

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Шаяхметов О.Х.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине
«Системы подвижной радиосвязи»
для студентов направления подготовки
11.03.02 «Инфокоммуникационные
технологии и системы связи»

Ставрополь 2026

Оглавление

Введение.....	5
8. Лабораторный практикум.....	75
8.1. Лабораторная работа № 8.1 «Создание моделей в среде MATLAB/Simulink».....	75
8.2. Лабораторная работа № 8.2 «Изучение принципов построения цифровых систем радиосвязи».....	98
8.3. Лабораторная работа № 8.3 «Скремблирование цифровых поток».....	131
8.4. Лабораторная работа № 8.4 «Исследование методов модуляции в системах сотовой связи стандарта GSM».....	138
8.5. Лабораторная работа № 8.5 «Исследование усовершенствованных методов QPSK».....	149
8.6. Лабораторная работа № 8.6 « Исследование помехоустойчивости ЦСПС в канале с замираниями Райса»..	177
8.7. Лабораторная работа № 8.7 « Исследование помехоустойчивости ЦСПС в канале с замираниями Рэлея»...	198
8.8. Лабораторная работа № 8.8 «Исследование помехоустойчиво- сти системы связи с BFSK в канале с замираниями Рэлея»...	224
8.9. Лабораторная работа № 8.9 «Исследование влияния параметров канала на ЦСПС»	249
8.10. Лабораторная работа № 8.10 «Изучение принципов формирования спектра модулированного сигнала».....	259

Введение

Движущей силой экономики современного постиндустриального общества являются научные разработки, создаваемые в первую очередь на основе таких производственных ресурсов, как информация и знания. Процессы интеграции компьютерных, информационных и коммуникационных технологий в единую систему дают возможность открывать новые общесистемные свойства, позволяя создавать все более продуктивные методы организации жизни, как отдельного человека, так и всего мирового сообщества. Ключевую роль в организации этих процессов занимают современные способы передачи информации.

Концепция развития средств связи в XXI веке предполагает создание всемирной информационной инфраструктуры, объединяющей региональные и национальные сети связи в единую сеть. При этом связь должна быть не только глобальной, но и персональной, и, следовательно, доступной любому потребителю.

В решении этой задачи, наряду с проводными системами, немаловажная роль принадлежит цифровым системам радиосвязи.

Учебное пособие состоит из двух частей. В первой части рассмотрены принципы построения цифровых систем радиосвязи, особенности передачи данных по радиоканалам, вероятностные модели многолучевых каналов, модели распространения радиоволн.

Вторая часть учебного пособия включает лабораторный практикум по исследованию цифровых систем радиосвязи с применением системы компьютерного моделирования (СКМ) MATLAB/Simulink.

8. Лабораторный практикум

Лабораторная работа № 8.1

«Создание модели в среде MATLAB/Simulink»

Цель работы: получить первоначальные навыки работы с Simulink, знакомство с менеджером библиотек (**Simulink Library Browser**) и редактором блок-схем.

Подготовка к работе

По указанной литературе изучить:

- 1) основы Simulink;
- 2) правила создания моделей в Simulink;
- 3) правила моделирования в Simulink;
- 4) иерархическую библиотеку Simulink.

Рекомендуемая литература

1. Дьяконов В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 976 с.
2. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. – М.: Техносфера, 2007. – 488 с.
3. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем : Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.

1. Введение в Simulink

MATLAB (*Matrix Laboratory*) – это пакет прикладных программ, предназначенный для решения задач технических вычислений.

При запуске MATLAB появляется логотип MATLAB (рис. 1.1).

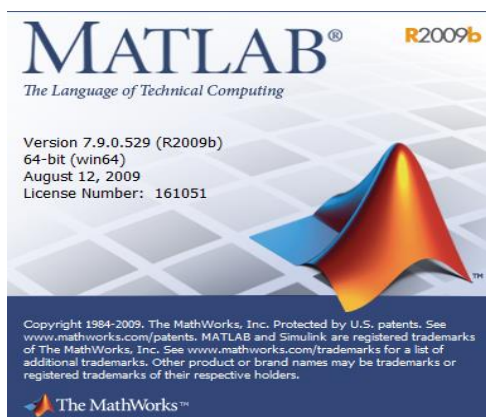


Рис. 1.1. Логотип MATLAB

Как язык программирования MATLAB был разработан в конце 1970-х годов Кливом Моулером в университете Нью-Мексико. MATLAB – это высокоуровневый интерпретируемый язык программирования, отличительной особенностью которого является оперирование с векторами и матрицами. На сегодняшний день насчитывается более одного миллиона пользователей MATLAB.

Simulink – это система имитационного блочного моделирования динамических систем, являющаяся подсистемой MATLAB. Средства моделирования Simulink основываются на программных средствах MATLAB, но позволяют обойтись без использования в явном виде языка MATLAB и создавать модели из стандартных блоков в графическом виде. При необходимости дополнительные блоки могут быть написаны пользователем как на языке MATLAB, так и на других языках (C, VHDL и др.). Визуальное представление дает возможность значительно упростить процесс создания модели, поиска ошибок, модификации модели другими пользователями, что в целом позволяет добиваться результатов гораздо быстрее, чем при использовании языка MATLAB в чистом виде.

Стартовое диалоговое окно MATLAB приведено на рисунке 1.2.

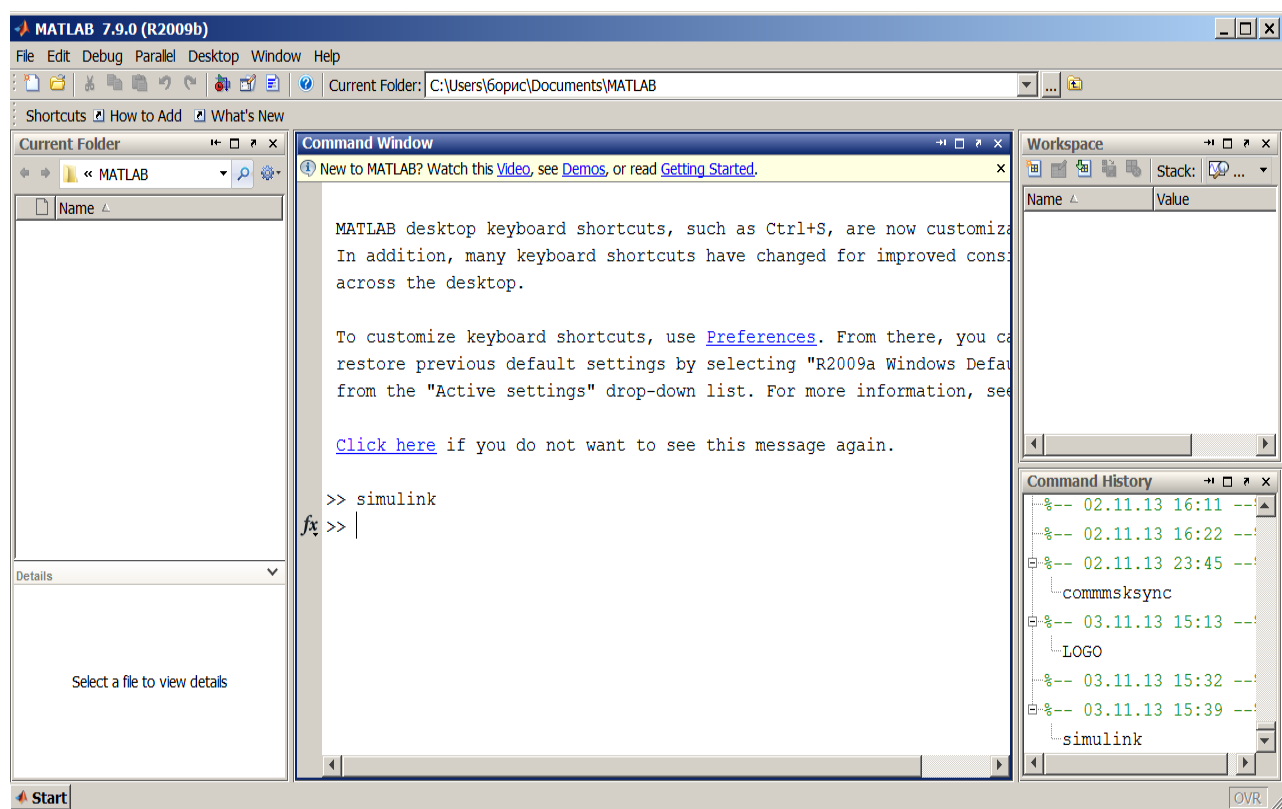


Рис. 1.2. Стартовое диалоговое окно MATLAB

1.1. Запуск Simulink

Запуск Simulink осуществляется при загруженной системе MATLAB. *Без MATLAB Simulink не работает.* Существует несколько способов запуска (рис. 1.2):

- 1-й способ: нажатие кнопки  на панели командного окна MATLAB;
- 2-й способ: ввод команды **simulink** в командном окне MATLAB.

1.2. Менеджер библиотек Simulink Library Browser

После запуска Simulink появляется менеджер библиотек (рис. 1.3), который состоит из дерева библиотек блочных компонентов, окна, отображающего состав текущей (выделенной) библиотеки, поля с кратким описанием выделенного блока и поля ввода ключевого слова для поиска интересующего блока.

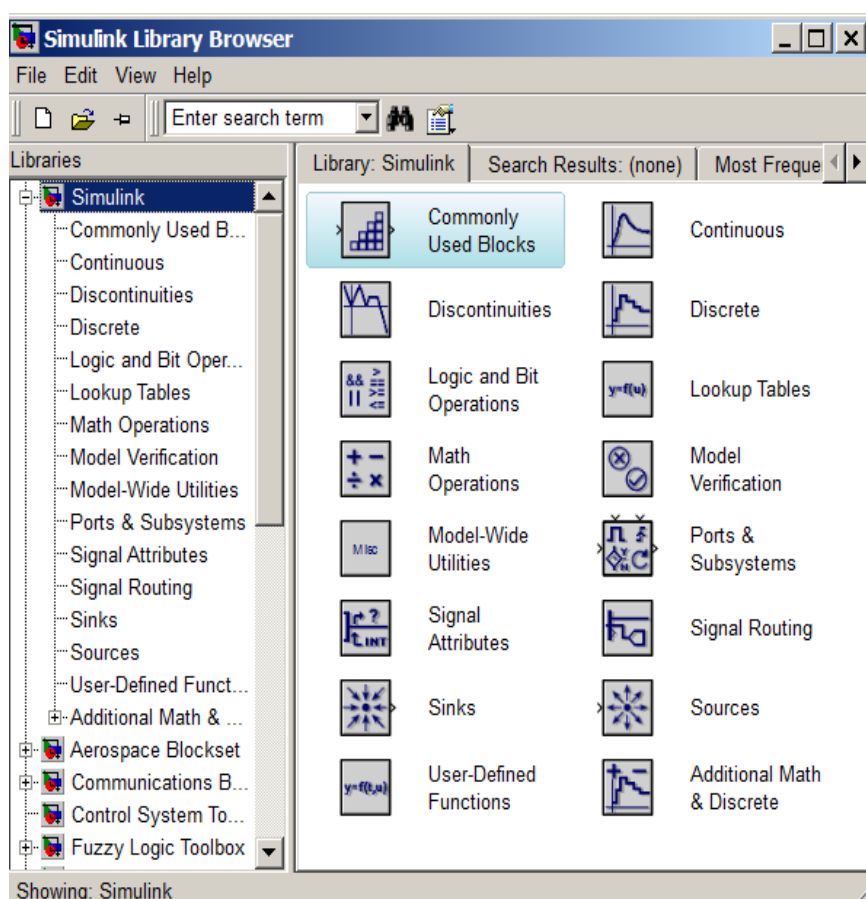


Рис. 1.3. Менеджер библиотек Simulink Library Browser

В левой панели окна приведен список библиотек Simulink. Правая панель содержит три вкладки: **Library** (содержание библиотеки), **Search Results** (результаты поиска), **Most Frequently Used Blocks** (наиболее часто используемые блоки).

Во вкладке **Library** отображаются элементы библиотеки, выбранной в левой панели окна. В дальнейшем эти элементы могут быть использованы для создания новой модели.

Для ускоренного поиска нужного блока необходимо использовать поисковую систему (*Enter search term*). Результаты поиска отображаются во второй вкладке правой панели (*Search Results*).

1.3. Пример создание модели

Порядок создания модели рассматривается на примере источника дискретного синусоидального сигнала.

Для создания модели выполните команду главного меню File, New, Model или нажмите Ctrl+N. По команде откроется новое безымянное окно (*Untitled*) модели (рис. 1.4).

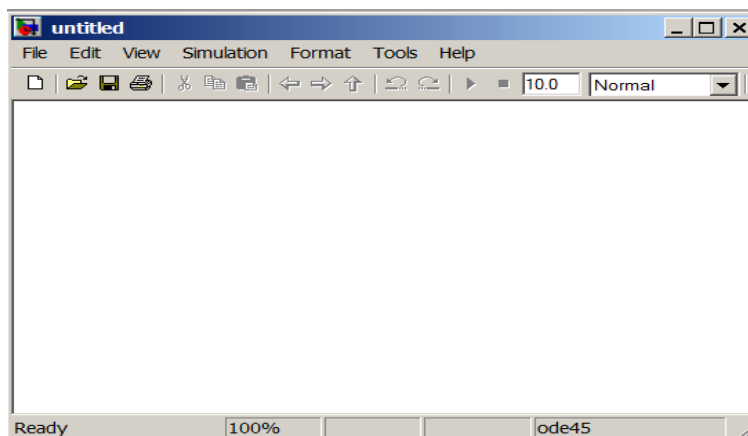


Рис. 1.4. Пустое окно новой модели Simulink

Перейдите к окну библиотеки Simulink.

Введите в строке поиска (*Enter search term*) *Scope* (осциллограф) и нажмите клавишу *Enter*. Во вкладке *Found: 'Scope'* отражаются результаты поиска, сгруппированные по библиотекам (рис. 1.4). В базовой библиотеке Simulink блок *Scope* найден дважды: в разделе *Commonly Used Blocks* (наиболее часто используемые блоки) и *Sinks* (средства анализа сигналов).

Разумеется, это один и тот же блок осциллографа. В списке найденных блоков также присутствует часто используемый блок *Spectrum Scope* (анализатор спектра), находящийся в библиотеке цифровой обработки сигналов (*Digital Signal Processing*).

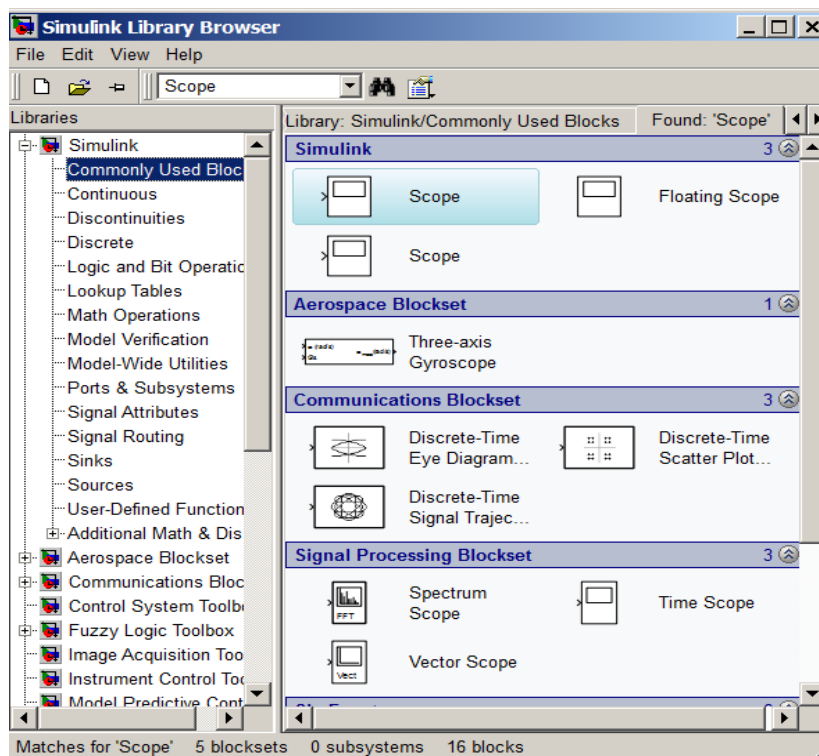


Рис. 1.5. Результаты поиска по слову «Scope»

Добавить выбранный блок в модель можно несколькими способами: перетаскив его на лист модели или выбрав пункт *Add To Untitled* контекстного меню, нажав правой кнопкой мыши на блоке (рис. 1.6). Аналогичным образом добавьте блок *Sine Wave* из раздела *Sources* (источники сигнала):

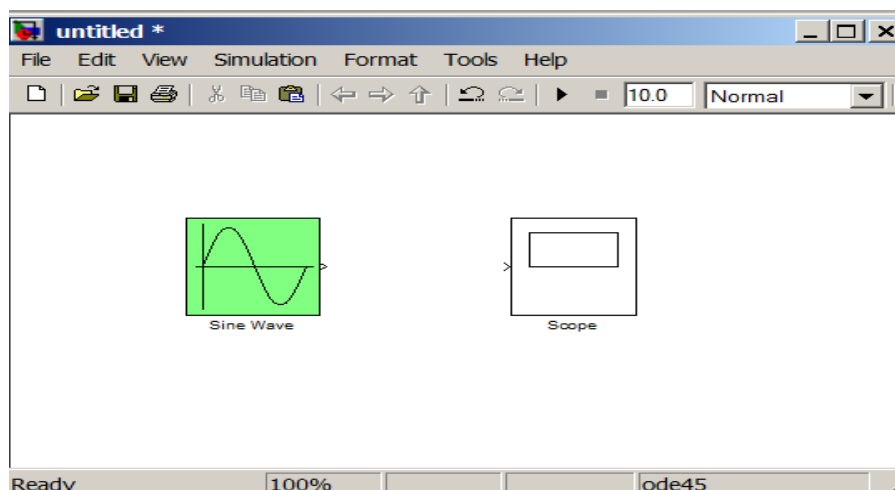


Рис. 1.6. Окно редактора блок-схем после буксировки блоков *Sine Wave* и *Scope*

Соединение блоков между собой может осуществляться двумя способами.

Ручной способ: наведя курсор мыши на выход источника сигнала, нажмите левую кнопку мыши и проведите линию до входа осциллографа.

Автоматический способ: выделив блок источника сигнала однократным нажатием левой кнопки мыши, нажмите кнопку *Ctrl* и нажмите левой кнопкой мыши на второй блок, соединение будет выполнено автоматически (рис. 1.7).

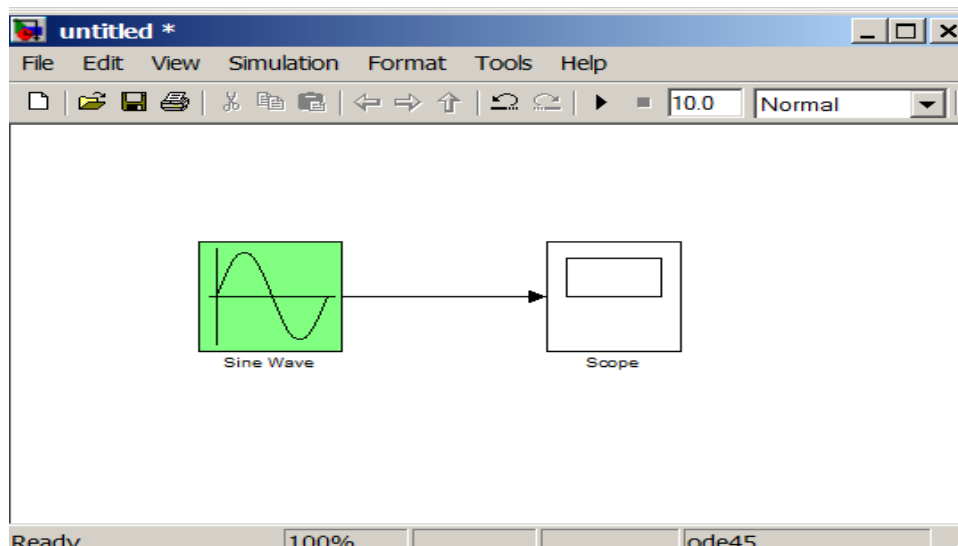


Рис. 1.7. Созданная модель

Для создания копии блока надо установить курсор на требуемый блок в окне модели, нажать правую клавишу мыши. В результате слева от курсора появится знак «+». Затем, удерживая клавишу в нажатом положении, переместить в нужное место курсор и отпустить клавишу.

Для настройки параметров генератора синусоидального сигнала двойным щелчком мыши откройте окно параметров блока (рис. 1.8).

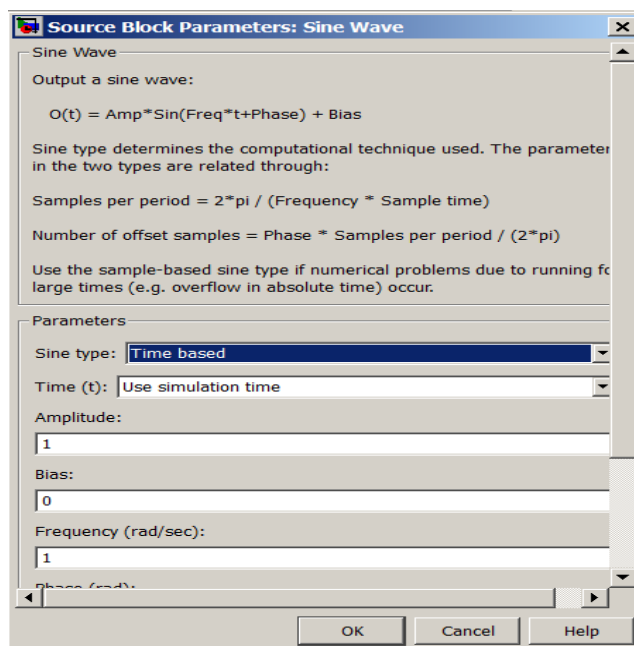


Рис. 1.8. Настройка параметров блока Sine Wave

Для формирования выходного сигнала блоком могут использоваться два алгоритма. Вид алгоритма определяется параметром **Sine Type** (способ формирования сигнала):

- **Time-based** – по текущему времени.
- **Sample-based** – по величине шага модельного времени.

Формирование выходного сигнала по текущему значению времени для непрерывных систем.

Выходной сигнал источника в этом режиме соответствует выражению:

$$y = \text{Amplitude} * \sin(\text{frequency} * \text{time} + \text{phase}) + \text{bias}.$$

Установить следующие параметры генератора:

1. **Amplitude** – амплитуда – 1.
2. **Bias** – постоянная составляющая сигнала – 0.
3. **Frequency (rad/sec)** – частота (рад/с) – 2.
4. **Phase (rad)** – начальная фаза (рад) – 0.
5. **Sample time** – шаг модельного времени. Используется для согласования работы источника и других компонентов модели во времени. Параметр может принимать следующие значения:

0 (по умолчанию) – используется при моделировании непрерывных систем;
> 0 (положительное значение) – задается при моделировании дискретных систем. В этом случае шаг модельного времени можно интерпретировать как шаг квантования по времени выходного сигнала;

-1 – шаг модельного времени устанавливается таким же, как и в предшествующем блоке, т. е. блоке, откуда приходит сигнал в данный блок.

Этот параметр может задаваться для большинства блоков библиотеки **Simulink**. В дальнейшем он рассматриваться не будет.

При расчетах для очень больших значений времени точность расчета выходных значений сигнала падает вследствие значительной ошибки округления.

Установить этот параметр = 0.

Установить параметр Time (t) – Use Simulation time.

Осциллограф **Scope** строит графики исследуемых сигналов в функции времени. Позволяет наблюдать за изменениями сигналов в процессе моделирования.

Настройка окна осциллографа выполняется с помощью панелей инструментов (рис. 1.9).

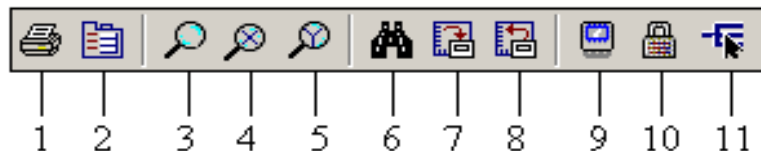


Рис. 1.9. Панель инструментов блока **Scope**

Панель инструментов содержит 11 кнопок:

1. **Print** – печать содержимого окна осциллографа.
2. **Parameters** – доступ к окну настройки параметров.
3. **Zoom** – увеличение масштаба по обоим осям.
4. **Zoom X-axis** – увеличение масштаба по горизонтальной оси.
5. **Zoom Y-axis** – увеличение масштаба по вертикальной оси.
6. **Autoscale** – автоматическая установка масштабов по обоим осям.
7. **Save current axes settings** – сохранение текущих настроек окна.
8. **Restore saved axes settings** – установка ранее сохраненных настроек окна.
9. **Floating scope** – перевод осциллографа в «свободный» режим.
10. **Lock/Unlock axes selection** – закрепить/разорвать связь между текущей координатной системой окна и отображаемым сигналом.

Инструмент доступен, если включен режим **Floating scope**.

11. **Signal selection** – выбор сигналов для отображения.

Инструмент доступен, если включен режим **Floating scope**.

Изменение масштабов отображаемых графиков можно выполнять несколькими способами:

1. Нажать соответствующую кнопку (, или) и щелкнуть один раз левой клавишей «мыши» в нужном месте графика. Произойдет 2,5 кратное увеличение масштаба.

2. Нажать соответствующую кнопку (, или) и, нажав левую клавишу «мыши», с помощью динамической рамки или отрезка указать область графика для увеличенного изображения.
3. Щелкнуть правой клавишей «мыши» в окне графиков и выбрать команду **Axes properties** в контекстном меню. Откроется окно свойств графика, в котором с помощью параметров **Y-min** и **Y-max** можно указать предельные значения вертикальной оси. В этом же окне можно указать заголовок графика (**Title**), заменив выражение %<SignalLabel> в строке ввода. Окно свойств показано на рисунке 1.10.

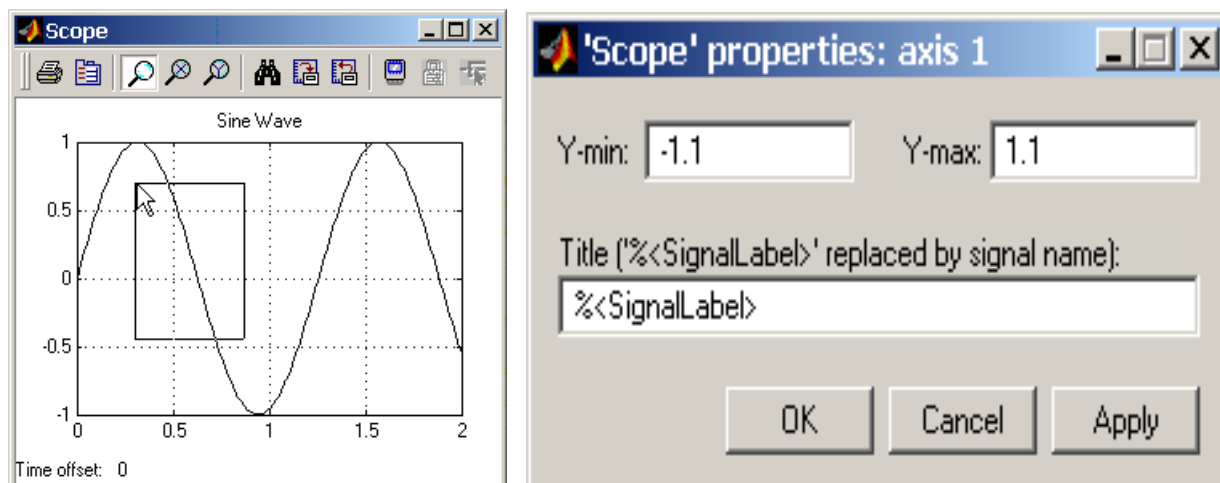


Рис. 1.10. Окно свойств графика

Параметры блока устанавливаются в окне **'Scope' parameters**, которое открывается с помощью инструмента (**Parameters**) панели инструментов. Окно параметров имеет две вкладки:

General – общие параметры.

Data history – параметры сохранения сигналов в рабочей области MATLAB.

Вкладка общих параметров показана на рисунке 1.11.

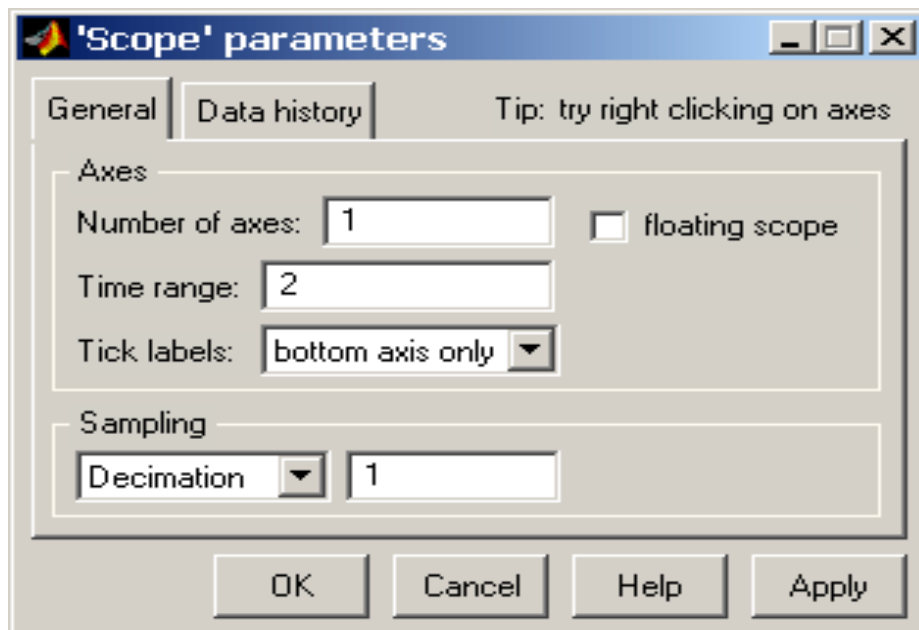


Рис. 1.11. Вкладка общих параметров **General**

Установить следующие параметры блока Scope:

На вкладке **General** задаются следующие параметры:

1. **Number of axes** – число входов (систем координат) осциллографа. При изменении этого параметра на изображении блока появляются дополнительные входные порты (= 1).
2. **Time range** – величина временного интервала, для которого отображаются графики. Если время расчета модели превышает заданное параметром **Time range**, то вывод графика производится порциями, при этом интервал отображения каждой порции графика равен заданному значению **Time range** (= 1).
3. **Tick labels** – вывод/скрытие осей и меток осей. Может принимать три значения (выбираются из списка):
 - **all** – подписи для всех осей,
 - **none** – отсутствие всех осей и подписей к ним,
 - **bottom axis only** – подписи горизонтальной оси только для нижнего графика.

Выбрать **all**.

4. **Sampling** – установка параметров вывода графиков в окне. Задает режим вывода расчетных точек на экран. При выборе **Decimation** кратность вывода устанавливается числом, задающим шаг выводимых расчетных точек. На рисунках 1.12 и 1.13 показаны графики синусоидальных сигналов рассчитанных с фиксированным шагом 0.1 с.

Выбрать **Decimation = 1**.

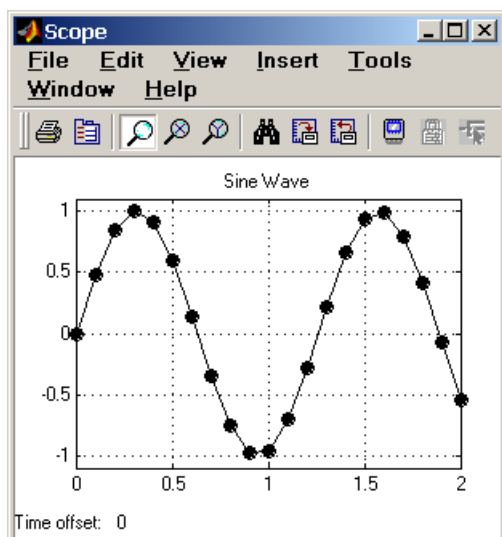


Рис. 1.12. Отображение синусоидального сигнала (**Decimation = 1**)

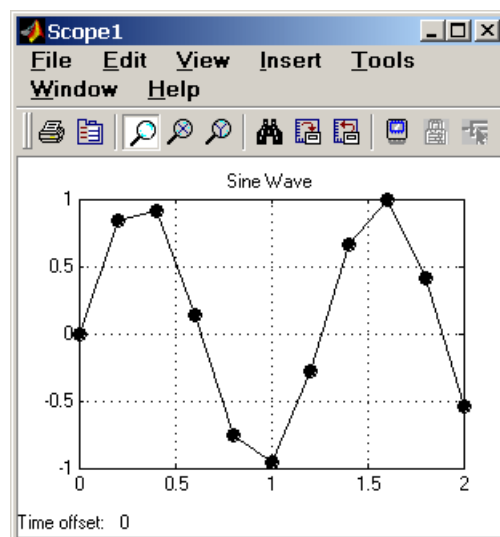


Рис. 1.13. Отображение синусоидального сигнала (**Decimation = 2**)

На рисунке 1.12 в окне блока **Scope** выводится каждая расчетная точка (параметр **Decimation** равен 1). На рисунке 1.13 показан вывод каждого второго значения (параметр **Decimation** равен 2).

Маркерами на графиках отмечены расчетные точки. В том случае, если режим вывода расчетных точек задается как **Sample time**, то его числовое значение определяет интервал квантования при отображении сигнала. На рисунке 1.14 показан график синусоидального сигнала для случая, когда значение параметра **Sample time** равно 0.1 .

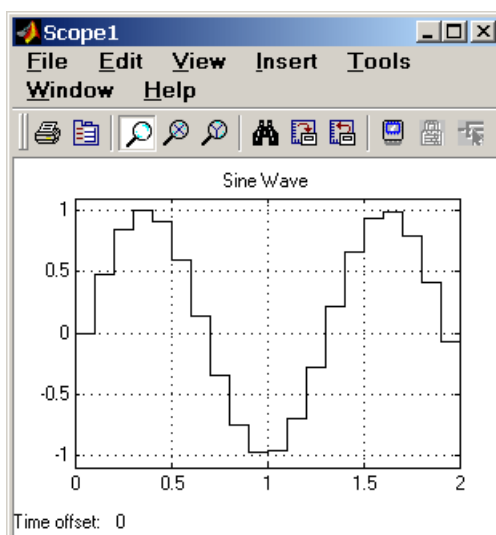


Рис. 1.14. Отображение синусоидального сигнала (**Sample time = 0.1**)

1.4. Настройка параметров модели

Выполните команду главного меню **Simulation, Configuration Parameters** (Моделирование, Параметры конфигурации) или нажмите Ctrl+E.

Процесс настройки заключается в задании параметров решающего модуля (*Solver*) (рис. 1.15):

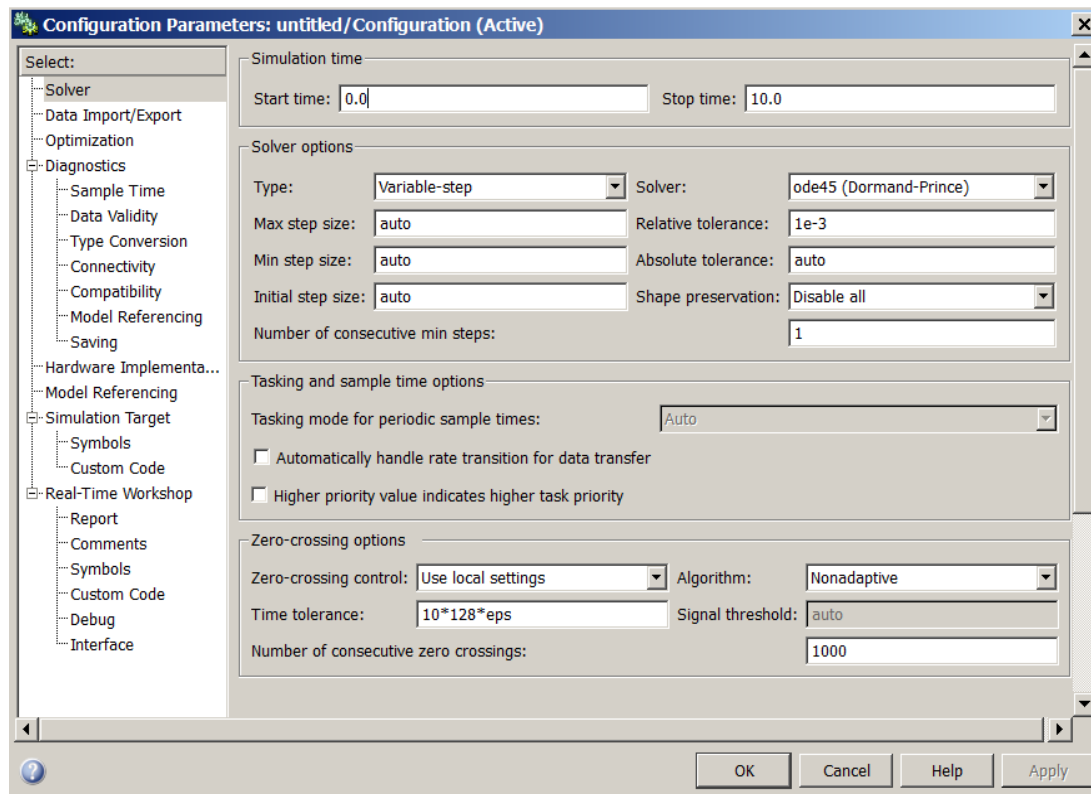


Рис. 1.15. Параметры конфигурации

Simulation time (Время моделирования) – задается временной интервал моделирования в секундах. Левая граница по умолчанию равна нулю, правая может принимать любое значение, в том числе и бесконечность (*inf*). В случае если начальное и конечное значения совпадают, будет выполнен только один шаг моделирования.

Редактирование положения, цвета, надписей блоков осуществляется путем выделения блока и нажатия правой клавишей мыши. Назначение пунктов появившегося контекстного меню приведено в таблице 1.1.

Табл. 1.1. Операции редактирования блоков

Меню	Операция
Format	Font – задает шрифт для надписей под выделенным блоком; Flip name – перемещает надпись на противоположную сторону блока; <i>Hide name</i> – скрывает надпись; <i>Flip block</i> – поворачивает блок на 180°; <i>Rotate block</i> – поворачивает блок на 90°; <i>Show drop shadow</i> – отображает тень от блока
Foreground color – цвет рамки блока	Custom – настройки пользователя, <i>Black, White...</i> <i>Dark, Green</i> – цвета: черный, белый ... темно-зеленый
Background color – цвет фона блока	

Запустите процесс моделирования **Simulation, Start (Ctrl+T)** на временном промежутке 0...10 сек. Двойным щелчком мыши откройте окно осциллографа (рис. 1.16).

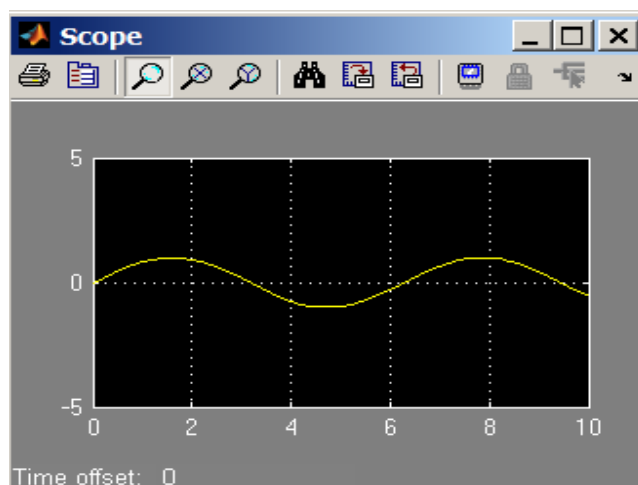


Рис. 1.16. Окно осциллографа

Как видно на рисунке 1.16, осциллограмма сигнала соответствует заданным параметрам гармонического колебания в настройках блока *Sine Wave*. При необходимости можно увеличить участок с требуемым фрагментом сигнала при помощи кнопок управления окна *Scope*. Кнопка *Autoscale* позволяет автоматически подобрать масштаб по двум осям для отображения всего

накопленного сигнала. При помощи кнопок *Zoom X – axis* и *Zoom Y – axis* имеется возможность изменения масштаба только по одной из координат. В настройках блока *Scope* можно задать количество входов осциллографа (*Number of axes*), параметры децимации входного сигнала (*Decimation*, пропускание выборок), настройки объема буфера хранения информации (*History, Limit datapoints to last*) и другие.

Если есть необходимость временно приостановить работу модели, следует нажать на пиктограмму  (пауза).

1.5. Библиотеки Simulink

Формирование сигналов в Simulink осуществляется при помощи генераторов сигналов *Sources* (рис. 1.17).

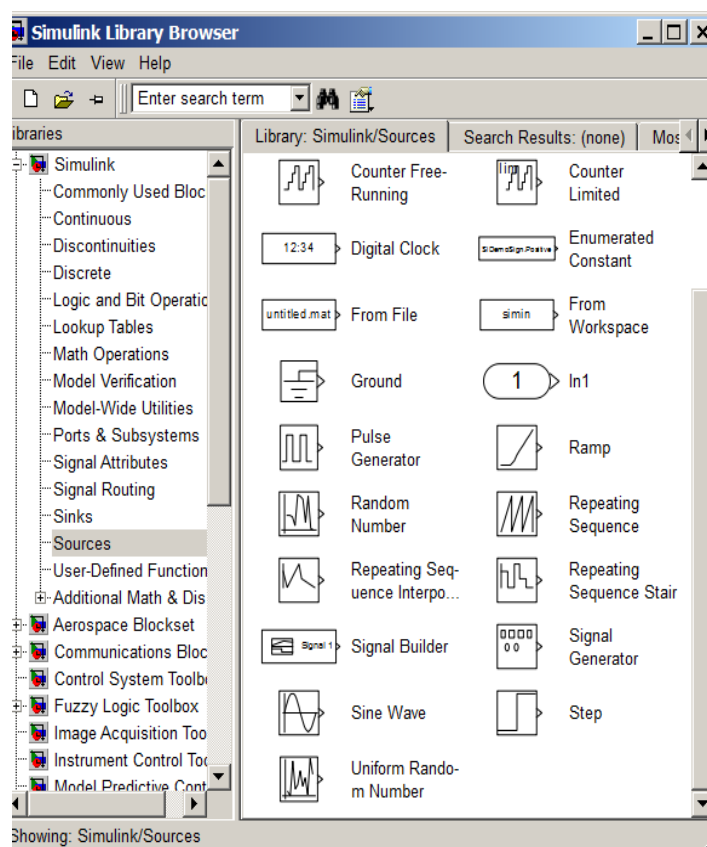


Рис. 1.17. Библиотека источников сигнала

В библиотеку входят следующие блоки:

Band-Limited White Noise – генератор нормального белого шума с равномерной финитной спектральной плотностью мощности и заданным временем корреляции для аналоговых систем;

Chirp signal – генератор синусоидального колебания с линейно возрастающей мгновенной частотой;

Clock – формирователь аналогового сигнала текущего времени моделирования (в соответствии с шагом моделирования);

Constant – источник постоянного сигнала;

Counter Free-Running – формирователь сигнала на основе N-разрядного счетчика и со сбросом по переполнению;

Counter Limited – формирователь сигнала на основе счетчика с произвольным значением сброса;

Digital Clock – формирователь дискретного сигнала текущего времени моделирования (в соответствии с шагом моделирования).

Анализ сигналов в Simulink осуществляется при помощи блоков библиотеки Sinks (рис. 1.18).

