплитудно-импульсной модуляции.*
4. *Принципы формирования АИМ-сигналов.*
5. *Принципы формирования ИКМ-сигналов.*
6. *Связь разрядности ИКМ-сигнала и точности восстановления исходного сообщения.*
7. *Особенности спектра АИМ-и ИКМ-сигнала.*
8. *Взаимосвязь ШИМ и ФИМ.*
9. *Объясните принципы формирования ФИМ-сигнала на основе схемы на рис. 2.13.*
10. *Объясните возможности преобразования ШИМ-сигнала в ФИМ-сигнал. Какими способами возможно обратное преобразование?*
11. *Расскажите об отличиях амплитудного спектра АИМ-, ШИМ- и ФИМ-сигналов. В чем их сходство?*
12. *Способы демодуляции АИМ-и ШИМ-сигналов. За счет чего возможно использовать для демодуляции ФНЧ?*
13. *Разностная (дифференциальная) ИКМ и преимущества и недостатки синтеза схем с ИКМ.*
14. *Как происходит оцифровка аналогового сигнала?*

Приложения к гл. 2

Приложение 2.1 Реализация амплитудно-импульсной модуляции

```
%генерация сигнала-сообщения
T=1; %временной отрезок, в котором рассматривается сигнал, 1 с
f=20; %частота сигнала, 20 Гц
A=1; %амплитуда сигнала
fd_i=8*10^3; %частота дискретизации, 8 кГц
k=1/fd_i;
t=0:k:T; %временная шкала
w=2*pi*f; %аргумент
signal=A*sin(w*t); %сигнал смешен в положительную область
```

Окончание прил. 2.1

```
%генерация стробирующих импульсов
Q=1/4; %скважность, 25%
pulse_s(1:length(t))=0;
for i=1:1/Q:length(t)
    pulse_s(i)=1;
end
%АИМ-модуляция
AIM_signal=signal.*pulse_s;

%отображение АИМ-сигнала
subplot(2,1,1);cla; hold on;
plot(t,pulse_s,'color',[150 150 150]/255);
plot(t,signal,'color',[0 0 0]/255);
subplot(2,1,2);cla; hold on;
plot(t,AIM_signal,'color',[0 0 0]/255);
```

Приложение 2.2 Реализация АИМ первого и второго рода в среде Matlab

```
%генерация стробирующих импульсов
Q=1/4; %скважность, 25%
n=1/Q*10; %количество дискретов на период импульса
pulse_s(1:length(t))=0;
for i=1:n:length(t)
    pulse_s(i:1:i+Q*n)=1;
end
%АИМ-2-модуляция
AIM2_signal=signal.*pulse_s(1:length(t));
%АИМ-1-модуляция
AIM1_signal(1:length(t))=0;
for i=1:n:length(t)
    AIM1_signal(i:1:i+Q*n)=signal(i);
end

%отображение АИМ-сигнала
figure(1);cla; hold on;
plot(t,AIM1_signal(1:length(t)), 'color',[150 150 150]/255);
plot(t,signal, 'color',[0 0 0]/255);
figure(2);cla; hold on;
plot(t,AIM2_signal(1:length(t)), 'color',[150 150 150]/255);
plot(t,signal, 'color',[0 0 0]/255);
```

Приложение 2.3 Формирование ИКМ-сигнала в среде Matlab

```
T=1; %временной отрезок, в котором рассматривается сигнал, 1 с
f=1; %частота сигнала-сообщения
ts=1/f; %период сигнала
fd_i=f*100; %частота дискретизации
td=1/fd_i; %период дискретизации
t=0:0.001:T; %временная шкала
A=1; %амплитуда сигнала, 1 Вольт
sig=A*sin(t*f*2*pi+30/180*pi); %формирование периодического сигнала
d_sig=sig(1:ts/td:length(t)-1); %дискретный сигнал, ts/td - отношение,
%равное количеству точек отсчета на
%период

%квантователь
resolution=5; %разрядность АЦП
N=2^resolution; %количество уровней квантователя
step=2*A/(N-1); %шаг квантователя
levels=-A:step:A; %массив уровней квантования
rez_qb(1:1:length(d_sig))=0; %массив для формирования ИКМ-сигнала
levels_bin=dec2bin(0:1:N-1)=='1'; %двоичное представление уровней (код
уровня)
for i=1:1:length(d_sig)
    for j=1:1:N-1
        if d_sig(i)>=levels(j) && d_sig(i)<levels(j+1) %сравнение в
уровнями квантования
            rez_qb((i-
1)*resolution+1:i*resolution)=double(levels_bin(j+1,:)); %запись в массив
кода уровня
            %double(levels_bin(j+1,:)); %вывод двоичного представления
            %(кода уровня) в консоль
        end
    end
end

%формирование ИКМ-сигнала для отображения
n=(ts/td)/resolution; %расчет длины символа (в дискретах)
rez_ikm(1:length(d_sig)*n)=0; %формирование массива ИКМ-сигнала
for i=1:1:length(rez_qb) %цикл по всем знакам кодовой последовательно-
сти
    rez_ikm((i-1)*n+1:1:(i-1)*n+1+n)=rez_qb(i); % "расширение" кодовых
последовательностей
end
%отображение на графике
figure(1);cla; hold on;
plot(t,sig, '--', 'color',[155 155 155]/255);
plot(t,rez_ikm, 'black');
```

Приложение 2.4 Формирование сигнала с дифференциальной импульсно-кодовой модуляцией в среде Matlab

```
diff_sig(1:length(d_sig)-1)=d_sig(1:length(d_sig)-1)-
d_sig(2:length(d_sig));
%квантователь
resolution=5; %разрядность АЦП
N=2^resolution; %количество уровней квантования
diff_ampl=max(diff_sig)+abs(min(diff_sig)); %изменение приращения на
рассматриваемом участке сигнала
step=diff_ampl/(N-1); %шаг квантователя
levels=min(diff_sig):step:max(diff_sig); %массив уровней квантования
rez_qb(1:1:length(d_sig))=0; %массив для формирования ДИКМ-сигнала
levels_bin=dec2bin(0:1:N-1)=='1'; %двоичное представление уровней (код
уровня)
for i=1:1:length(diff_sig)
    for j=2:1:N
        if diff_sig(i)==levels(j)|| (diff_sig(i)>=levels(j-1) &&
diff_sig(i)<levels(j)) %сравнение разницы с уровнями квантования
            rez_qb((i-
1)*resolution+1:i*resolution)=double(levels_bin(j,:)); %запись в массив
кода уровня
            %double(levels_bin(j+1,:)); %вывод двоичного представления
            %(кода уровня) в консоль
        end
    end
end
%формирование ДИКМ-сигнала для отображения
n=(ts/td)/resolution; %расчет длины символа (в дискретах)
%rez_ikm(1:length(d_sig)*n)=0; %формирование массива ДИКМ-сигнала
for i=1:1:length(rez_qb) %цикл по всем знакам кодовой последовательности
    rez_ikm((i-1)*n+1:1:(i-1)*n+1+n)=rez_qb(i); %"расширение" кодовых
последовательностей
end
buffer(1:n*resolution)=0; %буффер, так как до получения второго отсчета
rez_ikm=[buffer rez_ikm]; %разницы не может существовать
```

Приложение 2.5 Демодуляция ИКМ-сигналов в среде Matlab

```
%демодуляция
demod_sig(1:length(t))=0;
index2=1;
for i=1:resolution:length(rez_qb)
    num2str(rez_qb(i:i+resolution-1))
```

Окончание прил. 2.5

```
quant_level=bin2dec(num2str(rez_qb(i:i+resolution-1)));
index=fix((i)/resolution*ts/td)+1;
if quant_level~=0
demod_sig(index)=levels(quant_level);
end
end
```

Приложение 2.6 Пример реализации ШИМ в среде Matlab

```
%генерация сигнала-сообщения
T=1; %временной отрезок, в котором рассматривается сигнал, 1 с
f=1; %частота сигнала-сообщения
ts=1/f; %период сигнала
fd_i=f*100; %частота дискретизации
td=1/fd_i; %период дискретизации
t=0:0.001:T; %временная шкала
A=1; %амплитуда сигнала, 1 Вольт
sig=A*sin(t*f*2*pi+30/180*pi); %формирование периодического сигнала
d_sig=sig(1:ts/td:length(t)-1); %дискретный сигнал, ts/td - отношение,
%равное количеству точек отсчета на
%период

N=10; %уровни изменения скважности
step=2*A/(N-1); %шаг по амплитуде сигнала
levels=-A:step:A; %массив уровней амплитуды, соответствующие
%длительностям импульса
PWM_sig=[]; %инициализация массива ШИМ-сигнала
for i=1:length(d_sig) %цикл по дискретным отметкам
    for j=2:1:N %цикл по всем уровням амплитуды
        if d_sig(i)==levels(j)|| (d_sig(i)>=levels(j-1)) &&
d_sig(i)<levels(j) %сравнение амплитуды с уровнями
            ni=fix(j/10*(ts/td)); %расчет длительности импульса
            PWM_sig((i-1)*(ts/td)+1:(i-1)*(ts/td)+ni)=1; %формирование
импульса
            PWM_sig((i-1)*(ts/td)+ni:(i)*(ts/td)+1)=-1; %и паузы
        end
    end
end
%отображение исходного и модулированного сигналов
figure(1);cla; hold on;
plot(t,sig,'color',[0 0 0]/255, 'LineWidth', 2);
plot(t,PWM_sig,'color',[0 0 0]/255);
```

Приложение 2.7 Синтез ФИМ-сигнала в среде Matlab

```
%генерация сигнала-сообщения
T=1; %временной отрезок, в котором рассматривается сигнал, 1 с
f=2; %частота сигнала-сообщения
ts=1/f; %период сигнала
fd_i=f*100; %частота дискретизации
td=1/fd_i; %период дискретизации
t=0:0.001:T; %временная шкала
A=1; %амплитуда сигнала, 1 Вольт
sig=A*sin(t*f*2*pi+30/180*pi); %формирование периодического сигнала

d_sig=sig(1:ts/td:length(t)-1); %дискретный сигнал, ts/td - отношение,
%равное количеству точек отсчета на
%период

N=10; %уровни изменения скважности
step=2*A/(N-1); %шаг по амплитуде сигнала
levels=-A:step:A; %массив уровней амплитуды, соответствующие
%длительностям импульса
phi=(0:N-1)*(ts/td)*0.1; %массив начальных фаз для формирования ФИМ (в
отсчетах)
ni=0.1*(ts/td); %расчет длительности импульса

PPM_sig(1:length(sig))=-1; %инициализация массива ШИМ-сигнала
for i=1:length(d_sig) %цикл по дискретным отметкам
    for j=2:1:N %цикл по всем уровням амплитуды
        if d_sig(i)==levels(j)|| (d_sig(i)>=levels(j-1)) &&
d_sig(i)<levels(j)) %сравнение амплитуды с уровнями
            PPM_sig((i-1)*(ts/td)+phi(i)+1:(i-1)*(ts/td)+phi(i)+ni+1)=1;
        %формирование импульса
    end
end

%отображение ФИМ-сигнала
figure(1);cla; hold on;
plot(t, PPM_sig 'color',[150 150 150]/255);
plot(t, d_sig,'color',[0 0 0]/255);
```

3. СИСТЕМЫ СВЯЗИ С УПЛОТНЕНИЕМ КАНАЛОВ

3.1 Временное уплотнение каналов

Под каналом связи подразумевают совокупность технических и программных средств, предназначенных для передачи информации от одного источника сообщений.

Первые системы связи использовали отдельные линии передачи для организации каждого канала. Для передачи нескольких каналов (информационных потоков) по одной линии была предложена идея мультиплексирования. Под мультиплексированием (также используется термин «уплотнение» или «разделение») понимается объединение нескольких меньших по емкости входных каналов связи в один канал большей емкости для передачи по одному выходному каналу связи. При реализации такого объединения телефонных каналов одной из основных задач является устранение взаимного влияния соседних каналов.

Разделение сигналов – это обеспечение независимой передачи и приема многих сигналов по одной линии связи или в одной полосе частот, при которой, сигналы сохраняют свои свойства и не искажают друг друга. Многоканальная телемеханическая система (МТС) с одной линией связи представлена на рис. 3.1.

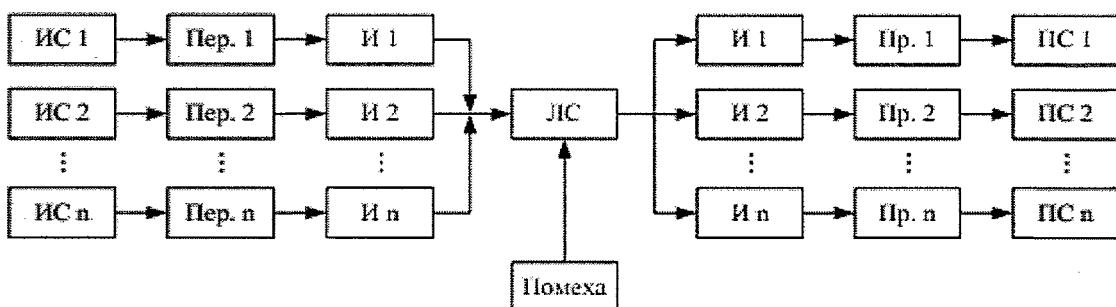


Рис.3.1. Общая схема многоканальной телемеханической системы с одной линией связи: ИС - источник сообщения; Пер – передатчик; Пр – приемник; ПС – приемник сообщения; ЛС – линия связи; И – классификатор (идентификатор)

Используемые методы уплотнения каналов можно классифицировать на линейные и нелинейные (комбинационные). В большинстве случаев

разделения каналов каждому источнику сообщения выделяется специальный сигнал, называемый канальным. Промодулированные сообщениями канальные сигналы объединяются, в результате чего образуется групповой сигнал. Если операция объединения линейна, то получившийся сигнал называют линейным групповым сигналом.

Для унификации многоканальных систем связи за основной или стандартный канал принимают канал тональной частоты (канал ТЧ), обеспечивающий передачу сообщений с эффективно передаваемой полосой частот 300 ... 3400 Гц, соответствующей основному спектру телефонного сигнала.

Временное уплотнение (ВУ) основано на представлении информации в импульсном виде и передаче электрических посылок, получаемых от нескольких источников сигналов в разные промежутки времени. Одним из принципов построения таких многоканальных систем является обеспечение ортогональности канальных систем, что достигается путем отсутствия перекрытий сигналов при формировании группового сигнала.

Способ формирования трех канальных сигналов в системах с ВУ показан на рис. 3.2. Для упрощения, принято, что сигналы имеют форму тональных и на рассматриваемом промежутке времени t не затухают. Причем, частоты распространения рассматриваемых сигналов различны: f_1, f_2, f_3 соответственно (рис. 3.2, А). Частота дискретизации f_s для всех сигналов одна и выбрана в соответствии с теоремой Котельникова, что $f_s \geq 2(\max(f_1, f_2, f_3))$, то есть как минимум вдвое больше чем самая высокая частота представленных сигналов.

В соответствии с периодом дискретизации вырабатываются импульсы, амплитуда которых соответствует мгновенной амплитуде соответствующего сигнала. Отсчеты каждого из канальных сигналов смешены относительно друг друга, но расстояние между отсчетами каждого сигнала постоянно на всей длительности сигнала (рис. 3.2, Б). Далее в системе с ВУ происходит периодическое подключение каждого источника к линии связи и формирование группового сигнала.

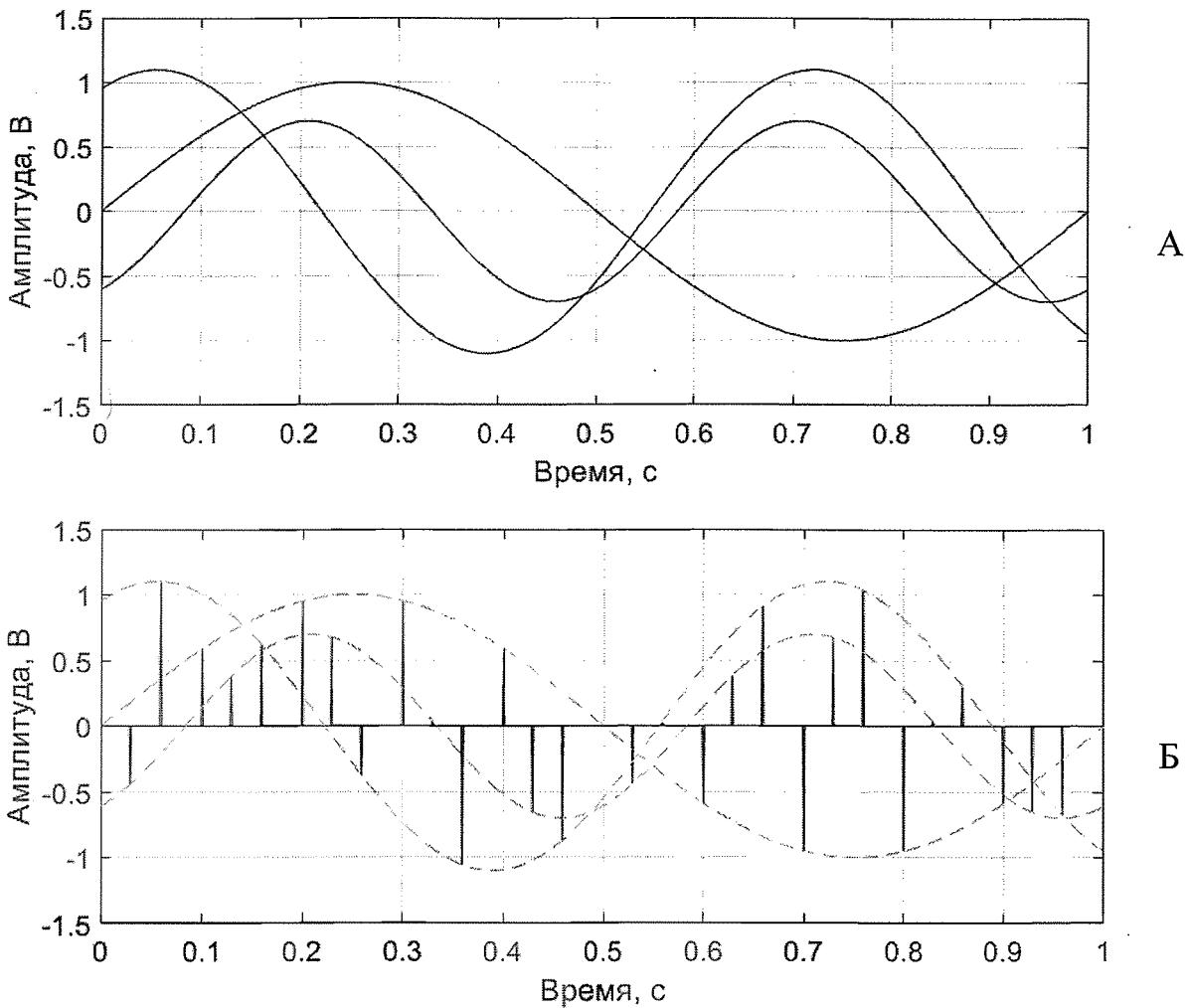


Рис. 3.2. Формирование группового сигнала в системах с ВУ: А – генерация тональных сигналов; Б – дискретизация и групповой сигнал

Рассмотрим аналоговое временное мультиплексирование (*TDM*, *Time Division Multiplexing*), однако следует учитывать, что генерируемые аналоговые сигналы в системах *Matlab* и *Simulink* таковыми не являются. При моделировании ВУ будет использованы дискретные сигналы с очень высокой частотой дискретизации.

TDM-мультиплексор выполняет операцию объединения сигналов различных каналов, на практике это устройство представляет собой коммутатор, синхронизированный с других коммутатором, выступающих в качестве демультиплексора для выделения сигналов на приеме. Рассмотрим коммутатор (рис. 3.3) для четырех канальной системы ВУ.

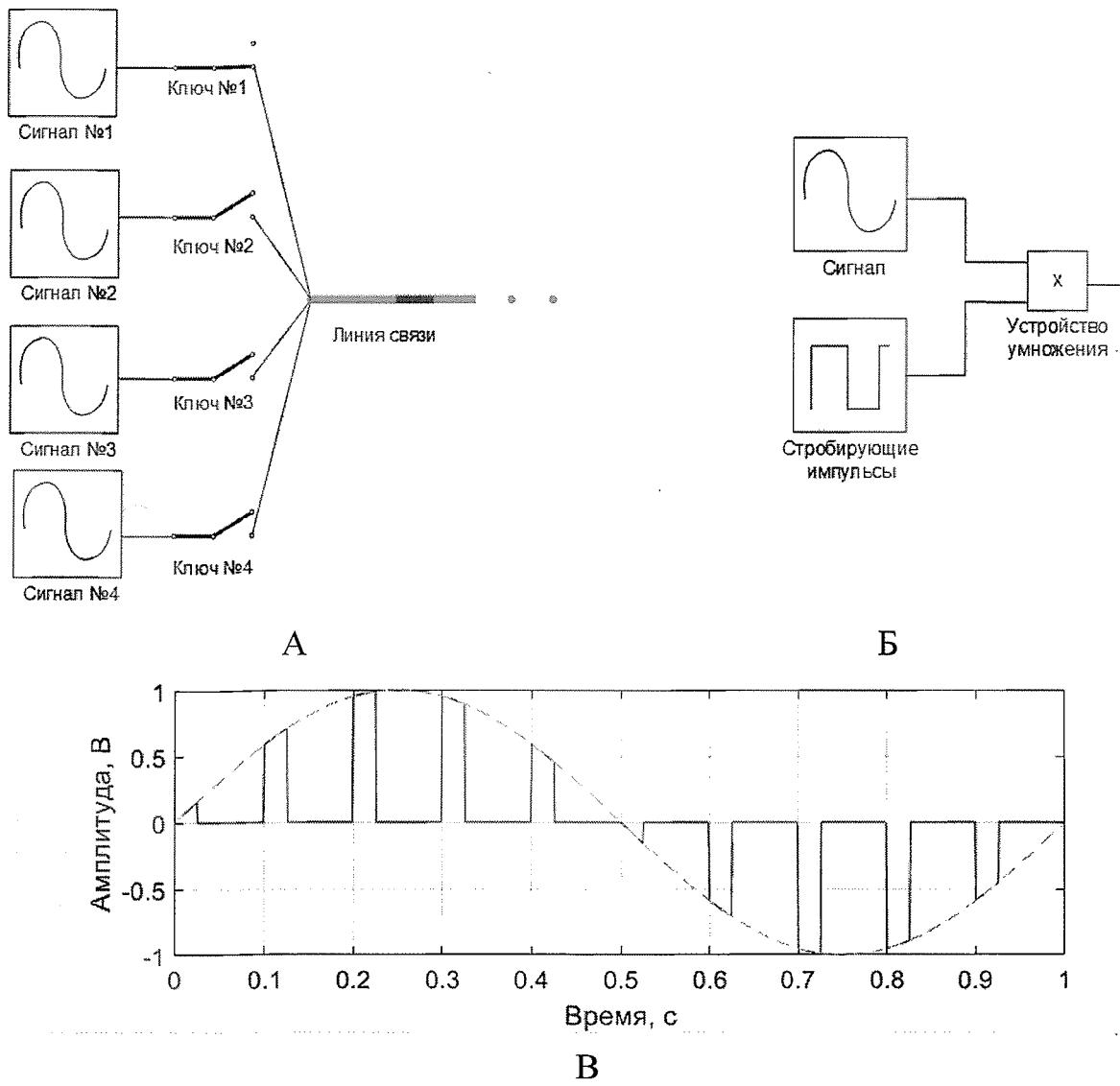


Рис. 3.3. Устройство TDM-мультиплексора: А – коммутатор; Б – эмуляция ключа с использованием стробирующих импульсов; В – результирующий сигнал на выходе ключа

Как правило, в таких устройствах управление сигналами каналов, из которых будет формироваться групповой сигнал в период времени t_1 производится за счет открытия соответствующего ключа k_1 , а ключи k_2, k_3, k_4 управляют формированием в периоды t_2, t_3, t_4 . Далее, после формирования первого периода T группового сигнала, следует периодическое открытие ключей k_1, k_2, k_3, k_4 для периодов t_5, t_6, t_7, t_8 . Причем все периоды равны и сумма периодов для последовательного открытия четырех ключей равна периоду группового сигнала. Управление ключами осуществляется при помощи стробирующих импульсов (рис.3.4) где длительность импульса

соответствует открытию ключа, а длительность паузы – временному интервалу для открытия трех остальных ключей. Листинг реализации стробирующих импульсов в среде *Matlab* приведен в прил. 3.1.

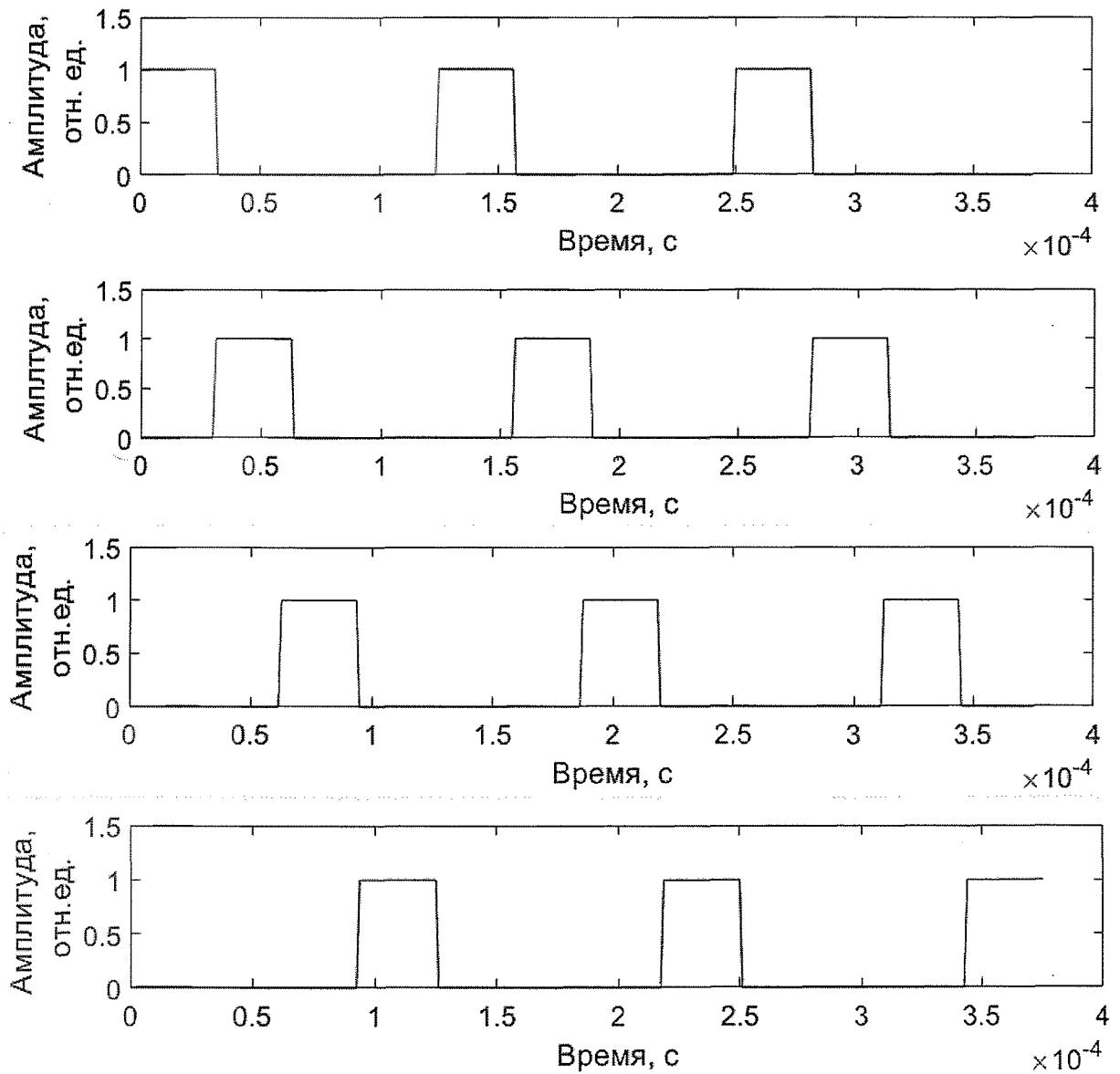


Рис. 3.4. Формирование стробирующих импульсов в TDM-мультиплексоре

Для эмуляции открытия ключа использована операция умножения исходного сигнала на стробирующий импульс (прил. 3.2).

Введем следующие обозначения: $T_{ц}$ – время опроса всех каналов; $f_{ц}$ – частота опроса каналов; τ_p – время работы одного канала; τ_3 – защитный интервал. В результате чего получаем

$$T_{ц} = N \tau_k,$$

где N – число каналов,

$$\tau_k = \tau_p + 2\tau_s.$$

В отличие от других способов разделения каналов, технология TDM производит манипуляцию двумя параметрами сигнала, а именно частотой и временем. Каждому каналу в технологии TDM назначается уже более широкая частотная полоса (до 200 кГц). В свою очередь данная полоса частот разбивается на разнесенные по времени логические каналы. Преимуществами данной системы являются более высокая помехозащищённость и наличие возможности повторно использовать одну и ту же полосу частот.