В библиотеку входят следующие блоки:

Display – блок отображения численных значений сигналов;

Out – выходной порт для сигналов подсистем;

Scope – осциллограф;

Stop Simulation – блок прерывания процесса моделирования при поступлении на вход ненулевого сигнала;

Floating Scope – блок осциллографа, способного в процессе моделирования подключаться к различным сигналам;

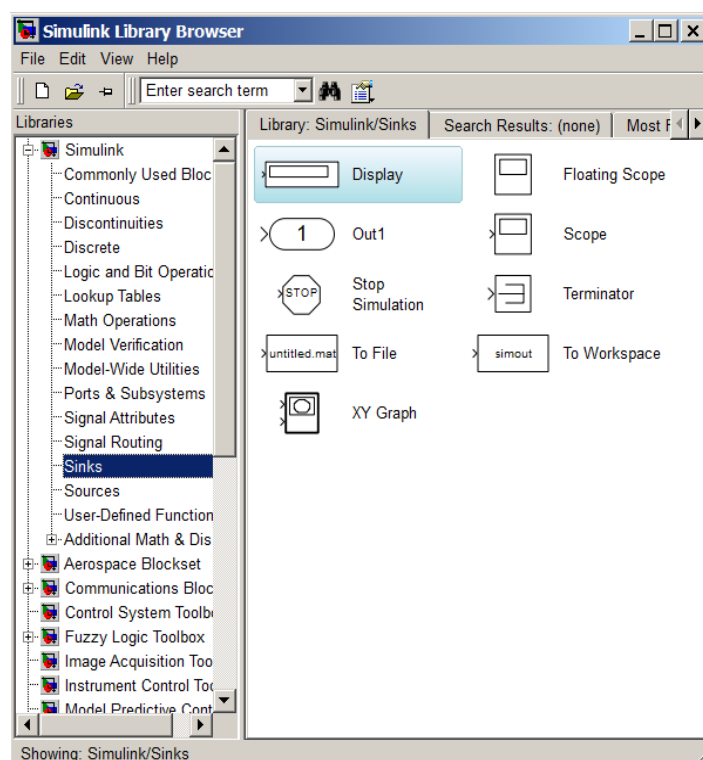


Рис. 1.18. Библиотека блоков анализа сигналов

Terminator – нагрузка для неиспользуемых сигналов;

To File – экспорт сигнала в mat-файл;

To Workspace – экспорт сигнала в Workspace;
XY Graph – двухкоординатный осциллограф.

На рисунке 1.19 показаны элементы библиотеки математических преобразований – *Math Operations*.

В библиотеку *Math Operations* входят следующие блоки:

Abs – блок взятия модуля сигнала;

Add – блок матричного или поэлементного сложения;

Bias – блок добавления постоянной составляющей к входному сигналу;

Complex to Real-Imag – блок выделения реальной и мнимой составляющих комплексного сигнала;

Divide – блок матричного или поэлементного деления;

Dot product – блок вычисления скалярного произведения векторов;

Gain – блок поэлементного или матричного умножения на коэффициент (скаляр, вектор или матрицу);

Magnitude-Angle to Complex – блок преобразования сигналов амплитуды и угла вектора на комплексной плоскости в комплексный сигнал;

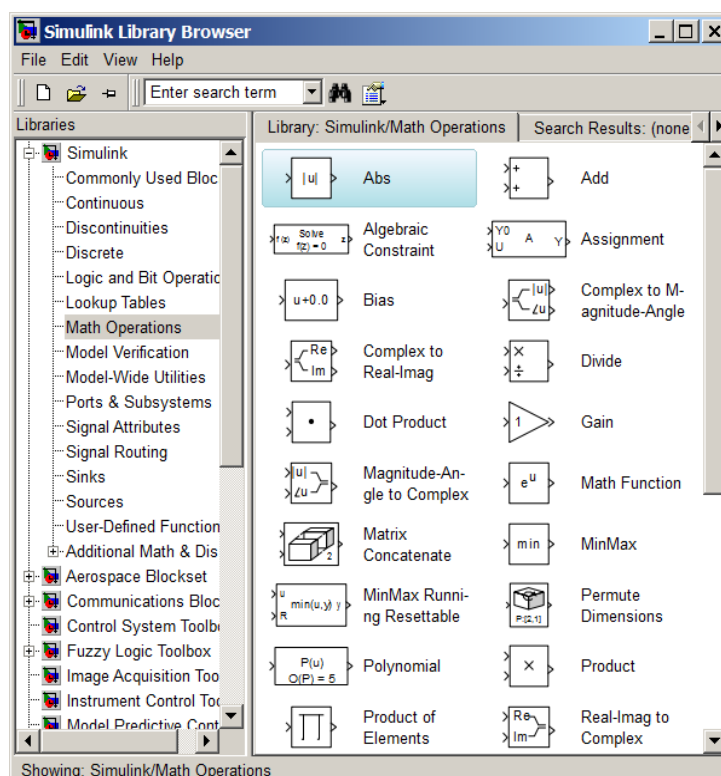


Рис. 1.19. Библиотека блоков математических преобразований

Math Function – блок вычисления математической функции (экспонента, логарифм, возведение в степень и др.);

Product – блок выполнения матричного или поэлементного умножения;

Product of Elements – блок вычисления произведения элементов матрицы;

Real-Imag to Complex – блок преобразования реального и мнимого сигналов в комплексный сигнал;

Rounding Function – блок округления;

Sign – блок вычисления знака входного сигнала;

Slider Gain – блок умножения на константу, значение которой задается положением ползунка;

Subtract – блок матричного или поэлементного вычитания;

Sum – блок матричного или поэлементного сложения;

Sum of Elements – блок вычисления суммы элементов матрицы;

Trigonometric Function – блок вычисления тригонометрических функций;

Unary Minus – блок инверсии входного сигнала.

На рисунке 1.20 показаны блоки логических операций над цифровым сигналом.

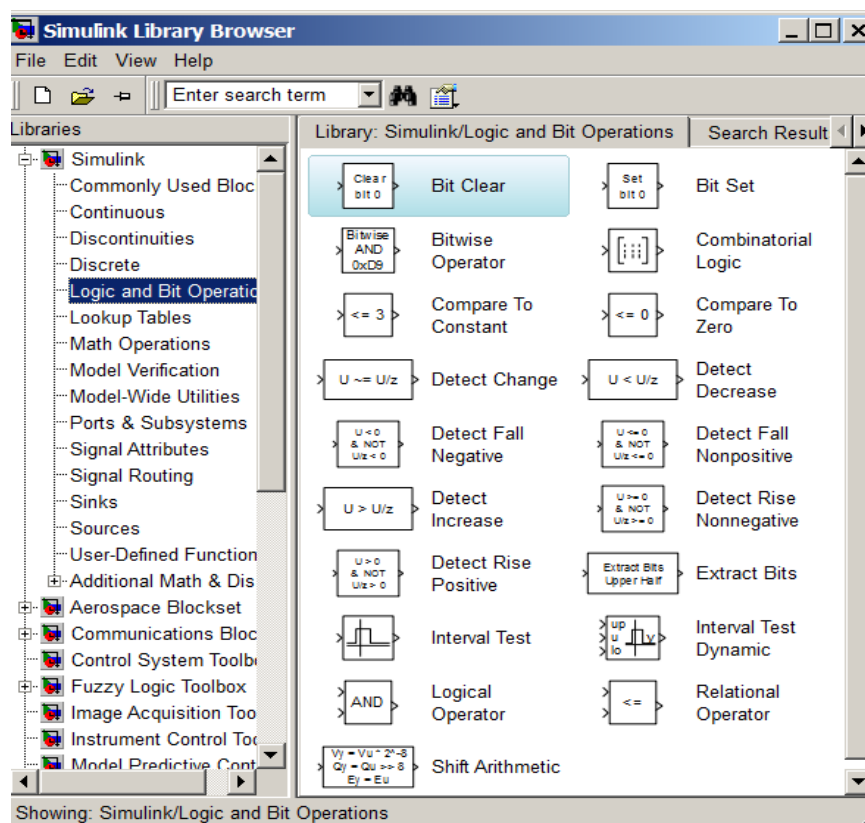


Рис. 1.20. Блоки логических операций

Наиболее часто используются следующие блоки:

Bit Clear – сброс i -го бита входного сигнала;

Bit Set – установка i -го бита входного сигнала;

Bitwise Operator – побитовая логическая операция;

Combinatorial Logic – реализация элементов комбинаторной логики на основе таблицы истинности;

Compare to Constant – блок сравнения входного сигнала с заданной константой;

Compare to Zero – блок сравнения входного сигнала с нулем;
Logical Operator – блок реализации логических элементов;
Relational Operator – блок сравнения.

Модуляторы цифровых систем связи реализуются на основе таблиц соответствий (истинности), которые могут быть созданы при помощи блоков группы *Lookup Tables* (рис. 1.21). В простейшем случае для создания цифрового модулятора может быть использована одномерная таблица истинности (*1-D Lookup Table*), в параметрах которой задается вектор входных воздействий (данные для передачи) и вектор комплексных точек сигнального созвездия.

Для реализации простых выражений на языке MATLAB предназначен блок *Fcn*, позволяющий записать функциональное выражение зависимости выходного сигнала от входного.

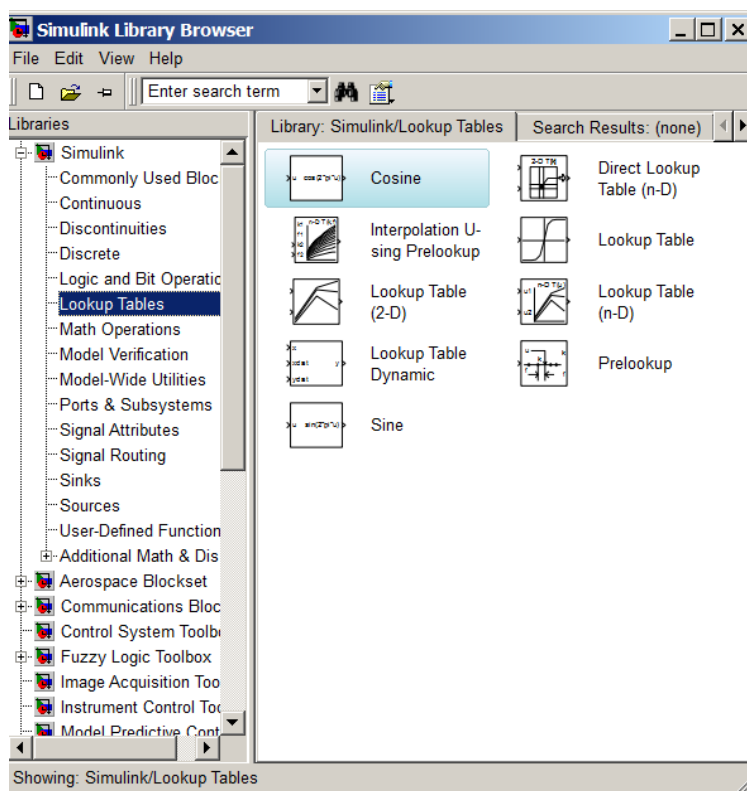


Рис. 1.21. Реализация таблиц истинности в Simulink

Элементы библиотеки *Random Data Sources* могут быть использованы в качестве источников случайных данных для передачи по каналу связи. В разделе *Noise Generators* расположены блоки формирования различных видов шума.

При анализе сигналов цифровых систем связи используются глазковые диаграммы (**Discrete Time Eye Diagram Scope**), диаграммы рассеяния (**Discrete Time Scatter Plot Scope**) и построители траектории вектора

комплексной огибающей сигнала (**Discrete Time Signal Trajectory Scope**). Блоки реализующие данные функции, можно найти в закладке **Comm Sinks** (рис. 1.22).

Блок **Error Rate Calculation** используется для сравнения передаваемых и принимаемых данных, расчета числа символьных ошибок. При необходимости данный блок может быть настроен для автоматической остановки процесса моделирования при достижении заданного числа ошибок передачи информации.

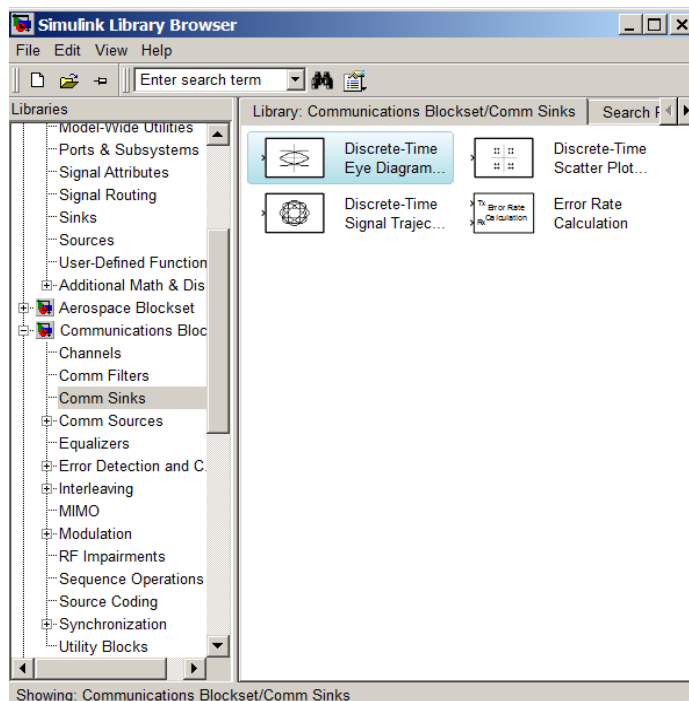


Рис. 1.22. Блоки анализа сигналов цифровых систем связи

Важнейшие задачи при передаче и приеме сигнала – формирование спектра в передатчике и согласованная фильтрация в приемнике. Для реализации этих задач используются формирующие и согласованные комплексные фильтры, представленные в закладке **Comm Filters** (рис. 1.23):

Raised Cosine Transmit Filter – блок формирования спектра и интерполяции передаваемого сигнала;

Raised Cosine Receive Filter – блок согласованной фильтрации и децимации принимаемого сигнала.

В разделе *Filtering* присутствует большое количество блоков фильтрации сигнала. В разделе *Signal Operations* находятся блоки повышения и понижения частоты дискретизации (*Upsample u Downsample*), блоки целочисленной и дробной задержек (*Variable Integer Delay u Variable Fractional Delay*). В разделе *Signal Processing Sinks* находится блок анализатора спектра (*Spectrum Scope*).

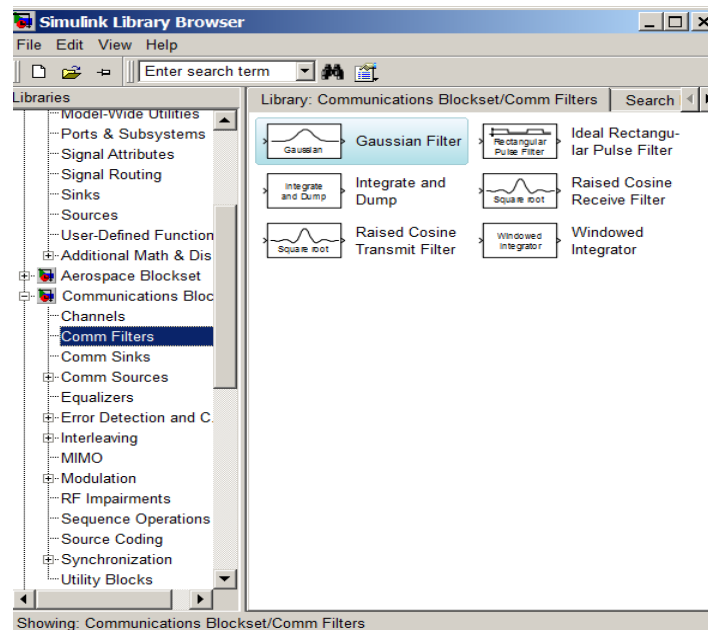


Рис. 1.23. Блоки формирования спектра и согласованной фильтрации сигнала

Более подробно ознакомиться с возможностями Simulink можно при помощи документации и демонстрационных проектов. В окне MATLAB нажмите кнопки *Start*, *Simulink*, *Demos*. Откроется окно помощи MATLAB Simulink со списком демонстрационных проектов, каждый из которых открыт для изучения.

1.6. Задание для самостоятельной работы

1.6.1. Собрать модель для анализа спектральной эффективности BPSK (рис. 1.24).

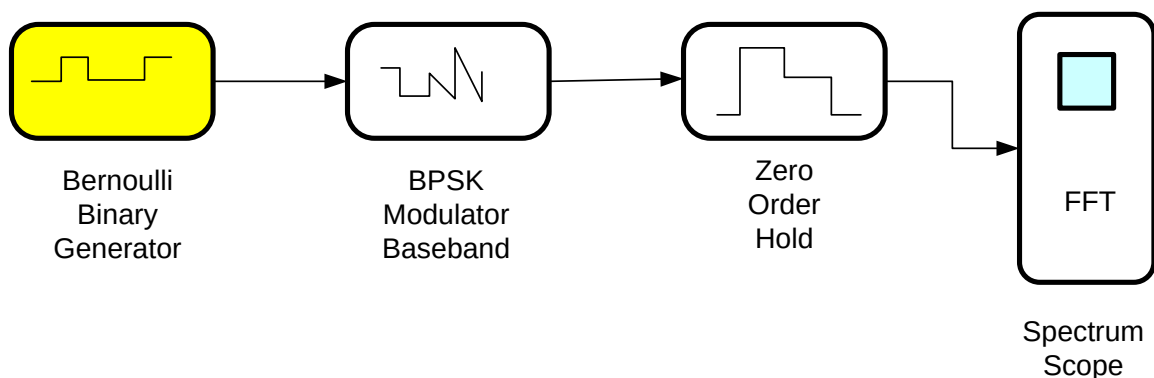


Рис. 1.24. Имитационная модель для исследования спектральной эффективности BPSK

Принцип работы модели:

Цифровой сигнал в коде NRZ, генерируемый блоком Bernoulli binary generator (генератор ПСП) поступает на вход модулятора BPSK со скоростью 0,1 Мбит/с. Несущая частота модулятора равна 200 кГц. Изменение вероятности двоичных символов производится путем установки вероятности нуля « $p = \dots$ ». При этом вероятность появления единиц равна « $1 - p$ ».

Для оценки спектра сигнала используется спектрограф (анализатор спектра) **Spectrum Scope**.

Блок **Zero Order Hold** производит преобразование сигнала на выходе модулятора (векторное представление) в скалярную величину.

Расположение блоков модели в библиотеке Simulink:

Bernoulli Binari Generator: Communication Blockset–Comm Sources–Data Sources;

BPSK Modulator Baseband: Communication Blockset–Modulation–Digital Basedand Modulation–M;

Spectrum Scope: Simulink–DSP Blockset–Sinks–Spectrum Scope;

Zero Order Hold: Simulink–DSP Blockset.

1.6.2. Произвести настройку параметров блоков (табл. 1.2).

Табл. 1.2. Параметры блоков модели модулятора

Bernoulli Binary Generator (Имитатор ЦС – генератор случайного сигнала в формате NRZ)	
1	2
Initial seed – номер ПСП	61
Simple time – период двоичных символов	1.5
Frame based outputs – размерность выходного сигнала: один выходной канал (двоичные символы в последовательном коде) или два (в параллельном коде (настраивается, если флажок Interpret vector parameters 1-D не установлен)	флажок
Samples per frame – дискретизация выходного сигнала. Поле активно, если флажок Frame-based outputs установлен	2
Output data type	double
Модулятор BPSK (BPSK Modulator Baseband)	
Main:	
Phase offset (rad)	pi
Data Types	double

Продолжение табл. 1.2

1	2
Анализатор спектра (Spectrum Scope)	
Spectrum units	dBW/Hertz
Spectrum type	Two-Sided ($-F_s/2 \dots F_s/2$)
Buffer size – <i>размер буфера</i>	1024
Buffer input – <i>подтверждение необходимости буферизации входного сигнала</i>	флажок
Buffer overlap – <i>перекрывание буфера, число значений для повторной буферизации значений</i>	0
Window	Hann
Window sampling	Periodic
Number of spectral averages	16
<i>Axis propereties:</i> Inlert sample time from input Frequency display offset (Hz) Frequency display limits Minimum Y-limit Maximum Y-limit Y-axis label <i>Display Properties:</i> Show grid Open Scope at start of Simulation	флажок 0 Auto -30 10 Magnitude, dB флажок флажок флажок
Параметры модели (Simulation)	
Start time	0.0
Stop timt	20 000
Type	Variable-step

1.6.3. Произвести запуск модели.

1.6.4. Произвести оценку ширины спектра сигнала по первым нулям спектра для случая равновероятных двоичных символах на входе модулятора (предварительно установить на блоке генератора значение вероятности появления нуля « $p = 0.5$ »). Возможный спектр сигнала BPSK показан на рисунке 1.25.

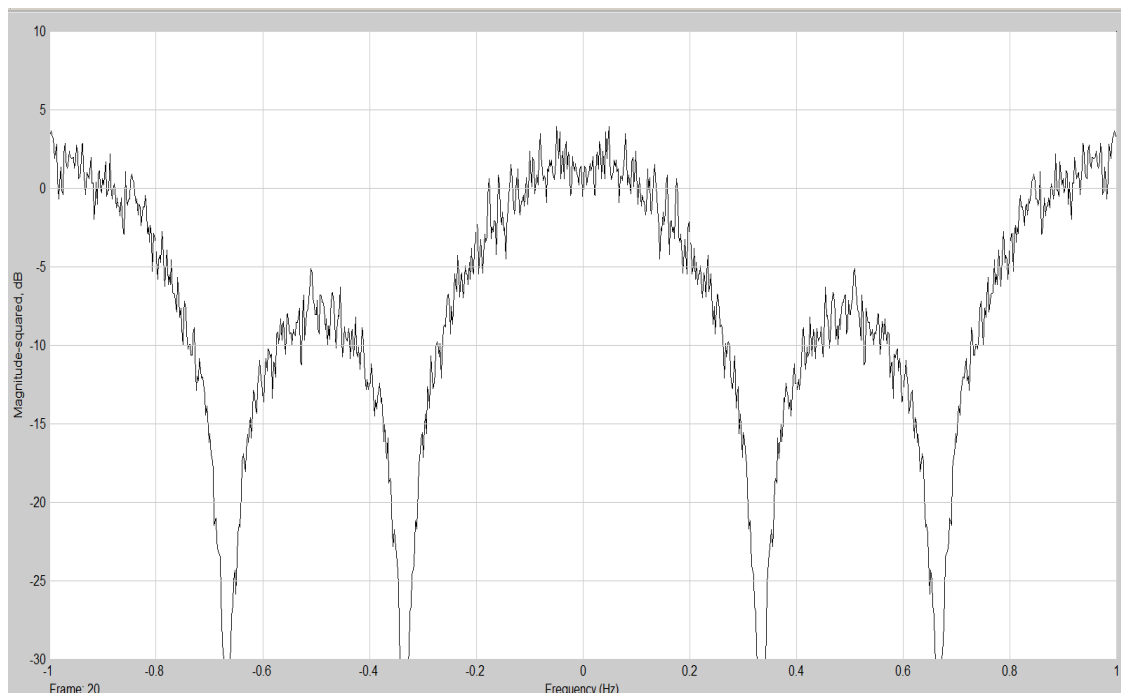


Рис. 1.25. Энергетический спектр сигнала BPSK

- 1.6.5. Зарисовать спектр сигнала для составления отчета.
- 1.6.6. Заккрыть окно модели. **Созданную модель сохранить.**
- 1.6.7. Составить модель простейшего 2-х позиционного частотного модулятора с разрывом фазы. Для наблюдения осциллограмм в контрольных точках модулятора использовать блок *Scope*.
- 1.6.8. Пронаблюдать и зарисовать осциллограммы для составления отчета по работе.
- 1.6.9. Заккрыть окно модели. **Созданную модель сохранить.**

Лабораторная работа № 8.2

«Изучение принципов построения современных цифровых систем радиосвязи»

Цель работы: изучение назначения и взаимодействия элементов ЦСПС; изучение способов оценки качества передачи информации в ЦСПС; оценка помехоустойчивости ЦСПС с BPSK в канале с МСИ и белым шумом.

Подготовка к работе

По указанной литературе изучить:

- 1) принципы построения и назначение элементов цифровых систем радиосвязи;
- 2) ознакомиться с методами оценки качества передачи информации в ЦСПС;
- 3) подготовить бланк отчета по лабораторной работе;
- 4) подготовить ответы на контрольные вопросы.

Рекомендуемая литература

1. Раздел 1.1 данного учебного пособия.
2. *Маглицкий Б.Н.* Космические и наземные системы радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2014. – 300 с.
3. *Маглицкий Б.Н.* Спектрально-эффективные методы модуляции в цифровых системах радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2009. – 120 с.

При выполнении лабораторной работы используется IBM – совместимый компьютер с процессором Pentium II и выше, операционная система Windows XP, Windows 7.

Программное обеспечение: СКМ «MATLAB/Simulink» (R2009b).

1. Теоретическая часть

1.1. Способы оценки качества передачи информации в ЦСПС

1.1.1. Коэффициент ошибок

Ключевым (интегральным) параметром любой цифровой системы передачи является коэффициент битовых ошибок (*Bit Error Ratio–BER*).

Напомним, что под BER понимается отношение ошибочно принятых бит к общему числу переданных.

Следует особо подчеркнуть, что оценка BER будет абсолютно точной только при бесконечно большом числе переданных битов. Строго говоря, когда их число ограничено, мы получаем не вероятность события BER, а его оценку BERT. Очевидно, что уровень достоверности этой оценки (*Confidential Level, CL*), называемый также доверительной вероятностью, зависит от количества зарегистрированных ошибок и от общего числа переданных битов N .

При измерениях BER используются типовые испытательные последовательности, причем каждой стандартной скорости передачи информации соответствует своя испытательная последовательность. По своим свойствам они близки к гауссову шуму, но имеют определенный период повторения. Поэтому они называются не просто случайными, а псевдослучайными последовательностями (ПСП) (Pseudo-Random Bit Sequence, PRBS).

Типовая схема измерения BER предполагает наличие генератора испытательных битовых (символьных) последовательностей, тестера BER, испытуемого объекта (регенератора, участка ЦСП и т. д.).

Наиболее существенными факторами, определяющими величину BER, являются:

- наличие шумов в тракте передачи;
- ограничение полосы частот тракта передачи и, как следствие, появление межсимвольных искажений и джиттера;
- наличие замираний в радиоканале.

Измерение коэффициента ошибок в цифровых системах связи осуществляется двумя методами:

- побитным сравнением единичных элементов принятого цифрового сигнала с единичными элементами посланного измерительного цифрового сигнала от генератора псевдослучайной последовательности (ПСП);
- выявлением нарушений алгоритма формирования кода в принятом цифровом сигнале.

Приборы, в которых ошибки обнаруживаются при поэлементном сравнении переданного и принятого сигналов (первый метод), являются измерителями коэффициента ошибок первого типа ИКО-1. Измерение коэффициента ошибки методом посимвольного сравнения с помощью ИКО-1 предполагает обязательный перерыв связи и проводится в процессе пуско-наладочных, ремонтных и регламентных работ.

Приборы, в которых ошибки выявляются при обнаружении нарушений алгоритма кода в принятом сигнале (второй метод), являются измерителями коэффициента ошибок второго типа ИКО-2, входят в состав штатной аппаратуры ЦСП и позволяют проводить измерения коэффициента ошибок без прерывания связи. Принцип работы такого прибора (ИКО-2) основан на определении числа символов, нарушающих структуру формата кода цифрового

сигнала. Число нарушений, подсчитанное относительно общего числа импульсов, прошедших линейный тракт, определяет коэффициент ошибок. Схема измерения показана на рисунке 1.1.

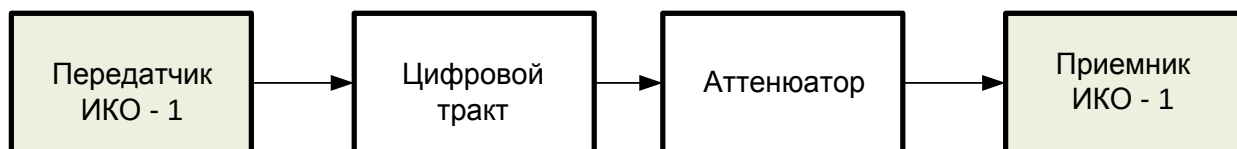


Рис. 1.1. Схема измерения коэффициента ошибок

Измерения с помощью ИКО-1 проводятся двумя способами: «по шлейфу» и «по направлению». При измерениях «по шлейфу» генератор испытательного сигнала и управляемый им анализатор кодовой последовательности находятся на одном конце тракта, а «шлейф» создается либо в регенераторе, либо соединением соответствующих волокон. В случае измерения «по направлению» генератор испытательного сигнала и анализатор находятся на различных концах тракта, при этом в анализаторе вырабатывается сигнал, аналогичный испытательному сигналу генератора и синхронный с входным сигналом.

На практике для качественной оценки степени влияния искажений и помех на качество передачи цифровых сигналов применяются глаз–диаграммы и сигнальные созвездия.

1.1.2. Глаз–диаграмма

Удобным и простым графическим методом оценки качества цифрового сигнала на выходе регенератора является глаз–диаграмма. Она представляет собой результат наложения всех возможных импульсных последовательностей в течение промежутка времени, равного двум или более тактовым интервалам цифрового сигнала.

Наиболее простой пример – диаграмма для троичного (возможные уровни -1, 0, +1) линейного сигнала при косинус-квадратной форме сигнала на выходе корректора регенератора (рис. 1.2). На глаз–диаграмме хорошо видна область («раскрыв»), в пределах которой должна производиться операция опознания сигнала для каждого из двух уровней решения (заштрихованная область на рисунке).

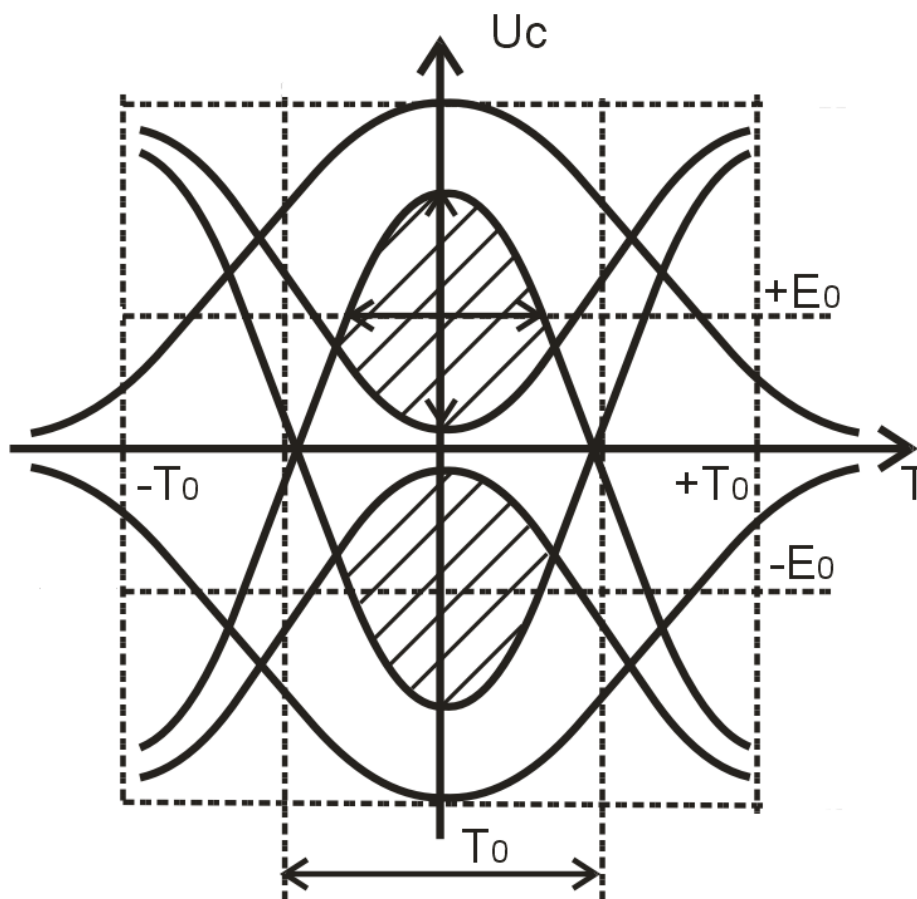


Рис. 1.2. Глаз-диаграмма 3-х уровневого сигнала
 E_0 – порог принятия решения;
 тактовый интервал: промежуток времени от $-T_0$ до $+T_0$

Наличие помех приводит к сокращению области «раскрыва» глаз-диаграммы по сравнению с идеальным случаем. Минимальное расстояние между центром и краями глаз-диаграммы служит мерой запаса помехозащищенности. Запас уменьшается как из-за искажений формы импульса, так и вследствие несовершенства самого процесса принятия решения. Первая причина приводит к уменьшению «раскрыва» глаз-диаграммы, а вторая – к перемещению точки принятия решения вдоль границ глаза. Возникающие вследствие двух указанных причин искажения принято подразделять на амплитудные и временные, соответствующие смещению точки принятия решения по вертикали и горизонтали.

Степень уменьшения «раскрыва» глаз-диаграммы по вертикали определяется результирующими искажениями, вызванными межсимвольными помехами, эхосигналами, изменениями амплитуды импульсов на входе регенератора, погрешностями порогов решающих устройств. В результате воздействия появляется вертикальная составляющая искажений глаз-диаграммы.

Временные искажения глаз–диаграммы, включающие несоответствие моментов решения их статическим значениям, учитываются обычно в смещении границ «глаза» по горизонтали.

Вид глаз–диаграммы зависит от формата цифрового сигнала и дает много информации о многих параметрах сигнала, в том числе и о джиттере сигнала.

На рисунке 1.3 показан пример глаз–диаграммы для двухуровневого сигнала в формате NRZ, полученной методом моделирования в среде MATLAB/Simulink.

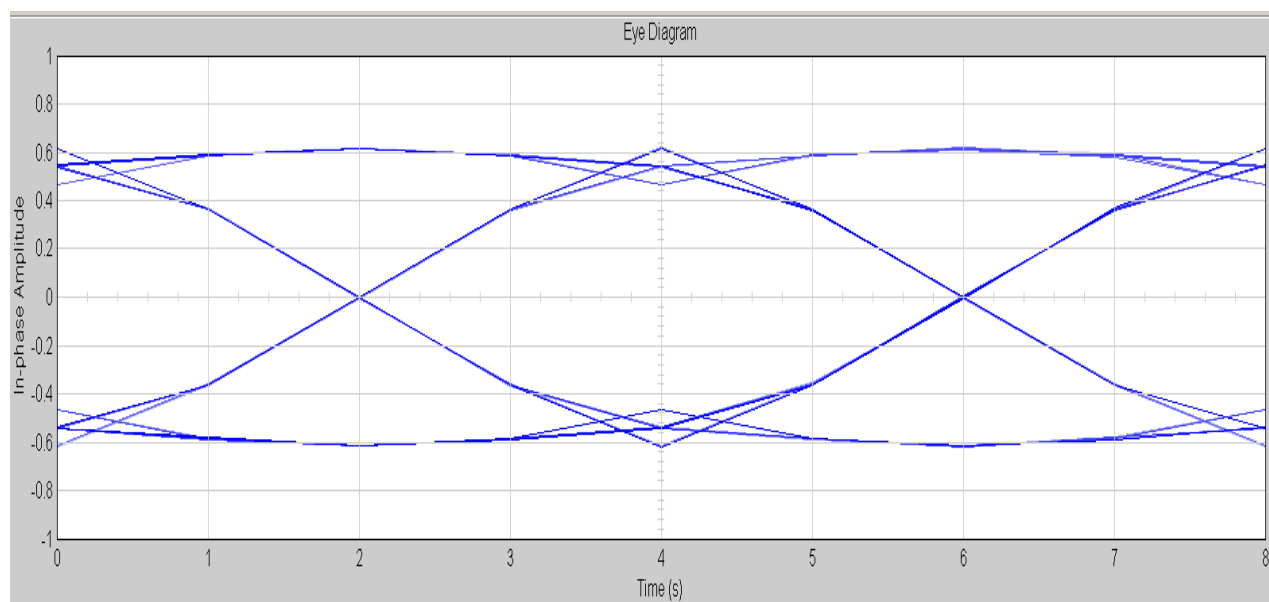


Рис. 1.3. Пример глаз–диаграммы для цифрового сигнала в формате NRZ

Глаз–диаграмма удобна простотой применения и тем, что может применяться в любой системе с реальными данными. Для глаз–диаграммы не требуется наличие специального тестового сигнала, хотя, при желании можно использовать измерительный сигнал импульсного генератора.

К числу основных видов помех, ухудшающих раскрыт глаз–диаграммы, относятся:

- собственные помехи (тепловые шумы линий связи и усилительных устройств регенераторов);
- межсимвольные помехи (МСИ первого и второго рода), которые возникают за счет ограничений полосы частот как сверху (МСИ-1), так и снизу (МСИ-2);
- импульсные помехи.

Анализ глаз–диаграммы позволяет определять значительное количество параметров формы импульсов:

- длительность и форму импульса;

- длительности переднего и заднего фронтов;
- длительность и форму импульса;
- длительности переднего и заднего фронтов;
- относительную ширину глаз-диаграммы.

Самым простым способом наблюдения глаз-диаграммы является способ с использованием осциллографа (рис. 1.4).

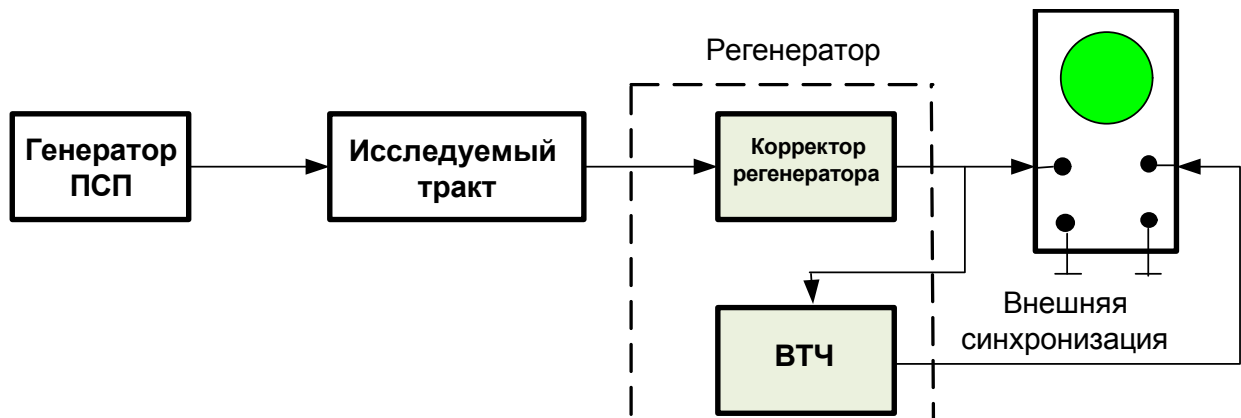


Рис. 1.4. Наблюдение глаз-диаграммы

В схему входят: генератор ПСП, тракт передачи (при исследованиях часто используется имитатор тракта – искусственная линия). Осциллограф подключается на выход корректора регенератора (точка принятия решений).

Синхронизация осциллографа осуществляется сигналом тактовой частоты, который формируется выделителем тактовой частоты (ВТЧ) регенератора. Длительность ждущей развертки выбирается равной примерно двум тактовым интервалам.

1.1.3. Сигнальное созвездие

Удобным средством анализа характеристик модулированных сигналов является отображение их с помощью полярных и квадратурных диаграмм в виде *сигнальных созвездий*.

а) полярные диаграммы

При модуляции несущего колебания изменению могут быть подвергнуты такие его параметры как амплитуда, фаза и частота. При простых видах модуляции модулирующее сообщение изменяет только один параметр. При комбинированных видах модуляции одновременно могут изменяться амплитуда и фаза несущей.

Наиболее простой способ отображения амплитудно-фазовых соотношений модулированного сигнала – это *полярная диаграмма*. При построении

полярной диаграммы несущая является опорным элементом, относительно которого отсчитывается угол фазового сдвига и изменение уровня модулированного сигнала. Модуль радиус-вектора, исходящего из центра окружности (начала координат), характеризует относительный уровень элементарного сигнала, а угол наклона между радиус-вектором и некоторым начальным радиусом – текущий фазовый сдвиг.

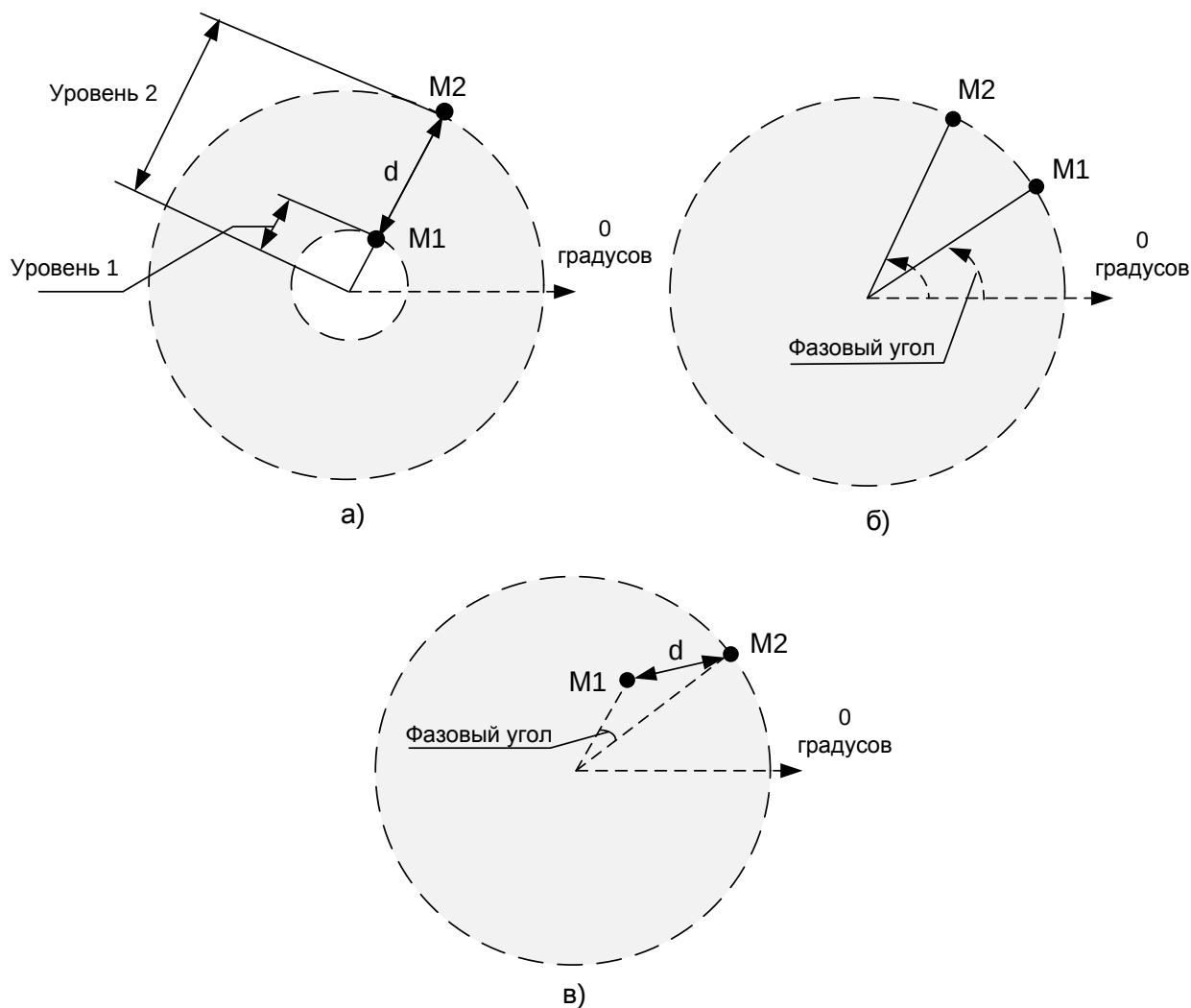


Рис. 1.5. Примеры полярных диаграмм

Отображение сигнала $s(t)$ на полярной диаграмме соответствует его «замораживанию» во времени, когда фиксируются только амплитуда сигнала A и его начальный фазовый сдвиг θ .