К недостаткам ВУ можно отнести линейные искажения, возникающие за счет ограниченности полосы частот и неидеальности амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик системы связи, а также взаимные помехи, которые могут возникать за счет несовершенства синхронизации тактовых импульсов на передающей и приемной сторонах.

Рассмотрим способы синхронизации при ВУ:

1. Пошаговый – при этом способе генератор устанавливается на передающей стороне, а переключение производится на приемной стороне по импульсу с передатчика (рис. 3.5).

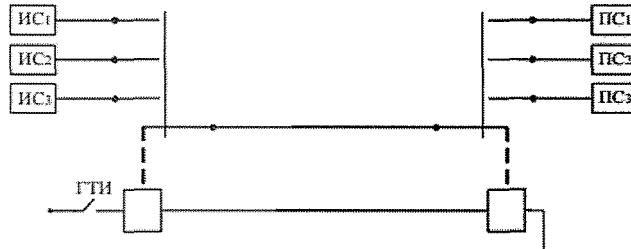


Рис. 3.5.МТС с пошаговым способом синхронизации: ГТИ – генератор тактовых сообщений (импульсов)

2. Циклический (старт-стопный) – при данном способе синхронизации на обоих концах имеются генераторы, работающие в ждущем режиме (рис. 3.6). За цикл их работы генерируется только один запускающий импульс. Такой способ синхронизации обладает более сложной структурой, чем пошаговый, но его помехоустойчивость выше.

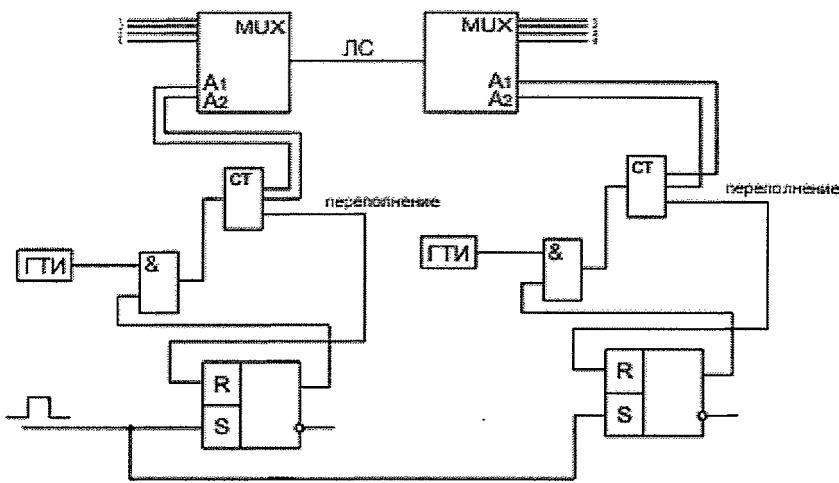


Рис.3.6. МТС с циклическим способом синхронизации

3. Инерционный - при данном способе синхронизации на обоих концах имеются генераторы, синхронизация генератора приемника осуществляется по величине смещения фаз генератора приемника и тактового импульса (рис. 3.7).

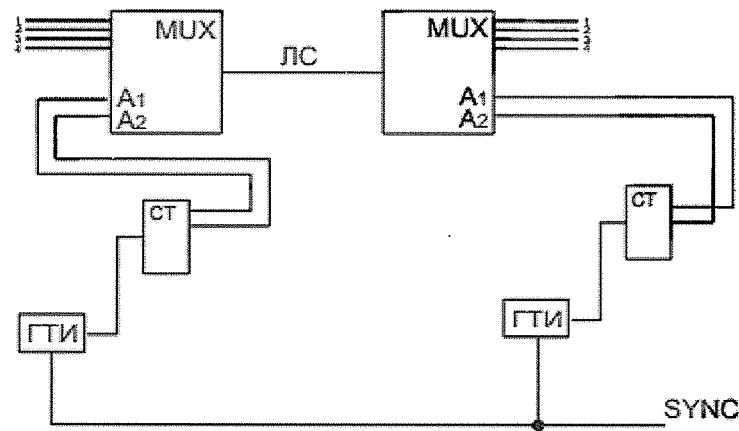


Рис. 3.7 МТС с инерционным способом синхронизации

В среде *Simulink* моделирование МТС с ВУ сводится к формированию стробирующих импульсов на мультиплексоре и демультиплексоре и умножение на сигнал-сообщение с последующим суммированием всех полученных сообщений. Сформированный групповой сигнал, поступая на демодулятор, повторно умножается на стробирующие импульсы, полно-

стью синхронизированные с модулятором на передающей стороне, схема реализации системы с ВУ приведена на рис. 3.8.

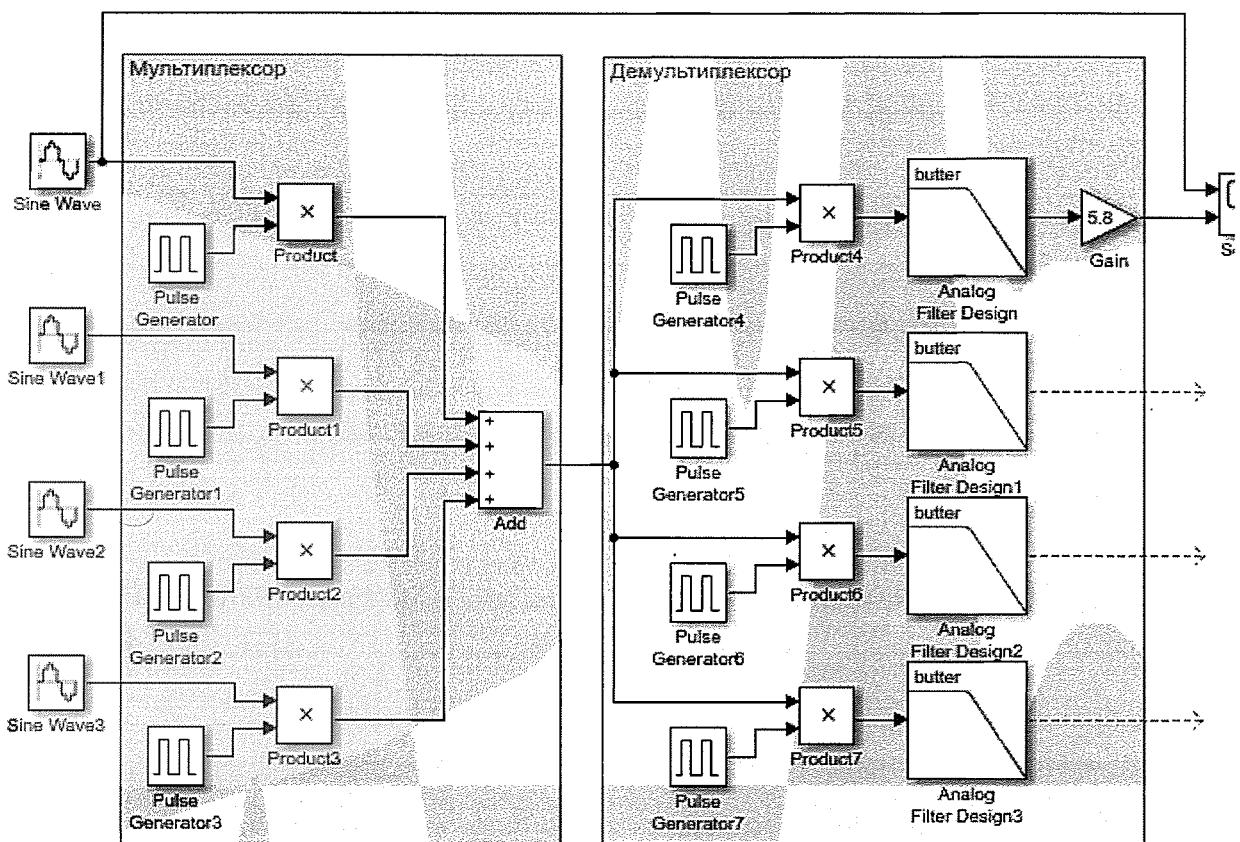


Рис. 3.8. Реализация МТС с ВУ в среде *Simulink*

Разработанная система не учитывает возможные помехи в линии и потери на распространение, мультиплексор и демультиплексор работают полностью синхронно. Осцилограммы работы организованной МТС представлены на рис. 3.9.

3.2 Частотное уплотнение каналов

В МТС с частотным уплотнением (ЧУ) переносчиками пользовательских сигналов являются гармонические несущие колебания с различными частотами, и каждый исходный сигнал от абонента будет передаваться в своей частотной области после преобразования в канальный сигнал.

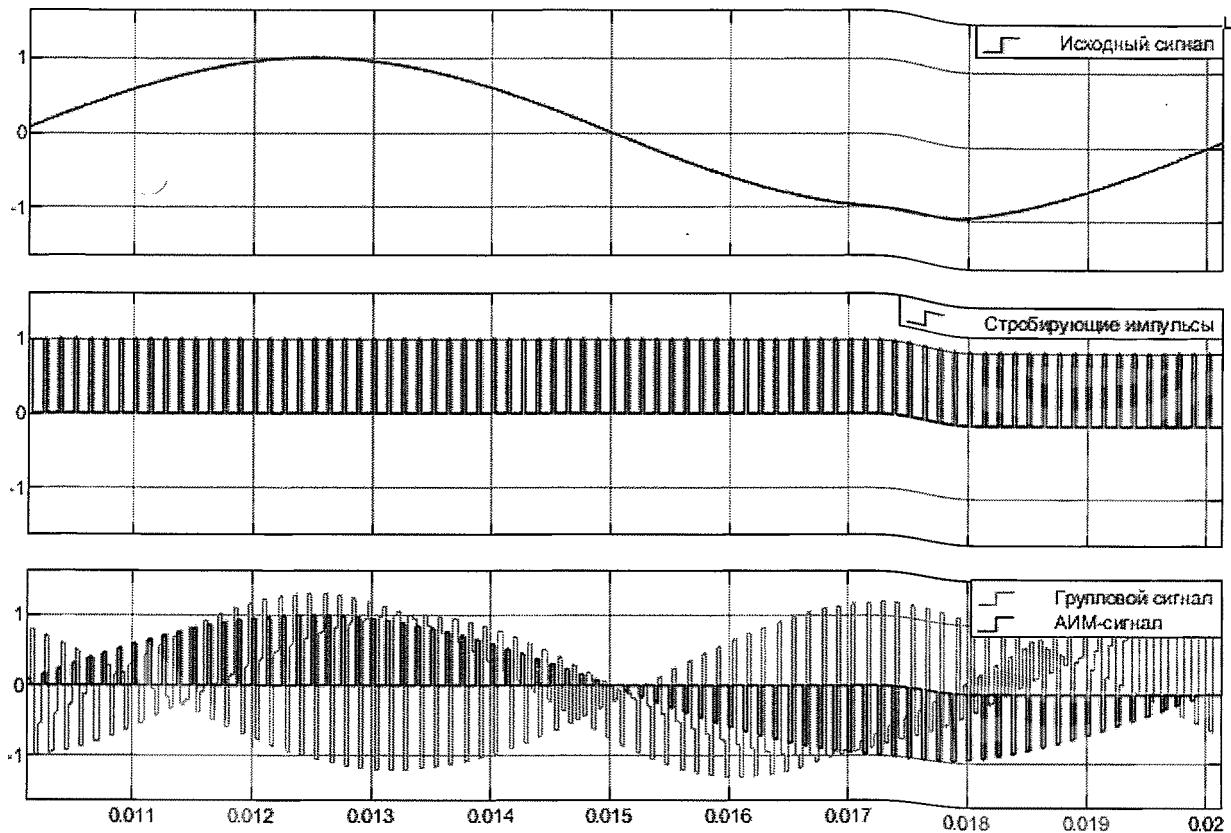


Рис.3.9. Временные диаграммы работы МТС с ВУ

Каждому каналу связи отводится определённый участок общей полосы частот ($f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$) , передаваемых по линии связи. Для первого канала связи выделяется полоса Δf_1 , для второго - Δf_2 и т.д. Соседние каналы связи разделяются между собой полосами непропускания $\Delta f_{\text{непр}}$, ширина которых зависит от качества фильтров, применяемых для разделения каналов.

Полоса частот определяется выражением

$$\Delta F = \sum_{i=1}^n (f_i + \Delta f_{\text{непр}}).$$

Для преобразования первичных сигналов в канальные, в системах с ЧУ обычно применяется амплитудная модуляция, как обладающая меньшей полосой частот для передачи одного канала, что обеспечивает большую емкость систем. Однако, следует отметить, что помехозащищенность систем с АМ гораздо ниже, чем у систем использующих угловую модуляцию (частотную или фазовую). При этом, спектр АМ сигнала состоит из

двух боковых полос, в каждой из которых передается одна и та же информация, и несущей частоты, не содержащей никакой информации (рис.3.10) листинг кода *Matlab*, генерирующего такой групповой сигнал, приведен в прил. 3.3.

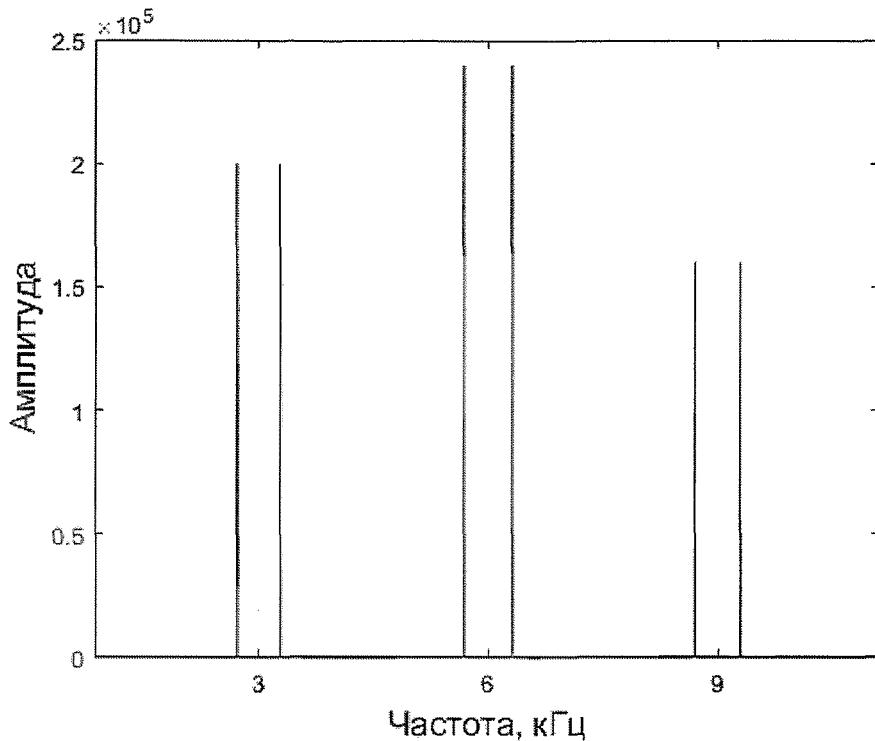


Рис. 3.10. Амплитудный спектр группового сигнала МТС с ЧУ

ЧУ предусматривает выделение каждому источнику сигналов фиксированного, строго определенного места в общем частотном диапазоне. Для этого выделенный для организации связи частотный диапазон $\Delta\omega$, предназначенный для системы связи, разбивается на N (по количеству каналов в ней) частотных поддиапазонов.

В каждый такой поддиапазон $\Delta\omega$, «помещают» спектр соответствующего канального сигнала. Такой способ основан на том, что спектр реального сигнала практически ограничен определенным интервалом частот. Считается, что вне этого интервала составляющие спектра сигналы отсутствуют. С помощью канальных передатчиков спектры сообщений не меняя своей структуры, преобразуются в канальные. Задача канальных передатчиков - распределить исходные спектры сообщения по частоте, построив

их друг за другом. Таким образом, при частотном объединении каналов каждый канальный спектр переносится в соответствующий отдельный поддиапазон.

На приемной стороне разделение происходит за счет фильтрации отдельных канальных спектров. Каждый фильтр пропустит только один спектр и задержит остальные. Выделенный фильтром сигнал преобразуется в исходный как в обычной одноканальной системе.

Для того чтобы при многоканальной передаче не возникли помехи между каналами, необходимо ширину частотных поддиапазонов взять несколько большей ширины канальных спектров группового сигнала, т. е. они не должны располагаться друг за другом с наложением. Между ними должен быть частотный промежуток - защитный интервал. В противном случае при разделении сигналов составляющие соседних канальных спектров могут просочиться друг к другу и вызвать искажения.

Следует учитывать, что частотное разнесение каналов ограничено спектром радиоканала. Этот спектр зависит от передающей среды, в которой происходит распространение группового сигнала, и канaloобразующего оборудования. Например, ширина спектра сигнала для мобильного телефона составляет 8 МГц. Если мобильный оператор даёт абоненту частоту 880 МГц, то следующий абонент может занимать частоту $880+8=888$ МГц. Таким образом, если оператор мобильной связи имеет лицензионную частоту 800—900 МГц, то он способен обеспечить около 12 каналов, с частотным разделением.

Рассмотрим МТС с ЧМ, обладающим более широким спектром, по сравнению с рассмотренной выше АМ. Для этого была собрана схема, представленная на рис. 3.11, в среде *Simulink*. Модуляторы и демодуляторы (аналогичные рис. 1.12) сформированы для упрощения схемы в отдельные блоки *Subsystems*. Частоты распространения сигналов-сообщений составляют 10, 20 и 30 Гц, а частота несущей при ЧМ 9, 14 и 19 кГц соответственно. С помощью блока *Add* формируется групповой сигнал. На приемной стороне установлены полосовые фильтры, выделяющие диапазоны передающих частот из общего спектра (рис. 3.11, В).

Разновидностью технологии частотного мультиплексирования, используемой в случае оптических линий связи, является мультиплексирова-

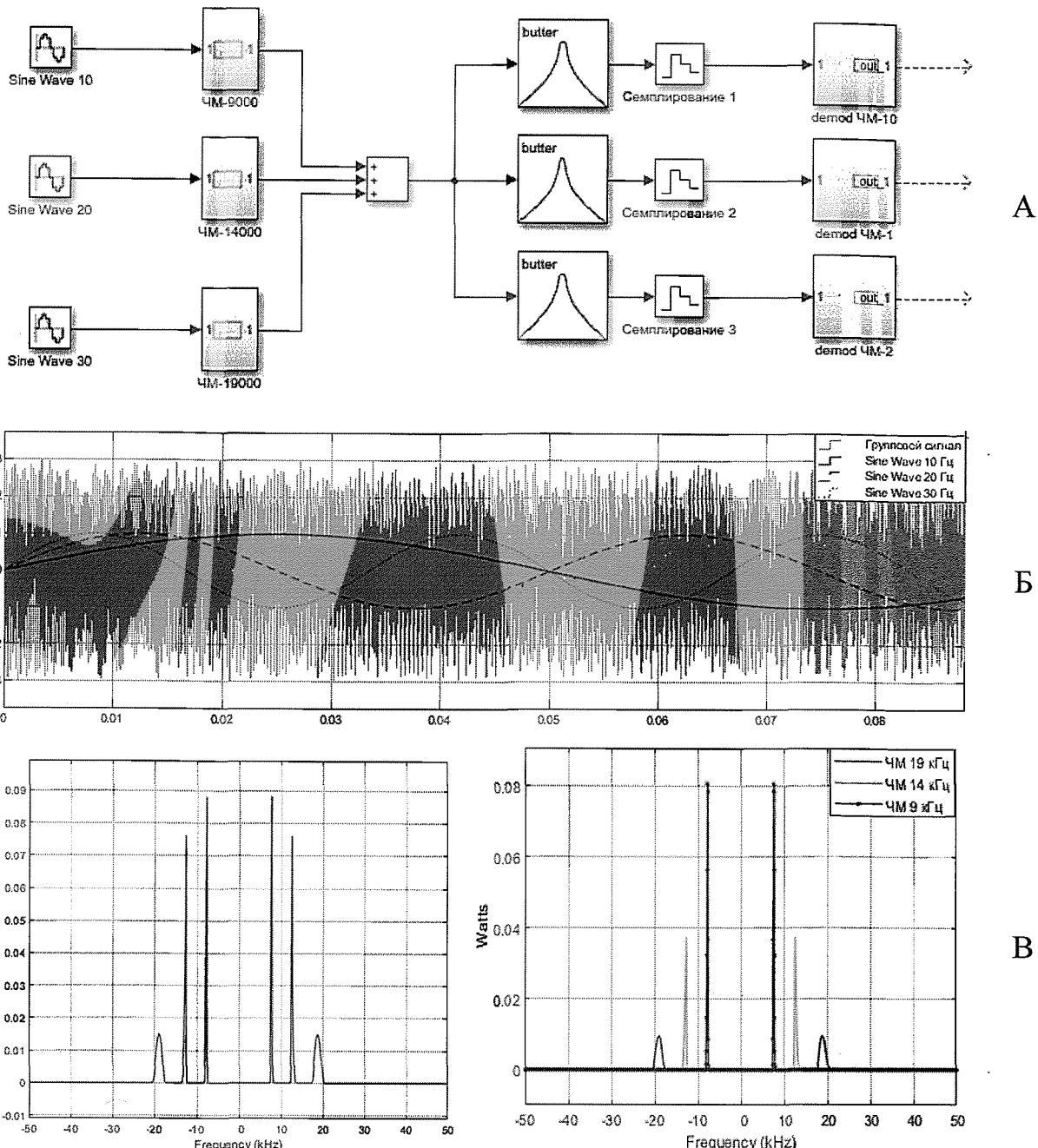


Рис.3.11. Моделирование МТС с ЧУ в среде *Simulink*: А – схема МТС; Б – групповой сигнал; В – амплитудный спектр группового сигнала и демультиплексированных сигналов

ние по длине волны (*Wavelength Division Multiplexing, WDM*). Физически мультиплексирование осуществляется следующим образом: несколько волокон подводится к призме (или чаще дифракционной решетке), световые пучки пропускаются через призму и попадают в общее волокно. На проти-

воположном конце пучки разделяются с помощью другой призмы. Если каждый подводимый пучок ограничен своим частотным диапазоном, то они не будут перекрываться. Оптические системы полностью пассивны и, как результат, более надежны.

Первоначально, в 70-х годах, системы волоконно-оптической связи использовали первое окно прозрачности, поскольку выпускаемые в то время лазеры, выступающие в роли призмы, работали на длине волны 850 нм. В настоящее время этот диапазон из-за большого затухания используется только в локальных сетях. В 80-х годах были разработаны лазеры на тройных и четверных гетероструктурах, способные работать на длине волны 1310 нм и второе окно прозрачности стало использоваться для дальней связи. Преимуществом данного диапазона явилась нулевая дисперсия на данной длине волны, что существенно уменьшало искажение оптических импульсов.

Поэтому исторически первыми возникли двухволновые WDM системы, работающие на центральных длинах волн из второго и третьего окон прозрачности кварцевого волокна (1310 и 1550 нм). Главным достоинством таких систем является то, что из-за большого спектрального разноса полностью отсутствует влияние каналов друг на друга. Этот способ позволяет либо удвоить скорость передачи по одному оптическому волокну, либо организовать дуплексную связь.

Современные WDM системы на основе стандартного частотного плана можно подразделить на три группы:

1) грубые WDM (*Coarse WDM — CWDM*) — системы с частотным разносом каналов не менее 200 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 18 каналов. (Используемые в настоящее время CWDM работают в полосе от 1260 до 1620 нм, промежуток между каналами 20нм (200 Ghz), можно мультиплексировать 18 спектральных каналов.);

2) плотные WDM (*Dense WDM — DWDM*) — системы с разносом каналов не менее 100 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 40 каналов;

3) высокоплотные WDM (*High Dense WDM — HDWDM*) — системы с разносом каналов 50 ГГц и менее, позволяющие мультиплексировать не менее 64 каналов.

3.3 Практические задания

3.3.1 Изучение принципов построения сетей с временным разделением каналов в среде Matlab Simulink

Цель работы: знакомство с принципами обработки сигналов при временном уплотнении и разделении на оборудовании связи

Задачи: 1. Ознакомиться с имеющимися в *Simulink* функциональными возможностями для моделирования цифровых систем передач

2. Спроектировать систему с временным разделением каналов согласно варианту

3. Изучить и применить методы выделения информации из сигналов, полученных в результате выделения из группового сигнала

Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения работы каждый студент получает свой вариант задания. Вариант задания включает в себя количество каналов в системе, информационные последовательности для передачи в многоканальной системе, длительность символов в последовательностях. Вид модуляции для формирования сигналов в каждом канале выбирается исходя из варианта практического задания.

Работа состоит из трех этапов: формирование группового сигнала, временное разделение и обработка результатов моделирования.

Первый этап, формирование группового сигнала:

1. Сформировать информационные последовательности в среде *Simulink* согласно варианту (табл. 3.1).

2. Провести модуляцию каждой последовательности с видом модуляции согласно варианту.

3. Сформировать последовательность стробирующих импульсов и получить АИМ-сигналы для каждого канала, исходя из количества каналов для варианта

4. Путем сложения АИМ-сигналов получить групповой сигнал. В отчете по лабораторной работе предоставить функциональную схему полу-

чения группового сигнала и временные диаграммы на каждом пункте выполнения работы.

Второй этап, временное разделение каналов:

1. Выполнить разделение канальных сигналов в соответствии со сформированными стробирующими импульсами. Потерями на распространение сигнала пренебречь, режим работы ключей мультиплексора и демодулятора считать полностью синхронным.

2. Восстановить форму сигнала путем применения ФНЧ, в отчете определить и описать методику выбора частоты среза ФНЧ и оценить изменения сигнала после фильтрации (амплитуду, частоту и наличие фазовых сдвигов в сигнале).

Третий этап, обработка результатов моделирования:

1. Из полученных сигналов выделить информационную последовательность по методике на выбор

2. Оценить корректность восстановленных последовательностей для каждого из каналов.

Таблица 3.1

Варианты заданий

Но- мер вари- анта	Количе- ство ка- налов	Информаци- онные по- следова- тельности	Длитель- ность символа, с	Но- мер вари- анта	Количе- ство ка- налов	Информа- ционные последова- тельности	Длитель- ность символа, с
1	4	010101 101010 110011 100011	1	11	3	1000100 1010000 1000110	0,15
2	5	101010 100100 110011 100011 110110	0,9	12	3	00100 01010 01101	0,25
3	3	100100 101101 010010	0,8	13	4	100100 101101 010010 101011	0,35

Окончание табл. 3.1

Но- мер вари- анта	Количе- ство ка- налов	Информаци- онные по- следова- тельности	Длитель- ность символа, с	Но- мер вари- анта	Количе- ство ка- налов	Информаци- онные по- следова- тельности	Длитель- ность символа, с
4	4	1000110 0110010 1000100 1000110	0,7	14	3	1101100 1000100 1010000	0,45
5	5	1101100 1000100 1000110 1000100 1010000	0,6	15	3	01101 10010 11001	0,55
6	3	1000100 1010000 1000110	0,5	16	4	01001 10010 01010 01101	0,65
7	4	00101 01001 10010 10010	0,4	17	5	1101100 1000100 1010000 1000110 0110010	0,75
8	5	01101 10010 10010 11001 11100	0,3	18	3	100100 101101 010010	0,85
9	3	11100 00100 01010	0,2	19	4	010010 111001 011100 100011	0,95
10	4	100011 101011 010100 011100	0,1	20	4	0101011 1101100 1000100 1010000	1,05

3.3.2 Моделирование сетей с частотным разделением каналов в среде Matlab Simulink

Цель работы: изучить принципы построения систем связи с частотным разделением каналов.

Задачи: 1. Изучить структуру и функции основных узлов системы с частотным разделением каналов для передачи сообщений.

2. Изучить влияние спектральных характеристик передаваемых сигналов на качество их разделения и восстановления переданного сообщения на приемной стороне.

Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения работы каждый студент получает свой вариант задания. Вариант задания включает в ширину полосы группового сигнала, которая включает частотные диапазоны ЧМ-сигналов в составе разрабатываемой МТС.

1. Собрать в среде *Simulink* схему МТС с ЧУ (рис. 3.11). В качестве модулирующего сигнала взять ЧМ. Количество каналов в системе и информационные сообщения определяются табл. 3.1.

2. Настроить ЧМ-модуляцию произвольно, исходя из ширины полосы группового сигнала S (табл. 3.2) и количества каналов в МТС.

3. Получить и отразить в отчете осцилограммы сигналов-сообщений и группового сигнала, построить амплитудный спектр группового сигнала.

4. Исходя из данных, полученных при анализе амплитудного спектра группового сигнала, настроить полосовые фильтры для выделения всех канальных диапазонов.

5. Провести демодуляцию фильтрованных сигналов, оценить демодулированный и исходный сигналы. Сделать вывод об эффективности проведения ЧУ.