Примеры полярных диаграмм, показывающих характерные изменения значащих параметров для амплитудной модуляции, приведены на рисунке 1.5. При амплитудной модуляции переход между значащими позициями (M1 и M2) осуществляется по прямой линии (кратчайшему расстоянию) между ними (а). При фазовой модуляции – по дуге окружности (б). Соответственно изме-

няются либо уровень, либо фазовый сдвиг модулированного сигнала. При совместной амплитудно-фазовой модуляции переход осуществляется по прямой линии, связывающей точки с различными фазовыми углами (в);

б) сигнальные созвездия

Современные модуляторы для цифровых систем передачи строятся, как правило, по квадратурной схеме. В таком модуляторе выходной сигнал образуется суммированием двух различных модулированных сигналов, несущие которых имеют между собой фазовый сдвиг 90° . Входы двух модулирующих сигналов квадратурного модулятора обозначаются I и Q : I (синфазный) относится к каналу, в котором начальный фазовый сдвиг несущей принимается равным 0° , Q – к каналу, несущая в котором сдвинута на 90° .

Для адекватного отображения пространства сигналов на выходе квадратурного модулятора полярные диаграммы преобразуют в прямоугольную систему координат, в которой по горизонтальной оси I откладывают уровень сигнала в синфазном канале, а по вертикальной оси Q – уровень сигнала в квадратурном канале. Все остальные построения соответствуют полярной диаграмме с учетом того, что ось I символизирует нулевой фазовый сдвиг, а ось Q – сдвиг на 90° . Проекции вектора сигнала на оси I и Q рассматривают как его квадратурные компоненты.

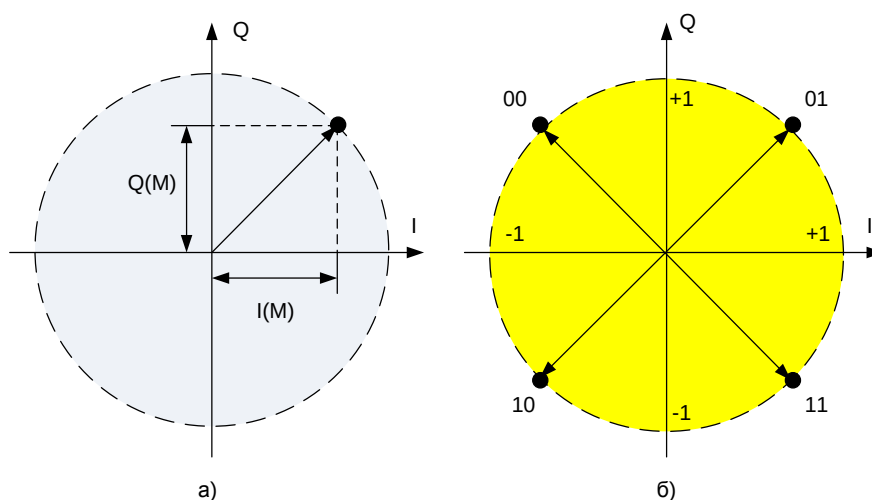


Рис. 1.6. Переход от полярной системы координат к квадратурной

Рисунок 1.6 а поясняет переход от полярной диаграммы к квадратурной, а полная квадратурная диаграмма для QPSK показана на рисунке 1.6 б.

Для упрощения рисунка квадратурной диаграммы, особенно при отображении сигналов современных многопозиционных видов модуляции, обычно изображают только конечные точки векторов, исходящих из начала координат, а сами векторы, как правило, опускают. Часто опускают и сами оси I и Q , подразумевая, что они проходят через центр симметрии фигуры.

Полное множество модулированных сигналов, изображенных на квадратной диаграмме в виде точек, называют *сигнальным созвездием*, а сами сигналы – *точками созвездия*.

Форма сигнального созвездия соответствует виду модуляции, а расстояния между точками созвездия характеризуют помехоустойчивость при приеме сигнала.

В качестве примера на рисунке 1.7 показаны несколько простых созвездий: *одномерных* для амплитудной модуляции (АМ) (а) и *двумерных* для фазовой модуляции (ФМ) (б), геометрическим местом точек которых являются соответственно прямая и окружность. Здесь следует заметить, что показанные созвездия АМ получаются при использовании в качестве модулирующего сигнала биполярных импульсов, значения уровней которых симметричны относительно нулевого уровня. При модуляции отрицательными импульсами одновременно изменяется на противоположную и фаза сигнала. Поэтому такая АМ может рассматриваться и как разновидность ФМ.

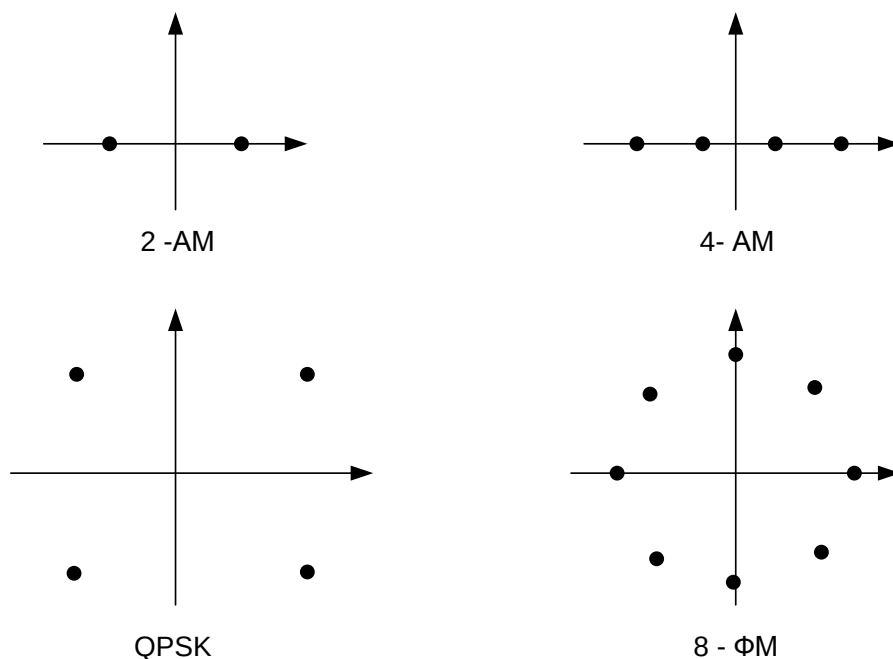
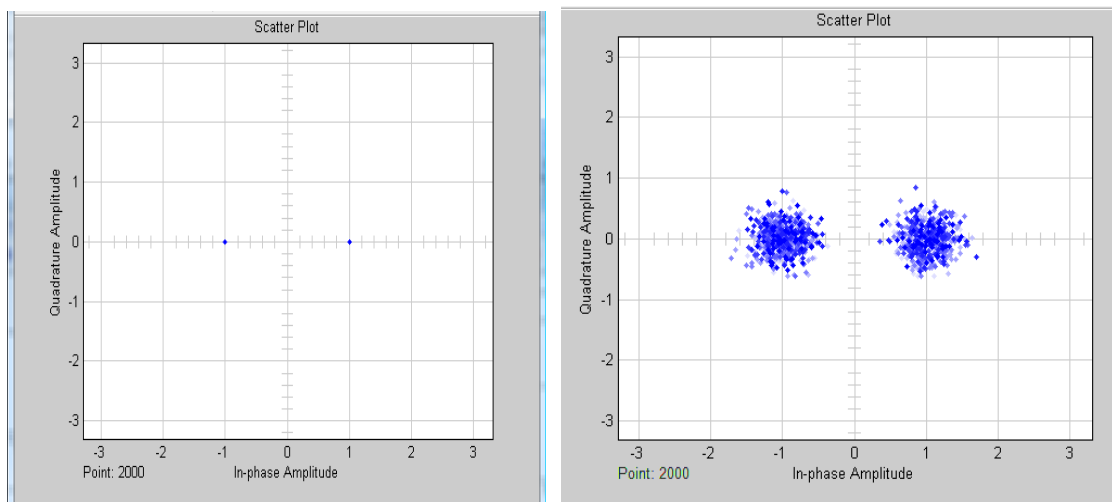


Рис. 1.7. Примеры сигнальных созвездий

В целях анализа принятых сигналов сигнальное созвездие позволяет упростить обнаружение некоторых видов искажения сигнала. Например, гауссовский шум представляется как размытые точки созвездия (рис. 1.8).



а)

б)

*Рис. 1.8. Воздействие АБГШ на сигнальное созвездие BPSK:
а) при отсутствии шума; б) при наличии шума*

Наличие фазовых искажений приводит к тому, что сигнальные точки распределены по окружности, а затухание сигнала проявляется в том, что сигнальные точки смещаются ближе к центру созвездия.

Наличие межсимвольной интерференции приводит к «скруглению» формы квадратурных составляющих сигнала. На сигнальном созвездии образуются «сигнальные облака», соответствующие каждому из четырех возможных различных символов при QPSK (рис. 1.9).

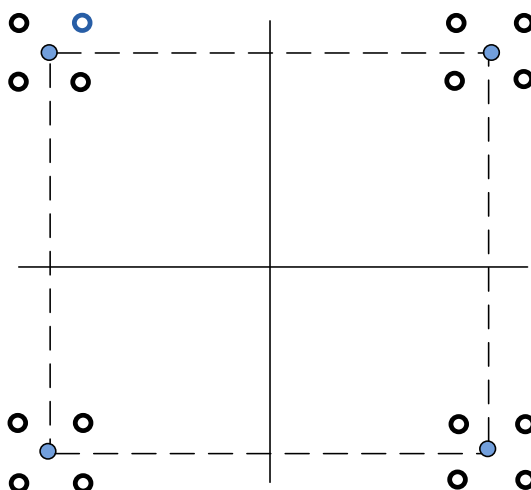


Рис. 1.9. Сигнальное созвездие QPSK при наличии МСИ

В порядке обобщения рассмотренного материала на рисунке 1.10 приведены сигнальное созвездие и глаз-диаграмма BPSK.

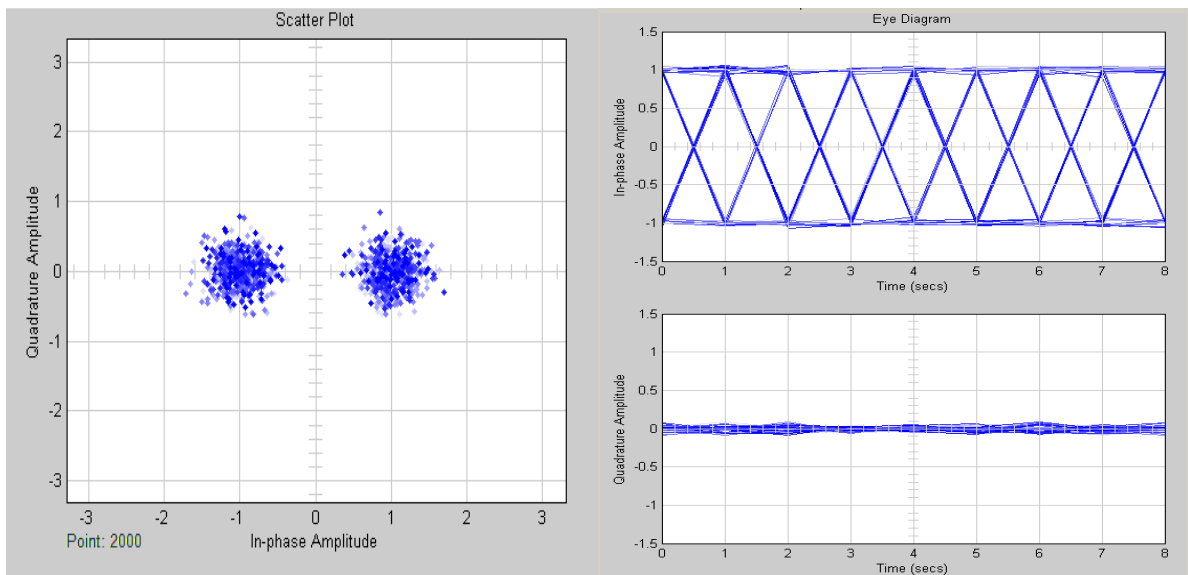


Рис. 1.10. Сигнальное созвездие и глаз–диаграмма BPSK при наличии помех в канале

1.1.4. Диаграмма фазовых переходов

Для характеристики свойств модулированных сигналов используют *диаграммы фазовых переходов*, которые представляют собой графические изображения траекторий перемещений сигнальных точек в сигнальном созвездии при переходе от одного передаваемого канального символа к другому (рис. 1.11).

На этой диаграмме сигнальная точка с координатами (1,1) расположена на линии, образующей угол 45° с осями координат и соответствует передаче символов 1 и 1 в квадратурных каналах модулятора. Если следующей парой символов будет (0,1), которой соответствует угол 135° , то из точки (1,1) к точке (0,1) можно провести стрелку, характеризующую переход фазы радиосигнала от значения 45° к значению 135° .

Полезность такой диаграммы можно проиллюстрировать на следующем примере. Из рисунка 1.12 б видно, что четыре фазовые траектории проходят через начало координат. Например, переход из точки сигнального созвездия (1, 1) в точку (0, 0) означает изменение мгновенной фазы высокочастотного несущего колебания на 180° . Так как на выходе модулятора обычно устанавливают узкополосный высокочастотный фильтр, то такое изменение фазы сигнала сопровождается существенным изменением значений огибающей сигнала на выходе этого фильтра и, следовательно, во всей линии передачи. В цифровых системах передачи непостоянство значений огибающей радиосигнала по многим причинам является нежелательным.

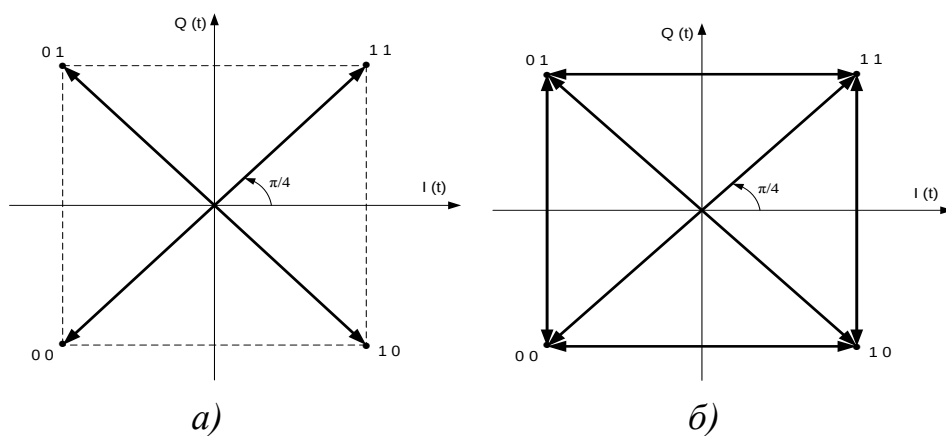


Рис. 1.11. Сигнальное созвездие (а) и диаграмма фазовых переходов (б) QPSK

Рисунок 1.12 иллюстрирует диаграммы фазовых переходов QPSK и $\pi/4$ DQPSK при отсутствии помех, полученные методом моделирования в MATLAB/Simulink.

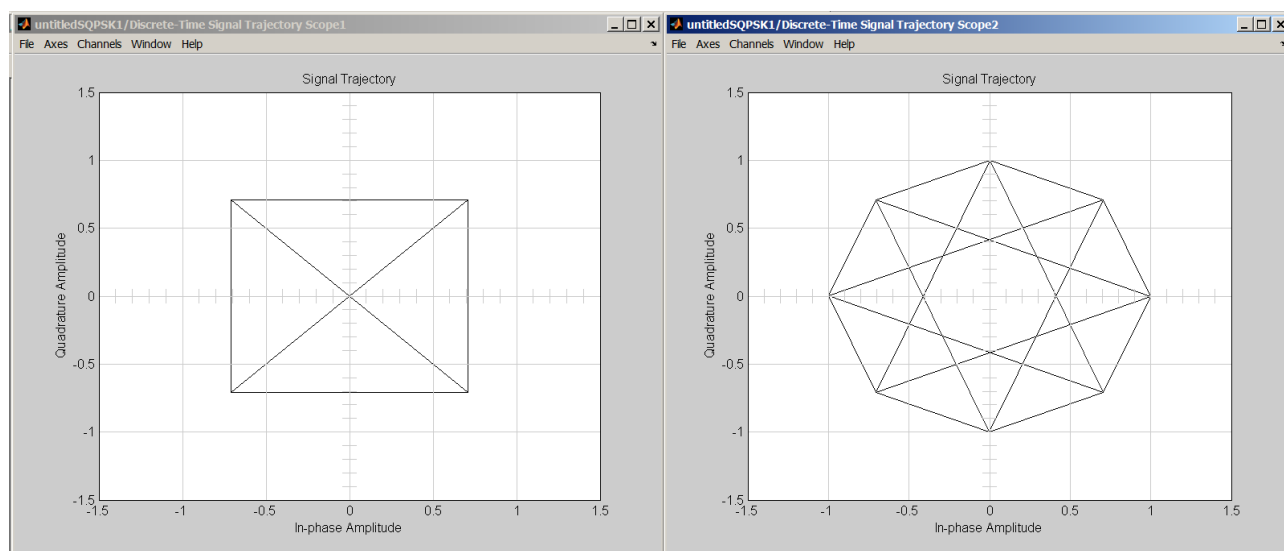


Рис. 1.12. Диаграммы фазовых переходов QPSK и $\pi/4$ DQPSK

На рисунке 1.13 показана диаграмма фазовых переходов QPSK при наличии межсимвольной интерференции.

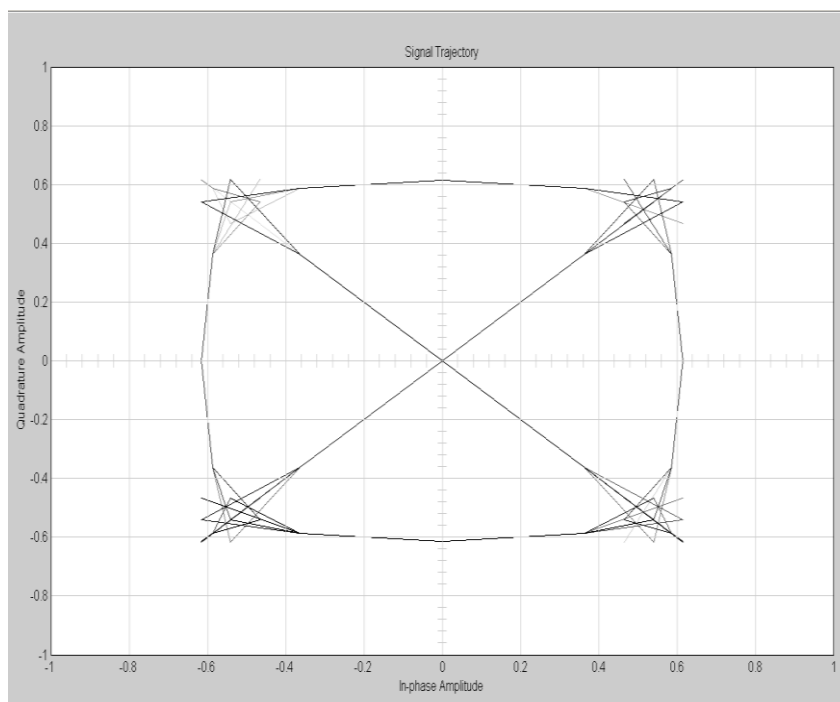
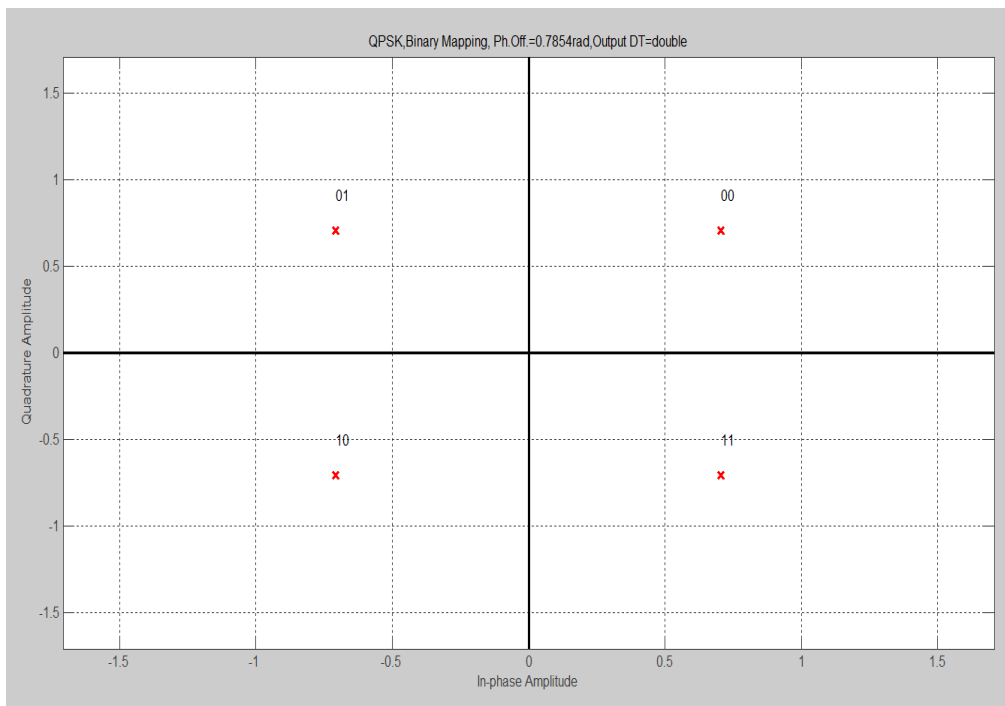


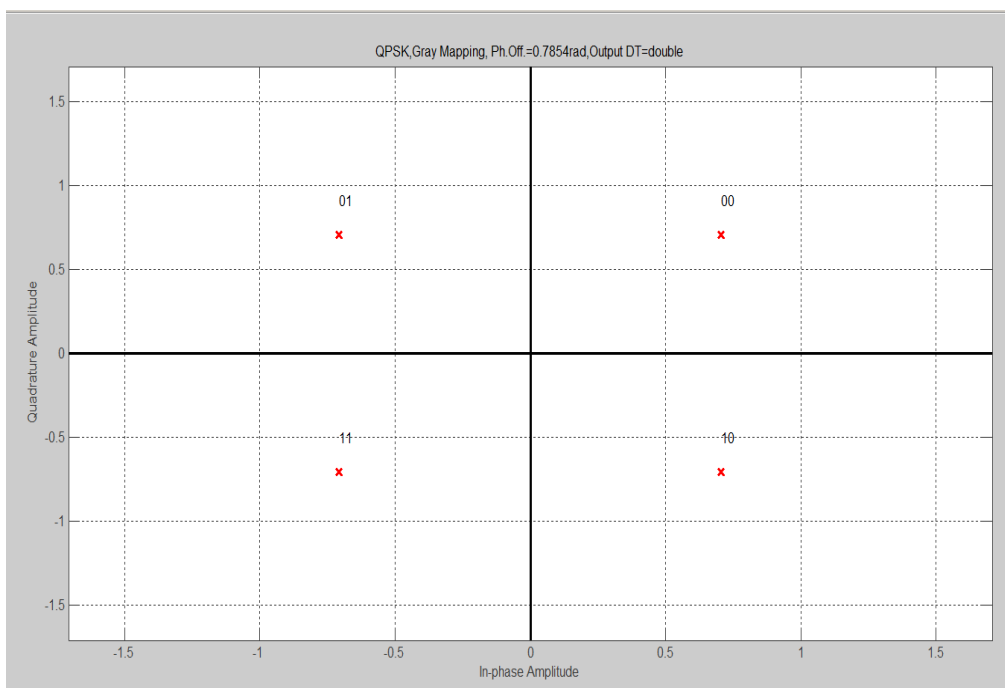
Рис. 1.13. Диаграмма фазовых переходов QPSK при наличии межсимвольной интерференции

Отметим еще одну важную особенность сигнального созвездия QPSK.

В многопозиционных ансамблях сигналов каждый символ содержит информацию о нескольких двоичных символах. Для минимизации вероятности ошибки на двоичный символ необходимо оптимизировать манипуляционный код, сопоставляющий каждому символу сигнала набор двоичных информационных символов. Ошибки чаще происходят за счет переходов в области соседних символов. Поэтому информационные комбинации, соответствующие соседним символам, должны отличаться наименьшим числом двоичных символов. Этому условию удовлетворяет код Грея (рис. 1.14 б). Здесь переход из любой сигнальной точки в соседнюю приводит к ошибке только в одном разряде двухразрядной кодовой комбинации. *Естественно, что сигнальные точки, разнесенные на π , соответствуют комбинациям двоичных символов, отличающимся в двух разрядах.*



а)



б)

Рис. 1.14. Сигнальные созвездия QPSK

1.1.5. Джиттер и вандер цифровых сигналов

Термины «джиттер» (*jitter* – дрожание) и «вандер» (*wander* – странствие) в общем случае отражают нежелательные нарушения временной периодичности некоторых событий. На системном уровне в ЦСП в качестве

таких событий обычно рассматриваются моменты прибытия информационных пакетов в узел назначения.

На самом низком, физическом уровне эти термины отражают фазовые помехи, которые приводят к сравнительно быстрым или медленным колебаниям фронтов импульсов относительно их идеальных положений. Частотная граница между джиттером и вандером (граничная частота между быстрым и медленным дрожанием фронтов импульсов) обычно принимается равной 10 Гц.

Один из вариантов джиттера для периодического сигнала поясняется диаграммами на рисунке 1.15.

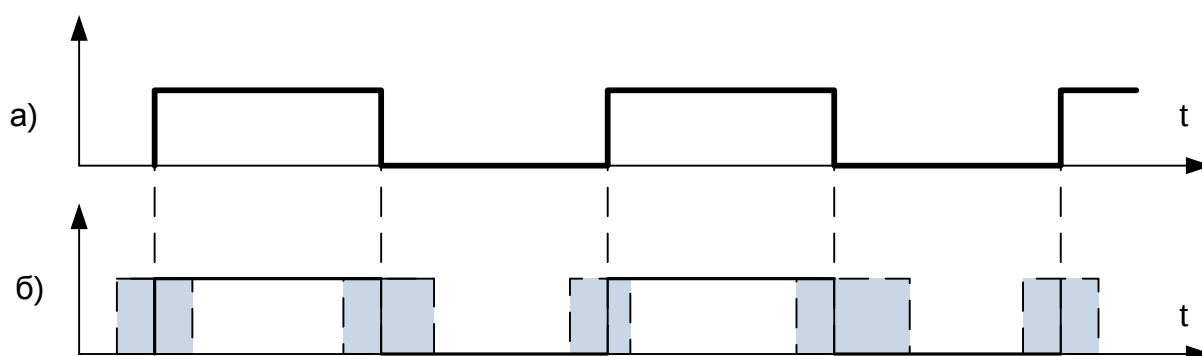


Рис. 1.15. Проявления джиттера и вандера:

а – осциллограмма сигнала без помех; *б* – осциллограмма сигнала при наличии джиттера или (и) вандера

Различают кодонезависимый и кодозависимый джиттер (вандер).

Кодонезависимый джиттер (вандер) не связан с характером передаваемых данных и может быть обусловлен многими факторами, среди которых:

- наводки от низкочастотного магнитного поля;
- пульсации напряжения питания источника или (и) приемника сигналов;
- механическая вибрация, при которой некоторые радиоэлектронные компоненты (например, некоторые керамические конденсаторы) могут работать как преобразователи механической энергии в электрическую.

Джиттер в данном случае проявляется в том, что длительности импульсов на выходе приёмника периодически изменяются в сторону увеличения и уменьшения относительно идеальных положений.

Кодозависимый джиттер обусловлен неодинаковыми условиями распространения по линии связи различных последовательностей битов.

1.1.6. Измерение джиттера в ЦСП

Джиттер можно определить как «отклонение показательных участков» сигнала от их требуемого положения во времени. Для цифрового сигнала «показательными участками» являются точки перехода (пересечения), которые определяются по самим данным или по дополнительному сигналу синхронизации. Джиттер вызывается как амплитудным, так и фазовым шумом внутреннего и внешнего происхождения.

Джиттер разделяют на две категории: случайный (random jitter – RJ) и регулярный (deterministic jitter – DJ). Случайный джиттер обусловлен шумовыми процессами (в основном тепловым шумом).

Регулярный джиттер вызывается перекрестными помехами от излучаемых сигналов и влиянием дисперсии при распространении сигнала. Общий джиттер состоит из детерминированной и случайной составляющих.

Детерминированная компонента подсчитывается путем сложения максимальных величин задержек и опережений, вносимых всеми источниками детерминированного джиттера.

Случайная компонента вычисляется определением функции Гаусса и оценкой ее среднего значения и среднеквадратичного отклонения.

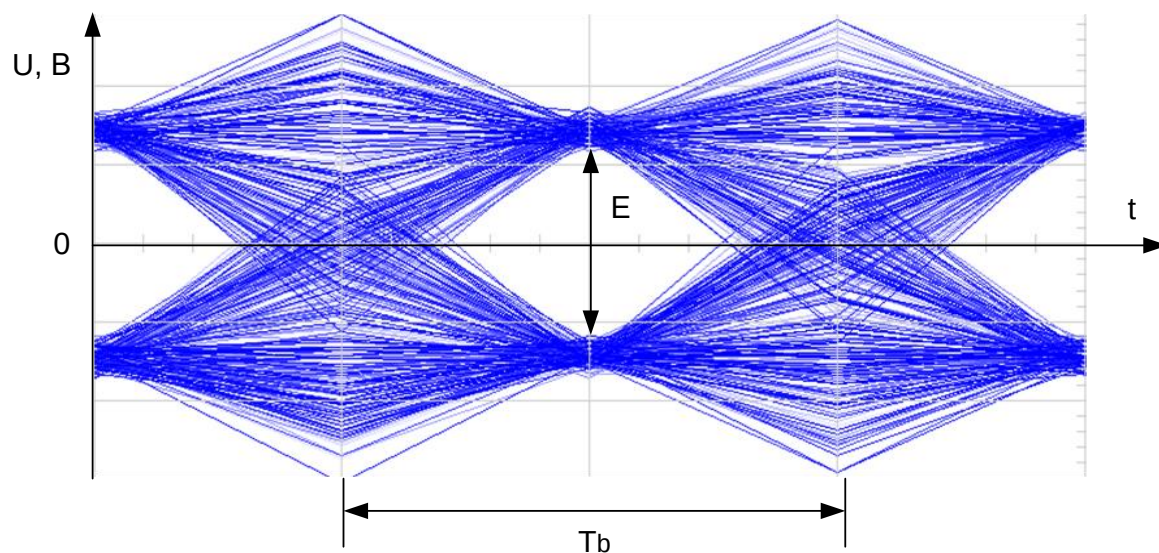
Способы определения джиттера простираются от глазковых диаграмм и гистограмм во временной области до анализа его частотных характеристик, и представлений, позволяющих разделить случайную и детерминированную составляющие полного амплитудного джиттера.

Самым легким и интуитивно понятным способом является оценка джиттера по глаз–диаграмме. Если момент принятия решения в регенераторе соответствует центру глаз–диаграммы, где сигнал достигает своего максимума или минимума, то вероятность ошибки очень мала.

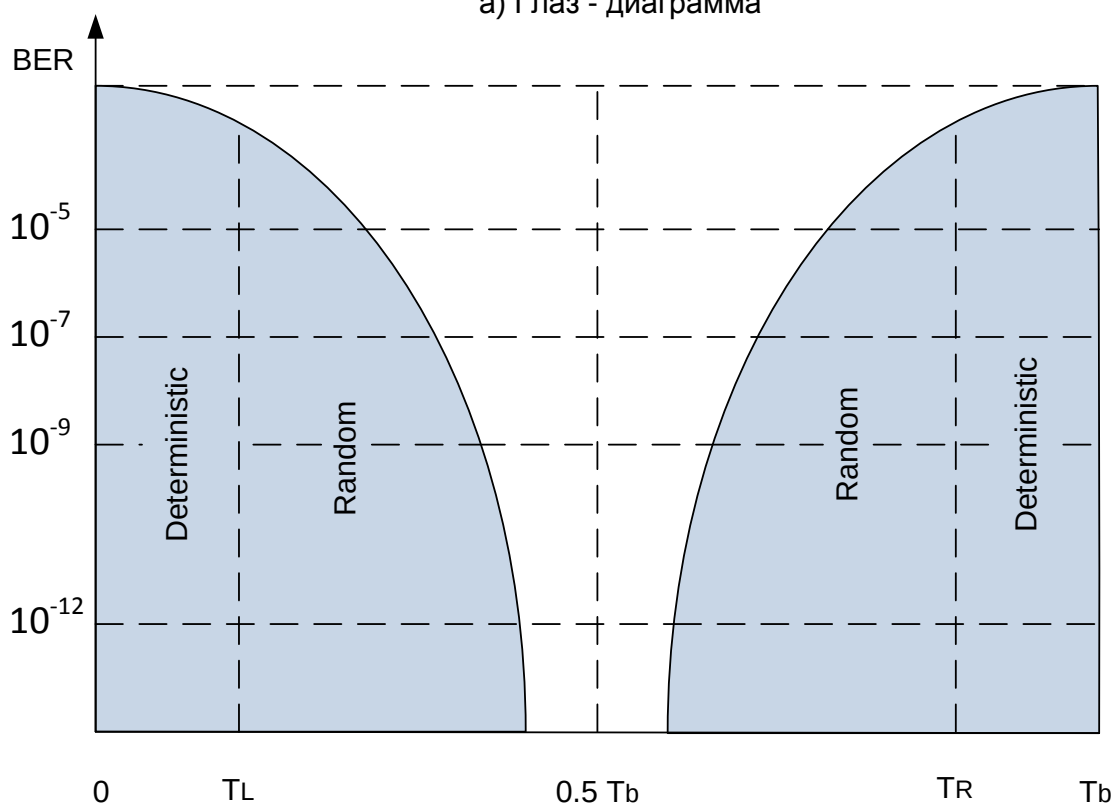
Расстояние между ближайшими пересечениями нулевого уровня называется единичным интервалом (Unit interval).

Рассмотрим способ оценки джиттера, заключающийся в построении U – образной кривой (bathtub curve). Она представляет собой график зависимости частоты ошибок по битам (BER) от положения пробной точки на единичном интервале (UI). Обычно график представляют в логарифмическом масштабе, чтобы уменьшить наклон кривой (рис. 1.16).

Когда пробная точка находится возле точки перехода, то $BER = 0,5$ (равная вероятность правильного или неправильного определения бита). В этой области кривая довольно плоская и здесь преобладает механизм детерминированного джиттера. По мере продвижения пробной точки к центру единичного интервала BER стремительно уменьшается. В этой области преобладает механизм случайного джиттера и BER определяется среднеквадратическим отклонением гауссовских процессов, определяющих случайный джиттер. Ожидается, что оптимальным положением пробной точки будет центр единичного интервала.



а) Глаз - диаграмма



б) U – образная кривая

Рис. 1.16. U – образная кривая

Стороны U – образной кривой показывают границы безошибочной передачи при выбранном допустимом значении BER. Чем дальше находится левая сторона кривой от правой стороны при определенном BER, тем больше запас помехоустойчивости к джиттеру у системы связи. Соответственно, чем ближе расположены кривые, тем меньше запас помехоустойчивости.

1.1.7. Инструмент BERTool

BERTool – инструмент СКМ МАТЛАБ в стиле графического интерфейса пользователя (ГИП). Инструмент позволяет строить зависимости вероятности ошибок от отношения сигнал/шум для выбранной конфигурации канала связи. При активизации отображается окно диалога, которое в порядке сверху вниз включает поля:

- список отображаемых графиков. В нем в поле DER Data Set можно задать легенду каждого графика. По умолчанию легенды просто нумеруются;
- поле закладок. Можно выбирать закладки: Theoretical (Теоретическая), Se-mianalytic (Полуаналитическая), Monte Carlo (в стиле Монте Карло). Каждая закладка включает поля выбора параметров канала связи. Закладка Theoretical (Теоретическая) включает поля:
 - E_b/N_0 – диапазон изменения отношения сигнал/шум в логарифмических единицах (дБ);
 - Channel type – список выбора типа канала. Список включает AWGN, Binary Symmetric, Multipath Rayleigh Fading, Multipath Rician Fading;
 - Modulation type – список выбора типа модуляции;
 - Modulation order – список выбора порядка модуляции;
 - Demodulation type – ключи выбора типа демодуляции (когерентная или некогерентная);
 - Differential encoding – флаг использования дифференциального декодирования;
 - Channel coding – переключатели использования помехоустойчивого кодека. Возможны: None (кодека нет), Convolution (сверточный кодек), Block (блочный кодек);
 - Synchronization – выбор типа синхронизации.

Если сделан определенный выбор, то может открыться окно для ввода параметров, присущих только сделанному выбору.

После задания всех параметров нажатие кнопки Plot (Рисовать) приводит к отображению графика в отдельном окне. Для сравнения можно в одном окне отображать графики для разных конфигураций (рис. 1.17).

Рассмотрим примеры использования BERTool.

Первый пример (рис. 1.18 а) – использование FSK. Расчеты выполнены для режимов с различными кодеками:

- FSK без помехоустойчивого кодека;
- FSK с кодом Рида–Соломона.

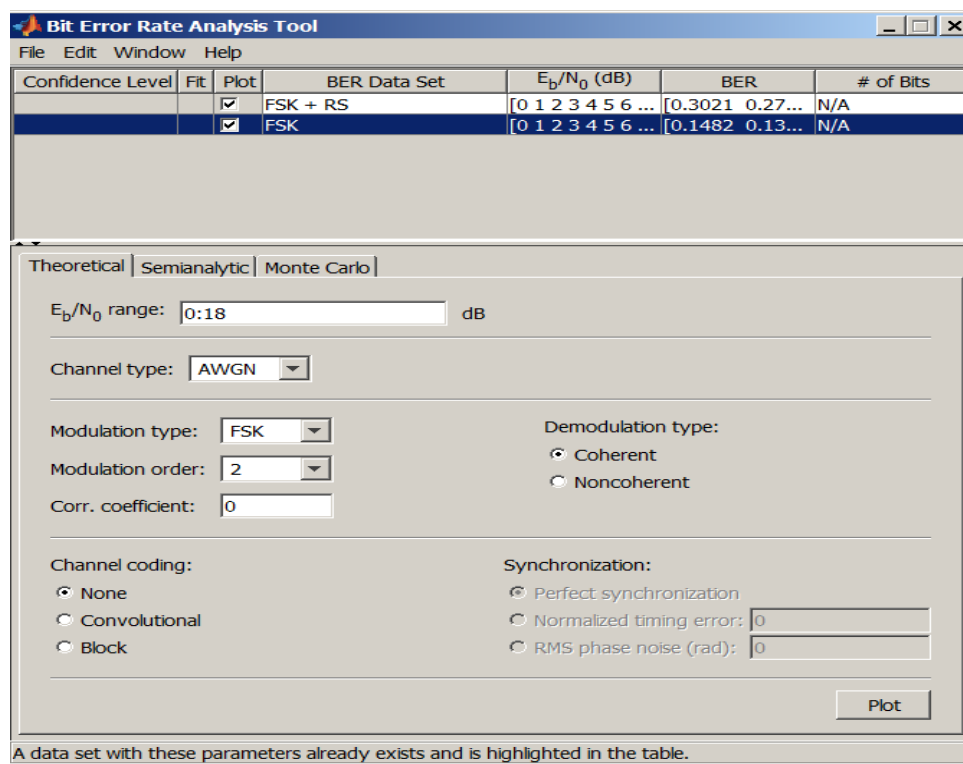


Рис. 1.17. Окно BERTool

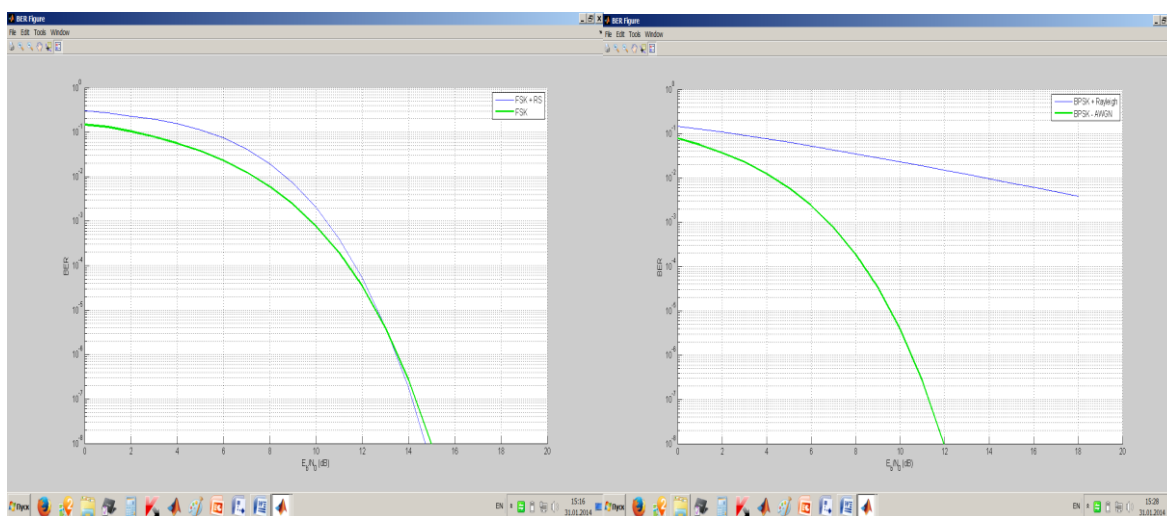


Рис. 1.18. Примеры использования BERTool

Второй пример (рис. 1.18 б) – использование фазовой модуляции BPSK в каналах с федингом Релея и AWGN

2. Выполнение лабораторной работы

Часть 1. Изучение принципов построения цифровых систем радиосвязи

1. Запустите СКМ MATLAB.
2. Откройте модель цифровой системы радиосвязи (рис. 1.1). С целью упрощения рисунка в схеме модели не показаны элементы сопряжения блоков.

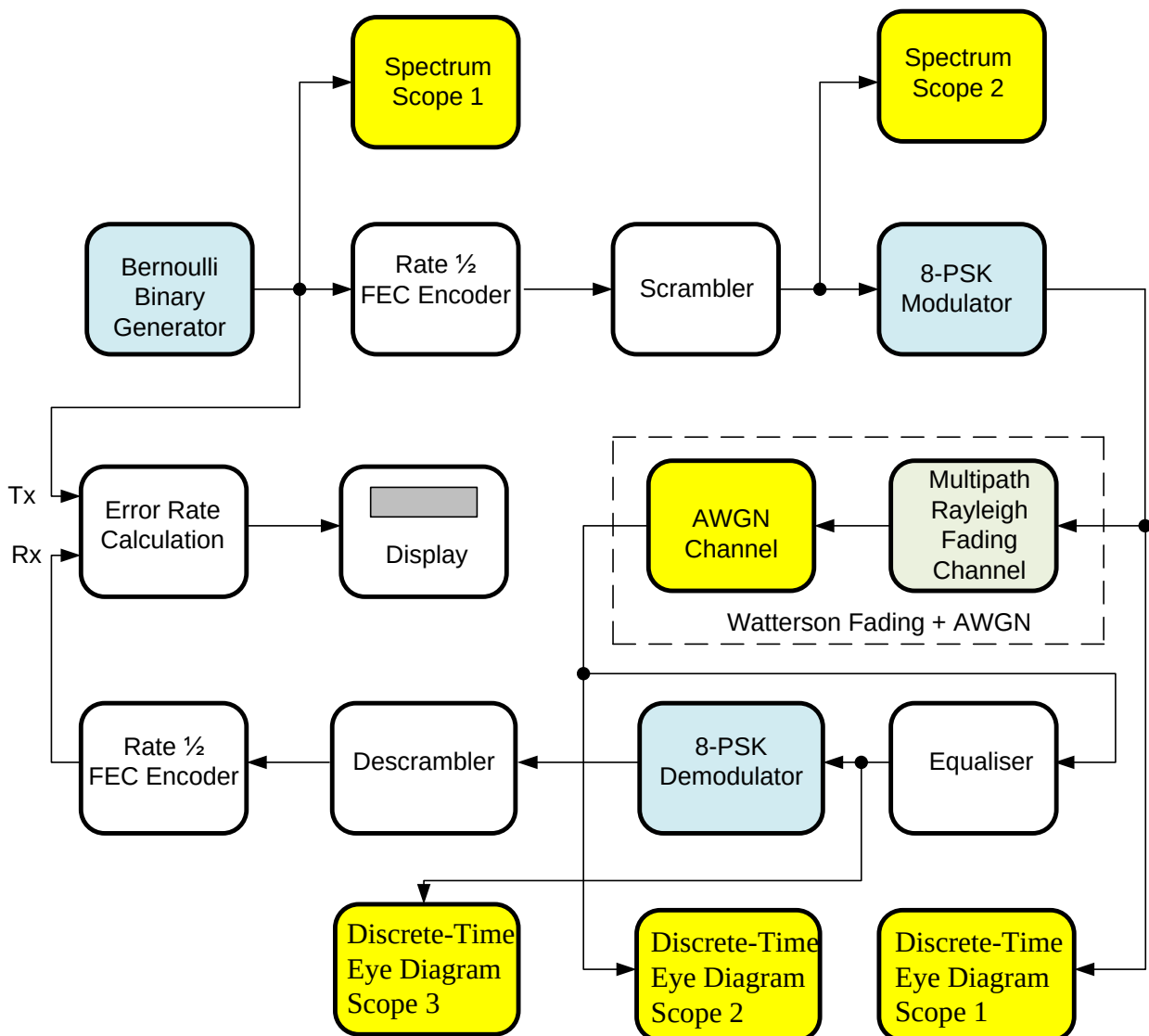


Рис. 1.1. Схема имитационной модели ЦСРС

Принцип работы лабораторной модели

Цифровой сигнал в формате NRZ, генерируемый блоком *Bernoulli Binary Generator*, поступает на вход блока *FEC Encoder* и затем на вход блока *Scrambler*.

Кроме скремблирования блок *Scrambler* реализует операции формирования 8-ми уровневого модулирующего сигнала и предмодуляционной фильтрации. В модели используется модулятор 8-PSK.

Блок *Watterson Fading + AWGN* имитирует радиоканал с белым шумом и рэлеевскими замираниями. На стороне приема установлены блоки *Equaliser* (эквалайзер) и *FEC Decoder*.

Для анализа работы модели используются анализаторы спектра, блоки наблюдения глаз-диаграмм и сигнальных созвездий (расположены в блоке *Equaliser*).

Для оценки коэффициента ошибок используется блок *Error Rate Calculation* и дисплей.

3. Откройте окно параметров блока *Watterson Fading + AWGN* и при помощи переключателя *Manual Switch* установите режим работы модели без замираний. Установите значение отношения сигнал/шум $E_b/N_0 = 100$ дБ в блоке *AWGN Channel* (рис. 1.2).

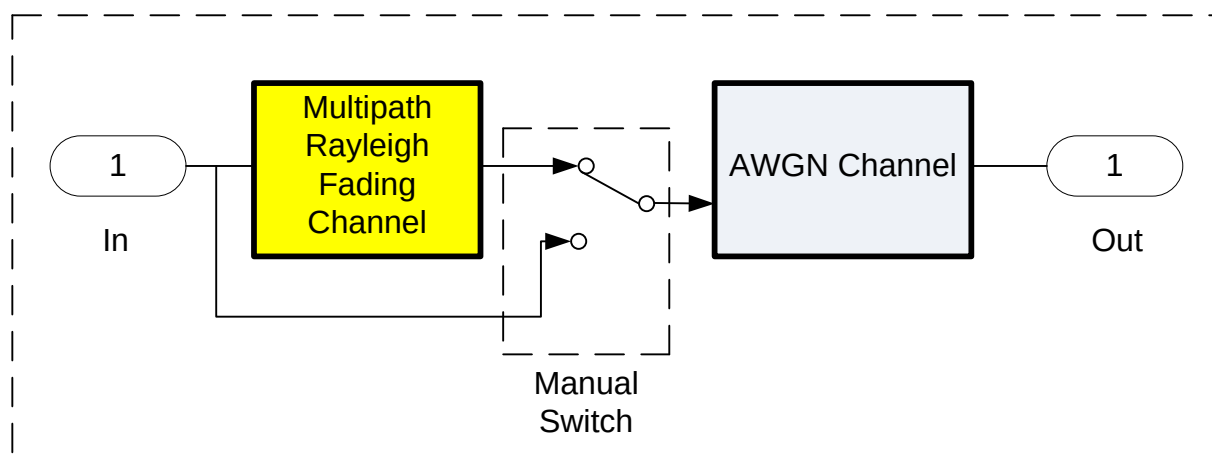
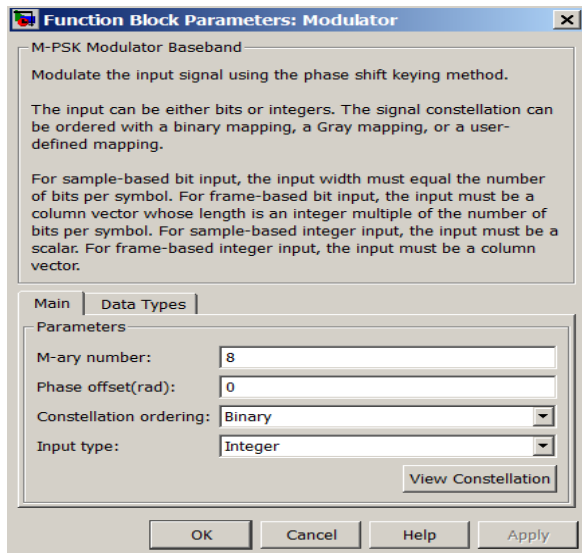


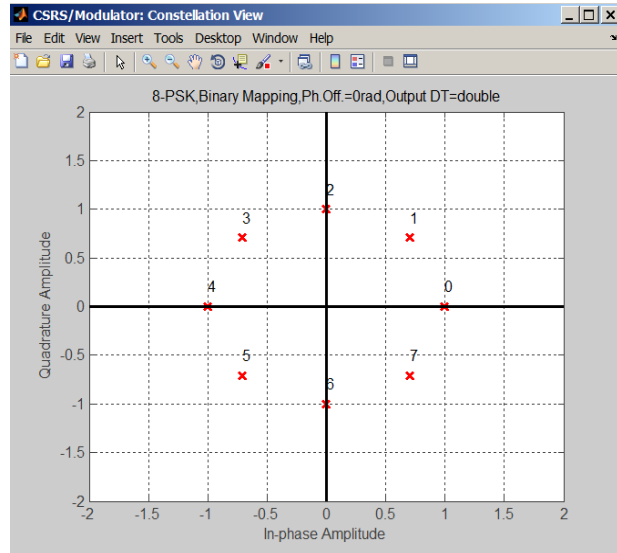
Рис. 1.2. Установка режима работы модели

4. Переведите блоки анализаторов спектра *Spectrum Scope* в режим отключения при запуске модели.
5. Запустите модель.
6. Проанализируйте сигнальные созвездия, формируемые на выходе модулятора для случаев расположения сигнальных точек в бинарном коде и коде Грея. Для этого необходимо воспользоваться функцией *View Constellation* в блоке модулятора. Пример созвездия сигнальных точек приведен на рисунке 1.3.

7. Проанализируйте глаз–диаграммы и сигнальные созвездия в контрольных точках исследуемой модели.
8. Повторите измерения для случая $E_b / N_0 = 20$ дБ.
9. Зафиксируйте значение коэффициента ошибок.
10. Сформулируйте выводы по проделанным измерениям.



а)



б)

Рис. 1.3. Окно параметров блока модулятора (а)
и сигнальное созвездие (б)

11. Установите режим работы модели с замираниями при отношении сигнал/шум в канале AWGN $E_b / N_0 = 100$ дБ.
12. Повторите измерения п.п. 5–10.
13. Установите блок *Rayleigh Fading* в режим открытия при запуске модели.
14. Установите следующие параметры блока *Rayleigh Fading* (рис. 1.4).

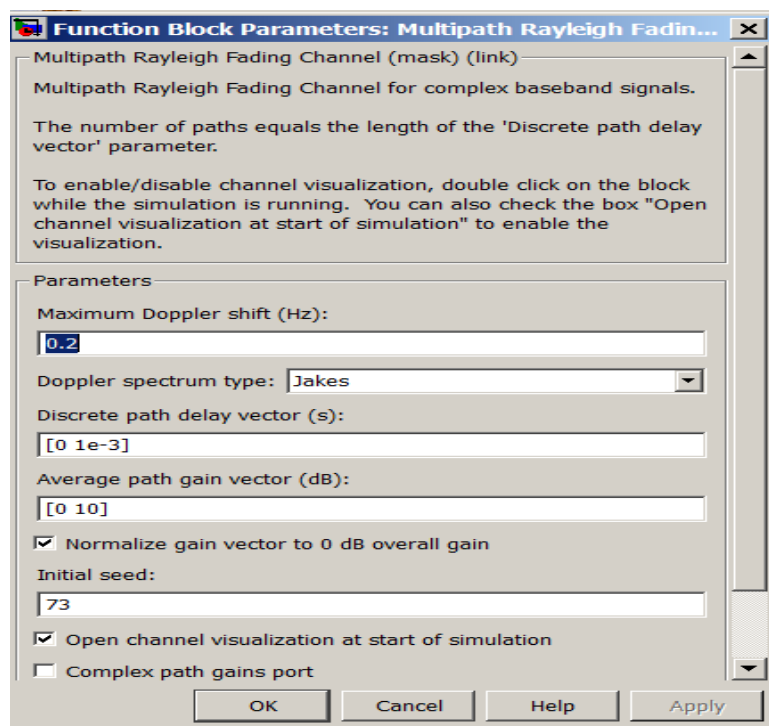
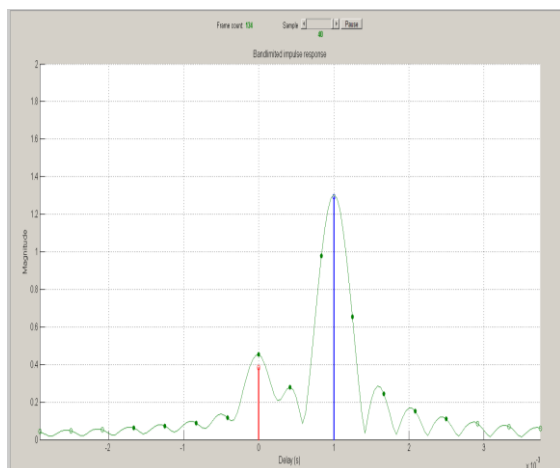
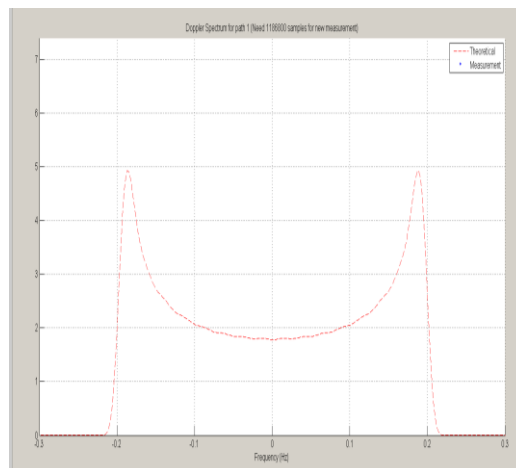


Рис. 1.4. Параметры блока *Rayleigh Fading*

15. Установите режим работы модели без замираний при отношении сигнал/шум в канале AWGN $E_b/N_0 = 20$ дБ.
16. Запустите модель и произведите оценку коэффициента ошибок.
17. Установите режим работы модели с замираниями при отношении сигнал/шум в канале AWGN $E_b/N_0 = 20$ дБ.
18. Запустите модель.
19. Пронаблюдайте и зарисуйте в отчет импульсную характеристику канала, доплеровский спектр и частотную характеристику канала с замираниями (рис. 1.5–1.6).
20. Произведите оценку коэффициента ошибок.
21. Сформулируйте выводы по результатам измерения.
22. Используя инструмент BERTool, проанализируйте теоретические зависимости коэффициента ошибок от отношения сигнал/шум в канале AWGN без помехоустойчивого кодирования, в канале с замираниями Рэлея и в канале AWGN при наличии помехоустойчивого кодирования (сверточный код) (рис. 1.7).



а)



б)

Рис. 1.5. Импульсная характеристика канала с замираниями (а) и доплеровский спектр (б)

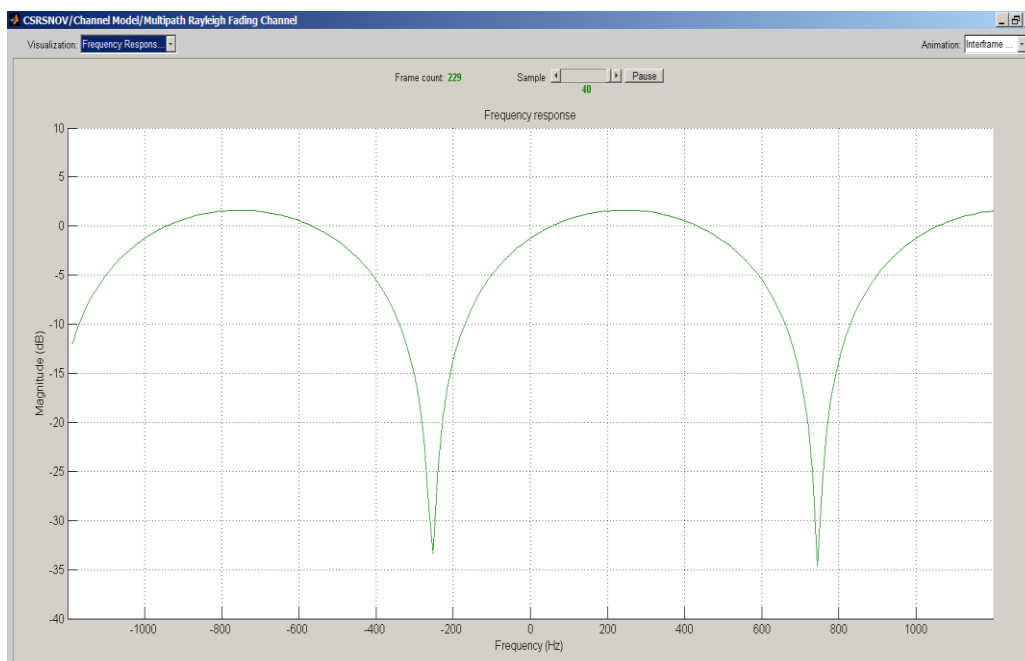


Рис. 1.6. Частотная характеристика канала с замираниями

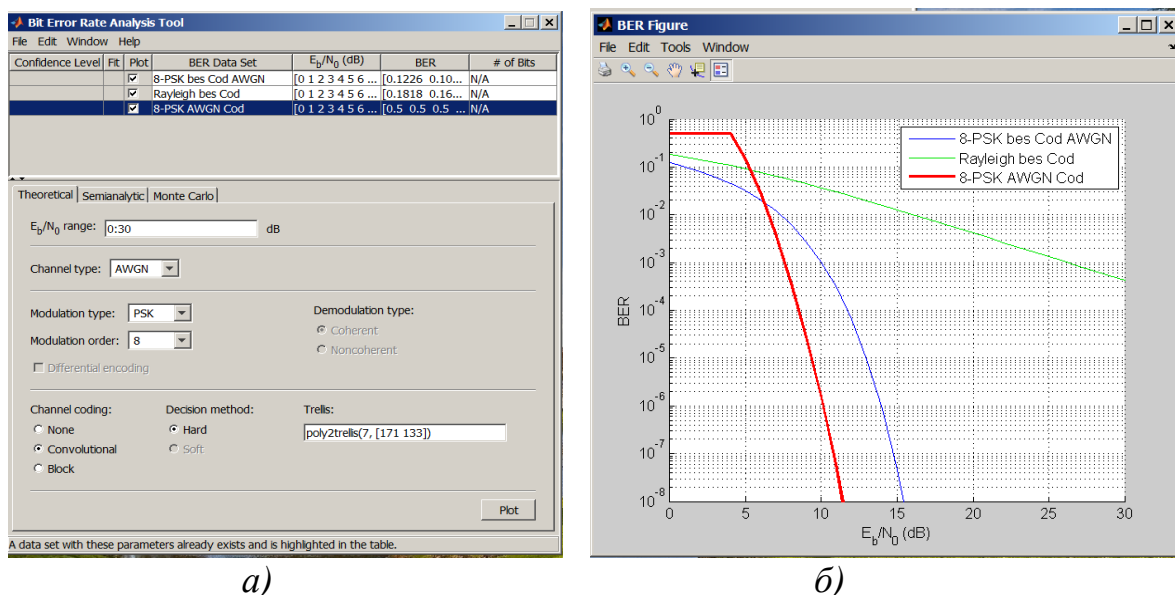


Рис. 1.7. Окно BERTool (a) и результат расчета (б)

23. Переведите блоки наблюдения глаз–диаграмм, сигнальных созвездий и блок *Rayleigh Fading* в ждущий режим запуска.
24. Установите блоки анализаторов спектра в режим открытия при запуске модели.
25. Запустите модель.
26. Пронаблюдайте спектры сигналов на выходе модулятора и выходе скремблера при равновероятных символах на выходе генератора и определите ширину спектров по первым нулям.
27. Определите длительность тактовых интервалов сигналов и сравните полученный результат с параметрами блока *Bernoulli Binary Generator*.
28. Установите в блоке *Bernoulli Binary Generator* значение $p(0) = 0.0$ и наблюдайте спектры сигналов на выходе генератора и выходе скремблера.
29. Проведите оценку полученных результатов и сформулируйте выводы по проведенному анализу.
30. Закройте модель.

Часть 2. Оценка помехоустойчивости ЦСПС в канале с МСИ и белым шумом

1. Соберите модель ЦСПС для проведения исследований (рис. 2.1).

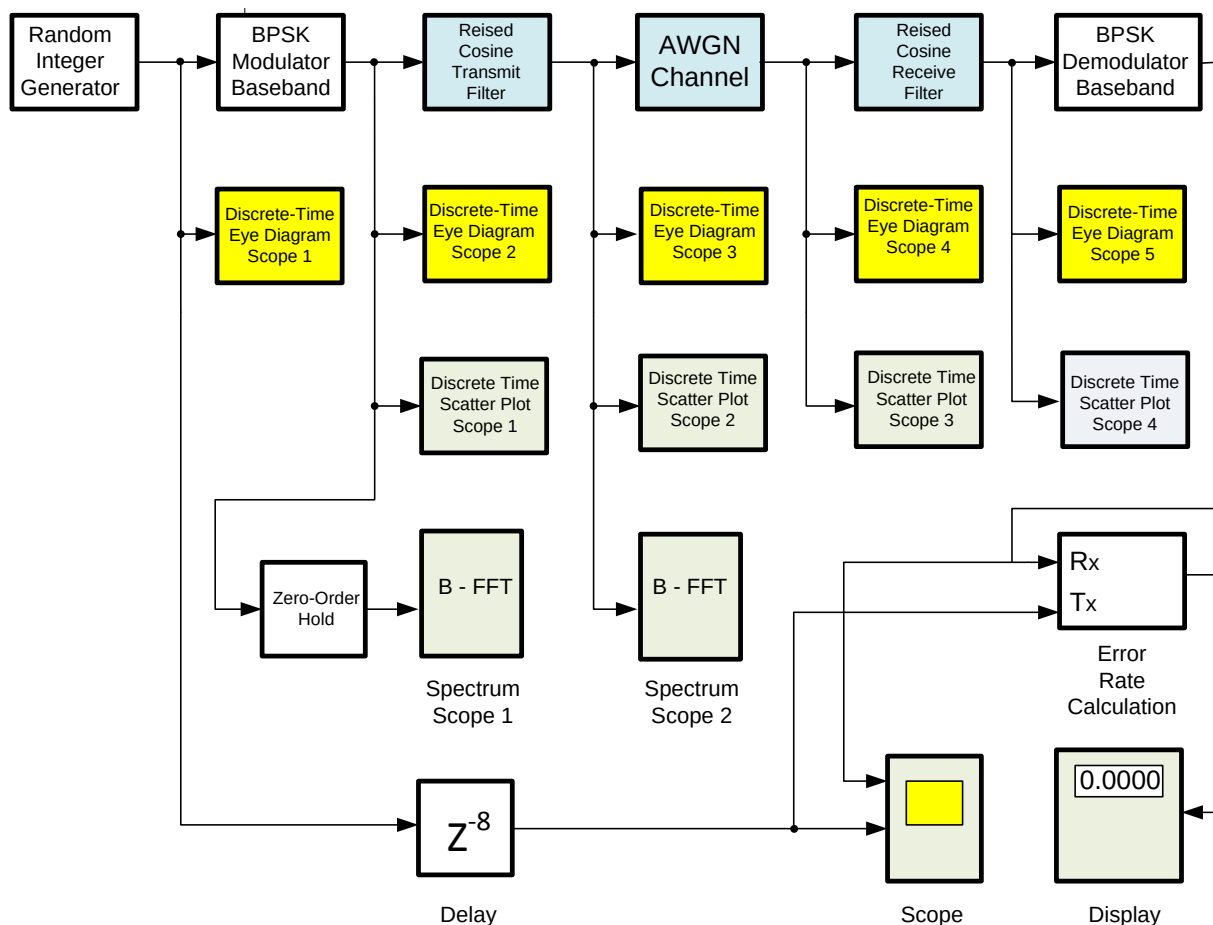


Рис. 2.1. Схема модели ЦСПС

В модели используются следующие блоки:

Блок генератора случайных чисел (**Random Integer Generator**):
Communications Blockset–Comm Sources.

Блок фильтра типа «приподнятый косинус» (**Raised Cosine Transmit Filter**):
Communications Blockset–Comm Filters.

Блок (**Zero-Order Hold**): *Simulink – Discrete.*

Блоки анализаторов спектра (**Spectrum Scope**): *Simulink–Signal Processing–Spectrum Scope.*

Блок наблюдения «глаз–диаграмм» (**Discrete Time Eye Diagram Scope**):
Communications Blockset–Comm Sinks.

Блок наблюдения сигнальных созвездий (**Discrete Time Scatter Plot Scope**):
Communications Blockset–Comm Sinks.

Блок модулятора (**BPSK Modulator Baseband**): *Communications Blockset–Modulation–Digital Dasedand Modulation.*

Блок демодулятора (**BPSK Demodulator Baseband**): *Communications Blockset–Modulation–Digital Dasedand Modulation.*

Счетчик ошибок (**Error Rate Calculation**): *Communications Blockset–Comm Sinks.*

Дисплей (**Dipla**: *Simulink–Discrete–Sinks*).

Блок задержки Z^{-1} : *Signal Proctssig–Signal Operations.*

Осциллограф (**Scope**): *Simulink–Discrete–Sinks.*

Блок **AWGN Channel**: *Communications Blockset–Channels.*

Формирование спектра сигнала производится при помощи формирующих фильтров с характеристикой корень из приподнятого косинуса *Raised Cosine Transmit Filter* и *Raised Cosine Receive Filter*.

Параметры блоков модели приведены в таблице 2.1

Табл. 2.1. Параметры блоков модели

Блок Random Integer Generator	
M-ary number	2
Initial seed	37
Sample time	4
Frame based outputs	флажок
Output data type	double
Блок BPSK Modulator Baseband	
<i>Main:</i>	
Phase offset (rad)	pi
Data Types	double
Блок BPSK Demodulator Baseband	
<i>Main:</i>	
Phase offset (rad)	pi
Decision type	Hard decision
Data Types:	
Output	double
Блок Raised Cosine Transmit Filter	
Filter Type	Square Root
Group delay	4
Roll off factor	по ходу выполнения работы

Продолжение табл. 2.1

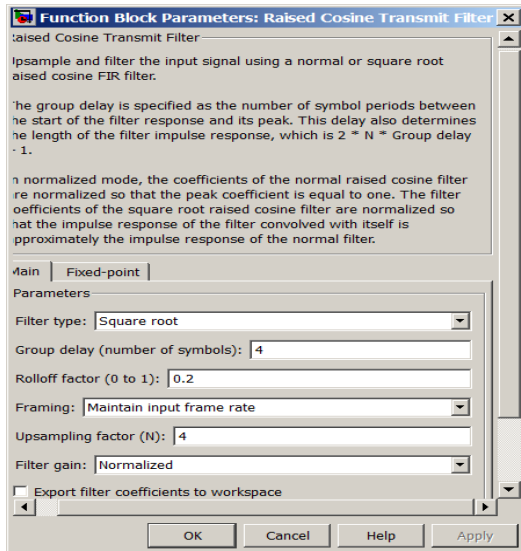
Framing	Nain tein input frame rate
Umsampling factor	4
Filter Gain	Normalised
Блок Raised Cosine Receive Filter	
Filter Type	Square Root
Group delay	4
Roll off factor	по ходу выполнения работы
Framing	Nain tein input frame rate
Output mode	Downsampling
Downsampling factor	4
Filter Gain	Normalised
Блок AWGN	
Initial seed	67
Mode	Signal to noise ratio
E_b/N_0 , дБ	по ходу выполнения работы
Symbol period	4
Блоки Discrete Time Scatter Plot	
Samples per Symbol	1
Off set	0
Points displayed	400
New poits per display	10
Блоки Spectrum Scope	
Spectrum units	dBW/Herts
Spectrum type	Two-Sided $((-F_s/2 \dots F_s/2))$
Buffer size – <i>размер буфера</i>	1024
Buffer input – <i>подтверждение необходимости буферизации входного сигнала</i>	флажок
Buffer owerlap – <i>перекрытие буфера, число значений для повторной буферизации</i>	128
Window	Hann
Window sampling	Periodic
Number of spectral averages	16

Продолжение табл. 2.1

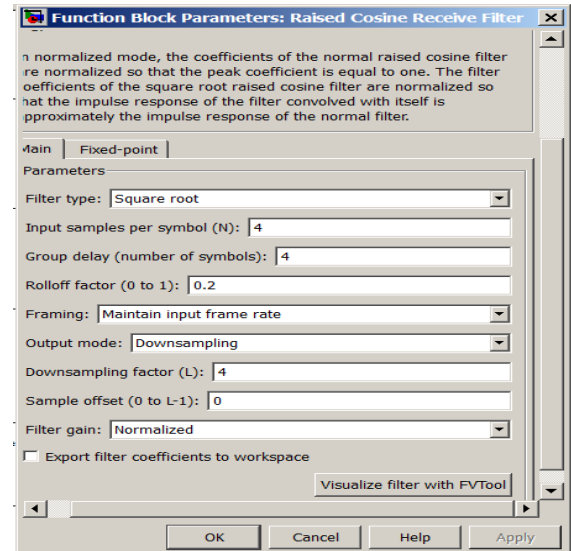
<i>Axis propereties:</i>	
Inlert sample time from input	флажок
Frequency display offset (Hz)	0
Frequency display limits	Auto
Minimum Y-limit	- 50
Maximum Y-limit	10
Y-axis label	Magnitude, dB
<i>Display Properties:</i>	
Show grid	флажок
Frame number	флажок
Open Scope at start of Simulation	флажок
Блоки Discrete Time Eye Diagram Scope	
Samples per Symbol	4
Offset (Samples)	0
Simbel per trace	1
Traces displayed	400
New traces per display	10
Блок Zero – Order Hold	
Sample – time (- 1 for inherited)	1
Блок Delay	
Delay	8
Блок Error Rate Calculation	
Receive delay	0
Computation delay	0
Computation mode	0
Output data	port
Блок Scope	
Number of axes	2
Time range	200
Tick labels	Bottom axis only
Sample time	1
Параметры модели (Simulation)	
Start time	0.0
Stop time	200 000.00
Type	Variable-step

2. Проведите оценку влияния МСИ на помехоустойчивость ЦРС, для чего:

- установите отношение E_b/N_0 в канале AWGN, равным 100 дБ;
- установите параметры блоков *Raised Cosine Transmit Filter* и *Raised Cosine Receive Filter* (рис. 2.2 и 2.3);



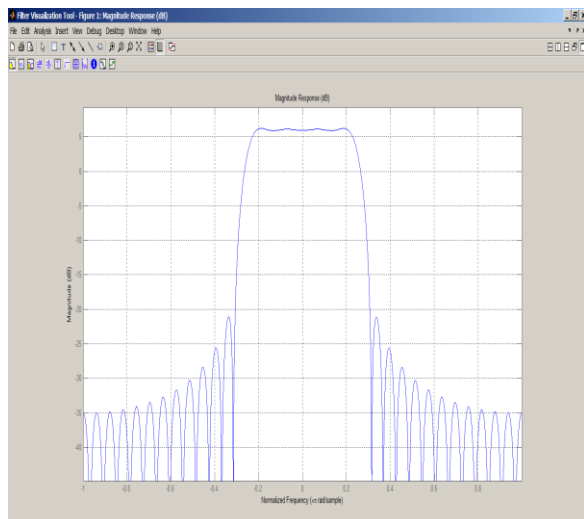
а)



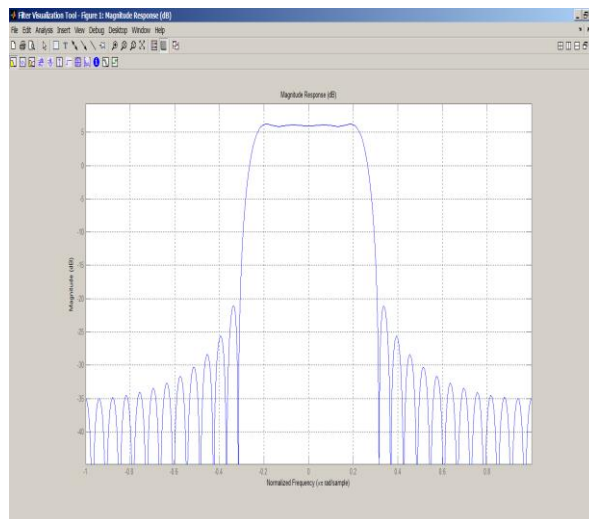
б)

Рис. 2.2. Окна настроек фильтров *Raised Cosine Transmit Filter* (а) и *Raised Cosine Receive Filter* (б)

- тип фильтра (Filter Type) – корень из приподнятого косинуса (Square Root);
 - групповая задержка, определяющая длину ИХ фильтра (Group Delay);
 - коэффициент округления (Rolloff Factor);
 - коэффициент повышения частоты дискретизации (Upsampling factor);
 - характер обработки сигнала (Input Processing) – sample based.
3. Используя функцию *Visualize filter with FVTool*, пронаблюдайте и зарисуйте в отчет по работе частотные характеристики фильтров (рис. 2.3).
 4. Установите блоки наблюдения сигнальных созвездий и наблюдения глаз – диаграмм в режим ожидания запуска.
 5. Запустите модель и проанализируйте спектры сигналов на выходе генератора и выходе фильтра *Raised Cosine Transmit Filter* (рис. 2.4).
 6. Определите ширину спектров по «первым нулям» и сравните результат с параметрами имитатора цифрового сигнала модели.

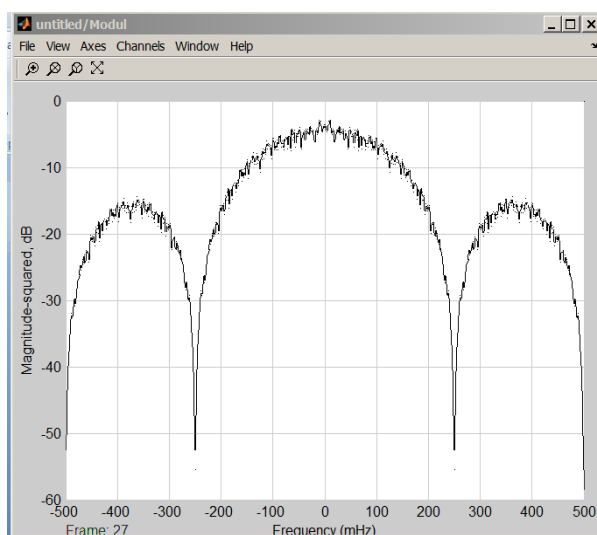


a)

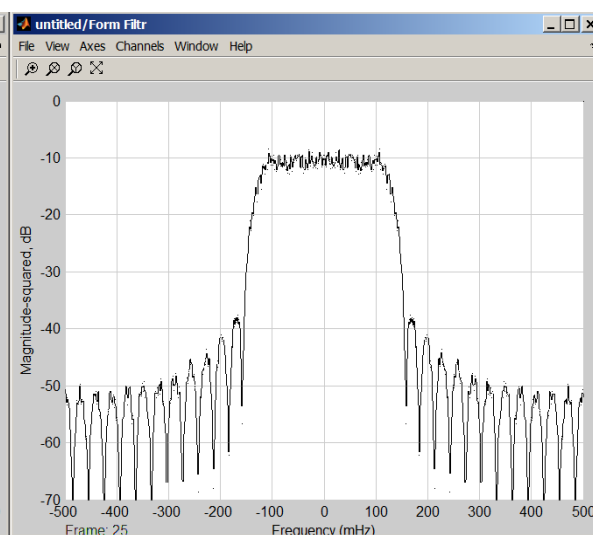


б)

Рис. 2.3. Частотные характеристики фильтров *Cosine Transmit Filter* (a) и *Raised Cosine Receive Filter* (б)



a)



б)

Рис. 2.4. Спектры сигналов на выходе генератора (a) и выходе фильтра *Cosine Transmit Filter* (б)

7. Установите блоки анализаторов спектра в режим ожидания, а блоки наблюдения глаз-диаграмм и сигнальных созвездий в режим запуска при работе модели.
8. Запустите модель и наблюдайте глаз-диаграммы и сигнальные созвездия в контрольных точках модели.
9. Объясните полученные результаты.

10. При помощи блока Scope пронаблюдайте и зарисуйте в отчет осциллограммы сигналов на выходе генератора и выходе демодулятора (рис. 2.5).

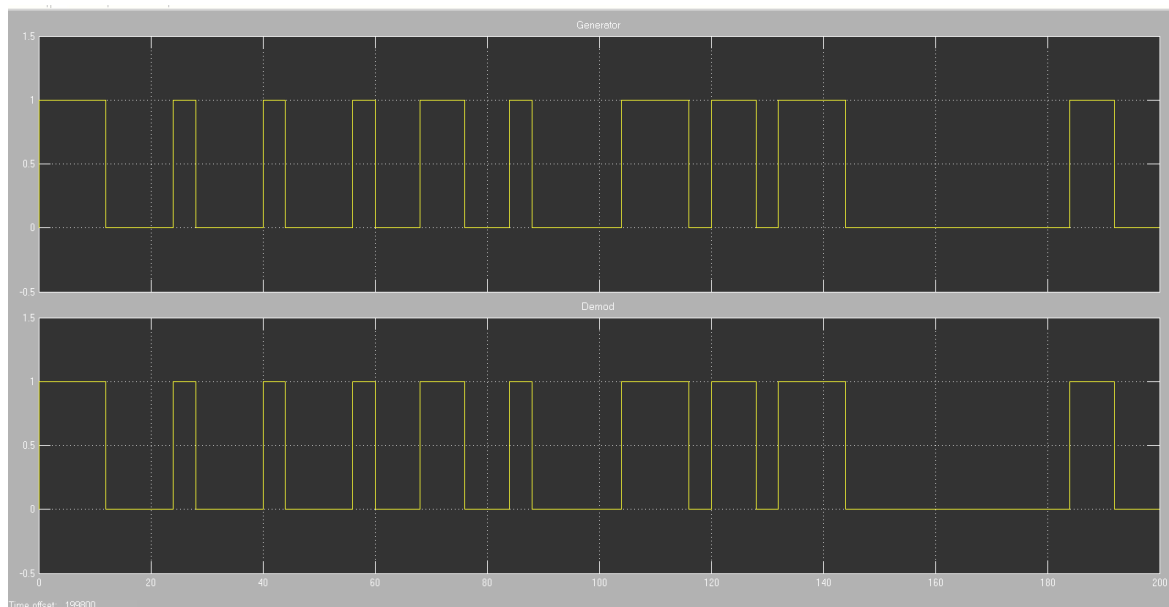


Рис. 2.5. Осциллограммы сигналов на выходе генератора и выходе демодулятора

11. Зафиксируйте полученное значение коэффициента ошибок.
12. Объясните полученные результаты.
13. Установите отношение E_b/N_0 в канале AWGN, равным 8 дБ.
14. Запустите модель.
15. Проанализируйте глаз–диаграммы и сигнальные созвездия.
16. Зафиксируйте полученное значение коэффициента ошибок.
17. Объясните полученные результаты.
18. Установите все регистраторы в режим ожидания запуска. Изменяя отношение E_b/N_0 в канале AWGN в пределах от 8.5 дБ до 16 дБ с шагом 1 дБ, снимите зависимость коэффициента ошибок от величины E_b/N_0 .
19. Результаты измерений оформить в виде таблицы и графика.
20. Установите все регистраторы (за исключением блока наблюдения глаз–диаграмм на выходе блока) *Raised Cosine Receive Filter* в режим ожидания запуска при открытии модели.
21. Изменяя отношение E_b/N_0 (блок AWGN) в пределах от 9 дБ до 16 дБ и наблюдая глаз–диаграмму на выходе блока *Raised Cosine Receive Filter*, постройте U–кривую. Пример построения показан на рис. 2.6.
22. Сформулируйте выводы по результатам измерения.
23. Закройте модель. **Модель сохранить.**

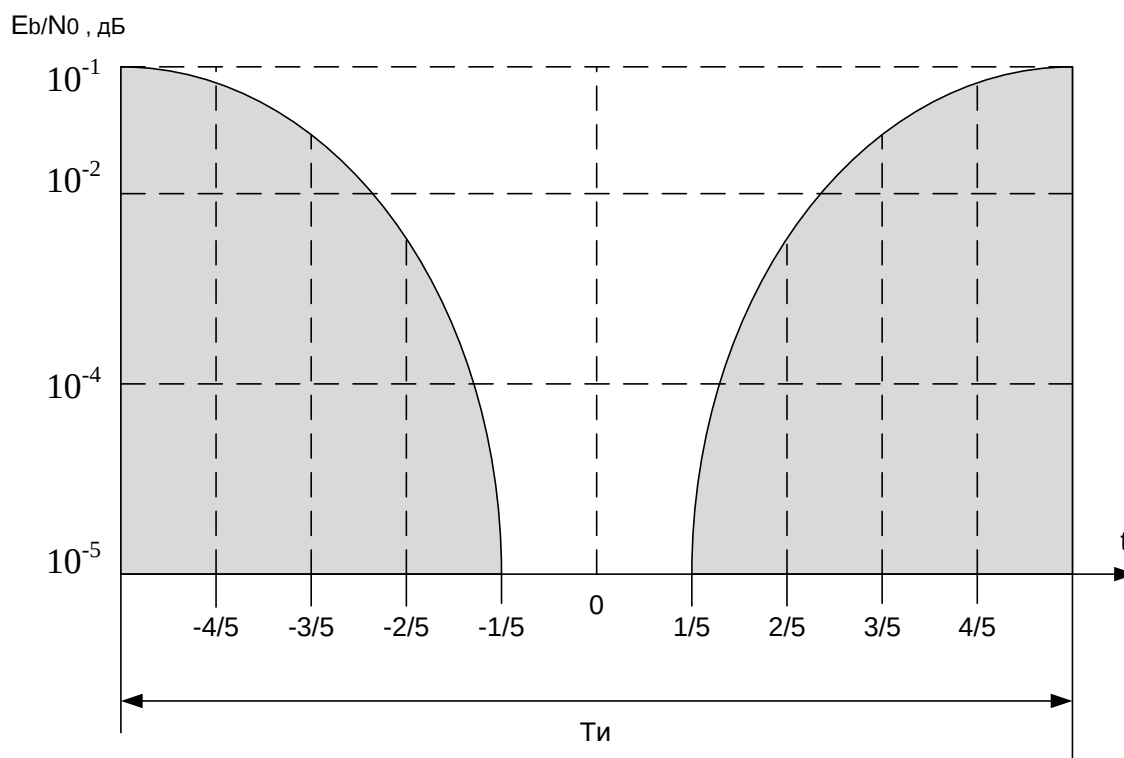


Рис. 2.6. Пример построения U-кривой

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Схемы лабораторных моделей.
2. Результаты измерений в виде таблиц и графиков.
3. Выводы по результатам выполнения работы.

Контрольные вопросы

1. Поясните назначение элементов ЦСРС.
2. С какой целью в ЦСРС применяется помехоустойчивое кодирование?
3. Поясните назначение эквалайзера.
4. Каким образом формируется сигнальное созвездие?
5. С какой целью наблюдается глаз-диаграмма?
6. Поясните принцип измерения коэффициента ошибок.
7. Каким образом изменяется глаз-диаграмма при воздействии белого шума?
8. Каким образом изменяется форма глаз-диаграммы при наличии МСИ?
9. Поясните, что понимается под диаграммой фазовых переходов.
10. Какие причины являются возникновением джиттера?
11. С какой целью строится U-кривая?
12. Поясните назначение инструмента BERTool.
13. Поясните сущность эффекта Доплера.
14. Дайте определение импульсной характеристики канала.

Лабораторная работа № 8.3

«Скремблирование цифровых сигналов»

Цель работы: изучение принципа работы скремблера и оценка эффективности скремблирования.

Подготовка к работе

По указанной литературе:

- 1) изучить методы оценки качества передачи информации в ЦСРС и принципы измерения энергетической эффективности методов модуляции;
- 2) изучить принцип работы скремблера;
- 3) подготовить бланк отчета по лабораторной работе;
- 4) подготовить ответы на контрольные вопросы.

Рекомендуемая литература

1. *Маглицкий Б.Н.* Космические и наземные системы радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2013. – 300 с.
2. *Маглицкий Б.Н.* Расчет качественных показателей цифровых радиорелейных линий : Практикум по дипломному проектированию. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2009. – 64 с.
3. *Маглицкий Б.Н.* Спектрально-эффективные методы модуляции в цифровых системах радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2009. – 120 с.

При выполнении лабораторной работы используется IBM – совместимый компьютер с процессором Pentium II и выше, операционная система Windows XP, Windows 7.

Программное обеспечение: СКМ «MATLAB/Simulink» (R2009b).

Выполнение лабораторной работы

1. Создать модель для оценки эффективности скремблирования (рис. 1).