Таблица 3.2

Варианты заданий

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S , кГц	10	9	12	8	5	7	11	10	6	9

Номер варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
S , кГц	8	5	7	11	10	10	9	12	8	5

Контрольные вопросы

1. Что такое мультиплексирование?
2. Перечислите известные методики разделения (уплотнения) каналов и сферы их применения.
3. Функциональная схема TDM-мультиплексора.
4. Как формируются стробирующие импульсы?
5. Формирование группового сигнала при временном разделении каналов.
6. Демультиплексирование группового сигнала при ЧУ.
7. Каковы различия между мультиплексированием с временным разделением и мультиплексированием с частотным разделением?
8. Какой тип модуляции применяется в системах передачи с ЧУ?
9. Где в амплитудно-модулированном сигнале содержится полезная информация?
10. Какова абсолютная ширина полосы частот одного канала с учетом защитного интервала?
11. Какие типы синхронизации выделяют в системах передач с ИКМ?
12. Для чего нужна тактовая синхронизация?
13. Что ведет к образованию межимпульсных помех?

Приложения к гл. 3

Приложение 3.1 Реализация стробирующих импульсов в среде Matlab

```
%генерация стробирующих импульсов
T=125*10^(-6); %период 125 мкс, частота 8 кГц
n=100;           %количество дискретных отсчетов на период
ni=n/4;          %количество отсчетов на импульс
N=4;             %число периодов
t=0:T:n:T*N;   %временная шкала в четыре периода
pulse1=t*0; pulse2=t*0;
pulse3=t*0; pulse4=t*0;
phi=[0 n/4 n/2 3*n/4]; %начальное смещение (фаза) в отсчетах
for i=1:1:N
    pulse1((i-1)*n+1+phi(1):(i-1)*n+1+phi(1)+ni)=1;
    pulse2((i-1)*n+1+phi(2):(i-1)*n+1+phi(2)+ni)=1;
```

Окончание прил. 3.1

```
pulse3((i-1)*n+1+phi(3):(i-1)*n+1+phi(3)+ni)=1;
pulse4((i-1)*n+1+phi(4):(i-1)*n+1+phi(4)+ni)=1;
end

subplot(4,1,1); cla;
plot(t,pulse1,'color',[0 0 0]/255);
subplot(4,1,2); cla;
plot(t,pulse2,'color',[0 0 0]/255);
subplot(4,1,3); cla;
plot(t,pulse3,'color',[0 0 0]/255);
subplot(4,1,4); cla;
plot(t,pulse4,'color',[0 0 0]/255);
```

Приложение 3.2 Временное уплотнение в среде Matlab

```
%генерация сигналов
T=1;           %временной отрезок, в котором рассматриваются сигналы, 1 с
f1=10;          %частота сигнала 1, 10 Гц
f2=5;           %частота сигнала 2, 5 Гц
f3=7.5;          %частота сигнала 3, 7.5 Гц
f4=2;           %частота сигнала 4, 2 Гц
A1=1;           %амплитуда сигнала 1
A2=1.2; A3=0.8; A4=0.5; %амплитуда сигналов 3-4
fd_i=8*10^3;    %частота дискретизации, 8 кГц
k=1/fd_i;
t=0:k/100:T;      %временная шкала
signal1=A1*sin(f1*2*pi*t);
signal2=A2*sin(f2*2*pi*t);
signal3=A3*sin(f3*2*pi*t);
signal4=A4*sin(f4*2*pi*t);

figure(1); subplot(2,1,1); cla; hold on;
plot(t, signal1,'color',[0 0 0]/255);
plot(t, signal2,'--','color',[0 0 0]/255);
plot(t, signal3,'color',[155 155 155]/255);
plot(t, signal4,'--','color',[155 155 155]/255);
%временное уплотнение каналов
aim1=signal1.*pulse1;
aim2=signal2.*pulse2;
aim3=signal3.*pulse3;
aim4=signal4.*pulse4;    %АИМ-сигналы 1-4
VRK_signal=aim1+aim2+aim3+aim4; %уплотненный сигнал
subplot(2,1,2);
plot(t, VRK_signal,'color',[0 0 0]/255);
```

Приложение 3.3 Синтез МТС с ЧУ в среде Matlab

```
%генерация сигналов
T=1; %временной отрезок, в котором рассматриваются сигналы, 1 с
f1=280; %частота сигнала 1
f2=320; %частота сигнала 2
f3=300; %частота сигнала
A1=1; %амплитуда сигнала 1
A2=1.2; A3=0.8; %амплитуда сигналов 2-3
fd_i=8*10^5; %частота дискретизации, 8 кГц
k=1/fd_i;
t=0:k:T; %временная шкала
signal1=A1*sin(f1*2*pi*t);
signal2=A2*sin(f2*2*pi*t);
signal3=A3*sin(f3*2*pi*t);
signal4=A4*sin(f4*2*pi*t);

%генерация несущих сигналов
A=1;
fn1=3000;
fn2=6000;
fn3=9000;
sig_n1=A*sin(fn1*2*pi*t);
sig_n2=A*sin(fn2*2*pi*t);
sig_n3=A*sin(fn3*2*pi*t);

%частотное уплотнение с применением АМ
AM1=sig_n1.*signal1;
AM2=sig_n2.*signal2;
AM3=sig_n3.*signal3;
group_sig=AM1+AM2+AM3;

sp=abs(fftshift(fft(group_sig))); %расчет спектра с применением
                                   %преобразования Фурье
scale=linspace(-fd_i/2, fd_i/2, length(sp)); %расчет шкалы частот
figure(3); cla; plot(scale, sp,'color',[0 0 0]/255);
```

4. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КАНАЛОВ СВЯЗИ

4.1 Разновидности помех. Понятие помехоустойчивости

В современном мире важное значение имеет надежность и достоверность передачи информации от объектов в виду их значительной удаленности друг от друга и наличии промышленных помех больших уровней. Каналы связи, по которым передается информация, практически никогда не бывают идеальными. В них могут всегда присутствовать помехи. Отличие лишь в уровне помех и в их спектральном составе. Помехи в каналах связи образуются по различным причинам, но результат воздействия их на передаваемую информацию всегда один – информация искажается.

Помехой называется стороннее возмущение, действующее в системе и препятствующее правильному приему сигналов. Помехи бывают промышленные и атмосферные, закономерные и случайные, внутренние и внешние. Промышленные помехи возникают при работе двигателей станков, лифтов и кранов, сварочных аппаратов, рентгеновских установок. К промышленным относятся так же помехи, создаваемые городским электротранспортом. Атмосферные помехи – молнии, пыльные и снежные бури, северное сияние, иней на антенне и даже солнечное излучение (в УКВ диапазоне).

Если помеха регулярная, то не трудно найти ей противодействие. Например, фон можно устранить компенсацией, помеху от соседней радиостанции – применив соответствующий фильтр.

Если помеха случайная, то бороться с ней сложнее. Случайные помехи подразделяются на аддитивные и мультиплексивные.

Аддитивной называется помеха, которая суммируется с сигналом. Аддитивная помеха существует независимо от сигнала и может наблюдаться как при наличии сигнала, так и при его отсутствии. Действие аддитивной помехи характеризуется величиной

$$U_a(t) = U_c(t) + U_\zeta(t),$$

где U_c и U_ζ – напряжения сигнала и помехи соответственно.

Наиболее универсальная причина аддитивной помехи – флуктуации, т. е. колебания случайных величин около их среднего значения. Примером

флуктуации может быть броуновское движение молекул, дробовый эффект в электронных лампах и др. Флуктуационная помеха принципиально неустранима. Бороться с ней можно, применяя сложные схемы и режимы, но полностью ее устраниить нельзя.

Мультипликативная помеха проявляется только при передаче сигналов, и действие ее заключается в многократном их усилении или ослаблении. Природа мультипликативной помехи состоит в случайном изменении параметров канала связи. Например, суточное и сезонное распространение коротких волн и пр. Действие мультипликативной помехи может характеризоваться величиной

$$U_a(t) = \gamma U_c(t),$$

где γ – некоторый коэффициент, учитывающий изменение параметров связи.

Помехоустойчивостью называется способность системы осуществлять прием информации в условиях наличия помех в линии связи. При анализе информационных систем различают помехоустойчивость системы к ложным срабатываниям от помех в линии связи в тот момент, когда информация не передается (статическая помехоустойчивость) и способность системы выделять полезные сигналы из шумов (динамическая помехоустойчивость). Статическую помехоустойчивость оценивают средним числом ложных сигналов, образуемых из помех за единицу времени, а динамическую – средним числом ложных команд, образуемых из переданных за единицу времени (включая непринятые сигналы).

Количественно помехоустойчивость характеризуют степенью соответствия принятого сообщения переданному. Эту величину называют критерием верности (достоверности) передачи информации. При передаче дискретных сообщений влияние помех проявляется в том, что вместо того или иного передаваемого символа принимается другой. Такое случайное событие называют ошибкой. Простейшим критерием верности при передаче дискретных сообщений является вероятность появления ошибки при передаче одного символа или одного бита информации.

При передаче непрерывных аналоговых сообщений степень соответствия переданного и принятого сигналов характеризует случайная величина отклонения принятого сигнала $y(t)$ от переданного $x(t)$. Мерой откло-

нения обычно служит расстояние ε между $y(t)$ и $x(t)$. Критерием верности в этом случае является вероятность ρ_0 того, что наблюдаемое отклонение будет меньше некоторого заданного ε_0 ,

$$\rho_0 = \rho(\varepsilon < \varepsilon_0).$$

Потенциальной помехоустойчивостью В.А. Котельников называл предельно достижимую помехоустойчивость передачи информации при заданной помехе. Основными задачами теории помехоустойчивости является выбор и обоснование критериев верности для различных условий передачи информации, анализ помехоустойчивости методов и алгоритмов передачи информации, техническая реализация оптимальных методов и алгоритмов передачи информации.

4.2 Методы борьбы с регулярными помехами

Общими методами борьбы с регулярными помехами являются:

1. Увеличение отношения сигнал-помеха (*signal-to-noise ratio*, сокр. *SNR*) состоит в увеличении мощности сигнала. Увеличение мощности сигнала приводит, соответственно, к увеличению мощности источника питания, габариты и вес всей системы.

2. Метод накопления. На передаваемый сигнал в виде прямоугольных импульсов накладывается случайная помеха со средним значением, равным нулю. Если производить прием методом пробы, т. е. брать отсчет принимаемого сигнала в некоторый момент на протяжении действия импульса, то получим

$$y = a + \xi,$$

где ξ – случайная величина, выражающая мгновенное значение помехи в момент отсчета. Отношение сигнал/помеха можно в этом случае выразить как

$$\rho_0 = \frac{a^2}{\bar{\xi}^2},$$

где $\bar{\xi}^2$ – средний квадрат помехи.

Если взять на протяжении действия импульса не один, а несколько отсчетов в разные моменты времени, то получим:

$$\begin{aligned}y_1 &= a + \xi_1; \\y_2 &= a + \xi_2; \\&\dots \\y_n &= a + \xi_n.\end{aligned}$$

Сумма этих отсчетов

$$y = \sum_{k=1}^n y_k = n a + \sum_{k=1}^n \xi_k.$$

Первый член выражает полезный сигнал, второй помеху. Беря средние квадраты обоих членов, составим отношение сигнал/помеха:

$$\rho = \frac{n^2 a^2}{\sum \xi_k^2}.$$

Если случайные величины ξ_k независимы, то имеем

$$\rho = \frac{n^2 a^2}{n \sum \xi_k^2} = n \rho_0,$$

т. е. при n -кратном повторении отсчетов отношение сигнал/помеха возрастает в n раз.

3. Метод фильтрации. Для увеличения отношения сигнал/помеха можно использовать различие в спектрах сигнала и помехи. Если бы спектры сигнала и помехи располагались в неперекрывающихся полосах, то сигнал мог бы быть полностью очищен от помех. Для этого достаточно было бы пропустить смесь сигнала и помехи через полосовой фильтр с соответствующей полосой пропускания. В действительности спектры сигнала и помехи практически всегда перекрываются. И, тем не менее, применение фильтров может значительно увеличить отношение сигнал/помеха.

4.3 Классификация шумов

При вероятностной классификации шумов используются признаки гауссовости и стационарности. Большинство помех представляет собой нестационарные случайные процессы, что затрудняет анализ их воздействия на приемное оборудование. Однако часто при действии помех на коротких, по сравнению с сигналом, временных интервалах нестационарность их проявляется слабо, и тогда говорят о локально-стационарных помехах. Относительно самого рецептора помеха может быть:

- собственной – создаются элементами самой радиоаппаратуры; источники внешних помех лежат вне ее;
- внутрисистемной – помеха формируются источниками, входящими в данную систему связи;
- внешней и межсистемной - помехи создаются источниками, внешними для данной системы.

К числу аддитивных помех естественного происхождения относят космические шумы (обусловлены термоядерными процессами в радиозвездах, движением элементарных частиц в космическом пространстве и проч.), атмосферные помехи (следствие грозовых и электростатических разрядов), шумы теплового излучения Земли, собственные шумы радиоаппаратуры.

Импульсные помехи являются основным видом помех в проводных каналах связи. Они связаны с автоматической коммутацией и перекрестными наводками.

Узкополосные помехи – помехи от соседних радиостанций и различных радиотехнических устройств, а также созданные искусственно прицельные помехи.

По характеру спектра шумы подразделяют на:

- широкополосный шум с непрерывным спектром;
- тональный шум, в спектре которого имеются выраженные тона.

Выраженным тон считается, если одна из полос частот превышает остальные не менее, чем на 10 дБ.

Среди всех источников шума наиболее распространенным на практике и наиболее широко используемым в качестве модели случайного процесса является шум, описываемый нормальным (гауссовским) распределением. Такой шум возникает в результате одновременного воздействия многих независимых случайных источников. Нормальное распределение отражает положения центральной предельной теоремы теории вероятностей, согласно которой случайная величина x , полученная суммированием статистически независимых случайных величин x_1, x_2, \dots, x_n с произвольными плотностями, имеет плотность, приближающуюся к нормальному, если n стремится к бесконечности. Типичным примером шума с нормальной плотностью является тепловой шум, обусловленный броуновским движе-

нием электронов в проводнике. Шум подобного типа принято называть белым шумом. Наибольший интерес при анализе систем представляет аддитивный белый гауссовский шум.

Аналитическое выражение для нормальной плотности, в общем случае, имеет вид

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где μ – среднее значение, σ – среднеквадратичное отклонение величины.

Обычно пользуются табулированной плотностью вероятности нормированной случайной величины $z = (x - \mu)/\sigma$ с нулевым средним и единичным среднеквадратичным отклонением:

$$p(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{z^2}{2}}.$$

Идеальный белый шум, обладая неограниченным однородным спектром, представляет собой последовательность бесконечно коротких импульсов, имеющих случайную высоту и следующих друг за другом через случайные промежутки времени. Для идеального белого шума мощность шума, приходящаяся на конечную полосу частот (рис. 4.1), т.е спектральная плотность, бесконечно мала. Для анализа процессов в реальной области положительных частот используют одностороннюю спектральную плотность N_0 , Вт/Гц. При теоретическом анализе в области положительных и отрицательных частот используют двустороннюю спектральную плотность $N_0/2$, Вт/Гц. Очевидно, что в обоих случаях мощность шума остается одной и той же. Постоянство спектральной плотности идеального белого шума означает, что в бесконечно широкой полосе частот средняя мощность шума бесконечно велика, т.е. такое свойство является не более, чем математической идеализацией. Однако практически полоса пропускания системы всегда ограничена, что автоматически ограничивает и мощность шума в этой полосе. Поэтому значение спектральной плотности за пределами полосы пропускания не влияет на анализируемые параметры сигнала и шума.

В прил. 4.1 приведен код Matlab, позволяющий сгенерировать белый шум с распределением Гаусса.

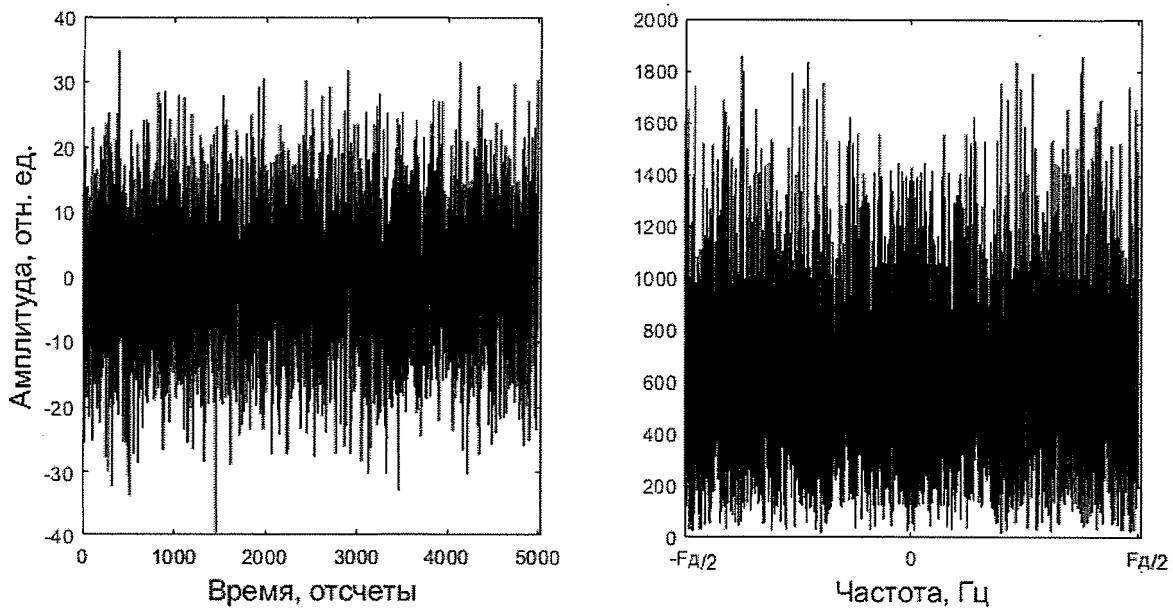


Рис. 4.1. Белый гауссов шум и его спектр

Выполнение данной команды предоставляет пользователю абстрактный белый шум с мощностью 20 ДБВ. Функционал *Matlab* позволяет сгенерировать аддитивный белый гауссов шум (прил. 4.2).

Для построения спектра сигнала (рис. 4.2) вычтем из результата выполнения команды исходный сигнал.

Данный шум получил название Гауссова вследствие распределения амплитуд по нормальному закону – закону Гаусса. Гистограмма сигнала, представленная на рис. 4.3, имеет форму Гауссова колокольчика или нормального распределения. В таком случае говорят, что в линии связи действует аддитивная помеха с плотностью распределения вероятностей, имеющей гауссовский закон распределения. Плотность распределения вероятностей показывает вероятность попадания значений случайной величины в интервал, отнесённой к величине этого интервала. имеет размерность обратную случайной величине. В общем случае, случайной величиной n является напряжение помехи (B), следовательно, размерность плотности распределения вероятности $1/B$.

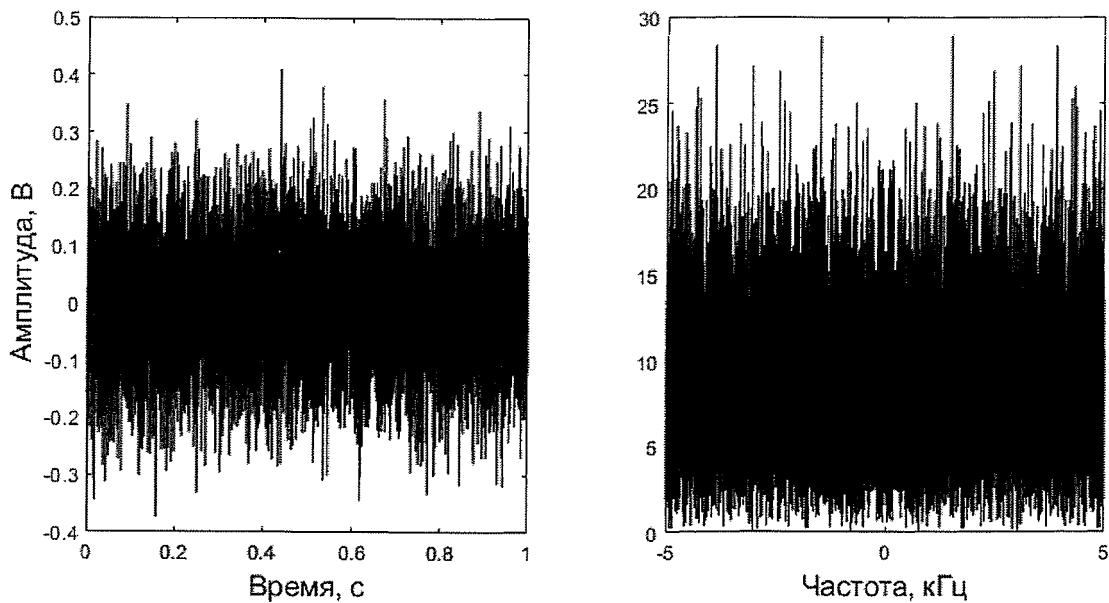


Рис. 4.2. Белый гауссов шум и его спектр

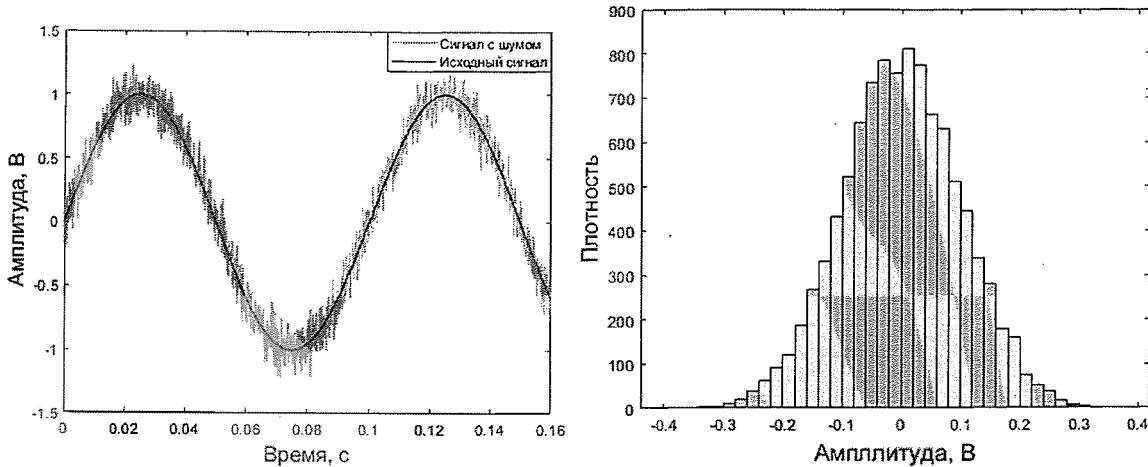


Рис. 4.3. Сигнал с белым гауссовым шумом и гистограмма амплитуд белого шума

Начальные моменты случайной величины определяются как

$$m_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} xp_{\Pi}(x)dx,$$

$$m_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p_{\Pi}(x)dx,$$

$$m_4 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^4 p_{\Pi}(x)dx.$$

Коэффициент эксцесса показывает степень «островершинности» распределения и может служить мерой отличия ПРВ от гауссовского зако-

на, для которого коэффициент эксцесса равен нулю. Данный коэффициент определяется по формуле

$$k = \frac{m_4}{\sigma_{\Pi}^4} - 3.$$

Для нормального закона распределения коэффициент эксцесса равен 3, в отечественной литературе принято отнимать целое число три и сравнивать коэффициент с нулем. В среде Matlab просчитать данный коэффициент можно с помощью команды *kurtosis*, для промоделированного в прил. 4.2 случая, его значение составляет 3,0316.

Для сигнала с белым шумом (прил. 4.2) коэффициент эксцесса составляет 1,55, гистограмма распределения амплитуд приведена на рис.4.4.

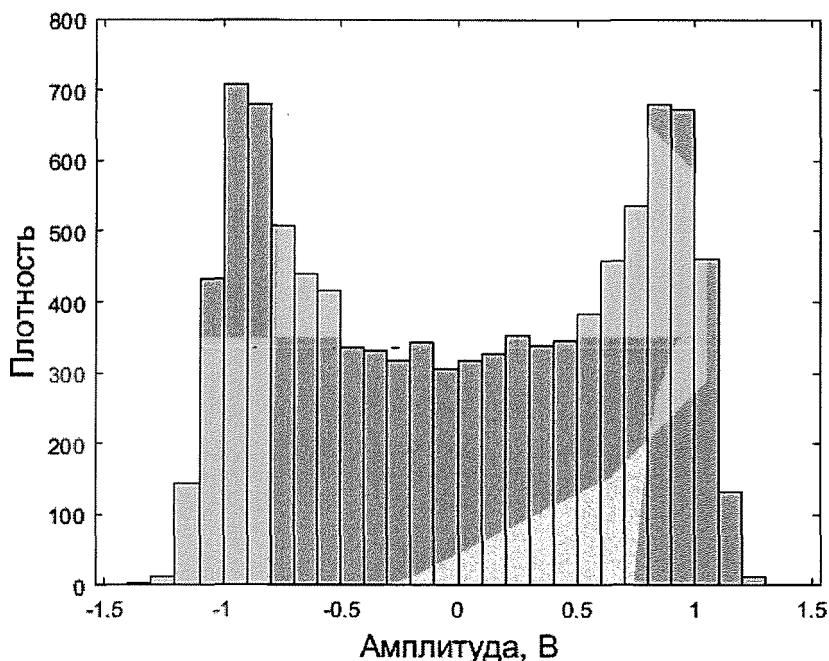


Рис. 4.4. Распределение амплитуд периодического сигнала с белым шумом, SNR=20 дБ

Следует указать, что в природе и технике белый шум в классическом понимании (то есть белый шум, имеющий одинаковую спектральную мощность на всех частотах) не встречается. Обычно под категорией «белый шум» попадают любые шумы, спектральная плотность которых одинакова (или слабо отличается) в рассматриваемом диапазоне частот.

Также следует обозначить, что некоторыми студентами ошибочно полагается, что гауссов шум эквивалентен белому шуму. Следует различать, что причисление шума к гауссову подразумевает распределение зна-

чений сигнала в виде нормального (гауссов колокольчик), а к белому – равномерное распределение спектральной плотности. Белый шум может иметь любое распределение – Гаусса, Пуассона, Коши и др.

Помимо белого шума, распространено понятие «цветной шум». Этот термин был введен для удобства описания шумовых сигналов с различными статическими свойствами. Различают следующие виды цветного шума:

1. Розовый шум – спектральная плотность которого обратно пропорциональна частоте. То есть график спектральной плотности равномерно убывает в логарифмической шкале частот (рис. 4.5).
2. Красный (коричневый) шум – спектральная плотность которого пропорциональна квадрату частоты. Это означает, что на низких частотах шум имеет больше энергии, чем на высоких.
3. Фиолетовый шум – шум, спектр которого зеркально-противоположен спектру красного шума.
4. Синий шум – спектральная плотность которого увеличивается с ростом частоты.
5. Серый шум – его спектр получается, если сложить спектры красного и фиолетового шумов. В спектре серого шума виден большой «провал» на средних частотах, однако человеческий слух субъективно воспринимает серый шум как равномерный по спектральной плотности (без преобладания каких-либо частот).

Также различают оранжевый, зеленый, черный шум.

Самый простой и понятный способ реализации любого цветного шума – это фильтрация сгенерированного белого шума фильтром с желаемой АЧХ. Также можно воспользоваться функцией генерации цветного шума по заданным характеристикам (прил. 4.3).

4.4 Разновидности моделей каналов

Сигнал на пути распространения от источника к приемнику может встречать преграды. При этом сигнал может быть поглощен ими либо отражен. Отраженный сигнал достигнет приемника, однако произойдет это с опозданием. С другой стороны, остальная энергия сигнала может достичь приемника без переотражения за более короткое время или пройти боль-

шее число отражений, что в свою очередь приведет к еще большим задержкам.

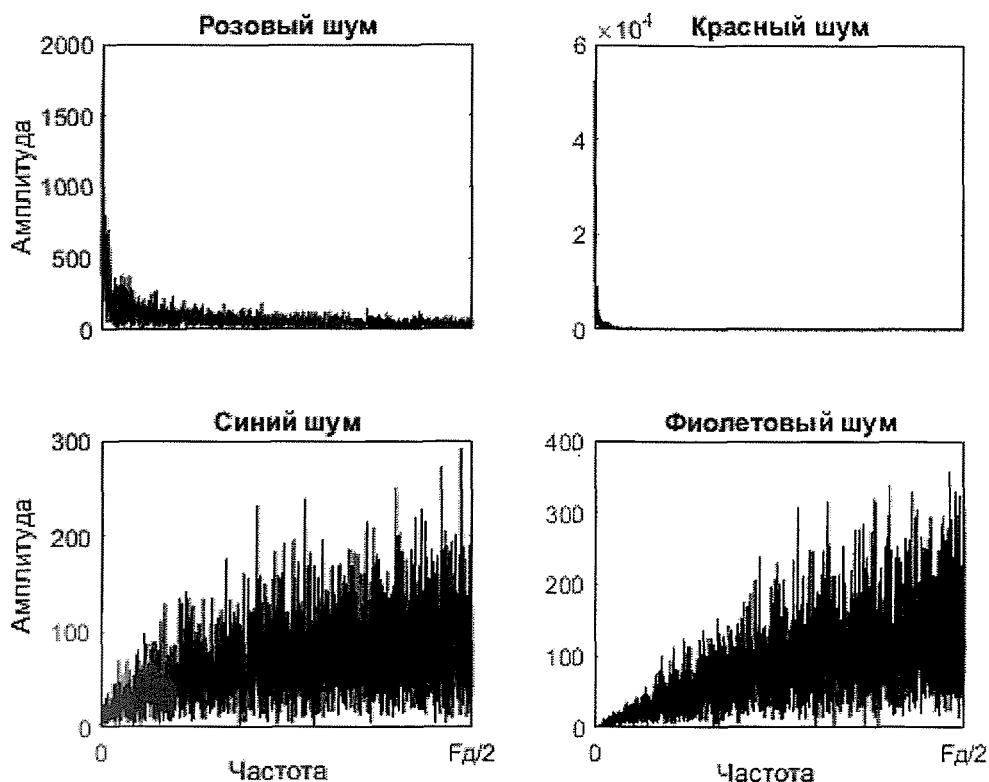


Рис. 4.5. Спектр цветного шума

Данный эффект возникает, когда между источником и приемником возникают несколько путей доставки сигнала. При этом энергия сигнала будет распределена между копиями сигнала неравномерно. Такое распространение сигнала называется многолучевым.