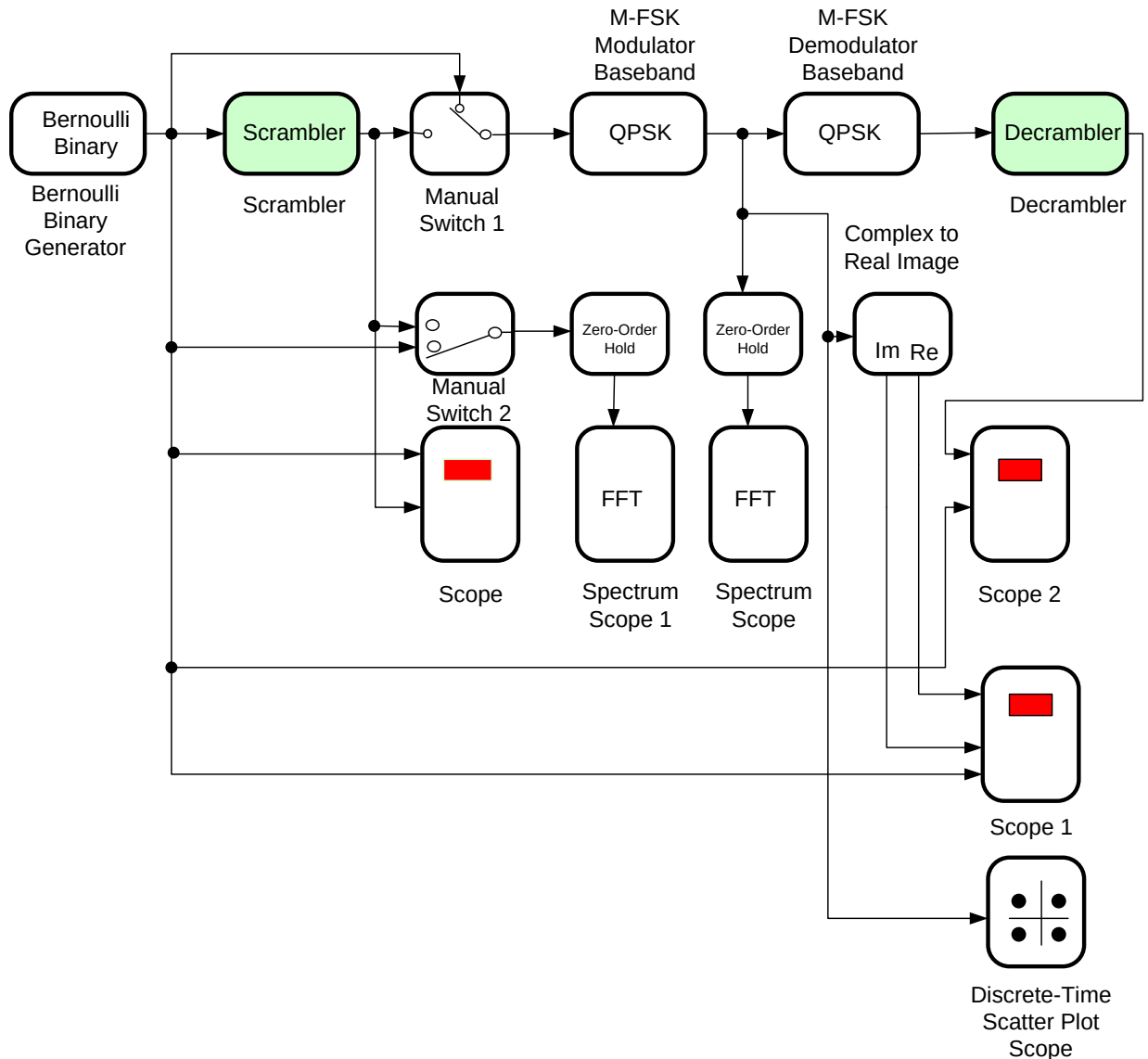


Рис. 1. Модель для анализа скремблирования

Модель содержит следующие блоки:

- имитатор цифрового сигнала (блок генератора Bernoulli Binary Generator);
- блок скремблера (Scrambler);
- блок модулятора QPSK (M-FSK Modulator Baseband);
- блок демодулятора QPSK (M-FSK Demodulator Baseband);
- блок дескремблера (Decrambler);
- блоки анализаторов спектра (Spectrum Scope);
- блоки осциллографов (Scope);
- блок для наблюдения «созвездия» сигнальных точек (Discrete Time Scatter Plot Scope);

- блок преобразования вектор – скаляр (Complex to Real Image);
- управляемые переключатели (Manual Switch).

Для нахождения блоков модели можно использовать таблицу 1.

Табл. 1. Местоположение блоков модели в библиотеке Simulink

Блоки модели	Место в библиотеке
Генератор импульсов Bernoulli Binary Generator	Communications Blockset-Random Data Sources
Скремблер Scrambler	Communications Blockset-Modulation-Sequence Operations
Дескремблер Decrambler	Communications Blockset-Modulation-Sequence Operations
Переключатель Manual Switch	Simulink-Signal Routing
Модулятор M-PSK Modulator Baseband	Communications Blockset-Modulation-PM
Демодулятор M-PSK Demodulator Baseband	Communications Blockset-Modulation-PM
Осциллограф Scope	Simulink-Sinks
Спектрограф Spectrum Scope	Signal Processing Sinks
Векторограф Discrete-Time Scatter Plot Scope	Communications Blockset-Com Sinks
Блок Zero-Order Hold	Simulink-Discrete
Блок Complex to Real-Imag	Simulink-Math Operations

При необходимости, для нахождения блоков можно использовать строку поиска (Enter search term) (рис. 2).

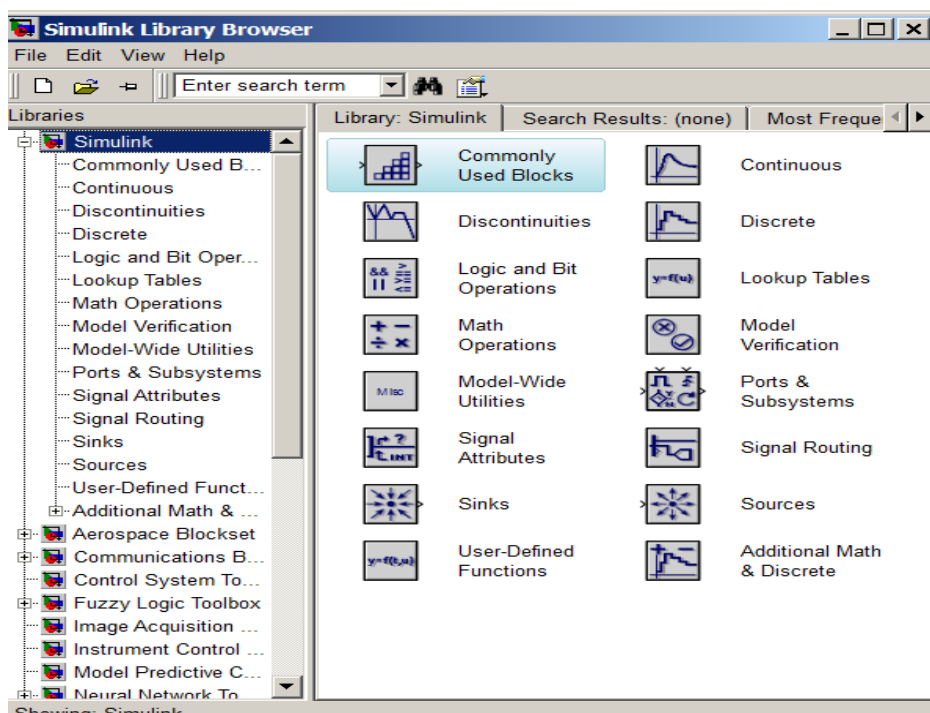


Рис. 2. Окно поиска блоков модели

2. Установить удобные для восприятия размеры и расположение блоков модели.
3. Установить требуемые параметры блоков модели (табл. 2).

Табл. 2. Параметры блоков модели

Блоки	Параметры
Генератор импульсов Bernoulli Binary Generator	
Initial seed	61
Sample time	4
Output data type	double
Скремблер Scrambler	
Calculation buse	4
Scramble polynomial	(11101)
Initial states	(0 1 2 3)
Дескремблер Decrambler	
Calculation buse	4
Scramble polynomial	(11101)
Initial states	(0 1 2 3)
Модулятор M-PSK Modulator Baseband	
M-ary number	4
Phase offset (rad)	0
Constellation ornung	Binary

Input type	Integer
Демодулятор M-PSK Demodulator Baseband	
M-ary number	4
Phase offset (rad)	0
Constellation ornung	Binary
Input type	Integer
Векторограф Discrete-Nime Scatter Plot Scope	
Samples per symbol	1
Offset (samples)	pi/8
Points Displayed	40
New points per display	10
<i>Rendering Properties:</i>	
Markers	.
Line Color	В
Color fading	флажок
Higt quality rendering	флажок
Show grid	флажок
Блок Zero-Order Hold	
Sample time	1
Блок Complex to Real-Imag	
Output	Real and Imag
Sample time (-1 for inherited)	-1
Спектрограф Spectrum Scope	
Spectrum units	dBW/Herts
Spectrum type	Two-sided ((-F _s /2....F _s /2))
Buffer Input	флажок
Buffer size	1024
Buffer overlap	0
Window	Hann
Window samples	Semmetric
Number spectral averages	16
<i>Display Properties:</i>	
Schow grid	флажок
Frame Number	флажок
Open scope at start Simulation	флажок
<i>Axes Properties:</i>	
Inherit sample time from input	флажок
Freyquency display offset (Hz)	0
Freyquency display limits	Auto
Y-axis label	Magnitude Squared, dB

4. Запустить модель.
 5. Провести анализ работы модели во временной области, для чего:
 - установить параметры моделирования (**Start** = 0.0, **Stop** = 100.0);
 - пронаблюдать и зарисовать осциллограммы сигналов на выходе генератора импульсов цифрового сигнала и на выходе скремблера при различных вероятностях нуля: $p(0) = 0.1$, $p(0) = 0.9$, $p(0) = 0.1$.
 6. Объяснить полученные результаты.
 7. Используя переключатель Manual Switch 1 пронаблюдать и зарисовать осциллограммы сигналов на выходе модулятора QPSK при отсутствии скремблирования для вероятностей $p(0) = 0.1$, $p(0) = 0.5$.
 8. Зарисовать и объяснить форму осциллограмм.
 9. Используя переключатель Manual Switch 1 пронаблюдать и зарисовать осциллограммы сигналов на выходе модулятора QPSK при наличии скремблирования для вероятностей $p(0) = 0.1$, 0.5, 0.9.
 10. Объяснить полученные результаты. Зарисовать осциллограммы.
 11. Осциллограммы, полученные по п. 4, отражают процесс формирования комплексной огибающей сигнала на выходе модулятора QPSK. Используя эти данные, составьте таблицу соответствия информационных бит уровням манипулирующих сигналов в квадратурных каналах модулятора QPSK.
 12. Пронаблюдайте «созвездие» сигнальных точек на выходе модулятора QPSK при значениях $p(0) = 0.5$ и 0.1.
 13. Зарисуйте полученные созвездия и объясните результат.
 14. Проведите оценку соответствия «созвездия» результатам по пункту 6.
 15. Сделайте выводы по результатам анализа.
 16. Проведите анализ работы модели в частотной области, для чего:
 - установите параметры моделирования (**Start** = 0.0, **Stop** = 10 000.0);
 - запустите модель;
 - установите режим работы модулятора M-PSK: QPSK ($M = 4$);
 - пронаблюдайте и зарисуйте спектрограммы на выходах генератора импульсов и выходе модулятора QPSK при вероятностях появления нуля $p(0) = 0.5$ и $p(0) = 0.0$ **при отсутствии скремблирования цифрового потока**;
 - пронаблюдайте и зарисуйте спектрограммы на выходах генератора импульсов, выходе скремблера и на выходе модулятора QPSK при вероятностях появления нуля $p(0) = 0.5$ и $p(0) = 0.0$ **при наличии скремблирования цифрового потока**.
- По спектрограммам определите, насколько «обогатилось» содержание спектра при введении скремблирования.
- Информация о длине ПСП скремблера имеется в настройках скремблера.
17. Определите уровни основных и боковых лепестков спектрограмм для случаев отсутствия и наличия скремблирования. Объясните полученные результаты.
 18. Сравните спектры сигналов на выходах скремблера и дескремблера.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Схема лабораторной модели.
2. Результаты измерений.
3. Выводы по результатам измерений.

Контрольные вопросы

1. Поясните, какими причинами обусловлена необходимость скремблирования в цифровых системах радиосвязи.
2. Изобразите и поясните характер спектра на выходе модулятора QPSK для случаев $p(0) = 0.0$ и $p(0) = 0.5$ при отсутствии скремблирования.
3. Изобразите и поясните характер спектра на выходе модулятора QPSK для случаев $p(0) = 0.0$ и $p(0) = 0.5$ при наличии скремблирования.
4. Поясните принцип работы скремблера.
5. Поясните принцип работы дескремблера.
6. Поясните зависимость характера спектра на выходе модулятора при наличии скремблирования от длины ПСП.
7. Поясните, каким образом статистические свойства цифрового сигнала сказываются на форме «созвездия».
8. Какие параметры цифрового сигнала, и при каких условиях могут ухудшить работу цифровой системы радиосвязи при отсутствии скремблирования?
9. В каких точках тракта передачи цифровой системы радиосвязи устанавливаются скремблер и дескремблер?

Лабораторная работа № 8.4

«Исследование методов модуляции в системах сотовой связи стандарта GSM»

Цель работы: изучение принципов модуляции FSK, MSK и GMSK; анализ спектральной эффективности FSK, MSK и GMSK; измерение помехоустойчивости FSK, MSK и GMSK.

Подготовка к работе

По указанной литературе:

- 1) изучить принципы модуляции FSK, MSK и GMSK;
- 2) подготовить бланк отчета по лабораторной работе;
- 3) подготовить ответы на контрольные вопросы.

Рекомендуемая литература

1. *Маглицкий Б.Н.* Космические и наземные системы радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2013. – 300 с.
2. *Маглицкий Б.Н.* Спектрально-эффективные методы модуляции в цифровых системах радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2009. – 120 с.
3. *Носов В.И., Дроздов Н.В., Тимошук Р.С.* Моделирование систем связи в среде MATLAB : Учебное пособие. – Новосибирск: СибГУТИ, 2007. – 178 с.

При выполнении лабораторной работы используется IBM – совместимый компьютер с процессором Pentium II и выше, операционная система Windows XP, Windows 7.

Программное обеспечение: СКМ «MATLAB/Simulink» (R2009b).

Выполнение лабораторной работы

1. Запустить программу MATLAB.
2. Собрать модель для исследования модуляторов MSK и GMSK (рис. 1).

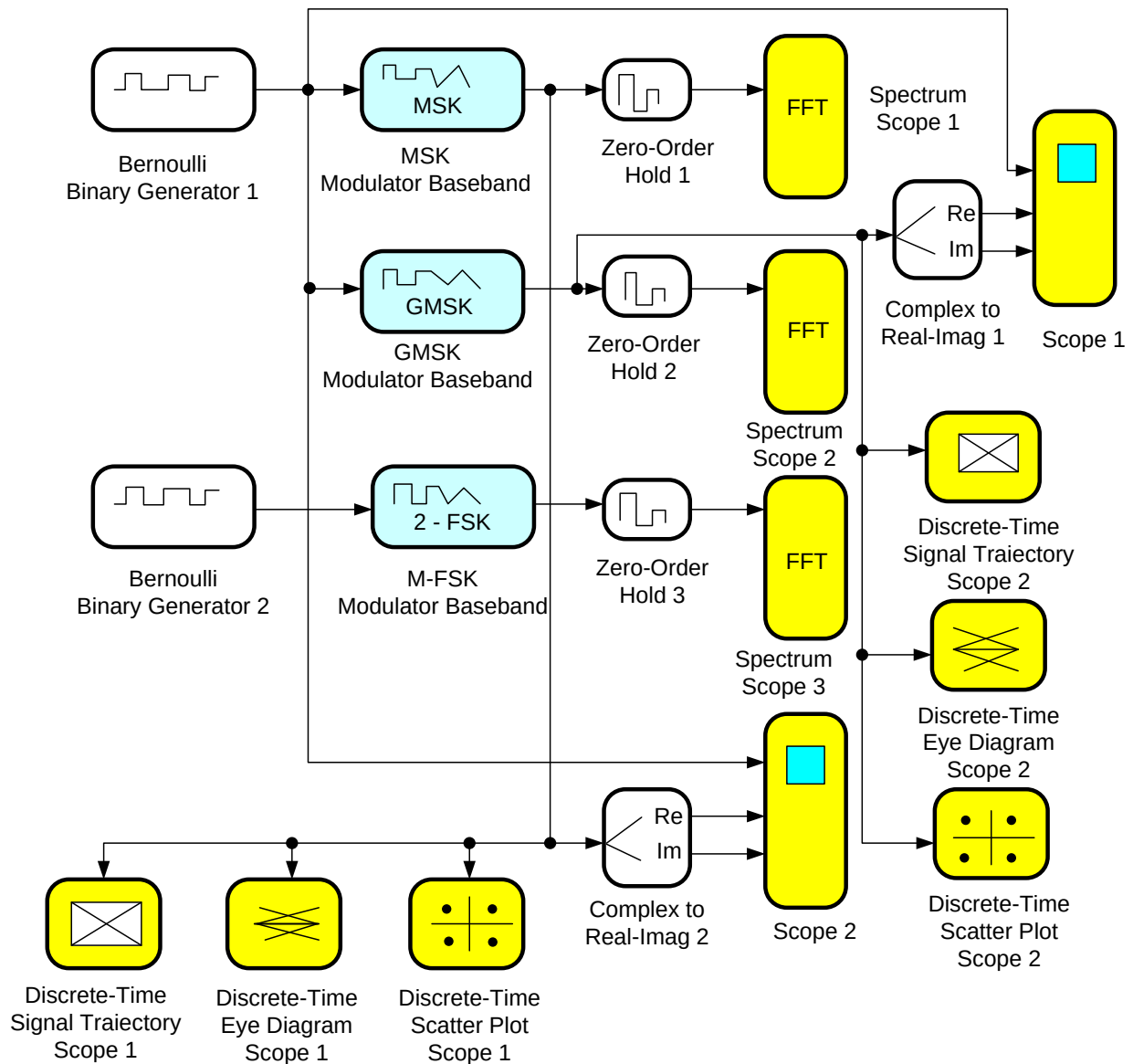


Рис. 1. Модель для исследования модуляторов MSK и GMSK

При составлении модели использовать блоки библиотеки Simulink:

Bernoulli Binary Generator: Communication Blockset–Comm Sources–Data Sources;

MSK Modulator Baseband: Communication Blockset–Modulation–Digital Baseband Modulation;

GMSK Modulator Baseband: Communication Blockset–Modulation–Digital Baseband Modulation;

M-FSK Modulator Baseband: Communication Blockset–Modulation–Digital Baseband Modulation;

Zero-Order Hold: Simulink–Discrete;

Spectrum Scope: Simulink: DSP Blockset–Spectrum Scope;

Complex to Real – Imag: Simulink–Math Operation;

Scope: Simulink–Sinks–Scope;

Discrete-Time Signal Trajectory Scope: Communication Blockset–Comm Sinks;

Discrete-Time Eye Diagram Scope: Communication Blockset Comm Sinks;

Discrete-Time Scatter Plot Scope: Communication Blockset–Comm Sinks.

3. Произвести настройку блоков модели согласно таблице 1.

Табл. 1. Параметры блоков модели

Bernoulli Binary Generator 1 (Имитатор ЦС – генератор случайного сигнала в формате NRZ)	
Probability of zero	0.5
Initial seed – номер ПСП	61
Simple time	4
Output data type	double
Bernoulli Binary Generator 2	
Probability of zero	0.5
Initial seed – номер ПСП	61
Simple time	1
Frame based outputs	флажок
Samples per frame – дискретизация выходного сигнала	1
Output data type	double
Модулятор MSK (MSK Modulator Baseband)	
Input type	Bit
Phase offset (rad)	π
Samples per Symbol	8
Output data type	double
Модулятор GMSK (GMSK Modulator Baseband)	
Input type	Bit
BT product	0.5
Pulse length (symbol intervals)	4
Symbol prehistory	1
Samples per Symbol	8
Output data type	double

Продолжение табл. 1

Модулятор М-FSK (M-FSK Modulator Baseband)	
M-ary number	2
Input type	Integer
Frequency separation (Hz)	4
Symbol set ordering	Binary
Phase continuity	Continuos
Sample per Symbol	17
Output data type	double
Анализатор спектра (Spectrum Scope)	
Spectrum units	dbW/Hertz
Spectrum type	Two-sided ((- $F_s/2 \dots F_s/2$))
Buffer size	1024
Buffer input	флажок
Buffer overlap	64
Window	Hann
Number of spectral averages	16
Блоки Discrete Time Signal Trajectory Scope	
Samples per symbol	8
Symbols displayed	40
New symbols per display	10
Блоки Discrete Time Eye Diagram Scope	
Samples per symbol	8
Offset (samples)	0
Symbols per trace	400
New traces per display	10
Блоки Discrete Time Scatter Plot Scope	
Samples per symbol	1
Offset (samples)	0
Points displayed	400
New points per display	10
Параметры модели (Simulation)	
Start time	0.0
Stop time	10 000
Type	Variable-step

4. Исследование формирования огибающей спектра на выходе модуляторов MSK и GMSK:

- 1) отмените включение при запуске модели для блоков **Spectrum Scope**, **Time Signal Trajectory Scope**, **Discrete Time Eye Diagram Scope** и **Discrete Time Scatter Plot Scope**, соответственно убрав флажки на вкладках параметров блоков: **Open Scope at start of simulation**;
- 2) запустите модель;
- 3) открыв окно Scope, зарисовать и проанализировать осциллограммы в контрольных точках модулятора MSK;
- 4) открыв окно Scope, зарисовать и проанализировать осциллограммы в контрольных точках модулятора GMSK при значениях параметра $BT = 0.1; 0.5$ и 1.0 ;
- 5) закройте модель.

5. Исследование спектральной эффективности FSK, MSK и GMSK:

- 1) установите флажки для **Open Scope at start of simulation** всех анализаторов спектра;
- 2) задайте значение $BT = 0.5$ для модулятора **GMSK**;
- 3) запустите модель;
- 4) проанализируйте и зарисуйте спектры сигналов на выходах модуляторов FSK, MSK и GMSK;
- 5) задайте значения $BT = 0.1; 0.5$ и 1.0 для модулятора **GMSK** и проведите исследование изменения характера спектра **GMSK**;
- 6) проведите анализ спектров FSK, MSK и GMSK при значениях $p(0) = 0.1$ и 0.8 ;
- 7) зарисуйте спектры в отчет по лабораторной работе;
- 8) рассчитайте спектральную эффективность FSK и MSK при $p(0) = 0.5$;
- 9) рассчитайте спектральную эффективность GMSK при $p(0) = 0.5$ и значениях параметра $BT = 0.1; 0.5$ и 1.0 ;
- 10) закройте модель.

6. Исследование глаз-диаграмм сигналов MSK и GMSK:

- 1) установите флажки для **Open Scope at start of simulation** для блоков **Discrete Time Eye Diagram Scope**;
- 2) запустите модель;
- 3) проанализируйте и зарисуйте глаз-диаграммы для $p(0) = 0.5$ и значения $BT = 0.5$ модулятора GMSK;
- 4) проанализируйте и зарисуйте глаз-диаграммы для значений $p(0) = 0.1$ и 0.9 ;
- 5) проанализируйте изменения глаз-диаграммы GMSK при значениях $BT = 0.3$ и 1.0 ;
- 6) закройте модель.

7. Исследование сигнальных созвездий MSK и GMSK:

- 1) установите флажки для **Open Scope at start of simulation** для блоков **Discrete Time Signal Trajectory Scope**;
- 2) запустите модель;
- 3) проанализируйте и зарисуйте созвездия сигнальных точек в отчет по работе;
- 4) закройте модель.

8. Исследование фазовых переходов для сигналов MSK и GMSK:

- 1) установите флажки для **Open Scope at start of simulation** для блоков **Discrete Time Scatter Plot Scope**;
- 2) запустите модель;
- 3) проанализируйте и зарисуйте полученные диаграммы;
- 4) закройте модель.

9. Сравнительный анализ помехоустойчивости FSK, MSK и GMSK в канале с AWGN:

- 1) собрать схему модели, приведенную на рисунке 2;
рекомендуется при этом использовать элементы модели рисунка 1;
- 2) установить параметры блоков модели (табл. 2);
- 3) изменяя отношение E_b/N_0 в пределах 0...6 дБ, провести анализ помехоустойчивости методов модуляции FSK, MSK и GMSK;
- 4) полученные результаты оформить в виде таблицы;
- 5) проанализировать полученные результаты;
- 6) закрыть окно модели. **Модель сохранить.**

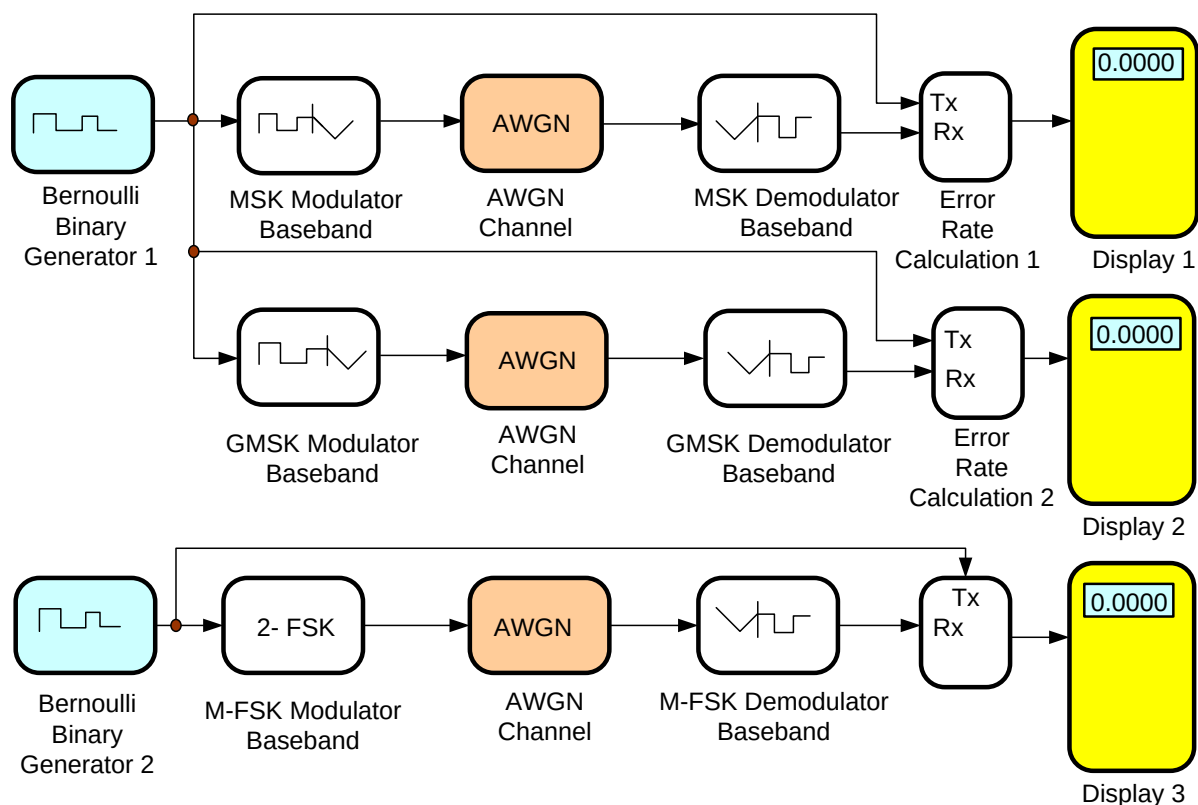


Рис. 2. Модель для анализа помехоустойчивости FSK, MSK и GMSK

Табл. 2. Параметры блоков модели

Канал с MSK	
Bernoulli Binary Generator	
Probability of zero	0.5
Initial seed – номер ПСП	61
Simple time – период двоичных символов	1
Output data type	double
Модулятор MSK (MSK Modulator Baseband)	
Input type	Bit
Phase offset (rad)	0
Samples per Symbol	4
Output data type	doudle
AWGN Channel	
Initial seed	61
Mode: Signal to noise ratio (E_b/N_0)	
(E_b/N_0) (dB)	100
Input signal power. Referenced to 1	3
Symbol period	1
Демодулятор MSK (MSK Demodulator Baseband)	
Output type	Bit

Продолжение табл. 2

Phase offset (rad)	0
Sample per symbol	4
Traceback length	1
Output data type	double
Error Rate Calculation	
Receive delay	2
Computation delay	0
Output Data	Port
Канал с M-FSK	
Bernoulli Binary Generator	
Probalility of zero	0.5
Initial seed – номер ПСП	61
Simple time – период двоичных символов	1
Output data type	double
Модулятор M-FSK (M-FSK Modulator Baseband)	
Input type	Bit
Frequency separation (Hz)	6
Phase continuity	Continuos
Sample per Symbol	17
Output data type	double
AWGN Channel	
Initial seed	61
Mode: Signal to noise ratio (E_b/N_0)	
(E_b/N_0) (dB)	100
Input signal power. Referenced to 1	1
Symbol period	1
Демодулятор M-FSK (M-FSK Demodulator Baseband)	
M-ary number	2
Ouput type	Bit
Symbol set ordering	Binary
Frequency separation (Hz)	6
Samples per symbol	17
Output data type	double
Error Rate Calculation	
Receive delay	1
Computation delay	0
Output Data	Port

Продолжение табл. 2

Канал с GMSK	
Модулятор GMSK	
Input Type	Bit
BT Product	0.5
Pulse length	1
Symbol prehistory	1
Phase offset (rad)	0
Samples per symbol	8
Output data type	double
AWGN Channel	
Initial seed	61
Mode: Signal to noise ratio (E_b/N_0)	
(E_b/N_0) (dB)	100
Input signal power. Referenced to 1	1
Symbol period	1
Демодулятор GMSK (GMSK Demodulator Baseband)	
Output type	Bit
BT product	0.5
Pulse length	1
Symbol prehistory	1
Traceback length	16
Samples per Symbol	8
Phase offset (rad)	0
Output data type	double
Error Rate Calculation	
Receive delay	1
Computation delay	0
Output Data	Port

10. Анализ теоретической помехоустойчивости FSK и MSK:

- 1) запустить программу MATLAB;
- 2) в командном окне набрать команду >> BERTool;
- 3) вызвать инструмент *Bit Rate Analysis Tool* (рис. 3);

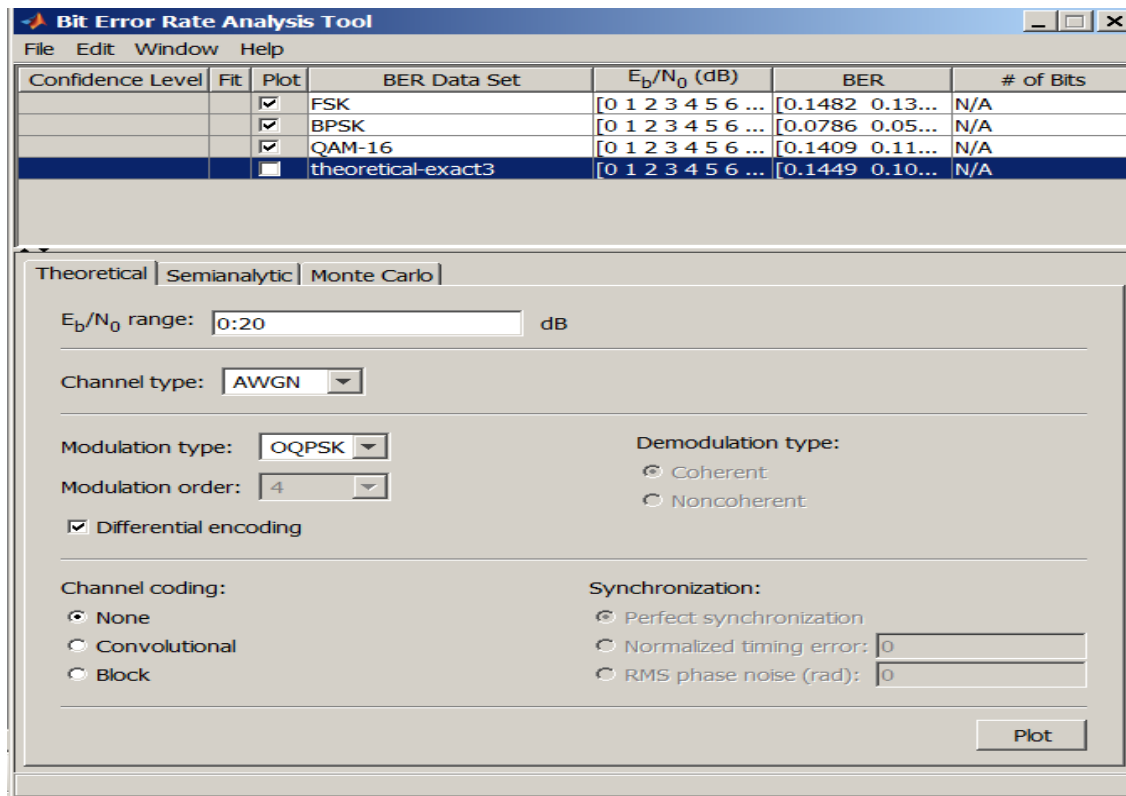


Рис. 3. Инструмент *Bit Rate Analysis Tool*

4) использовать закладку **Theoretical**. В ее полях выбрать параметры:

- в поле E_b/N_0 заносим диапазон 0:18 дБ;
- в поле *Channel Type* (тип канала) выбираем из списка канал с добавлением белого шума AWGN;
- в поле *Modulation type* (тип модуляции) последовательно выбираем нужные типы;
- в поле *Modulation order* (порядок модуляции) выбираем позиционность модуляции M ;

5) выполнить сравнительный анализ теоретической энергетической эффективности FSK и MSK:

Для каждого типа модема выполняем команду *Plot*, которая рисует график зависимости вероятности ошибок от отношения сигнал/шум.

На графике для каждой зависимости отображается легенда с именем графика (рис. 4).

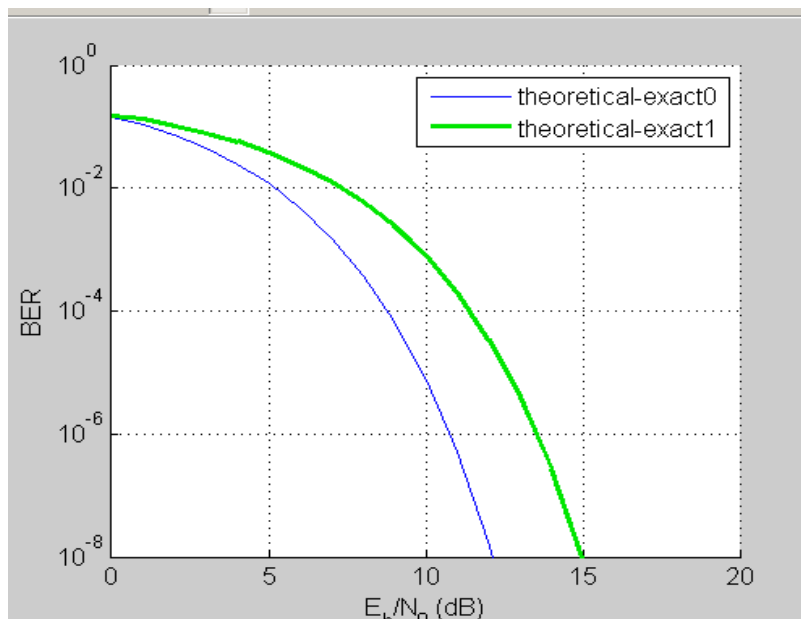


Рис. 4. Результаты расчета

- 6) зарисовать заполученные зависимости;
- 7) для значения $BER = 10^{-6}$ провести сравнение методов модуляции по величине энергетического проигрыша по отношению к BFSK;
- 8) закрыть окно;
- 9) сравнить полученные результаты с данными задачи п. 10;
- 10) сделать выводы по результатам исследования.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Схемы исследуемых моделей.
2. Результаты исследования в виде таблиц и графиков.
3. Выводы по полученным результатам.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип модуляции MSK.
2. Поясните принцип модуляции GMSK.
3. Поясните физический смысл параметра BT.
4. Дайте определение спектральной и энергетической эффективности методов модуляции.
5. Поясните принцип работы квадратурного модулятора MSK.
6. Чему равен индекс модуляции MSK?
7. Поясните смысл параметра компактность спектра.
8. Изобразите и поясните фазовую диаграмму MSK.
9. Какая спектральная эффективность достигается при MSK?
10. Поясните диаграмму фазовых переходов MSK.

Лабораторная работа № 8.5

«Исследование усовершенствованных методов QPSK»

Цель работы: изучение принципов QPSK, OQPSK и DQPSK; анализ спектральной эффективности QPSK, OQPSK и DQPSK; измерение помехоустойчивости QPSK, OQPSK и DQPSK.

Подготовка к работе

По указанной литературе:

- 1) изучить принципы QPSK, OQPSK и DQPSK;
- 2) подготовить бланк отчета по лабораторной работе;
- 3) подготовить ответы на контрольные вопросы.

Рекомендуемая литература

1. *Маглицкий Б.Н.* Космические и наземные системы радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2013. – 300 с.
2. *Маглицкий Б.Н.* Спектрально-эффективные методы модуляции в цифровых системах радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: СибГУТИ, 2009. – 120 с.
3. *Носов В.И., Дроздов Н.В., Тимощук Р.С.* Моделирование систем связи в среде MATLAB : Учебное пособие. – Новосибирск: СибГУТИ, 2007. – 178 с.

При выполнении лабораторной работы используется IBM – совместимый компьютер с процессором Pentium II и выше, операционная система Windows XP, Windows 7.

Программное обеспечение: СКМ «MATLAB/Simulink» (R2009b).

1. Теоретическая часть

1.1. Квадратурная фазовая модуляция со сдвигом OQPSK (offset QPSK)

В цифровых системах радиосвязи часто используются узкополосные фильтры, которые в ряде случаев вызывают существенные искажения проходящих через них сигналов. Эти фильтры являются существенными элементами аппаратуры. Сюда входят усилители промежуточной частоты, фильтры для предотвращения перегрузки аппаратуры, подавления паразитных помех излучений.

Ограничение полосы сигнала QPSK приводит к появлению амплитудной модуляции, обусловленной переходными процессами (в основном, при скачках фазы на 180^0). С подобным явлением мы уже сталкивались при рассмотрении методов BPSK и BDPSK.

Изменения огибающей нежелательны, так как дополнительное усиление сигнала нелинейными элементами может увеличить энергию боковых полос, увеличить помехи в соседних каналах и вызвать искажения из-за влияния преобразования АМ / ФМ (амплитудно-фазовая конверсия).

В случае обычных двухпозиционных методов модуляции фаза несущего колебания изменяется скачком от одного возможного значения к другому в соответствии с модулирующим сигналом. Рассмотрим в качестве примера процесс формирования сигнала DPSK (относительная фазовая модуляция). На рисунке 1.1 приведены диаграммы, поясняющие этот процесс.

Исходный цифровой сигнал (рис. 1.1 а) предварительно преобразуется в относительный сигнал (в данном случае NRZ-M) (рис. 1.1 б). Затем этим сигналом производится модуляция несущей (рис. 1.1 в – немодулированная несущая) по принципу синхронной PSK (BPSK). В результате формируется сигнал DPSK (рис. 1.1 г). С целью упрощения на рисунке 1.1 показан один период несущей частоты.

При таких изменениях фазы несущего колебания энергетический спектр модулированного сигнала имеет высокий уровень боковых лепестков. С целью формирования спектра модулированный сигнал подвергается фильтрации. Влияние фильтрации поясняется рисунком 1.2.

Как следует из рисунка 1.2 б, в результате фильтрации сигнал приобретает паразитную амплитудную модуляцию. Огибающая модулированного сигнала «проваливается» до нуля в моменты времени, соответствующие скачкообразному изменению фазы несущего колебания на 180^0 . Это явление приводит к заметному снижению средней мощности радиосигнала и снижению помехоустойчивости.

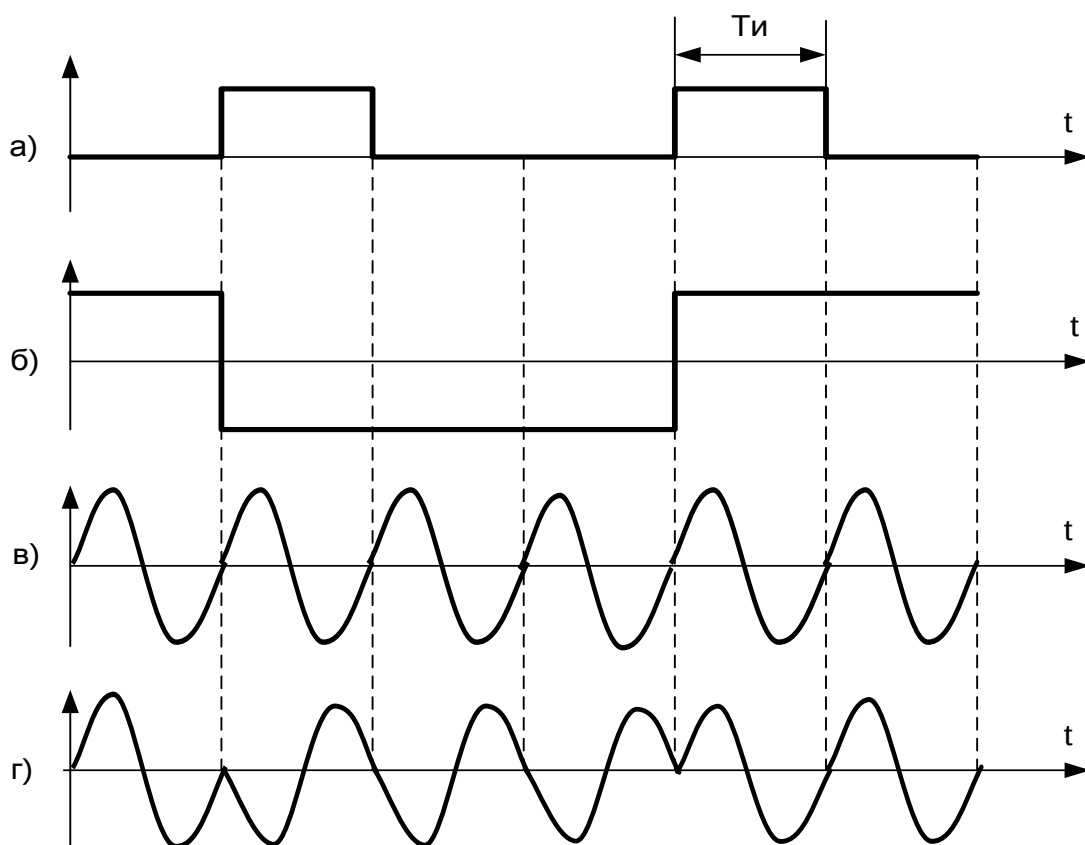


Рис. 1.1. Формирование сигнала DPSK

Спектр случайной последовательности радиоимпульсов с детерминированным тактовым интервалом определяется амплитудным спектром огибающей одиночного радиоимпульса. На рисунке 1.2 в показана огибающая радиосигнала после прохождения нелинейного элемента (ограничитель, усилитель). Как следует из этого рисунка, огибающая одиночного радиоимпульса вновь становится прямоугольной и энергетический спектр последовательности радиоимпульсов приближается к спектру сигнала DPSK до фильтрации. По этой причине, например, в приемопередатчиках ЦРРС не используются амплитудные ограничители, а усилители должны работать в линейном режиме.

Вместо разбиения интервала возможных значений мгновенной фазы несущего колебания на небольшие интервалы и переходов между ними скачками можно переходить от одного значения фазы к другому плавно по какому-либо закону (например, по линейному). Если при этом сигнальная точка остается на окружности радиусом единица, то формируется сигнал с постоянным значением амплитуды.

В сигнале OQPSK такие скачки фазы несущей отсутствуют, так как формирование сигнала производится с использованием двух квадратурных каналов, смещенных по времени на величину тактового интервала $T_{и}$. При этом скачки фазы на 90° остаются.

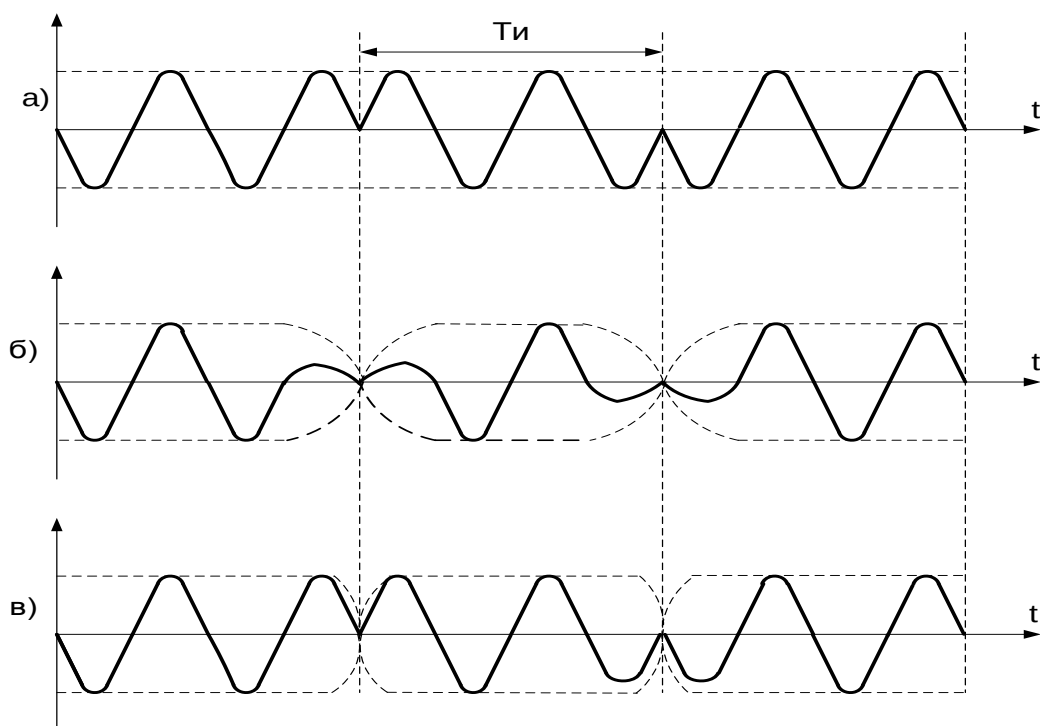


Рис. 1.2. Влияние фильтрации на DPSK сигнал:
 а) DPSK сигнал до фильтрации,
 б) DPSK сигнал после фильтрации,
 в) DPSK сигнал после ограничения и усиления

Диаграмма фазовых переходов для сигнала QPSK со смещением представлена на рисунке 1.3.

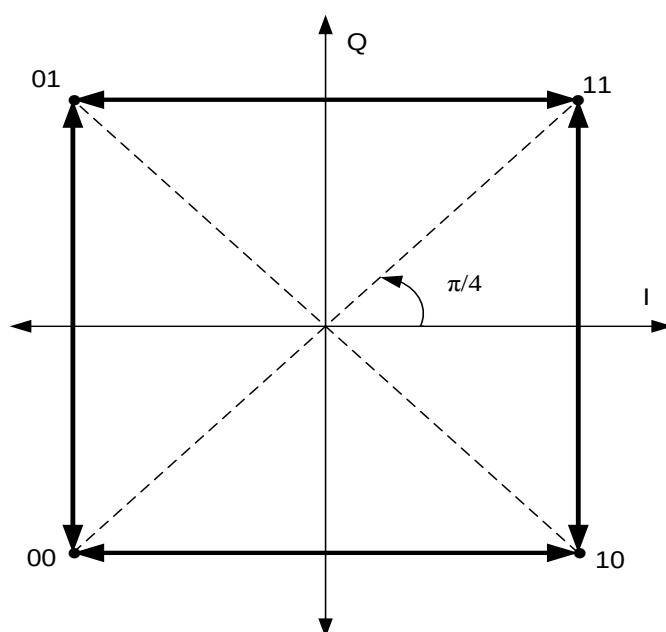


Рис. 1.3. Диаграмма фазовых переходов для сигналов OQPSK

Схема квадратурного модулятора OQPSK отличается от схемы модулятора QPSK тем, что в схеме делителя потока устраняется линия задержки на тактовый интервал T_u . Очевидно, что аналогичным образом может быть получена смещенная DQPSK.

В качестве примера формирование манипулирующих сигналов для ODQPSK поясняется диаграммами на рисунке 1.4.

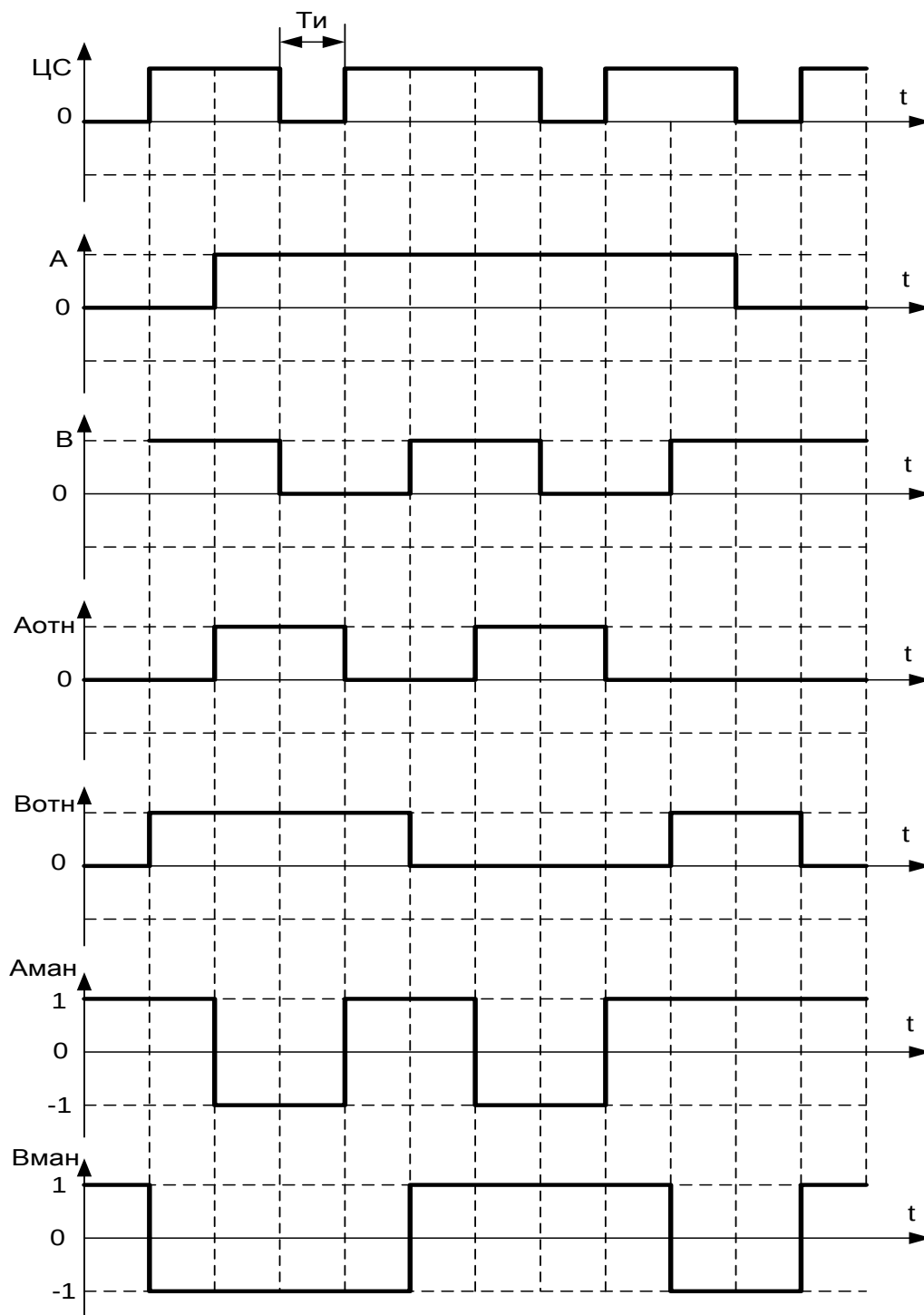


Рис. 1.4. Формирование манипулирующих сигналов для ODQPSK

На диаграммах приняты следующие обозначения:

- А и В – последовательности двоичных символов на выходе делителя потоков,
- Аотн и Вотн – последовательности А и В в относительном коде NRZ-М,
- Аман и Вман – манипулирующие последовательности на выходе логической схемы ЛС.

Таким образом, в случае OQPSK максимальное изменение фазы составляет $\pi/2$. Максимальный уровень изменения амплитуды огибающей для OQPSK составляет 30% по сравнению со 100% для обычной QPSK.

1.2. Дифференциальная квадратурная фазовая модуляция DQPSK (differential quadrature phase shift keying)

Практическая реализация QPSK предполагает когерентную демодуляцию принимаемого сигнала. При когерентной демодуляции PSK сигналов предполагается, что в демодуляторе обеспечивается формирование когерентного опорного сигнала с требуемой точностью. Однако практически сформировать такой сигнал не всегда возможно.

Обычно фазовая ошибка содержит две составляющие, обусловленные особенностями работы блока восстановления несущей из принимаемого сигнала: одна вызвана воздействием шума и представляет собой случайный процесс, а другая – детерминированная составляющая и определяется возможной неоднозначностью при восстановлении несущей из PSK сигнала.

Например, при восстановлении несущей из QPSK сигнала принимаемый сигнал должен быть возведен в четвертую степень для устранения фазовой манипуляции. При формировании когерентного опорного сигнала частоту полученного сигнала необходимо разделить на 4. В результате возникает фазовая неоднозначность кратная $\pi/4$.

Для устранения этой фазовой неоднозначности необходимо осуществлять относительное кодирование символов передаваемого сообщения так, чтобы необходимая информация содержалась в разности фаз двух последовательно передаваемых PSK сигналов. В этом случае говорят об относительной фазовой манипуляции или фазовой манипуляции с относительным кодированием символов передаваемого сообщения.

При демодуляции решение относительно переданного символа сообщения принимается на основе разности фаз сигналов в смежных интервалах времени. В результате фазовая неоднозначность может быть устранена. Для реализации рассмотренного метода передачи в фазовом модуляторе сигнала производится относительное кодирование символов передаваемого сообщения, а затем осуществляется абсолютная фазовая манипуляция. Таким образом, для передачи k символов сообщения требуется $(k+1)$ абсолютных значений фазы. Иначе говоря, для устранения фазовой неоднозначности необходимая избыточность составляет один символ.

В качестве примера рассмотрим преобразование абсолютного кода в относительный (относительный кодер) для $M = 2$. Технически данное преобразование осуществляется при помощи логической схемы «исключающее ИЛИ» (рис. 1.5):

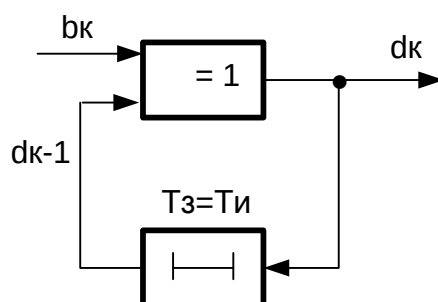


Рис. 1.5. Преобразование двоичных символов в относительный код:

d_k – символ на выходе кодера в относительном коде,

b_k – текущий символ в абсолютном коде,

d_{k-1} – предыдущий символ в относительном коде

В случае DQPSK относительное кодирование осуществляется с помощью более сложного алгоритма.

Наиболее проста реализация модулятора DQPSK на основе квадратурного представления сигналов (рис. 1.6). Эта схема во многом совпадает со схемой модулятора QPSK. Дополнительно в схему введен преобразователь кода ПК, выполняющий преобразование символов потоков А и В из абсолютного в относительный код.

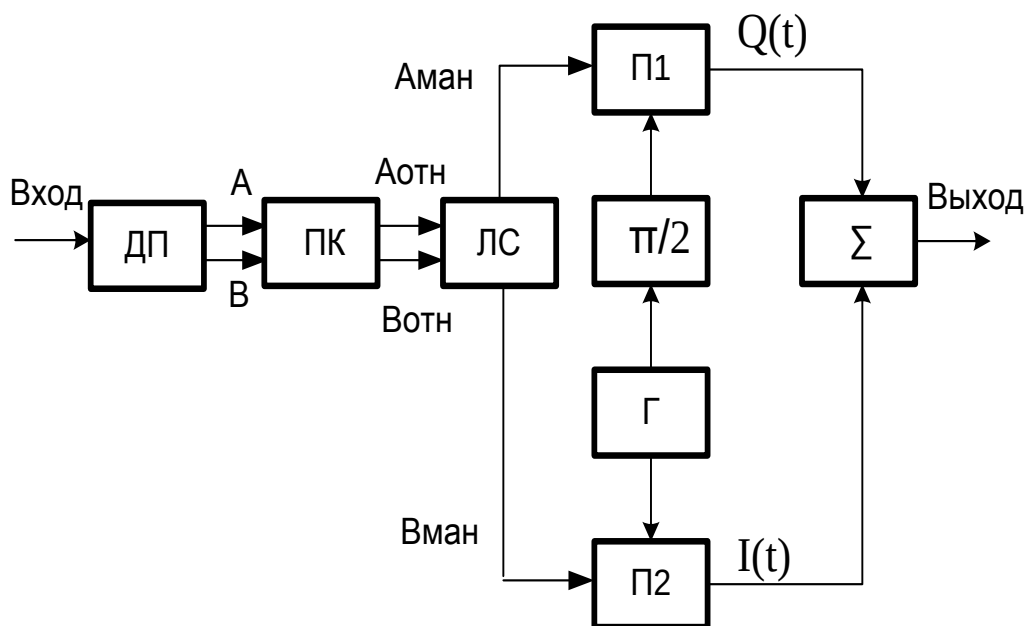


Рис. 1.6. Структурная схема модулятора DQPSK

В схеме модулятора имеется опорный генератор (Γ), формирующий синфазную (I) и квадратурную (Q) составляющие несущего колебания, которые подаются на перемножители ($\Pi 1$ и $\Pi 2$).

Выработка напряжений, обеспечивающих изменение фазы несущего колебания в соответствии с манипуляционным кодом производится с помощью логической схемы (ЛС). Результирующий сигнал DQPSK формируется на выходе сумматора (Σ).

При этом значение фаз несущих синфазного и квадратурного каналов φ_A и φ_B равные в момент начала рассмотрения соответственно φ_{A_0} и φ_{B_0} , изменяются в соответствии с таблицей 1.1.

Диаграмма фазовых переходов для сигнала DQPSK точно такая же, как и для сигнала QPSK. Это означает, что сигнал DQPSK, как и сигнал QPSK имеет изменение фазы несущей частоты на 180 градусов при одновременной смене символов в квадратурных каналах.

Относительное кодирование приводит, грубо говоря, к увеличению вероятности ошибки вдвое. Это является платой за возможность устранения фазовой неоднозначности. Кроме того, при демодуляции относительных сигналов возникающие ошибки группируются в пары. Действительно, если значение абсолютной фазы определено ошибочно, то это вызывает появление ошибок в двух смежных тактовых интервалах T_u .

Табл. 1.1. Изменения фаз квадратурных несущих DQPSK

$A_{\text{отн}}$	$B_{\text{отн}}$	φ_A	φ_B	$\Delta\varphi^\circ$
0	0	φ_{A0}	φ_{B0}	0°
0	1	φ_{A0}	$\varphi_{B0}+180^\circ$	90°
1	1	$\varphi_{A0}+180^\circ$	$\varphi_{B0}+180^\circ$	180°
1	0	$\varphi_{A0}+180^\circ$	φ_{B0}	270°

Формирование сигнала DQPSK при помощи квадратурного модулятора поясняется диаграммами, приведенными на рисунке 1.7.

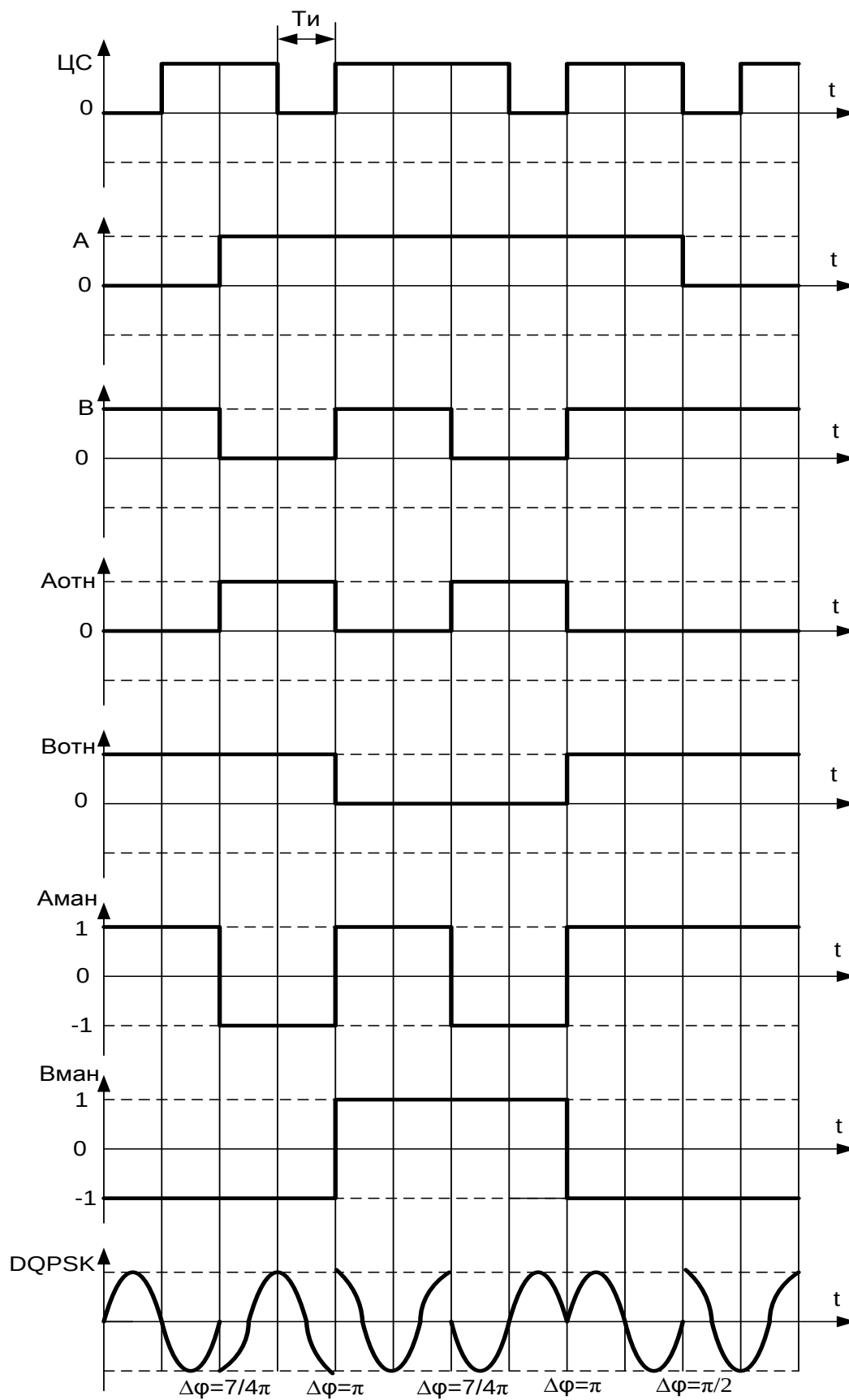


Рис. 1.7. Формирование сигнала DQPSK

На рисунке 1.7 приняты следующие обозначения:

- А, В – последовательности двоичных символов на выходе делителя потоков ДП,
- Аотн, Вотн – последовательности А и В в относительном коде (NRZ-S),
- Аман, Вман – манипулирующие последовательности синфазного и квадратурного каналов соответственно (выход логической схемы ЛС),
- DQPSK – выходной сигнал модулятора.

«Созвездие» сигнала DQPSK показано на рисунке 1.8.

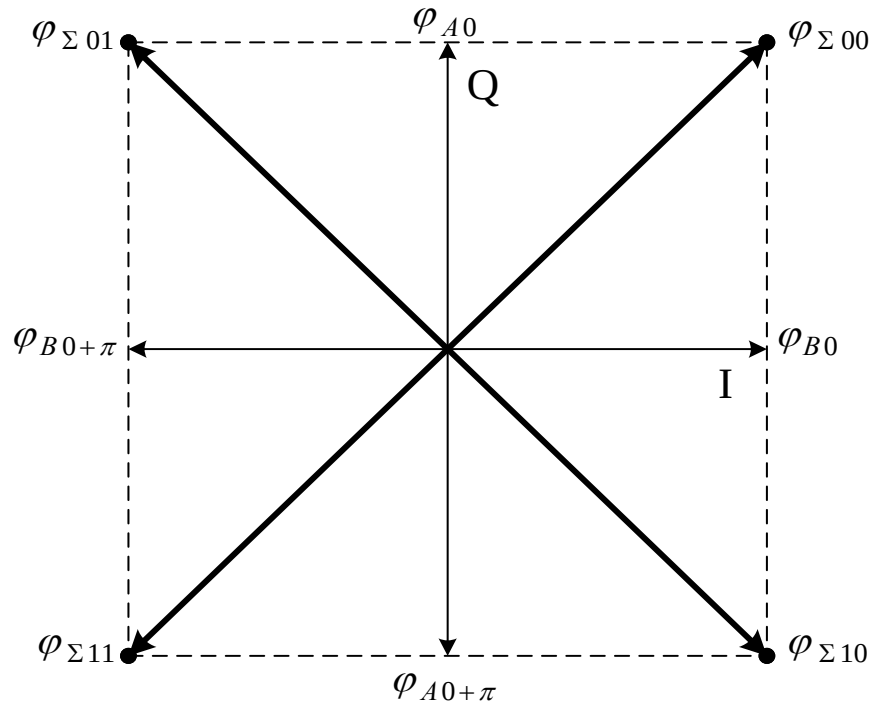


Рис. 1.8. Созвездие сигнальных точек сигнала DQPSK

Энергетический спектр сигнала DQPSK совпадает со спектром сигнала QPSK.

1.3. Дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом $\pi/4$ ($\pi/4$ Differential Quadrature Phase Shift Keying – $\pi/4$ DQPSK)

Этот вид модуляции является промежуточным между QPSK и OQPSK, так как изменение фазы несущей за один символ происходит на 45° или 135° (в QPSK на 180° , в OQPSK на 90°). Диаграмма фазовых переходов для $\pi/4$ DQPSK приведена на рисунке 1.9 [2]. На этой диаграмме кружочками обозначены дискретные значения, которые может принимать фаза несущей частоты, отсчитываемая от некоторого начального значения. Стрелками указаны возможные переходы между разрешенными значениями фазы. Оси координат соответствуют синфазной и квадратурной составляющим сигнала.

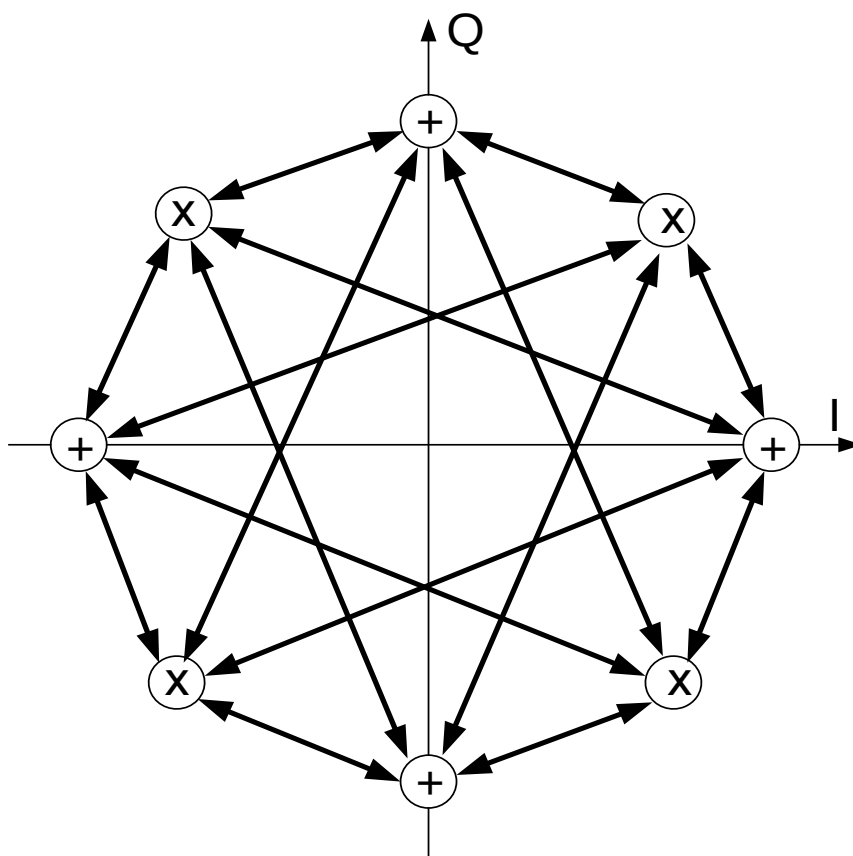


Рис. 1.9. Диаграмма фазовых переходов для сигнала $\pi/4$ DQPSK

Данная фазовая диаграмма фактически состоит из двух диаграмм обычной квадратурной фазовой манипуляции: фазовые соотношения одной из них обозначены значком $\oplus$, а другой – значком $\otimes$. Диаграммы сдвинуты одна относительно другой на угол $\pi/4$. При переходе от одного символа к другому происходит изменение фазы от одного из состояний первой диаграммы к одному из состояний второй, а при переходе к следующему символу – возврат к предыдущей диаграмме, *хотя, скорее всего не к прежнему фазовому состоянию*.

Одним из достоинств $\pi/4$ DQPSK сигнала является возможность достаточно простой реализации алгоритмов некогерентной демодуляции с автокорреляционным преобразованием, не требующих предварительного восстановления несущей. Это особенно важно для каналов связи с доплеровским сдвигом частоты и быстрыми рэлеевскими замираниями.

Алгоритмы некогерентной демодуляции с автокорреляционным преобразованием сигналов со смещенной относительной квадратурной манипуляцией реализуются сложнее.

Структурная схема модулятора $\pi/4$ DQPSK приведена на рисунке 1.10. Отличие этой схемы от схемы модулятора QPSK заключается в наличии дифференциального кодера фазы.

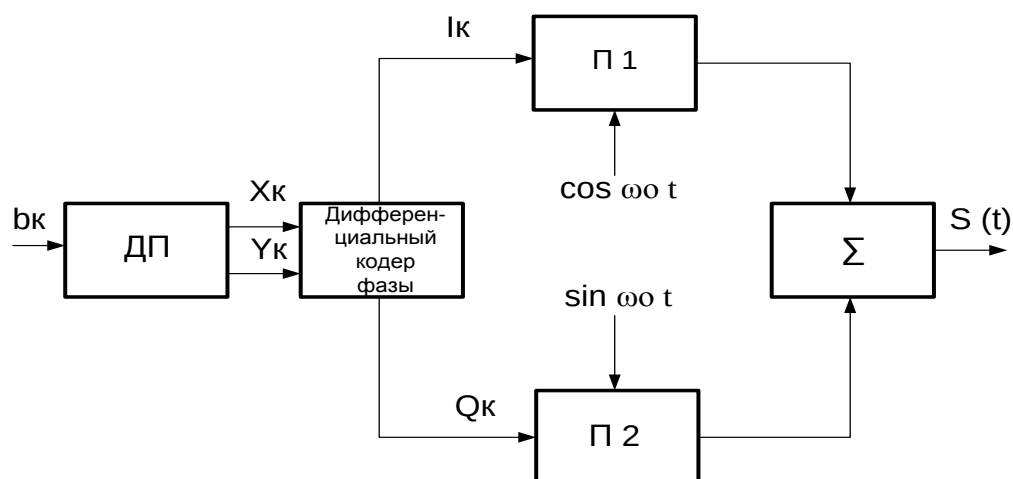


Рис. 1.10. Структурная схема модулятора $\pi/4$ DQPSK

В данном случае входная последовательность в делителе потока ДП разделяется на пары – на 2-х битовые символы X_k и Y_k и при переходе от символа к символу начальная фаза несущей изменяется на величину $\Delta\varphi_k$ в соответствии с правилом манипуляции, приведенном в таблице 1.2.

Табл. 1.2. Закон манипуляции $\pi/4$ DQPSK

Биты входной последовательности		Изменение фазы $\Delta\varphi_k = \Delta\varphi_k(X_k, Y_k)$
Нечетные (первые биты символа) X_k	Четные (вторые биты символа) Y_k	
1	1	$-3\pi/4$
0	1	$3\pi/4$
0	0	$\pi/4$
1	0	$-\pi/4$

Результирующий выходной сигнал модулятора $\pi/4$ DQPSK может быть представлен в виде [2]:

$$s(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi_k), \quad (1)$$

где ω_0 – несущая частота,

$\varphi_k = \varphi_{k-1} + \Delta\varphi_k$ – начальная фаза на интервале k -го символа.

На диаграммах рисунка 1.11 показан пример формирования сдвига фазы $\Delta\varphi_k$ для фрагмента исходного сигнала b_k в соответствии с таблицей 1.2. При этом предполагается, что к началу рассмотрения процесса (начало координат) величина $\Delta\varphi_k = 0$. На двух нижних диаграммах приведены манипулирующие сигналы квадратурных каналов, которые должны быть сформированы дифференциальным кодером фазы.

На рисунке 1.12 показан процесс формирования соответствующей диаграммы фазовых переходов. Цифрами над стрелками обозначены последовательные фазовые переходы.

Таким образом, при $\pi/4$ -квадратурной относительной фазовой модуляции, максимальный скачок фазы равен 135° , а все другие значения мгновенной фазы радиосигнала кратны значению $\pi/4$. Ни одна траектория фазовых переходов для этого способа модуляции не проходит через начало координат. В результате огибающая радиосигнала имеет меньшие провалы по сравнению с квадратурной фазовой модуляцией.

Также важно, что при данном способе модуляции каждая новая пара информационных битов определяет не полную фазу несущего колебания, а только приращение этой фазы для интервала с номером i относительно полной фазы комплексной огибающей на интервале с номером $(i - 1)$.

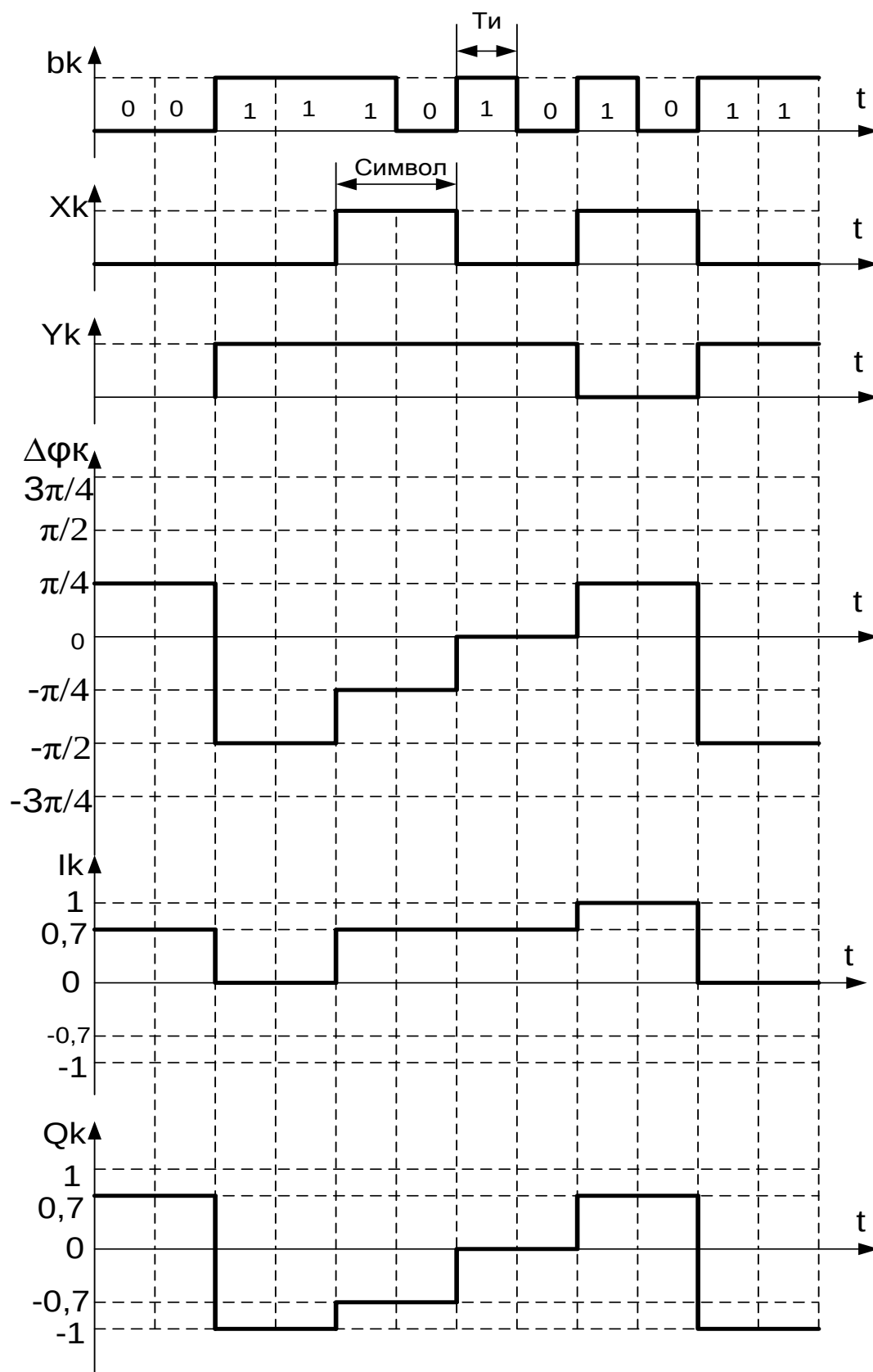


Рис. 1.11. Формирование сдвига фазы при $\pi/4$ DQPSK

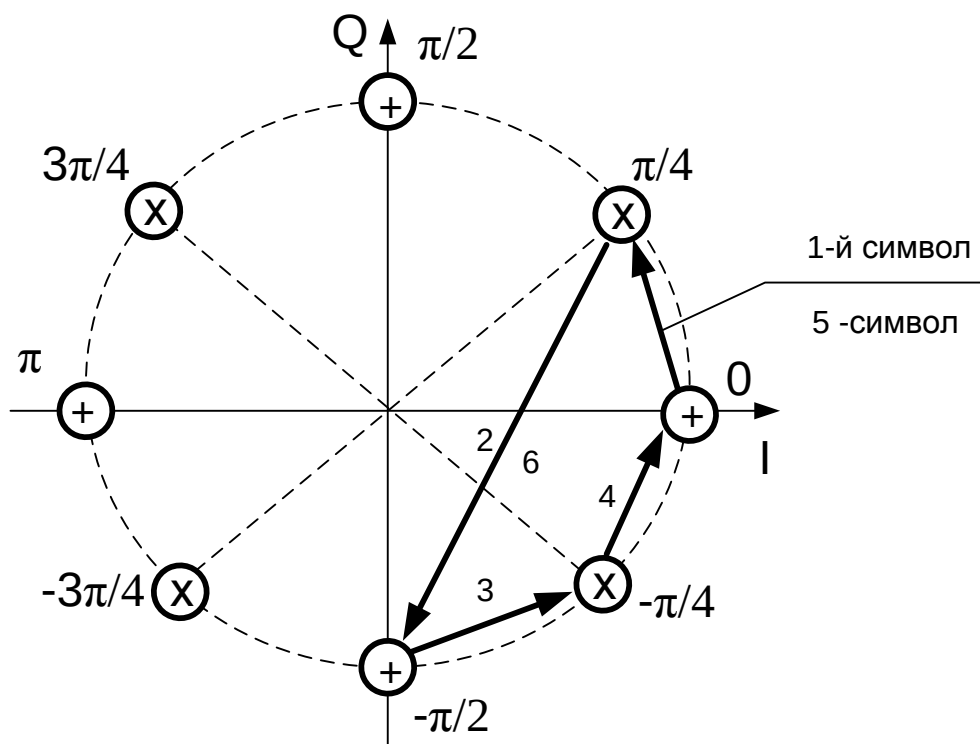


Рис. 1.12. Диаграмма фазовых переходов для фрагмента исходного цифрового сигнала (6 тактовых интервалов Tu)

Алгоритм формирования амплитуд квадратурных составляющих I_k и Q_k записывается [2]:

$$\begin{aligned} I_k &= \cos \varphi_k = \cos (\varphi_{k-1} + \Delta \varphi_k) = \cos \varphi_{k-1} \cos \Delta \varphi_k - \sin \varphi_{k-1} \sin \Delta \varphi_k = \\ &= I_{k-1} \cos [\Delta \varphi_k (X_k, Y_k)] - Q_{k-1} \sin [\Delta \varphi_k (X_k, Y_k)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_k &= \sin \varphi_k = \sin (\varphi_{k-1} + \Delta \varphi_k) = \sin \varphi_{k-1} \cos \Delta \varphi_k + \cos \varphi_{k-1} \sin \Delta \varphi_k = \\ &= Q_{k-1} \cos [\Delta \varphi_k (X_k, Y_k)] + I_{k-1} \sin [\Delta \varphi_k (X_k, Y_k)] \end{aligned}$$

Выполнение вычислений упрощается тем, что каждая из величин $\cos \Delta \varphi_k$, $\sin \Delta \varphi_k$ может принимать в соответствии с рисунком 1.11 одно из пяти дискретных значений: 0; 0,7; -0,7; 1; -1.

С целью более глубокого понимания излагаемого материала рассмотрим пример вычисления квадратурных манипулирующих сигналов I_k и Q_k . Пусть начало рассмотрения соответствует фазе несущей частоты $\pi/4$ (диаграмма фазовых переходов на рис. 1.13 а).

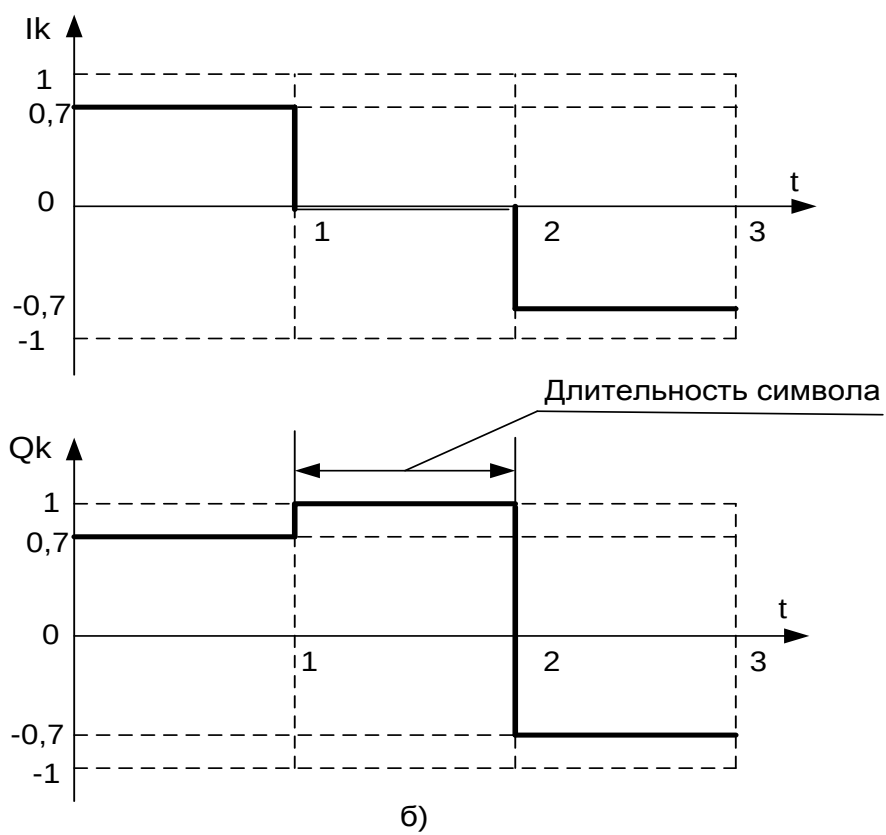
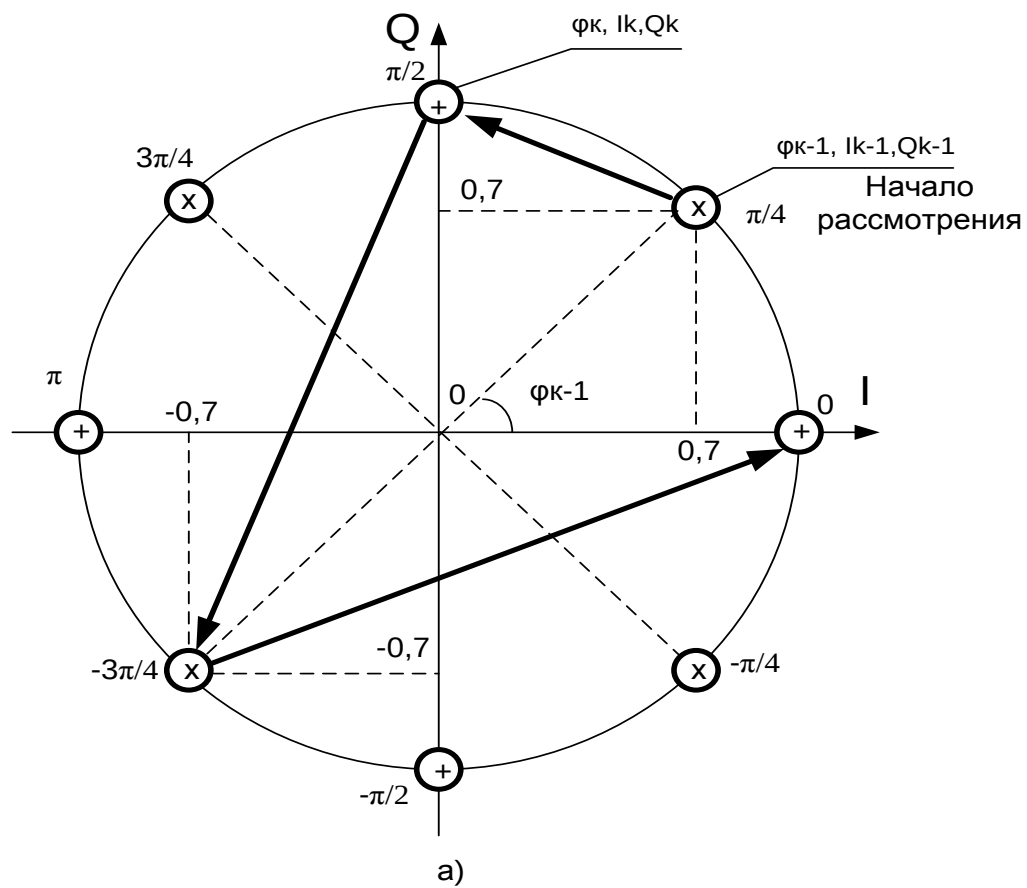


Рис. 1.13. Пример вычисления квадратурных манипулирующих сигналов

При переходе в точку со значением фазы несущей будут вычислены следующие значения I_k и Q_k (момент времени 1 на диаграммах рисунка 1.13 а):

$$I_k = (\sqrt{2} / 2) \times (\sqrt{2} / 2) - (\sqrt{2} / 2) \times (\sqrt{2} / 2) = 0,$$

$$Q_k = (\sqrt{2} / 2) \times (\sqrt{2} / 2) + (\sqrt{2} / 2) \times (\sqrt{2} / 2) = 1.$$

Для момента времени 2:

$$I_k = (0) \times (\sqrt{2} / 2) - (1) \times (\sqrt{2} / 2) = (\sqrt{2} / 2) = -0,7,$$

$$Q_k = (1) \times (-\sqrt{2} / 2) + (0) \times (-1) = (\sqrt{2} / 2) = -0,7.$$

Характеристики помехоустойчивости некогерентной демодуляции с автокорреляционным преобразованием OQPSK сигналов и $\pi/4$ DQPSK сигналов в каналах с аддитивным белым гауссовым шумом одинаковы [2].

2. Выполнение лабораторной работы

Задача 1: проанализировать сигнальные «созвездия», диаграммы фазовых переходов и глаз–диаграммы сигналов QPSK, OQPSK и DQPSK. Схема лабораторной модели приведена на рисунке 2.1.