Многолучевое распространения присутствует в любой среде передачи. В некоторых средах оно имеет значительное влияние на качество детектирования сигнала (гидролокация, радиоволны), в некоторых проводных линиях связи – меньше (оптоволокно).

Рассмотрим основные модели, используемые при моделировании многолучевого канала:

1. Канал Райса – канал, при распространении в котором сигнал испытывает воздействие большого числа отраженных сигналов с изменяющимся уровнем и фазой, помимо аддитивной составляющей шума. Такой канал может присутствовать, например, при распространении сигналов в радио-

релейной связи (рис. 4.6) когда в качестве отражающими поверхностями могут быть земная поверхность, нижние слои атмосферы и даже частицы жидкости в атмосфере (например, при повышенной туманности).

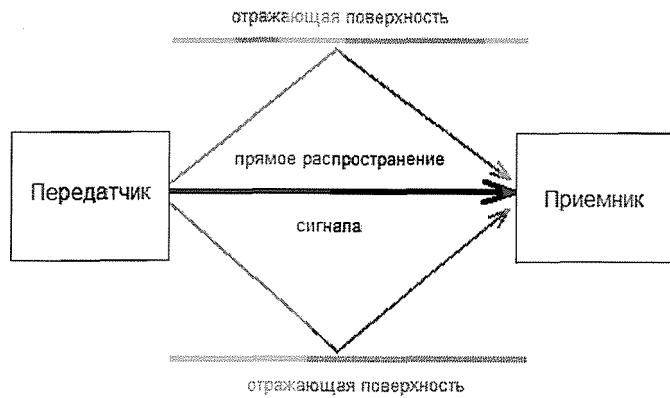


Рис. 4.6. Канал Райса

Рассмотрим возможности моделирования канала Райса в среде Simulink. Для этого с моделируем модель передачи, состоящую из приемника и передатчика, закрепленных на высоте 20 метров от земли. Приемник и передатчик разнесены в на расстоянии 40 метров. В прил. 4.4 приведен листинг кода, позволяющий с моделировать координаты X и Z этих устройств. Для простоты моделирования, предположим, что ось Y проходит через приемник и передатчик, поэтому в моделировании ей можно пренебречь.

В моделируемом канале добавим две отражающие поверхности (прил. 4.5). Предположим, что в отражающие поверхности расположены вверху и внизу, по аналогии с рис. 4.6. Нижняя отражающая поверхность (*bottom*) ограничена земной поверхностью и ее координата по оси Z равна нулю. Верхняя отражающая поверхность расположена на высоте 40 метров. Обе поверхности параллельны. Для моделирования отражения, необходимо выделить несколько точек с конкретными координатами. Для упрощения модели, возьмем пять равноудаленных точек на каждой из отражающих поверхностей.

Далее, сгенерируем сигнал-сообщение. В прил. 4.6 приведен уже известный нам код синтеза гармонического сигнала.

Для определения времени фиксирования отраженных сигналов в канале, необходимо определить время на распространения сигнала. Так как все отраженные составляющие распространяются по различным траекториям, необходимо вычислить длину пройденного пути каждого луча. Для этого можно воспользоваться формулой длины вектора, разложив каждую траекторию на две: от передатчика до точки отражения и от точки отражения до приемника (прил. 4.7).

Далее вычислим время прохождения каждого сигнала до приемника, а также время прохождения сигнала, который распространяется прямолинейно (прил. 4.8). Следует уточнить, скорость распространения взята произвольно. Для моделирования реальных беспроводных, сотовых, релейных, спутниковых сетей необходимо пользоваться справочными значениями частоты сигнала и скорости распространения в среде.

Теперь, зная время распространения сигнала (а значит, и время фиксирования отраженной составляющей на приеме), можно рассчитать сигнал на приемнике. Для этого выполним перевод времени в периоды дискретизации (прил. 4.9) и разместим все отраженные сигналы на временной шкале.

В данной модели не учитывается затухание сигнала и потери на распространение и смещение начальной фазы сигнала на приеме. Полученный в результате моделирования сигнал имеет вид, представленный на рис. 4.7.

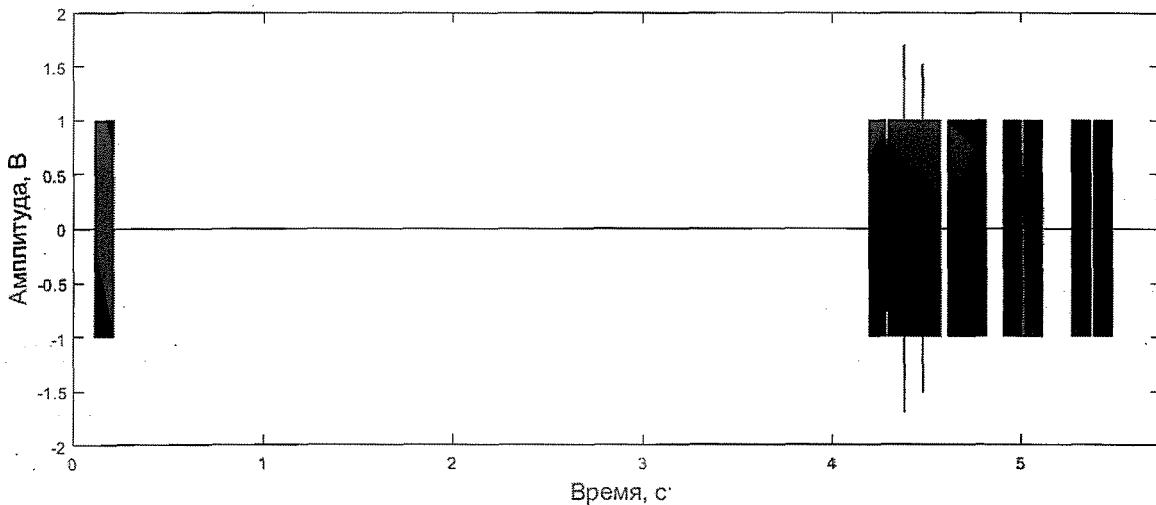


Рис. 4.7. Модель сигнала, сформированного при многолучевом распространении при отсутствии затухания и помех

2. Канал Релея – канал, где есть только отраженные сигналы, как и в канале Райса, но отличием является отсутствие прямого луча от передатчика к приемнику. Канал Релея соответствует случаю, когда нет прямой видимости (рис. 4.8).

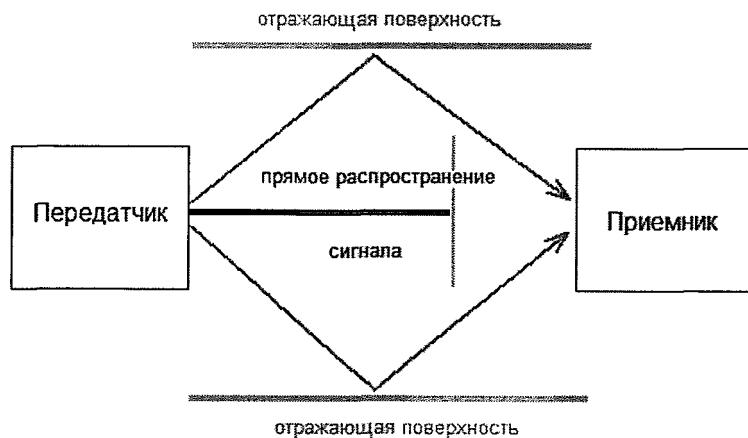


Рис. 4.8. Канал Релея

3. Канал Гаусса – распространение сигнала в отсутствии других сигналов. Данный канал является идеальным без замираний и многолучевого распространения. В модель канала Гаусса вводится аддитивный белый гауссовский шум, и считается, что это единственная помеха, воздействующая на сигнал в данном канале. Такой канал характеризует идеальный случай приема и будет использован в рамках данного пособия для моделирования и оценки помехоустойчивости систем.

4.5 Практические задания

4.5.1 Оценка помехоустойчивости системы с временным уплотнением при передаче АИМ и ИКМ-сигналов

Цель работы: проведение оценки системы с ВУ путем моделирования передачи АИМ- и ИКМ- сигналов с присутствием в линии передачи шума.

Задачи:

1. Проектирование модели устройства, реализующего импульсно-кодовую модуляцию

2. Создание системы с временным разделением каналов для передачи ИКМ сигналов

3. Оценка помехоустойчивости системы, спроектированной при наличии в канале шума.

Порядок выполнения работы

К выполнению данной лабораторной работы допускаются студенты, выполнившие лабораторные работы «Изучение принципов построения сетей с временным разделением каналов в среде *Matlab Simulink*» и «Изучение принципов генерации ИКМ-сигналов».

Генерация белого гауссовского шума. Для простоты выполнения работы предлагается использование блока *AWGN Channel* библиотеки *Communication Toolbox*. Окно параметров и результат прохождения простого периодического сигнала через *AWGN Channel* представлены на рис. 4.9.

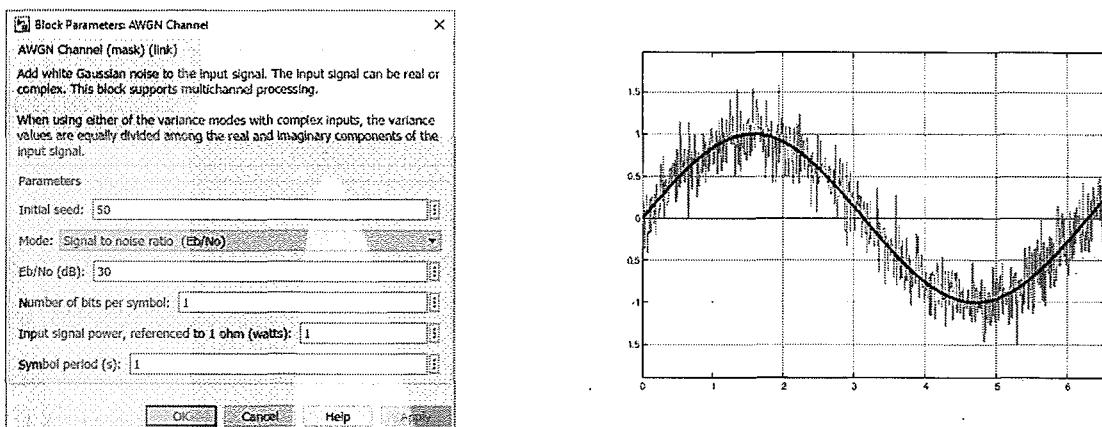


Рис. 4.9. Передача простого синусоидального сигнала через канал с белым аддитивным гауссовским шумом

Проведение серии вычислительных экспериментов для многоканальной системы с ВРК для передачи АИМ-сигналов, спроектированной в работе «Изучение принципов построения сетей с временным разделением каналов в среде *Matlab Simulink*». Для оценки помехоустойчивости системы предлагается заменить линию передачи группового сигнала на *AWGN Channel* так, как показано на рис. 4.10.

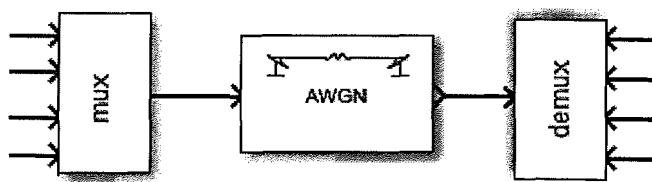


Рис. 4.10. Проектирование многоканальной системы с ВРК с гауссовским шумом

Оценку помехоустойчивости системы необходимо провести при диапазоне шума в канале от 100 до -20 дБ, в отчете представить график зависимости ошибки определения символов информационных последовательностей четырех сигналов при демодуляции от отношения SNR.

Проведение серии вычислительных экспериментов для многоканальной системы с ВРК для передачи ИКМ-сигналов, спроектированной с использованием ИКМ-модулятора из лабораторной работы «Изучение принципов генерации ИКМ-сигналов». Оценку помехоустойчивости системы необходимо провести при диапазоне шума в канале от 100 до -20 дБ, в отчете представить график зависимости ошибки определения символов информационных последовательностей четырех сигналов при демодуляции от отношения SNR.

4.5.2 Оценка помехоустойчивости системы с частотным уплотнением при передаче частотно-модулированных сигналов

Цель работы: проведение оценки системы с ЧУ путем моделирования передачи ЧМ-сигналов с присутствием в линии передаче шума.

Задачи:

1. Оценка помехоустойчивости системы МТС с ЧУ (гл. 3.3.2 «Моделирование сетей с частотным разделением каналов в среде *Matlab Simulink*»).

2. Приобретение навыков моделирования шума в канале передачи.

Порядок выполнения работы

К выполнению данной лабораторной работы допускаются студенты, выполнившие лабораторные работы «Моделирование сетей с частотным разделением каналов в среде *Matlab Simulink*».

Для оценки помехоустойчивости системы предлагается заменить линию передачи группового сигнала на *AWGN Channel* так, как показано на рис. 4.10.

Оценку помехоустойчивости системы необходимо провести при диапазоне шума в канале от 100 до -20 дБ, в отчете представить график зависимости ошибки определения символов информационных последовательностей четырех сигналов при демодуляции от отношения SNR.

В отчете привести результирующий график с анализом помехоустойчивости систем с ВУ и ЧУ, сделать вывод о приоритете использования одного из видов уплотнения каналов связи.

4.5.3 Моделирование канала Райса и Релея в среде Matlab

Цель работы: приобретение навыков моделирования систем передачи с многолучевым распространением в среде *Matlab*

Задачи:

1. Изучение принципов распространения сигналов в каналах Райса и Релея.

2. Приобретение навыков моделирования реальных условий при распространении сигналов в воздушном пространстве

Порядок выполнения работы

Данная работа является заключительной в курсе изучения вопросов моделирования систем передачи информации в среде *Matlab Simulink*. Задание зачастую требует творческого подхода к решению. Варианты выдаются по усмотрению преподавателя. Варианты заданий приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Варианты заданий

Номер варианта	Задание по варианту
1	Смоделировать канал Райса для распространения сложного сигнала, состоящего из трех гармонических составляющих с различными начальными фазами, но одинаковой амплитуды и частоты. При расчете характеристик каждой отраженной составляющей также произвести расчет начальной фазы, с которой начнется фиксирование этой составляющей на приеме. Оценить амплитудный и фазовый спектр исходного сигнала и сигнала на приеме, в отчете привести результаты анализа спектра и вывод по работе.
2	Провести моделирование канала Релея при распространении спутникового сигнала. В модели учитывать только передачу сигнала с ретранслятора на земную станцию. Значения скорости распространения и затухания взять из справочника. В качестве распространяемого сигнала принять сигнал с линейно-частотной модуляцией, длительности импульса выбрать произвольно.
3	Провести моделирование канала Райса, в модели учитывать затухание сигнала. Зависимость затухания от частоты и пройденного пути взять из справочника. Мощность излучения на передаче принять равным 1. Провести корреляционный анализ принятого сигнала, сделать вывод о возможности/невозможности определения времени фиксирования прямолинейной составляющей в принятом сигнале
4	Произвести моделирование радиорелейной линии связи. Расположение двух соседних станций, частоту распространения сигнала взять справочную. Сравнить сигналы на приеме при распространении сигнала в канале Райса и Релея.
5	Провести моделирование канала Релея, в модели учитывать затухание сигнала. Зависимость затухания от частоты и пройденного пути взять из справочника. Количество точек отражения взять порядка 1000, для упрощения модели пренебречь нижней поверхностью отражения. Провести корреляционный анализ принятого сигнала, сделать вывод о возможности/невозможности определения времени фиксирования прямолинейной составляющей в принятом сигнале
6	Провести моделирование канала Релея, в модели учитывать отражение сигнала с прямолинейным движением в верхнюю и нижнюю поверхность отражения с дальнейшим переотражением на приемник. Оценить сигнал на приемнике.

Номер варианта	Задание по варианту
7	Провести моделирование канала Релея с учетом затухания сигнала и потерями на отражение. Потери поглощения зоной верхней и нижней зоной отражения взять из справочника.

Контрольные вопросы

1. *Описание канала Райса и канала Релея.*
2. *Особенности белого шума.*
3. *Виды помехи (аддитивная, мультипликативная и другие классификации).*
4. *Разновидности цветного шума, их различия.*
5. *Белый гауссов шум – особенности генерации в среде Simulink и Matlab.*

Приложения к гл. 4

Приложение 4.1 Генерация белого гауссова шума в среде Matlab

```
N=5000; %размерность массива с шумом
%Генерация белого шума с распределением Гаусса
noise=wgn(N,1, 20); %массив с шумом мощностью 20 дБВ
sp=abs(fftshift(fft(noise))); %амплитудный спектр
figure; cla; %отображение графиков
subplot(1,2,1); cla; plot(sp,'color',[0 0 0]/255);
subplot(1,2,2); cla; plot(noise,'color',[0 0 0]/255);
```

Приложение 4.2 Генерация аддитивного белого гауссова шума в среде Matlab

```
%генерация сигнала
T=1; %временной отрезок, в котором рассматривается сигнал, 1 с
f=10; %частота сигнала
A=1; %амплитуда сигнала
fd_i=f*1000; %частота дискретизации
k=1/fd_i;
t=0:k:T; %временная шкала
w=2*pi*f; %аргумент
```

Окончание прил. 4.1

```
signal=A*sin(w*t)

noise_signal=awgn(signal, 20);
only_n=noise_signal-signal;
sp=abs(fftshift(fft(only_n)));
scale=linspace(-fd_i/2, fd_i/2, length(sp)); %расчет шкалы частот
figure(1); cla;
subplot(1,2,2); cla; plot(scale, sp,'color',[0 0 0]/255);
subplot(1,2,1); cla; plot(t,only_n,'color',[0 0 0]/255);
```

Приложение 4.3. Генерация цветного шума в среде Matlab

```
%розовый
pink = dsp.ColoredNoise('pink', 'SamplesPerFrame', 5000);
pink_n=pink();
sp_pink=abs(fftshift(fft(pink_n)));

%красный (коричневый)
brown = dsp.ColoredNoise('brown', 'SamplesPerFrame', 5000);
brown_n=brown();
sp_brown=abs(fftshift(fft(brown_n)));

%синий
blue = dsp.ColoredNoise('blue', 'SamplesPerFrame', 5000);
blue_n=blue();
sp_blue=abs(fftshift(fft(blue_n)));

%фиолетовый
purple = dsp.ColoredNoise('purple', 'SamplesPerFrame', 5000);
purple_n=purple();
sp_purple=abs(fftshift(fft(purple_n)));

subplot(2,2,1); plot(sp_pink,'color',[0 0 0]/255); xlim([2500 5000]); title ("Розовый шум");
subplot(2,2,2); plot(sp_brown,'color',[0 0 0]/255); xlim([2500 5000]); title ("Красный шум");
subplot(2,2,3); plot(sp_blue,'color',[0 0 0]/255); xlim([2500 5000]); title ("Синий шум");
subplot(2,2,4); plot(sp_purple,'color',[0 0 0]/255); xlim([2500 5000]); title ("Фиолетовый шум");
```

Приложение 4.4 Моделирование канала Райса в среде *Matlab*. Координаты приемника и передатчика

```
%Моделирование канала Райса
%Расположение приемника и передатчика
transmitter_K=[0 20]; %координаты передатчика, смещение по X=0
                       %смещение по высоте, Z=20;
receiver_K=[40 20];   %координаты приемника, смещение по X=40
                       %высота совпадает с передатчиком. Все в метрах
```

Приложение 4.5 Моделирование канала Райса в среде *Matlab*. Координаты точек отражения

```
%отражающие поверхности
N=5;                  %количество точек отражения
surface_bottom(1,:)=(1:N).*(receiver_K(1)/(N+1)); %координата X нижней поверхности
surface_bottom(2,1:N)=0;                      %на нулевом смещении от поверхности Земли
surface_top(1,:)=(1:N).*(receiver_K(1)/(N+1)); %координата X нижней поверхности
surface_top(2,1:N)=40;                        %на высоте 40 м
```

Приложение 4.6 Моделирование канала Райса в среде *Matlab*. Синтез сигнала

```
%сигнал-сообщение
T=0.1;                %длительность сигнала
f=2000;               %частота сигнала, 2 МГц
A=1;                  %амплитуда сигнала
W=1;                  %мощность излучателя
fd_i=f*40;             %частота дискретизации
k=1/fd_i;
t=0:k:T;              %временная шкала
w=2*pi*f;             %аргумент
signal=A*sin(w*t);
```

Приложение 4.7 Моделирование канала Райса в среде *Matlab*. Расчет длины пройденного пути каждого отраженного сигнала

```
%расчет путей многолучевого распространения
for i=1:N
    %от передатчика до точки отражения верхней поверхности
```

Окончание прил. 4.7

```
S1=sqrt((surface_top(1,i)-transmitter_K(1))^2+(surface_top(2,i)-
transmitter_K(2))^2);
%от верхней точки до приемника
S2=sqrt((receiver_K(1)-surface_top(1,i))^2+(receiver_K(1)-
surface_top(2,i))^2);
S_t(i)=S1+S2;
%от передатчика до точки отражения нижней поверхности
S1=sqrt((surface_bottom(1,i)-transmitter_K(1))^2+(surface_bottom(2,i)-
transmitter_K(2))^2);
%от нижней точки до приемника
S2=sqrt((receiver_K(1)-surface_bottom(1,i))^2+(receiver_K(1)-
surface_bottom(2,i))^2);
S_b(i)=S1+S2;
end
```

Приложение 4.8 Моделирование канала Райса в среде Matlab. Расчет длины пройденного пути каждого отраженного сигнала

```
%расчет времени многолучевого распространения
V=343.1; %для звука, м/с
T_t=S_t./V;
T_b=S_b./V;
%прямолинейное распространение
S=40;
T_out=S/V;
```

Приложение 4.9 Моделирование канала Райса в среде Matlab. Формирование сигнала на приемнике

```
sig_out=[]; %сигнал на приеме
max_t=max(T_t);
scale=0:k:(max_t+T);
sig_out(1:length(scale)*2)=0; %прямолинейное
sig_out(fix(T_out/k):1:fix(T_out/k)+length(t)-
1)=sig_out(fix(T_out/k):1:fix(T_out/k)+length(t)-1)+signal;
figure; hold on; plot(sig_out);
for i=1:N %многолучевые компоненты
    num=fix(T_b(i)/k):1:fix(T_b(i)/k)+length(t)-1;
    sig_out(num)=sig_out(num)+signal;
    num=fix(T_t(i)/k):1:fix(T_t(i)/k)+length(t)-1;
    sig_out(num)=sig_out(num)+signal; plot(sig_out);
end
...
```

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии изложены основы моделирования и его применения при описании сигналов и помех в телекоммуникационных системах. Наибольшее внимание уделено моделям процессов, которые представлены в фундаментальных трудах по теории связи и работа с которыми найдет продолжение при изучении дисциплин цифровой обработки сигналов и систем обработки сигналов и сообщений.

Моделирование – сложнейший многоэтапный процесс исследования систем, направленный на выявление свойств и закономерностей, присущих исследуемым системам, с целью их создания или модернизации. В процессе моделирования решается множество взаимосвязанных задач, основными среди которых являются разработка модели, анализ свойств и выработка рекомендаций по модернизации существующей или проектированию новой системы.

В данном пособии в процессе моделирования представлены характеристики сигналов и систем, обобщенные модели дискретных и непрерывных каналов связи. Приведены методы построения моделей на основе экспериментальных данных и соответствующие методы проверки их адекватности. Кратко описана программная среда *Matlab* и пакет визуального моделирования *Simulink*.

Математическое моделирование является мощным и эффективным инструментом исследования разнообразных объектов, систем и процессов в различных областях человеческой деятельности. Как сложный технический процесс не может быть запущен без этапа моделирования, так и обучение должно включать в себя этот важный этап.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература

1. Канаков, В. А. Приемно-передающие устройства в системах телекоммуникаций : Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы к проблемам генерации, обработки, передачи, хранения, защиты информации и их применение» / В. А. Канаков, В. Ф. Клюев, И. Я. Орлов. – Нижний Новгород, 2007. – 95 с.
2. Смирнов, С. А. Преобразования оптических сигналов : учебное пособие. – СПб. СПбГУ ИТМО, 2008. – 113 с.
3. Белоус, И. А. Теория сигналов : учебное пособие / И. А. Белоус, Ю. А. Левашов. – Владивосток : Изд-во ВГУЭС, 2017. – 100 с.
4. Горюнов, А. Г. Телеконтроль и телеуправление : курс лекций по специальности 140306 «Электроника и автоматика физических установок» направления 140300 «Ядерная физика и технологии» / А. Г. Горюнов, С. Н. Ливенцов, Ю. А. Чурсин. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 161 с.
5. Пономарев, Д. Ю. Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей : учеб. пособие / Д. Ю. Пономарев. – Красноярск, 2014. – 176 с.
6. Дадаян, Ю. А. Помехоустойчивое кодирование : учебное пособие для студентов специальности «Информационно-измерительная техника и технологии» / Ю. А. Дадаян. – Москва, 2009. – 79 с.

Дополнительная литература

1. Борисов, Ю.П. Основы многоканальной передачи информации : учебное пособие для вузов / Ю.П. Борисов, П.И. Пенин. – М. : Связь, 1967. – 435 с.
2. Склар, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание : пер. с англ / Б. Склар. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
3. Борисов, В.А. Принципы построения и помехоустойчивость систем передачи непрерывных и дискретных сообщений : учебное пособие по курсу «Системы передачи информации» / Л.В. Когновицкий, Е.Е. Лазарева, П.И. Пенин ; под ред. П.И. Пенина. – М. : Типография МЭИ, 1982. – 84 с.
4. Мамчев, Г. В. Основы радиосвязи и телевидения : учебное пособие для ВУЗов / Г. В. Мамчев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 416 с.
5. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб : Питер, 2003. – 604 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. МОДУЛЯЦИЯ СИГНАЛОВ	4
1.1 Введение в спектральный анализ. Представление сигналов в частотной об- ласти	4
1.2 Методы аналоговой модуляции.....	9
1.3 Амплитудная модуляция	10
1.4 Частотная модуляция.....	14
1.5 Фазовая модуляция	17
1.6 Практические задания	21
Контрольные вопросы	24
Приложения к гл. 1.....	25
2. ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ.....	30
2.1 Амплитудно-импульсная модуляция	30
2.2 Импульсно-кодовая модуляция	33
2.3 Широтная импульсная модуляция	40
2.4 Фазовая импульсная модуляция	43
2.5 Практические задания	46
2.5.1 Изучение принципов генерации ИКМ-сигналов	46
2.5.2 Синтез ФИМ- и ШИМ-сигналов	49
Контрольные вопросы	52
Приложения к гл. 2.....	52
3. СИСТЕМЫ СВЯЗИ С УПЛОТНЕНИЕМ КАНАЛОВ.....	58
3.1 Временное уплотнение каналов.....	58
3.2 Частотное уплотнение каналов.....	65
3.3 Практические задания	71
3.3.1 Изучение принципов построения сетей с временным разделением ка- налов в среде Matlab Simulink.....	71
3.3.2 Моделирование сетей с частотным разделением каналов в среде Matlab Simulink.....	73
Контрольные вопросы	75
Приложения к гл. 3.....	75

4. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КАНАЛОВ СВЯЗИ.....	78
4.1 Разновидности помех. Понятие помехоустойчивости	78
4.2 Методы борьбы с регулярными помехами	80
4.3 Классификация шумов	81
4.4 Разновидности моделей каналов	87
4.5 Практические задания	91
4.5.1 Оценка помехоустойчивости системы с временным уплотнением при передаче АИМ- и ИКМ-сигналов.....	91
4.5.2 Оценка помехоустойчивости системы с частотным уплотнением при передаче частотно-модулированных сигналов	93
4.5.3 Моделирование канала Райса и Релея в среде Matlab	94
Контрольные вопросы	96
Приложения к гл. 4.....	96
Заключение	100
Библиографический список.....	101