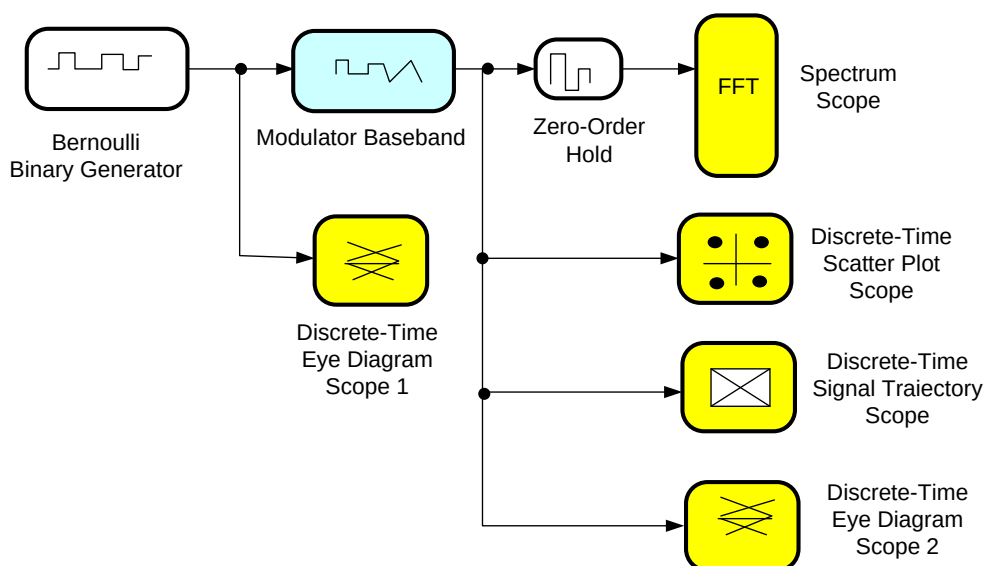


Рис. 2.1. Схема модели для проведения исследований

При выполнении задачи использовать блоки библиотеки Simulink:

Bernoulli Binary Generator: Communication Blockset–Comm Sources–Data Sources;

QPSK Modulator Baseband: Communication Blockset–Modulation–Digital Baseband Modulation;

OQPSK Modulator Baseband: Communication Blockset – Modulation – Digital Baseband Modulation;

DQPSK Modulator Baseband: Communication Blockset–Modulation–Digital Baseband Modulation;

Zero-Order Hold: Simulink–Discrete;

Spectrum Scope Simulink: Communication Blockset–Signal Processing–Spectrum Scope;

Discrete-Time Signal Trajectory Scope: Communication Blockset–Comm Sinks;

Discrete-Time Eye Diagram Scope: Communication Blockset–Comm Sinks;

Discrete-Time Scatter Plot Scope: Communication Blockset–Comm Sinks.

- 1.1. Собрать модель для исследования модулятора QPSK.
- 1.2. Установить параметры блоков модели (табл. 2.1).

Табл. 2.1. Параметры блоков модели модулятора QPSK

Bernoulli Binary Generator (Имитатор ЦС – генератор случайного сигнала в формате NRZ)	
Probability of zero	0.5
Initial seed – номер ПСП	61
Simple time – период двоичных символов	4
Samples per frame	2
Output data type	double
Frame based outputs	флажок
Модулятор QPSK (QPSK Modulator Baseband)	
Input type	Bit
Phase offset (rad)	$\pi/4$
Constellation ordering	Binary
Output data type	doudle
Анализатор спектра (Spectrum Scope)	
Spectrum units	dbW/Hertz
Spectrum tipe	Two-sided $((-F_s/2 \dots F_s/2$
Buffer input	флажок
Buffer size	1024
Buffer overlap	64
Window	Hann
Window Sampling	Periodic
Number of spectral averages	16
Блок Discrete Time Scatter Plot Scope	
Samples per symbol	1
Offset (samples)	0
Points displayed	400
New points per display	10
Блоки Discrete Time Eye Diagram Scope	
Samples per symbol	8
Offset (samples)	0
Symbol per trace	1
Traces displayed	400
Блоки Discrete Time Signal Traiectory Scope	
Samples per Symbol	1
Symbols displayed	400
New symbols per display	10

Продолжение табл. 2.1

Параметры модели (Simulation)	
Start time	0.0
Stop time	10 000
Type	Variable-step

- 1.3. Запустите модель.
- 1.4. Пронаблюдать и проанализировать сигнальное «созвездие», диаграмму фазовых переходов и глаз–диаграмму сигнала QPSK при $p(0) = p(1) = 0,5$.
- 1.5. Зарисовать осциллограммы в отчет по лабораторной работе.
- 1.6. Выполнить анализ энергетического спектра QPSK при $p(0) = p(1) = 0,5$.
- 1.7. Рассчитать спектральную эффективность для сигналов QPSK.
- 1.8. Закройте модель.
- 1.9. Собрать модель для исследования модулятора DQPSK.
- 1.10. Установить параметры блоков модели (табл. 2.2).

Табл. 2.2. Параметры блоков модели модулятора DQPSK

Bernoulli Binary Generator	
Probability of zero	0.5
Initial seed – номер ПСП	61
Simple time – период двоичных символов	2
Samples per frame	2
Output data type	double
Frame based outputs	флажок
Модулятор DQPSK (DQPSK Modulator Baseband)	
Phase rotation	$\pi/4$
Input type	bit
Constellation ordering	Binary
Output data type	double
Анализатор спектра (Spectrum Scope)	
Spectrum units	dbW/Hertz
Spectrum tipe	Two-sided ((- $F_s/2 \dots F_s/2$)
Buffer input	флажок
Buffer size	1024
Buffer overlap	64

Продолжение табл. 2.2

Window	Hann
Window Sampling	Periodic
Number of spectral averages	16
Блок Discrete Time Scatter Plot Scope	
Samples per symbol	1
Offset (samples)	0
Points displayed	400
New points per display	10
Блоки Discrete Time Eye Diagram Scope	
Samples per symbol	8
Offset (samples)	0
Symbol per trace	1
Traces displayed	400
New traces per display	10
Блоки Discrete Time Signal Trajectory Scope	
Samples per Symbol	1
Symbols displayed	400
New symbols per display	10
Параметры модели (Simulation)	
Start time	0.0
Stop time	10 000
Type	Variable-step

- 1.11. Запустите модель.
- 1.12. Пронаблюдать и проанализировать сигнальное «созвездие», диаграмму фазовых переходов и глаз–диаграмму сигнала DQPSK при $p(0) = 0,5$ и значениях параметра модулятора **Phase rotation** = $\pi/4$; $\pi/8$; $\pi/16$.
- 1.13. Зарисовать осциллограммы в отчет по лабораторной работе.
- 1.14. Выполнить анализ энергетического спектра DQPSK при $p(0) = p(1) = 0,5$.
- 1.15. Рассчитать спектральную эффективность для сигнала DQPSK.
- 1.16. Закройте модель.
- 1.17. Собрать модель для исследования модулятора OQPSK.
- 1.18. Установить параметры блоков модели (табл. 2.3).

Табл. 2.3. Параметры блоков модели модулятора OQPSK

Bernoulli Binary Generator	
Probability of zero	0.5
Initial seed – номер ПСП	61
Simple time – период двоичных символов	1
Samples per frame	2
Output data type	double
Frame based outputs	
Модулятор OQPSK (OQPSK Modulator Baseband)	
Input type	bit
Phase offset (rad)	$\pi/2$
Data type	double
Анализатор спектра (Spectrum Scope)	
Spectrum units	dbW/Hertz
Spectrum tipe	Two-sided $((-F_s/2 \dots F_s/2$
Buffer input	флажок
Buffer size	1024
Buffer overlap	64
Window	Hann
Window Sampling	Periodic
Number of spectral averages	16
Блок Discrete Time Scatter Plot Scope	
Samples per symbol	1
Offset (samples)	0
Points displayed	400
New points per display	10
Блоки Discrete Time Eye Diagram Scope	
Samples per symbol	8
Offset (samples)	0
Symbol per trace	1
Traces displayed	400
New traces per display	10
Блоки Discrete Time Signal Trajectory Scope	
Samples per symbol	8
Offset (samples)	0
Symbol per trace	1
Traces displayed	40
New traces per display	10

Продолжение табл. 2.3

Параметры модели (Simulation)	
Start time	0.0
Stop time	10 000
Type	Variable-step

- 1.19. Запустите модель.
- 1.20. Пронаблюдать и проанализировать сигнальное «созвездие», диаграмму фазовых переходов и глаз – диаграмму сигнала OQPSK при $p(0) = p(1) = 0,5$.
- 1.21. Зарисовать осциллограммы в отчет по лабораторной работе.
- 1.22. Выполнить анализ энергетического спектра OQPSK при $p(0) = p(1) = 0,5$.
- 1.23. Рассчитать спектральную эффективность для сигнала OQPSK.
- 1.24. Закройте модель.
- 1.25. Определить величину изменений боковых лепестков спектра сигналов OQPSK и DQPSK по сравнению с QPSK.
- 1.26. Результаты расчетов оформить в виде таблицы.
- 1.27. Заккрыть окно модели.

Задача 2: провести анализ работы модуляторов QPSK и DQPSK.

1. Запустить программу MATLAB.
2. Собрать схему модели для анализа работы модуляторов QPSK и DQPSK (рис. 2.2).

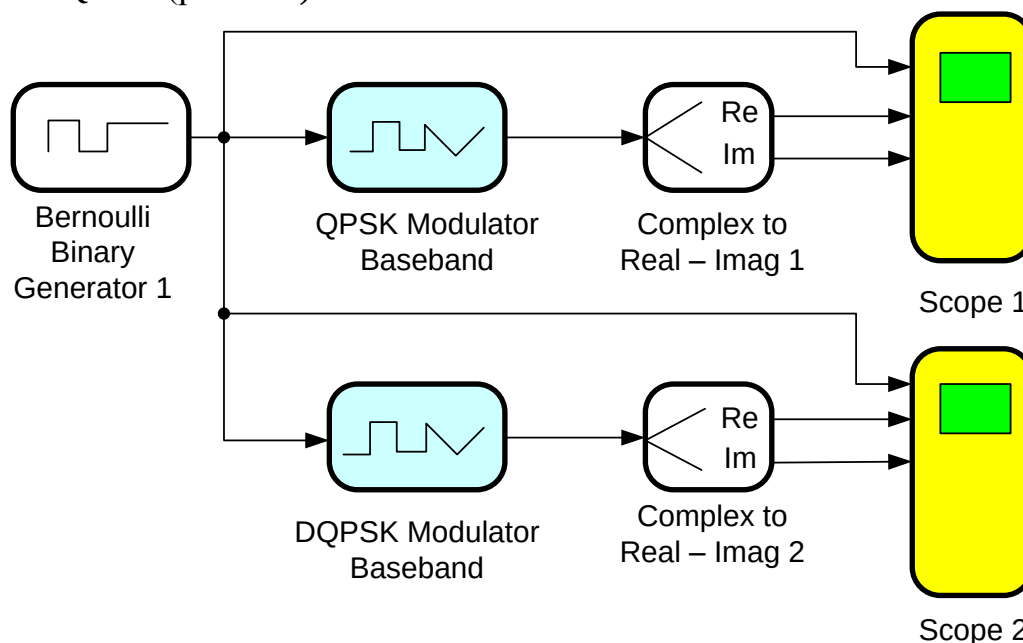


Рис. 2.2. Модель для исследования работы модуляторов QPSK и DQPSK

При составлении модели использовать блоки библиотеки Simulink:

Bernoulli Binary Generator: Communication Blockset–Comm Soueces–Data Souerces;

QPSK Modulator Baseband: Communication Blockset–Modulation–Digital Baseband Modulation;

DQPSK Modulator Baseband: Communication Blockset–Modulation–Digital Baseband Modulation;

Scope: Simulink–Sinks–Scope;

Complex to Real Imag: Simulink–Math Operation.

3. Произвести настройку блоков модели согласно таблице 2.4;

Табл. 2.4. Параметры модели

Bernoulli Binary Generator (Имитатор ЦС – генератор случайного сигнала в формате NRZ)	
Probability of zero	0.5
Initial seed – номер ПСП	61
Simple time – период двоичных символов	5
Frame-based output	флажок
Samples per frame	1
Output data type	double
Модулятор QPSK (QPSK Modulator Baseband)	
Input type	Integer
Phase offset (rad)	0
Constellation ordering	Binary
Output data type	doudle
Модулятор DQPSK (DQPSK Modulator Baseband)	
Phase rotation	pi/4
Input type	bit
Constellation ordering	Integer
Output data type	double
Параметры модели (Simulation)	
Start time	0.0
Stop time	10 000
Type	Variable-step

Настройки блоков Complex to Real-Imag и Scope приведены на рисунках 2.3 и 2.4.

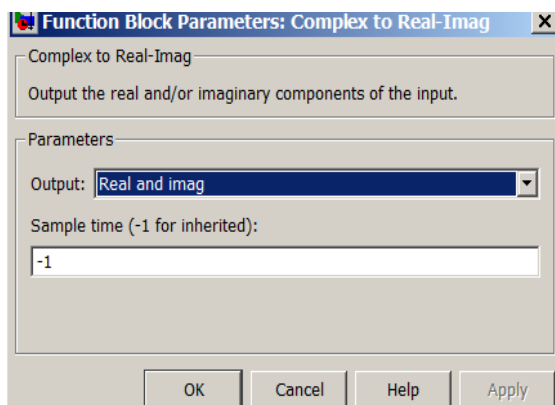


Рис. 2.3

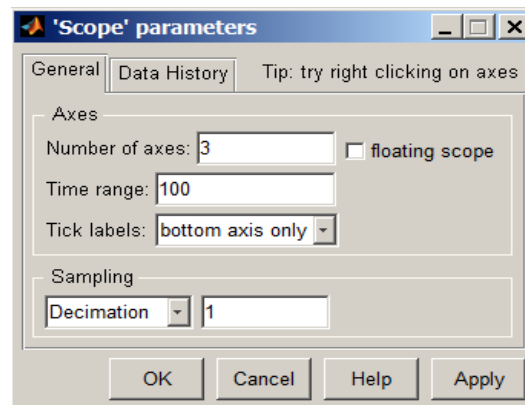


Рис. 2.4

4. Запустить модель.
5. Пронаблюдать и проанализировать временные диаграммы в контрольных точках модуляторов QPSK и DQPSK (при значениях параметра Phase rotation = $\pi/4$; $\pi/8$; $\pi/16$).
6. Зарисовать осциллограммы в отчет по лабораторной работе.
7. Заккрыть окно модели.

Задача 3: провести анализ работы модуляторов OQPSK.

1. Запустить программу MATLAB.
2. Собрать схему модели для анализа работы модуляторов QPSK и DQPSK (рис. 2.5).

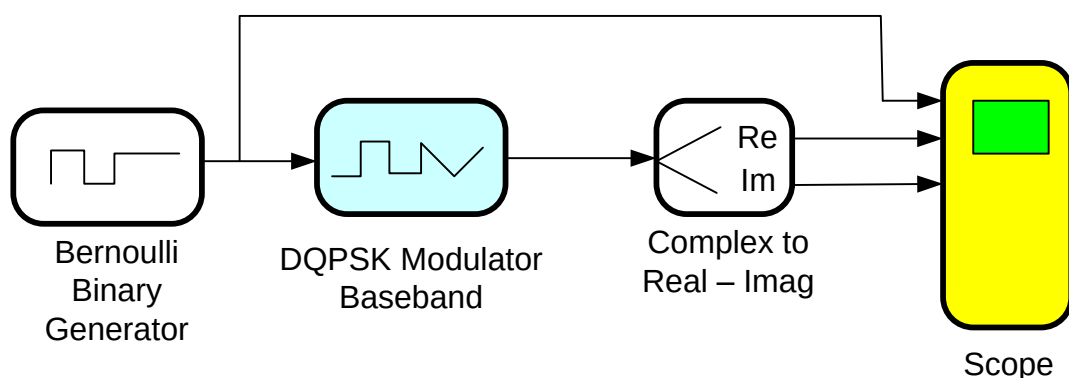


Рис. 2.5. Схема модели для исследования модулятора OQPSK

3. Произвести настройку блоков модели согласно таблице 2.5.

Табл. 2.5. Параметры модели

Bernoulli Binary Generator (Имитатор ЦС – генератор случайного сигнала в формате NRZ)	
Probability of zero	0.5
Initial seed – номер ПСП	61
Simple time – период двоичных символов	1
Модулятор OQPSK (OQPSK Modulator Baseband)	
Input type	Integer
Phase offset (rad)	$\pi/4$
Output data type	doudle
Параметры модели (Simulation)	
Start time	0.0
Stop time	10 000
Type	Variable-step

Настройки блоков Complex to Real-Imag и Scope приведены на рисунках 2.6 и 2.7.

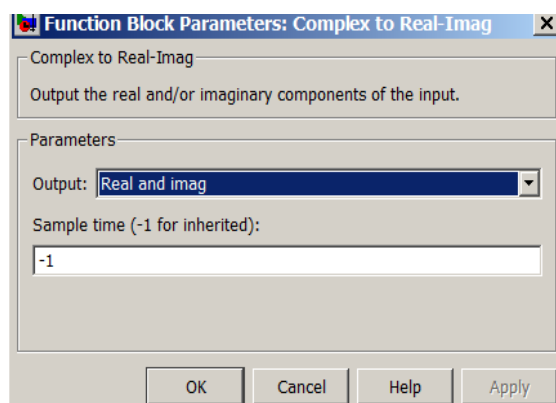


Рис. 2.6

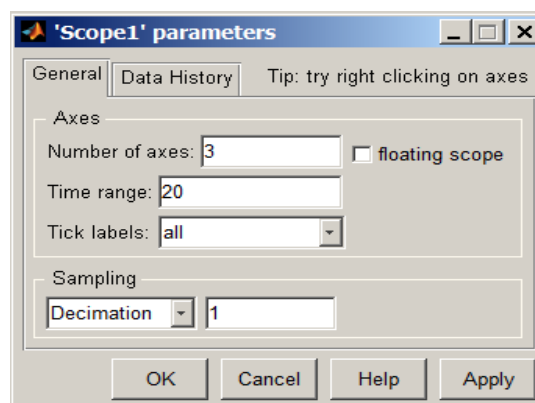


Рис. 2.7

4. Запустить модель.
5. Пронаблюдать и проанализировать временные диаграммы в контрольных точках модулятора.
6. Зарисовать осциллограммы в отчет по лабораторной работе.
7. Заккрыть окно модели.

Задача 4: провести анализ теоретической помехоустойчивости QPSK, OQPSK в канале с AWGN.

1. Запустить программу MATLAB.
2. В командном окне набрать команду `>> BERTool`.
3. Вызвать инструмент *Bit Rate Analysis Tool* (рис. 2.8).

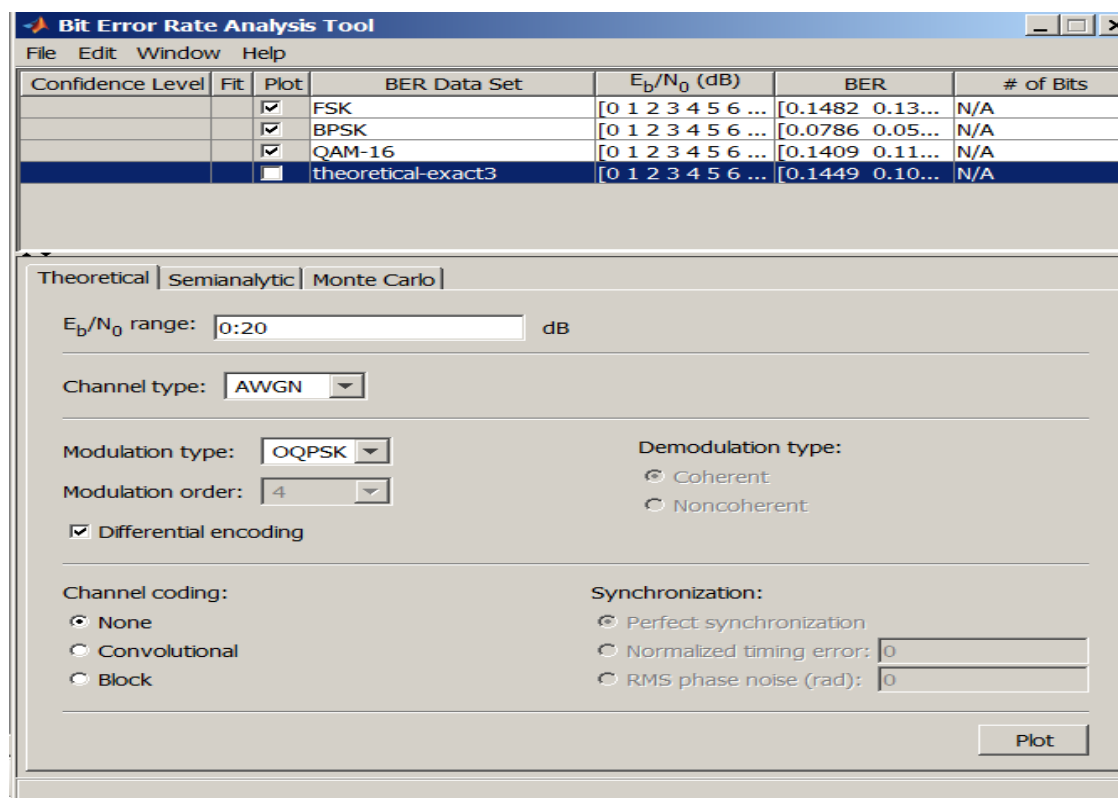


Рис. 2.8. Инструмент *Bit Rate Analysis Tool*

4. Использовать закладку **Theoretical**. В ее полях выбрать параметры:
 - в поле E_b/N_0 заносим диапазон 0:18 дБ;
 - в поле *Channel Type* (тип канала) выбираем из списка канал с добавлением белого шума *AWGN*;
 - в поле *Modulation type* (тип модуляции) последовательно выбираем нужные типы;
 - в поле *Modulation order* (порядок модуляции) выбираем позиционность модуляции M .
5. Выполнить сравнительный анализ теоретической энергетической эффективности:
 Для каждого типа модема выполняем команду *Plot*, которая рисует график зависимости вероятности ошибок от отношения сигнал/шум.
 На графике для каждой зависимости отображается легенда с именем графика (рис. 2.9).

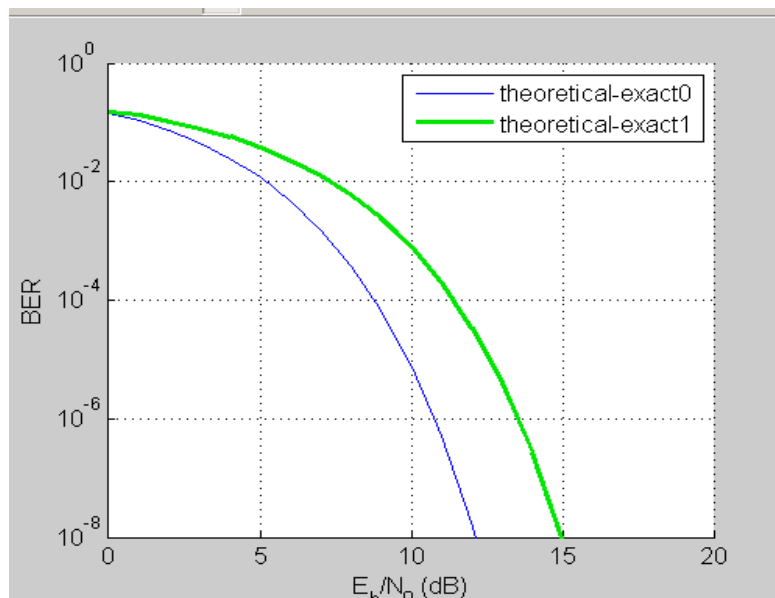


Рис. 2.9. Результаты расчета

6. Зарисовать полученные зависимости.
7. Для значения $BER = 10^{-6}$ провести сравнение методов модуляции по величине энергетического проигрыша по отношению к BFSK.
8. Закрыть окно.
9. Сравнить полученные результаты с данными задачи 3.
10. Сделать выводы по результатам исследования.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Схемы исследуемых моделей.
2. Результаты исследования в виде таблиц и графиков.
3. Выводы по полученным результатам.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип модуляции QPSK.
2. Поясните принцип модуляции OQPSK.
3. Поясните принцип модуляции DQPSK.
4. Дайте определение спектральной и энергетической эффективности методов модуляции.
5. Поясните принцип работы квадратурного модулятора QPSK.
6. Поясните смысл параметра компактность спектра.
7. Изобразите и поясните фазовые диаграммы QPSK, OQPSK и DQPSK.
8. Какая спектральная эффективность достигается при QPSK?
9. Поясните сигнальные созвездия QPSK, OQPSK и DQPSK.
10. С какой целью применяется модуляция QPSK?

Лабораторная работа № 8.6

«Исследование помехоустойчивости ЦСПС в канале с замираниями Райса»

Цель работы: изучение причин появления замираний в ЦСПС; оценка помехоустойчивости системы связи с BPSK в канале с AWGN и замираниями Райса.

Подготовка к работе

По указанной литературе:

- 1) изучить причины появления замираний в каналах ЦСПС;
- 2) подготовить бланк отчета по лабораторной работе;
- 3) подготовить ответы на контрольные вопросы.

Рекомендуемая литература

1. *Маглицкий Б.Н.* Космические и наземные системы радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2014. – 300 с.
2. *Маглицкий Б.Н.* Спектрально-эффективные методы модуляции в цифровых системах радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2009. – 120 с.
3. *Носов В.И., Дроздов Н.В., Тимошук Р.С.* Моделирование систем связи в среде MATLAB : Учебное пособие. – Новосибирск СибГУТИ, 2007. – 178 с.
4. Теоретическая часть данного учебного пособия.

При выполнении лабораторной работы используется IBM – совместимый компьютер с процессором Pentium II и выше, операционная система Windows XP, Windows 7.

Программное обеспечение: СКМ «MATLAB/Simulink» (R2009b).

1. Выполнение лабораторной работы

Ознакомление с работой модели замираний «Multipath Rayleigh and Rician Fading Channel»

1.1. Запустите MATLAB.

1.2. Откройте имитационную модель *Multipath Rayleigh and Rician Fading Channel*, выполнив команду **commmultipathfading**; окно модели *Multipath Rayleigh and Rician Fading Channel* (модель канала с многолучевыми замираниями Рэля и Райса) приведено на рисунке 1.

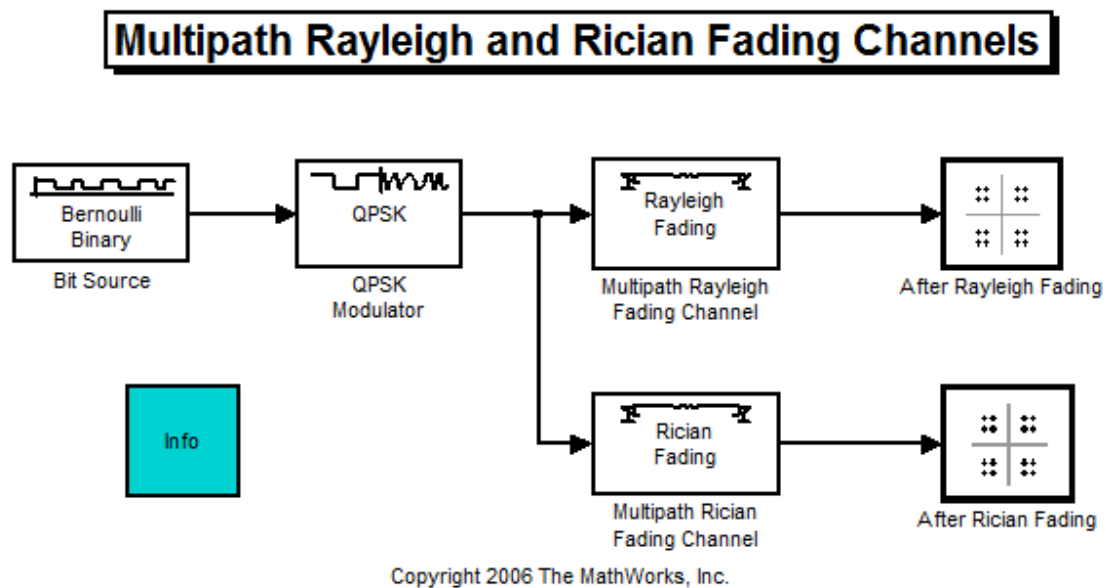


Рис. 1. Схема модели *Multipath Rayleigh and Rician Fading Channel*

Модель имитирует замирания по каналу с замираниями Рэля и с замираниями Райса.

Имитатором цифрового сигнала в формате NRZ в данной модели служит блок *Bernoulli Binary*.

1.3. Откройте окно параметров блока *Bernoulli Binary* (рис. 2).

Регулируемыми параметрами блока являются:

- вероятность появления нулей (*Probability of a zero*);
- длительность тактового интервала цифрового сигнала (*Sample time*);
- количество бит на один фрейм (*bitsPerFrame*).

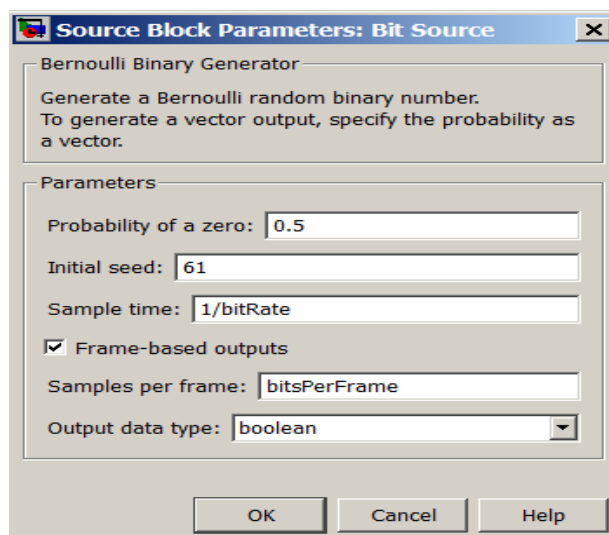


Рис. 2. Окно параметров блока *Bernoulli Binary*

По умолчанию, скорость передачи данных (*bitRate*) равна 500 кбит/с, что соответствует скорости символов при QPSK 250 000 символов/с):

$\text{bitRate} = 500000$ $\text{bits Per Frame} = 200$

Блок *Multipath Rician Fading Channel* реализует среду распространения радиоволн с замираниями Райса для узкополосных систем (в моделях должны использоваться модуляторы в основной полосе частот *Baseband Modulator*). Этот блок целесообразно использовать для мобильных систем связи, в которых передаваемый сигнал может достигнуть приемника, как по прямому пути, так и по путям, создаваемыми отраженными лучами.

Окно параметров блока *Multipath Rician Fading Channel* показано на рисунке 3.

Блок *Multipath Rician Fading Channel* так же можно использовать для моделирования мобильных систем, когда передатчик перемещается относительно приемника. При этом линия прямой видимости является доминирующей.

Относительное движение передатчика и приемника приводит к появлению доплеровского сдвига частоты сигнала.

Максимальный доплеровский сдвиг частоты вычисляется как:

$$\Delta f_{\max} = V * f / c, \quad (1)$$

где V – скорость передвижения;
 f – несущая частота;
 c – скорость света.

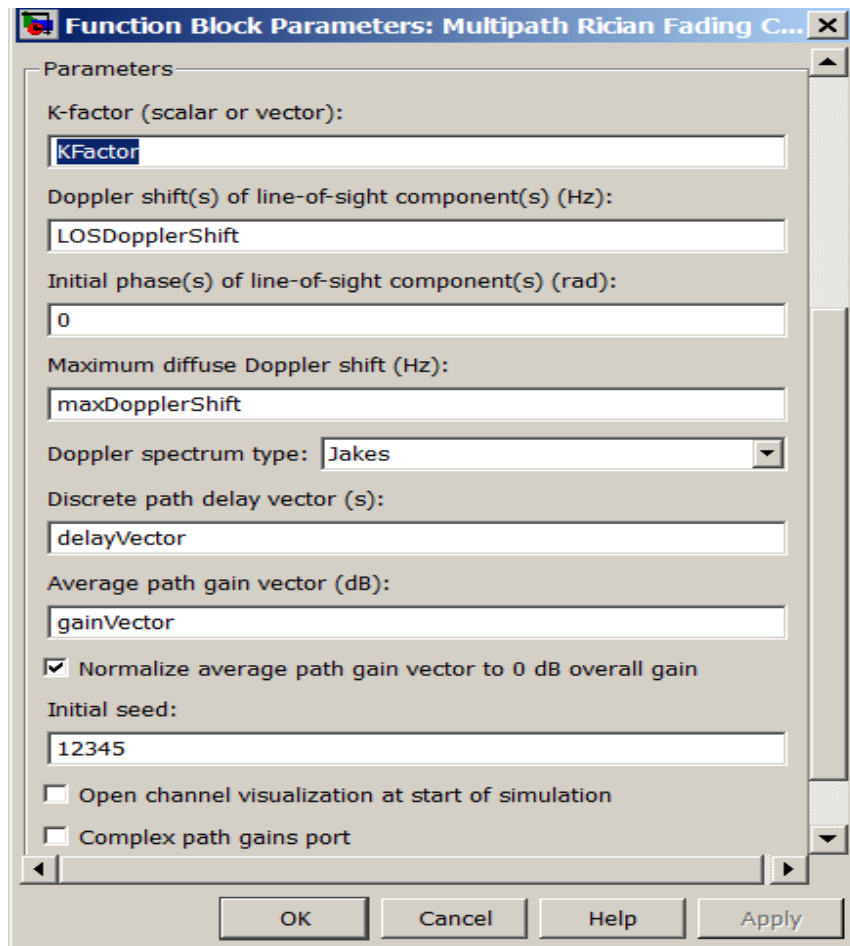


Рис. 3. Окно параметров блока *Multipath Rician Fading Channel*

Например, максимальный доплеровский сдвиг частоты, равный 200 Гц, соответствует скорости передвижения 65 миль/час (30 м/с) и несущей частоте 2 ГГц.

В блоке можно задать тип доплеровского спектра, используя окно параметров блока *Doppler spectrum type*.

Регулируемыми параметрами блока *Multipath Rician Fading Channel* являются:

- *Maximum Doppler shift (Hz)* – максимальное значение доплеровского сдвига;
- *Doppler Spectrum type* – модель доплеровского спектра;
- *Discrete path delay vector (s)* – значение задержки запаздывающего сигнала;
- *Average path gain vector* – коэффициент усиления задержанного сигнала;
- *K-factor* – отношение мощности сигнала, приходящего по прямому пути, к мощности рассеянного (отраженного сигнала).

По умолчанию, в блоке установлены следующие параметры:

```
maxDopplerShift = 200
delayVector: [0 0.0400 0.0800 0.1200]
gainVector: [0 -3 -6 -9]
```

Доплеровский сдвиг компоненты линии прямой видимости, как правило, меньше, чем максимальный доплеровский сдвиг и зависит от направления пути мобильного телефона. В модели установлены следующие параметры:

```
LOSDopplerShift = 100
K-Factor = 10
```

Установленные по умолчанию параметры соответствуют режиму работы модели в канале с частотно-селективными замираниями для случая 4-х путей распространения радиоволн.

- 1.4. Установите все блоки модели в режим ожидания открытия при запуске модели.
- 1.5. Установите параметры моделирования: **Start = 0.0, Stop = inf.**
- 1.6. Запустите модель.
- 1.7. Откройте окно блока *Multipath Rician Fading Channel*.
- 1.8. Пронаблюдайте характер доплеровского спектра, выбрав в окне визуализации блока режим *Doppler Spectrum* (рис. 4).

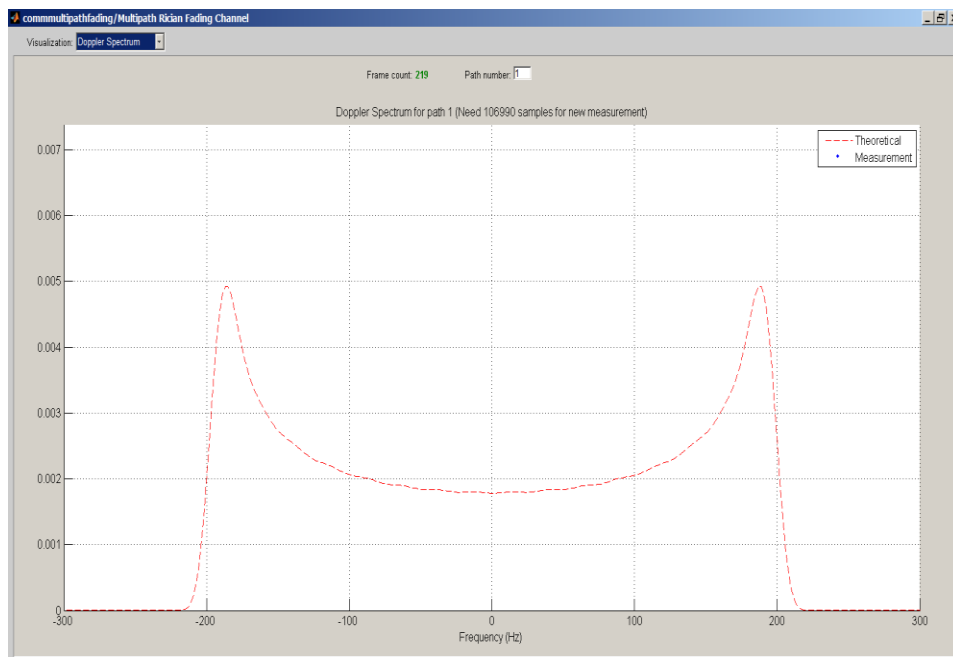


Рис. 4. Доплеровский спектр

- 1.9. Рассчитайте скорость передвижения мобильного абонента для значений несущей частоты, равных 2 и 4 ГГц.
- 1.10. Проанализируйте полученные результаты.
- 1.11. Выберите режим визуализации IR и FR (импульсная и частотная характеристика канала) и наблюдайте эти характеристики (рис. 5).

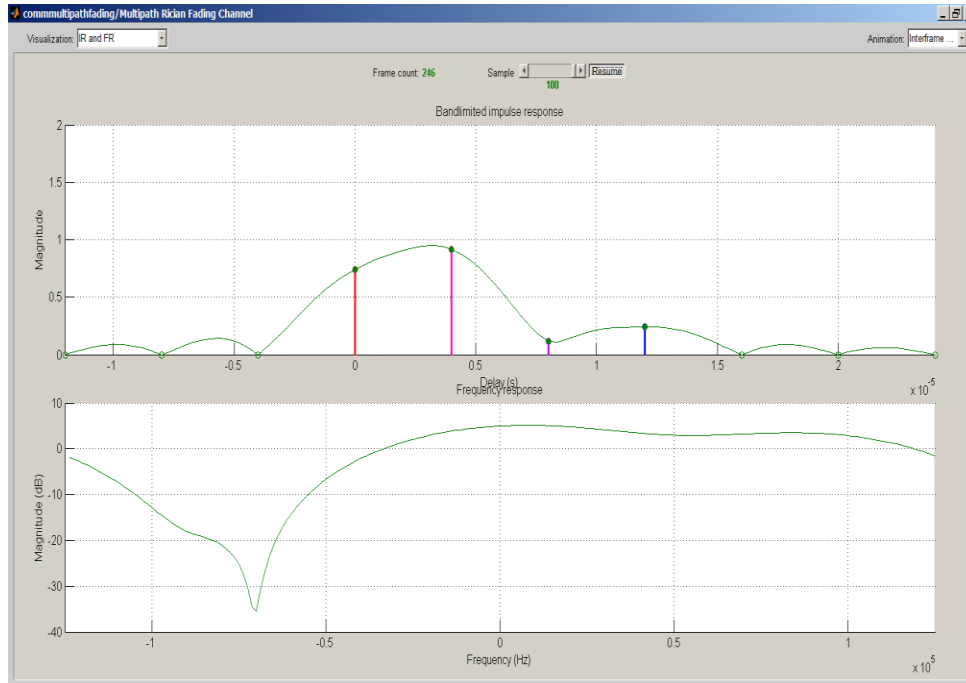


Рис. 5. Импульсная и частотная характеристика канала с ЧСЗ

В анализируемой модели замирания моделируются как изменение комплексного коэффициента передачи канала, который характеризует как затухание сигнала, так и фазовый сдвиг. «Фазовая траектория» показывает, как изменяются эти параметры. При этом синяя линия соответствует изменению фазы, зеленая – изменению затухания.

- 1.12. В режиме визуализации *Phasor Trajectory* наблюдайте изменение амплитуды и фазы сигнала (рис. 6).
- 1.13. Остановите работу модели.
- 1.14. Установите следующие параметры блока *Multipath Rician Fading Channel*.

```
bitsPerFrame = 200
delayVector: [0 4e-6]
gainVector: [0 3e-3]
```

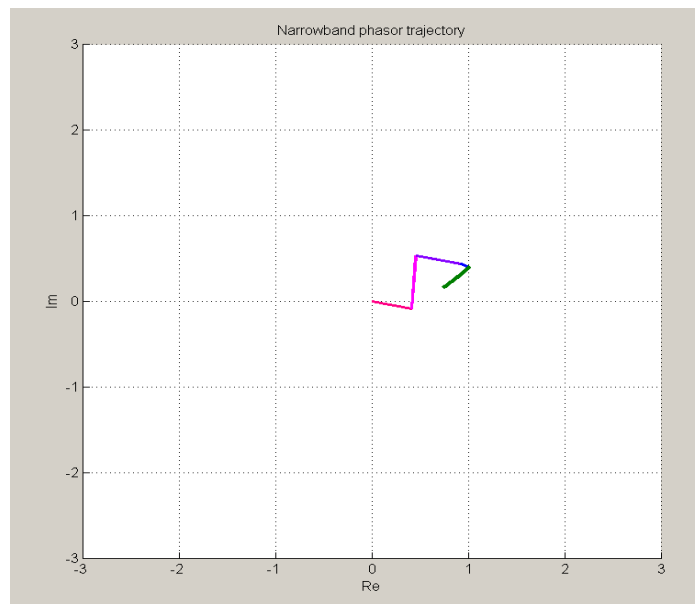


Рис. 6. Фазовая траектория

Сигнал испытывает глубокий провал, когда «фазовая траектория» проходит через или около нуля.

1.15. Запустите модель и пронаблюдайте сигнальное созвездие (рис. 7).

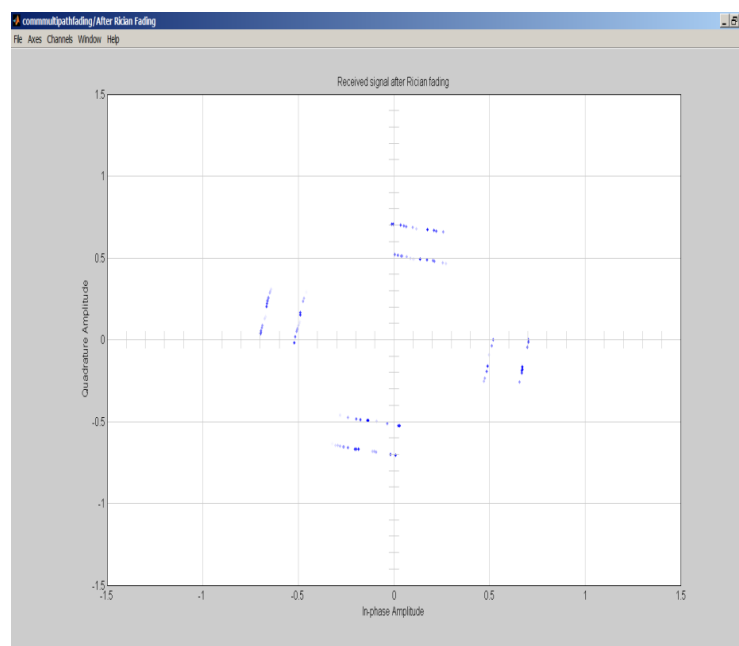


Рис. 7. Сигнальное созвездие

1.16. Объясните полученный результат.

1.17. Остановите и затем закройте исследуемую модель.

2. Исследование помехоустойчивости ЦСПС с BPSK в каналах с AWGN

2.1. Соберите модель ЦСПС для проведения исследований (рис. 8).

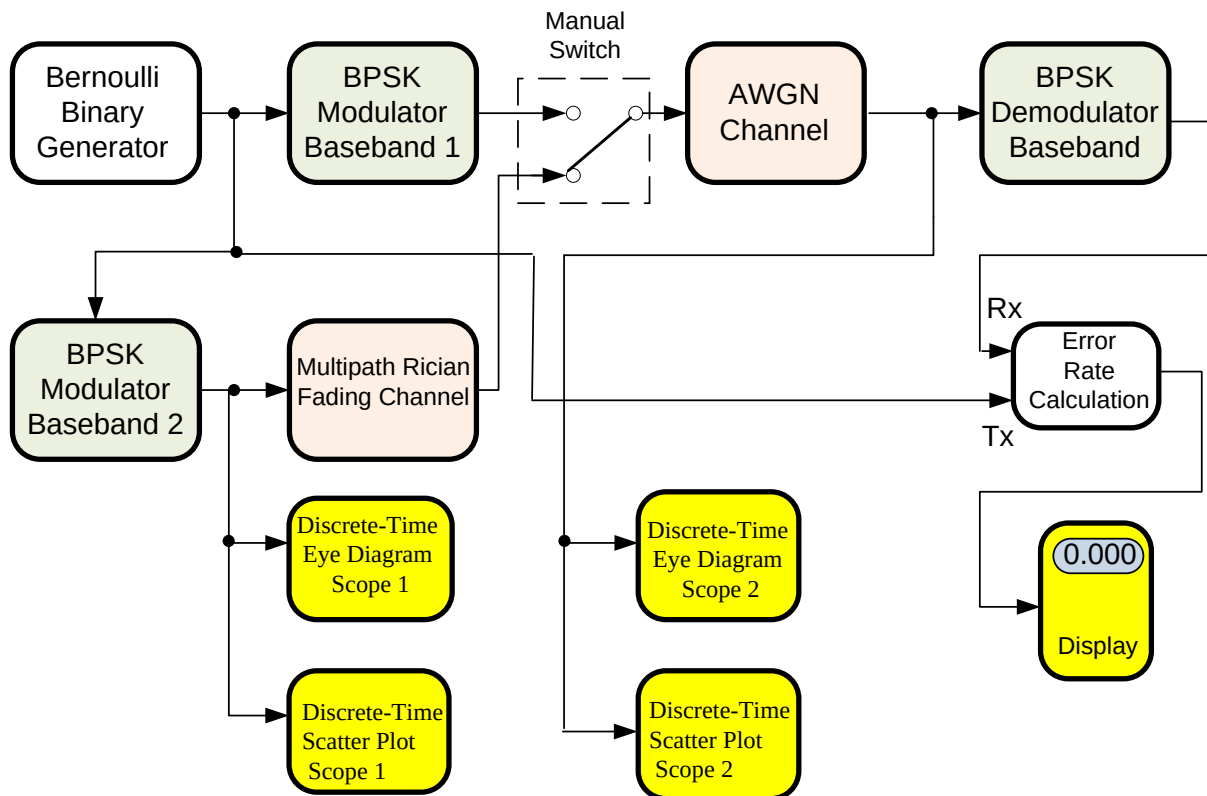


Рис. 8. Схема модели цифровой системы радиосвязи

В модели используются следующие блоки:

- *Bernoulli Binary Generator* (генератор последовательности импульсов в формате NRZ – имитатор цифрового сигнала): Communications Blockset – Comm Sources;
- *BPSK Modulator Baseband* (частотный модулятор в основной полосе частот): Communications Blockset–Modulation-PM;
- *BPSK Demodulator Baseband* (частотный демодулятор в основной полосе частот): Communications Blockset–Modulation-PM;
- *AWGN Channel* (канал с аддитивным белым гауссовым шумом): Communications Blockset–Channels;
- *Multipath Rician Fading Channel* (канал с замираниями Рэлея): Communications Blockset–Channels;
- *Discrete-Time Eye Diagram Scope* (блок наблюдения «глаз–диаграмм»): Communications Blockset–Comm Sinks;

- *Discrete-Time Scatter PlotScope* (блок наблюдения сигнальных созвездий): *Communications Blockset–Comm Sinks*;
- *Error Rate Calculation* (счетчик ошибок): *Communications Blockset–Comm Sinks*; *Display*: *Simulink–Sinks*;
- *Manual Switch* (управляемый переключатель): *Simulink–Signal Routings*.

Регулируемые параметры блоков модели:

Окна параметров блоков *Bernoulli Binary Generator* и *BPSK Modulator Baseband* приведены на рисунках 9 и 10.

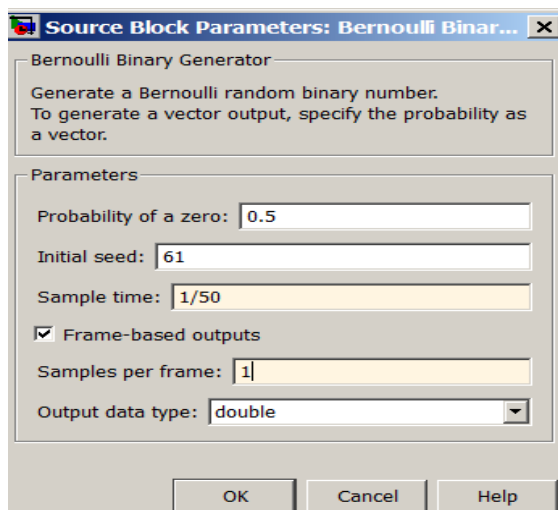


Рис. 9. Окно параметров блока *Bernoulli Binary Generator*

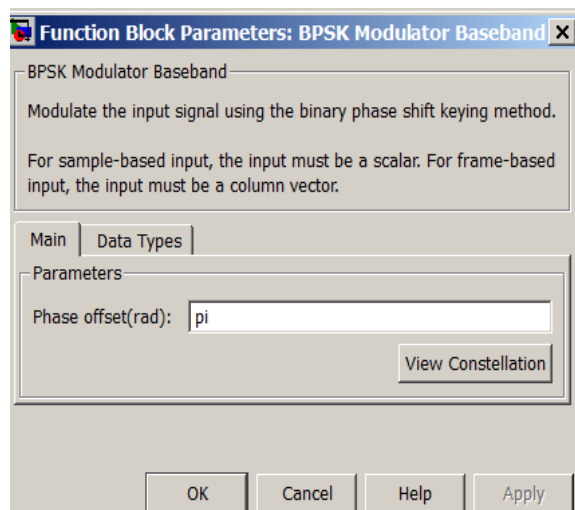


Рис. 10. Окно параметров блока *BPSK Modulator Baseband*

Блок *Bernoulli Binary Generator* вырабатывает ПСП импульсов в формате NRZ. Регулируемые параметры блока:

- *Probability of a zero* – вероятность появления символов «0»;
- *Sample time* – длительность импульсов ПСП;
- *Samples per frame* – число переданных бит в кадре;
- *Output data type* – тип выходных данных.

Блок *BPSK Modulator Baseband* вырабатывает двухпозиционный фазомодулированный сигнал в основной полосе частот.

Окна параметров блоков *BPSK Demodulator Baseband* и *Error Rate Calculation* приведены на рисунках 11 и 12.

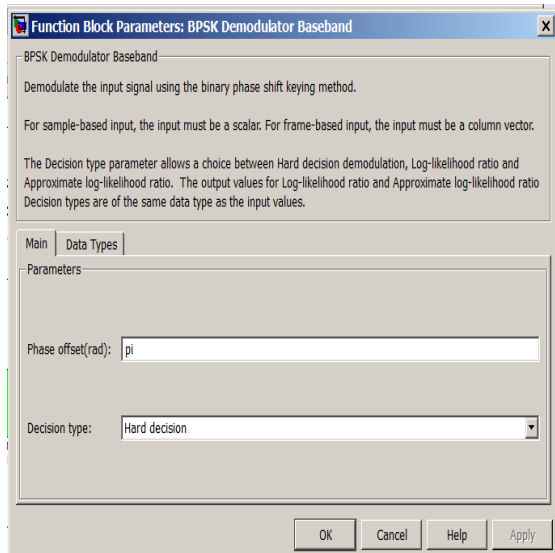


Рис. 11. Окно параметров блока *BPSK Demodulator Baseband*

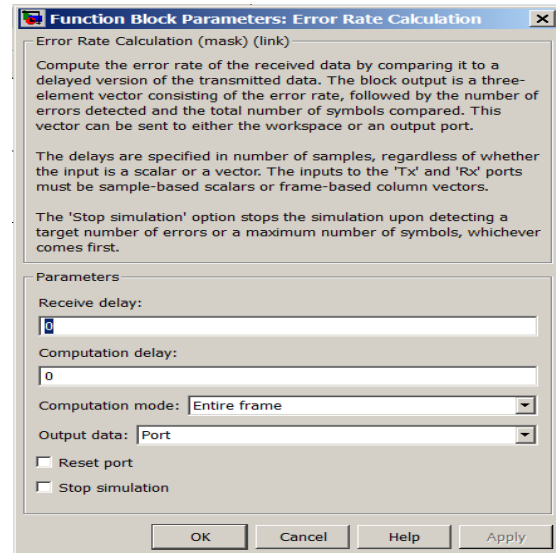


Рис. 12. Окно параметров блока *Error Rate Calculation*

Регулируемым параметром блока *Error Rate Calculation* является значение *Receive delay* – задержка сигнала на входе блока.

Блок *AWGN Channel* реализует среду распространения радиоволн в канале с аддитивным белым гауссовым шумом.

Регулируемыми параметрами блока *AWGN Channel* являются:

- *Mode* – тип отношения сигнал/шум;
- E_b/N_0 – отношение энергии сигнала на бит к спектральной плотности теплового шума;
- *Number of bits per symbol* – число бит на символ;
- *Symbol Period* – символьный период;
- *Output data type* – тип выходных данных.

Блок *Multipath Rician Fading Channel* реализует канал с замираниями Райса.

Регулируемыми параметрами блока *Multipath Rician Fading Channel* являются:

- *Maximum Doppler shift (Hz)* – максимальное значение доплеровского сдвига;
- *Doppler Spectrum type* – модель доплеровского спектра;
- *Discrete path delay vector (s)* – значение задержки запаздывающего сигнала;
- *Average path gain vector* – коэффициент усиления задержанного сигнала;
- *K-factor* – отношение мощности сигнала, приходящего по прямому пути, к мощности рассеянного (отраженного сигнала).

Окна параметров блоков *AWGN Channel* и *Multipath Rician Fading Channel* приведены на рисунках 13 и 14.

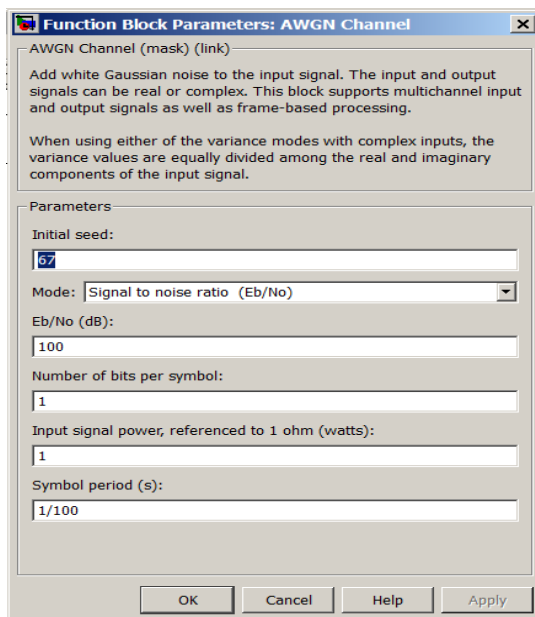


Рис. 13. Окно настроек блока *AWGN Channel*

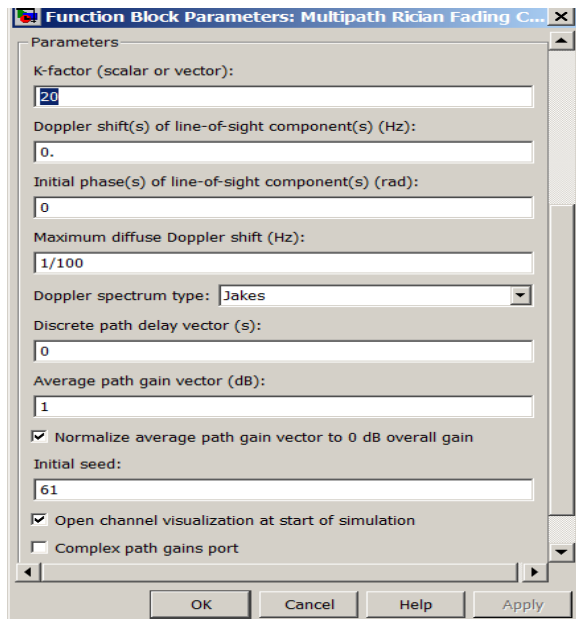


Рис. 14. Окно настроек блока *Multipath Rician Fading Channel*

2.2. Установите параметры блоков модели, приведенные в таблице 1.

Табл. 1. Параметры модели

Блок <i>Bernoulli Binary Generator</i>	
Sample Time	1/100
Frame-based outputs	флажок
Samples per frame	4
Output data type	double
Блок <i>BPSK Modulator Baseband</i>	
Phase offset (rad)	pi
Output data type	double
Блок <i>BPSK Demodulator Baseband</i>	
Phase offset (rad)	pi
Output data type	double

Продолжение табл. 1

Блок AWGN Channel	
Mode	Signal to noise ratio (E_b/N_0)
E_b/N_0	10
Number bits per symbol	1
Input Signal power...	1
Symbol period	0.01
Блок Multipath Rician Fading Channel	
K-factor	100
Doppler schift (s) of line.....	500
Initial phase (s).....	0
Maximum diffuse Doppler schift (Hz)	1/100
Doppler spectrum type	Jaces
Average path gain vector (s)	[0]
Normalise average path gain.....	[0]
Блок Discrete Time Eye Diagram Scope	
Samples per symbol	2
Offset (samples)	0
Symbol per trace	1
Traces displayed	400
New points per display	10
Блок Discrete Time Scatter PlotScope	
Samples per symbol	4
Offset (samples)	0
Points displayded	400
New points per display	10
Блок Error Rate Calculation	
Receive delay	0
Computation delay	0
Computation mode	Entre frame
Output data	Port
Параметры модели	
Start	0.0
Stop	inf

- 2.3. Установите режим работы модели без замираний.
- 2.4. Установите значение $E_b/N_0 = 100 \text{ dB}$.
- 2.5. Запустите модель и проанализируйте влияние белого шума на сигнальные созвездия, глаз-диаграммы (рис. 15–16).

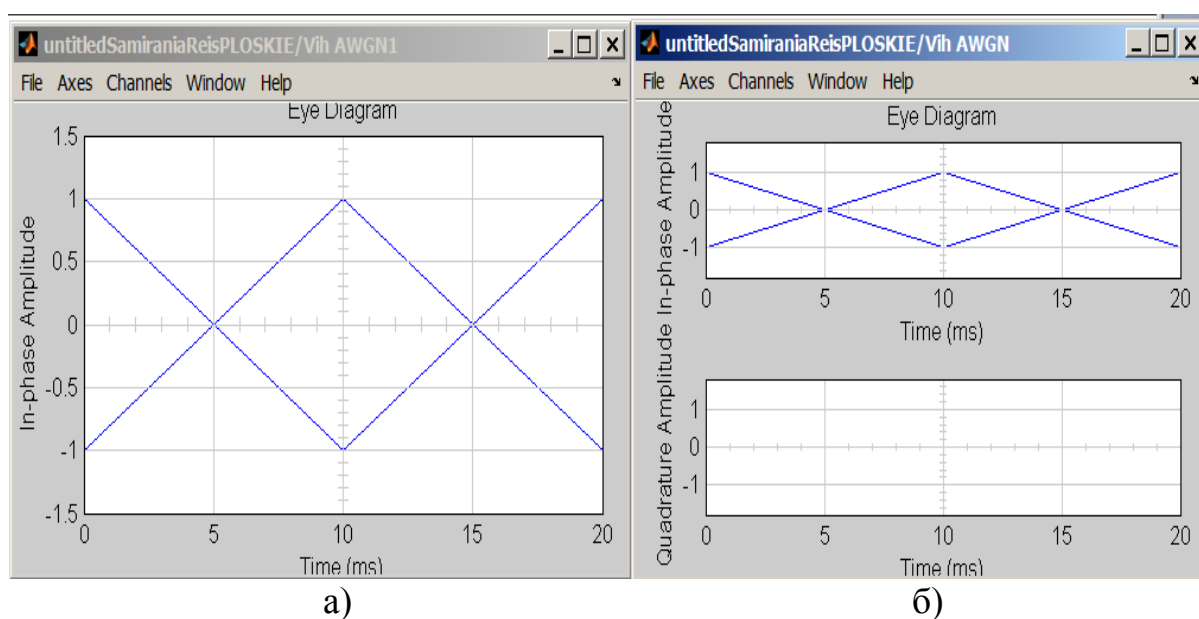


Рис. 15. Глаз-диаграммы на выходе генератора (а) и выходе модулятора (б)

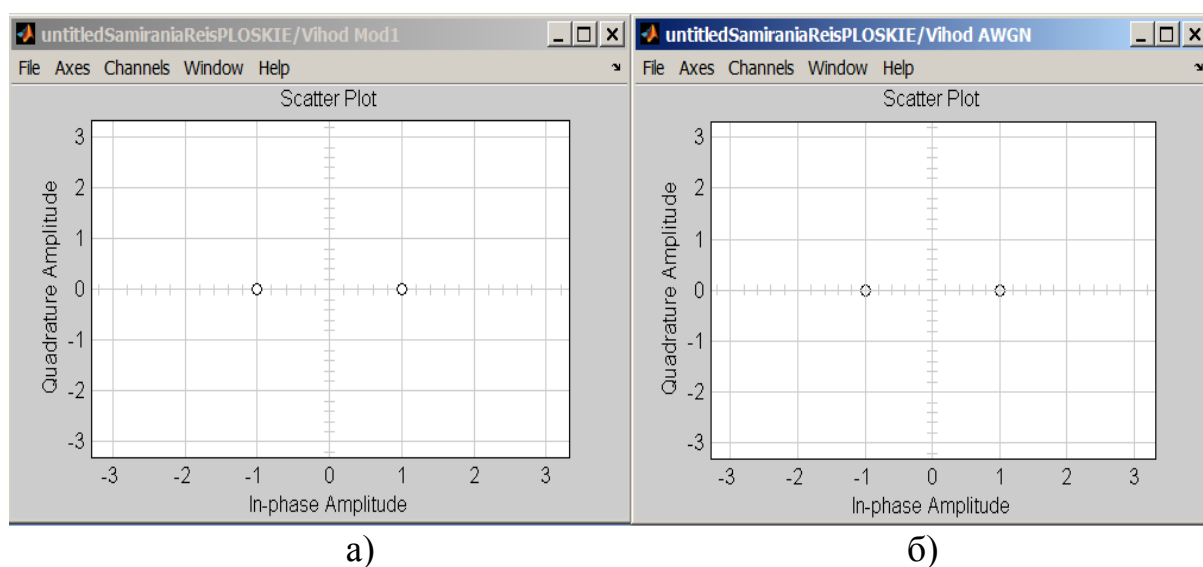


Рис. 16. Сигнальные созвездия на выходе модулятора (а) и выходе канала AWGN (б) при малом уровне шума

- 2.6. Зафиксируйте значение коэффициента ошибок и остановите работу модели.
- 2.7. Установите значение $E_b/N_0 = 20 \text{ dB}$.

2.8. Запустите модель и проанализируйте влияние белого шума на сигнальные созвездия, глаз-диаграммы (рис. 17–18).

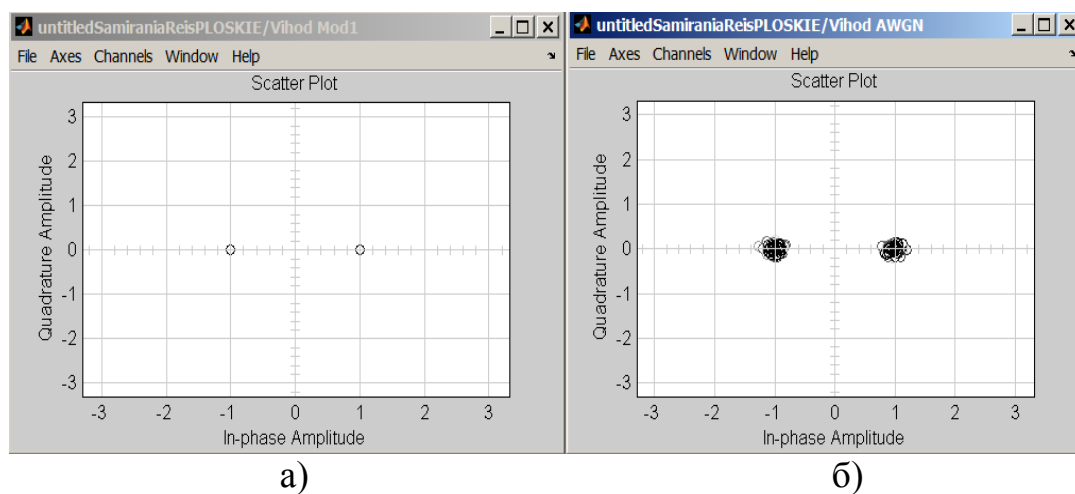


Рис. 17. Сигнальные созвездия на выходе модулятора (а) и выходе канала AWGN (б) при наличии шума

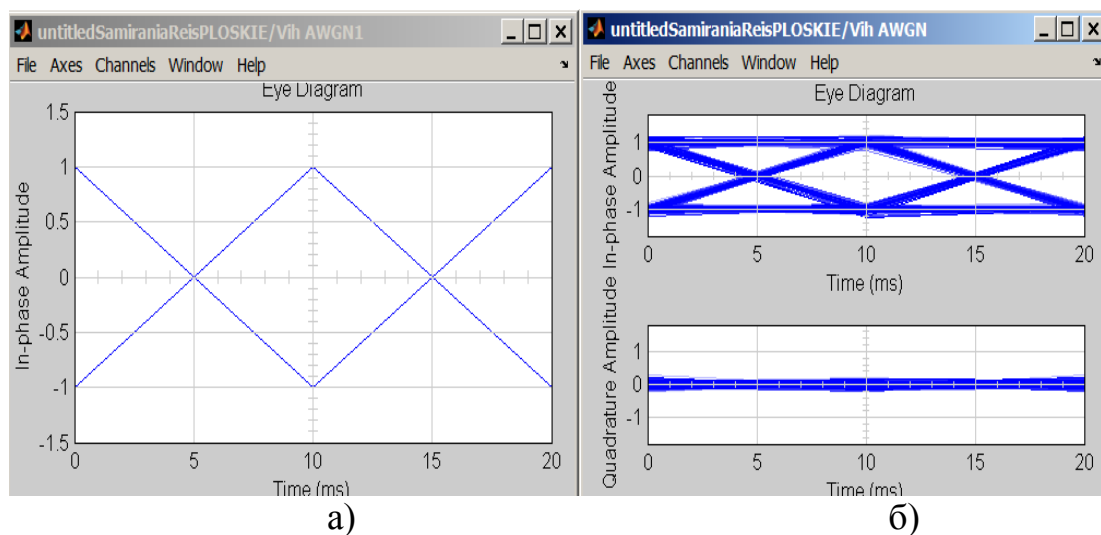


Рис. 18. Глаз- диаграммы на выходе модулятора (а) и выходе канала AWGN (б) при наличии шума

2.9. Остановите работу модели.

2.10. Снимите зависимость $\kappa_{\text{ош}} = f(E_b/N_0)$, изменяя отношение сигнал/шум в пределах от 2 до 10 дБ с шагом 2 дБ.

2.11. Остановите работу модели.

3. Исследование помехоустойчивости ЦСПС с BPSK в канале с «плоскими» замираниями

3.1. В модели ЦСПС (рис. 8) установите следующие параметры блока *Multipath Rician Fading Channel*:

K -factor = 10
Doppler shift (s) of line-of-sight component(s) = 5
Maximum diffuse Doppler shift = 1/100
Discrete path delay vector: [0]
Average path gain vector: [0]
Normalise average path gain vector to 0 dB gain – галочка.

Данные параметры соответствуют случаю работы модели с малыми межсимвольными искажениями.

- 3.2. Установите длительность тактового интервала цифрового сигнала равной 1/1000.
- 3.3. Установите отношение сигнал/шум в канале AWGN $E_b/N_0 = 100$ dB.
- 3.4. Запустите модель и, наблюдая сигнальное созвездие и глаз-диаграмму, проанализируйте влияние замираний на сигнал при низком уровне шумов в канале с AWGN (рис. 19).

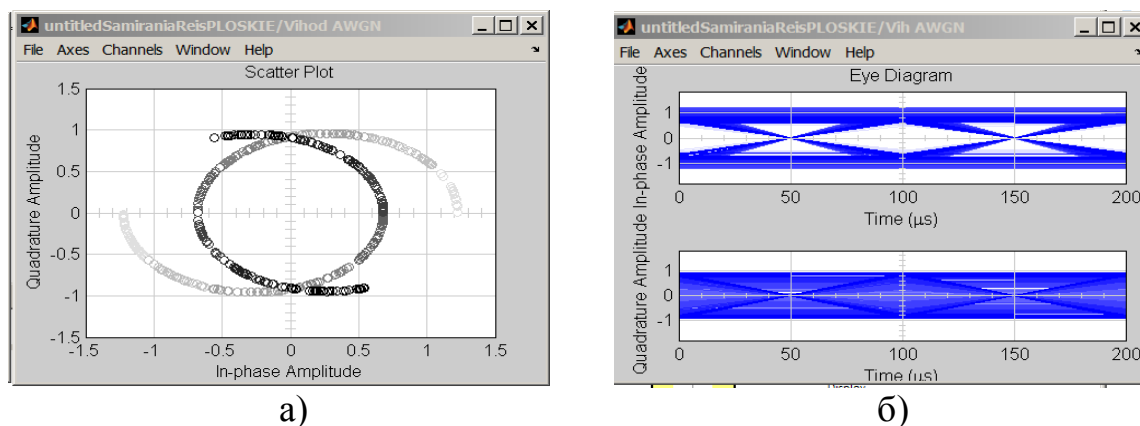
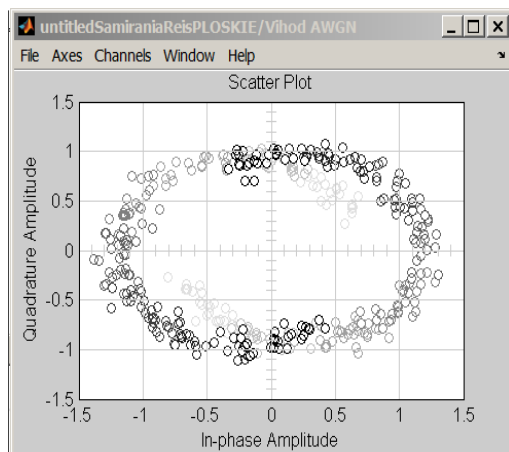
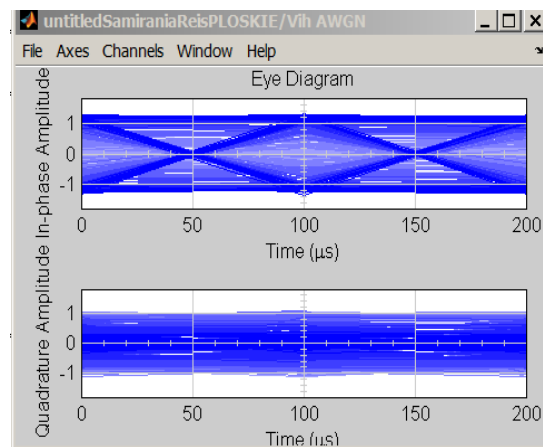


Рис. 19. Сигнальное созвездие (а) и глаз-диаграмма (б) при низком уровне шума в канале с AWGN

- 3.5. Остановите работу модели.
- 3.6. Установите отношение сигнал/шум в канале AWGN $E_b/N_0 = 20$ dB.
- 3.7. Запустите модель и, наблюдая сигнальное созвездие и глаз-диаграмму, проанализируйте влияние замираний на сигнал при высоком уровне шумов в канале с AWGN (рис. 20).



а)

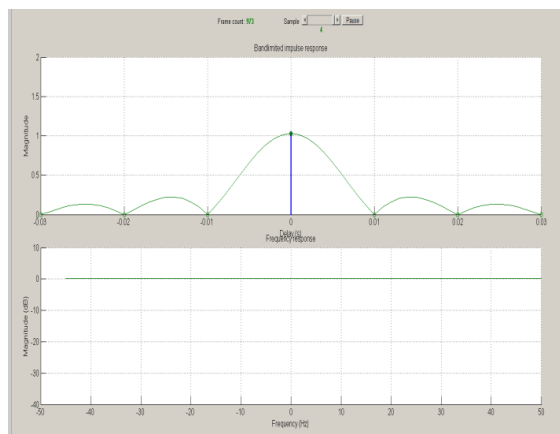


б)

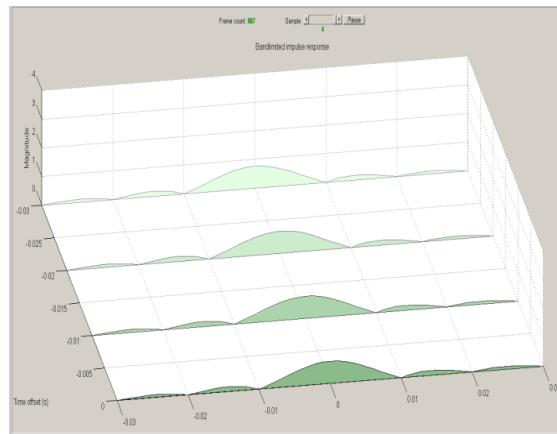
Рис. 20. Сигнальное созвездие (а) и глаз-диаграмма (б) при высоком уровне шума в канале с AWGN

3.8. Объясните полученные результаты;

3.9. Проанализируйте импульсную и частотную характеристики канала с замираниями (рис. 21 а) и характер доплеровского спектра (рис. 21 б).



а)



б)

Рис. 21. Импульсная и частотная характеристики канала с замираниями (а) и Доплеровский спектр (б)

3.10. Остановите работу модели.

3.11. Установите следующие параметры блока *Multipath Rician Fading Channel*:

K-factor = 10

Doppler shift (s) of line-of-sight component(s) = 500

Maximum diffuse Doppler shift = 1/100

Discrete path delay vector : [0]

Average path gain vector: [0]

Normalise average path gain vector to 0 dB gain – галочка.

- 3.12. Снимите зависимость $\kappa_{\text{ош}} = f(E_b/N_0)$, изменяя отношение сигнал/шум в пределах от 2 до 10 дБ с шагом 2 дБ.
- 3.13. Полученные результаты оформите в виде таблицы и графика. На графике постройте так же зависимость $\kappa_{\text{ош}} = f(E_b/N_0)$, полученную в п. 2.10.
- 3.14. Остановите работу модели и закройте модель.
- 3.15. Используя инструмент BERTool, получите теоретические зависимости $\kappa_{\text{ош}} = f(E_b/N_0)$ для канала с AWGN, канала с замираниями Райса при значениях К-фактора равного 0 и 10 (рис. 22).

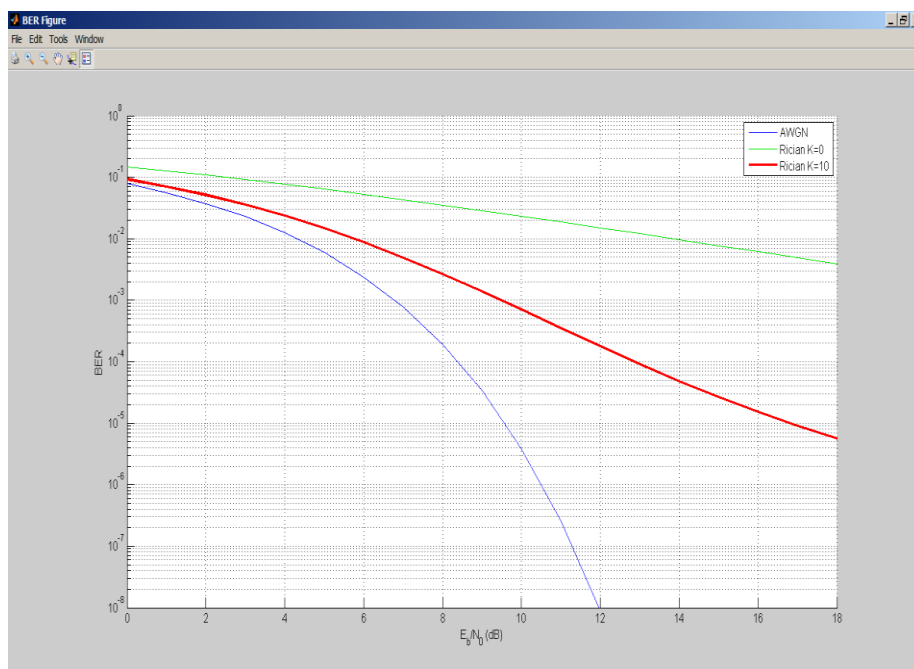


Рис. 22. Теоретические зависимости $\kappa_{\text{ош}} = f(E_b/N_0)$

- 3.16. Полученные результаты сравните с данными моделирования, и сформулируйте выводы по результату проведенного анализа.
- 3.17. Закройте окно BERTool.

4. Исследование помехоустойчивости ЦСПС с BPSK в канале с частотно-селективными замираниями

4.1. В модели ЦСПС (рис. 8) установите следующие параметры блока *Multipath Rician Fading Channel*:

K -factor = 10
Doppler shift (s) of line-of-sight component(s) = 200
Maximum diffuse Doppler shift = 1
Discrete path delay vector : [0 0.02 0.04]
Average path gain vector: [0 -15 -15]
Normalise average path gain vector to 0 dB gain – галочка.

Данные параметры соответствуют случаю работы модели с ЧСЗ при малых межсимвольных искажениях.

- 4.2. Установите длительность тактового интервала цифрового сигнала равной 1/100.
- 4.3. Установите отношение сигнал/шум в канале AWGN $E_b/N_0 = 12$ dB.
- 4.4. Запустите модель и, наблюдая сигнальные созвездия и глаз-диаграммы, проанализируйте влияние замираний на сигнал (рис. 23–24).

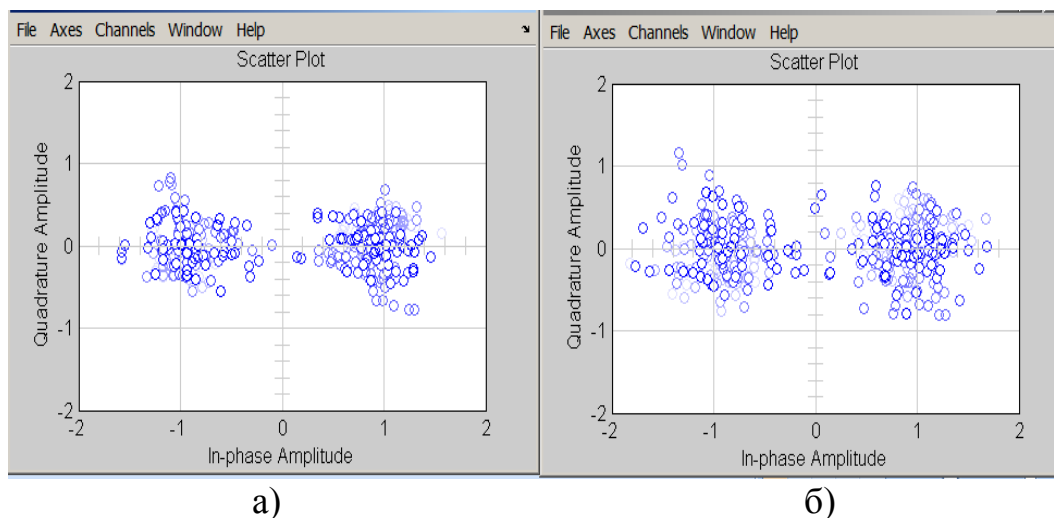


Рис. 23. Сигнальное созвездие на выходах блока *Multipath Rician Fading Channel* (а) и блока AWGN (б)

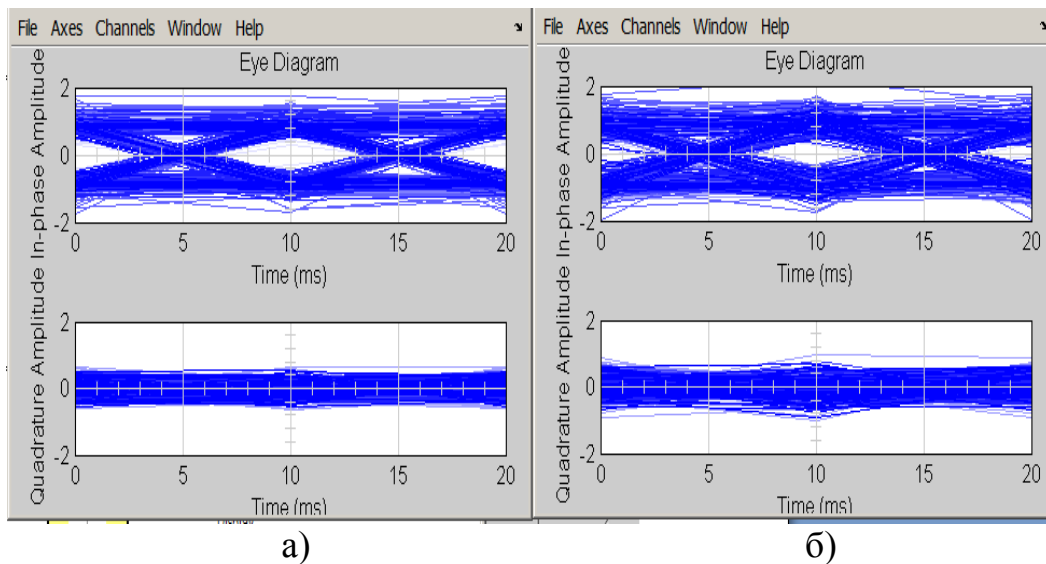


Рис. 24. Глаз–диаграммы на выходах блока *Multipath Rician Fading Channel* (а) и блока *AWGN* (б)

4.5. Проанализируйте импульсную и частотную характеристики канала с ЧСЗ и «фазовую траекторию» сигнала (рис. 25).

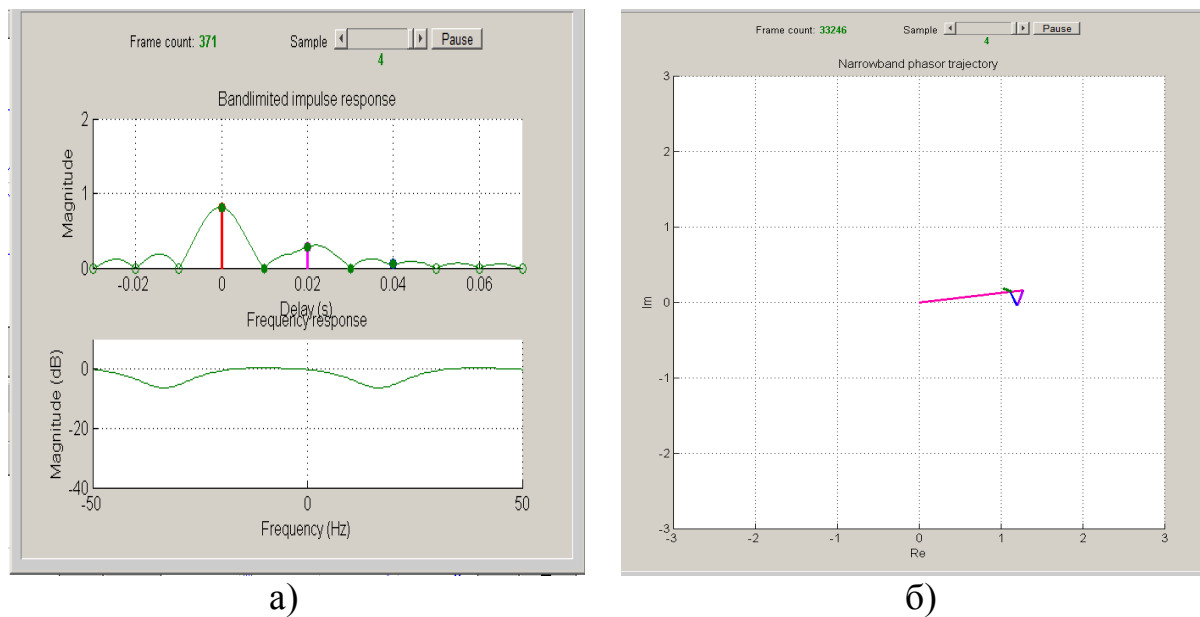


Рис. 25. Импульсная характеристика канала с ЧСЗ (а) и «фазовая траектория сигнала» (б)

4.6. Пронаблюдайте доплеровский спектр (рис. 26).

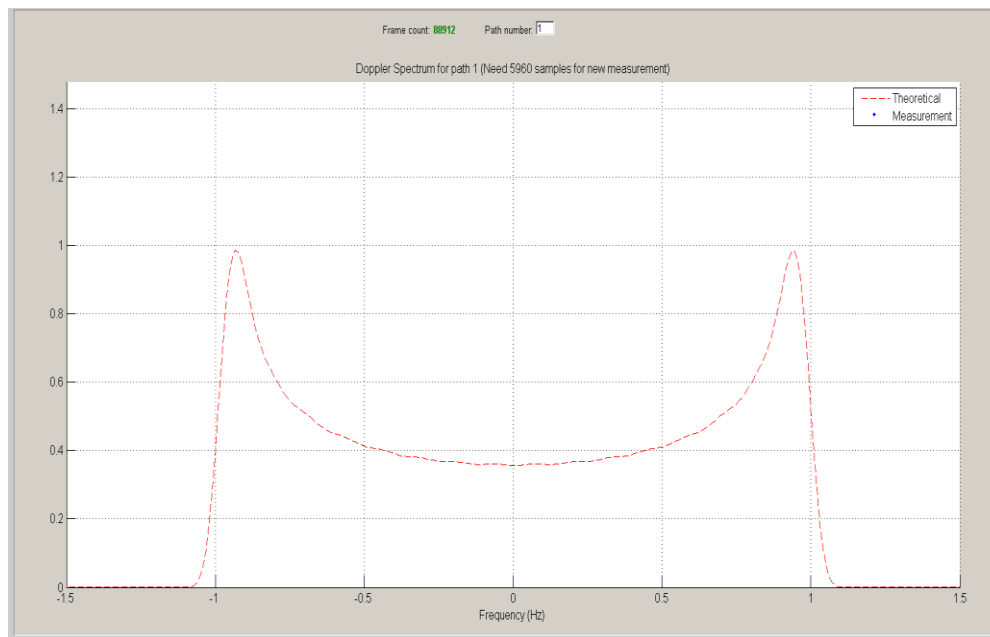


Рис. 26. Доплеровский спектр

- 4.7. Остановите работу модели.
- 4.8. Объясните полученные результаты.
- 4.9. Снимите зависимость $\kappa_{\text{ош}} = f(E_b/N_0)$, изменяя отношение сигнал/шум в пределах от 2 до 10 дБ с шагом 2 дБ.
- 4.10. Полученные результаты оформите в виде таблицы и графика.
На графике постройте так же зависимость $\kappa_{\text{ош}} = f(E_b/N_0)$, полученную в п. 2.10.
- 4.11. Остановите работу модели и закройте модель.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Схемы исследуемых моделей ЦСПС.
2. Результаты исследований в виде таблиц и графиков.
3. Выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы

1. Поясните особенности моделирования телекоммуникационных устройств в MATLAB/Simulink.
2. Какие замирания называются плоскими?
3. Какие замирания называются частотно-селективными?
4. При каких значениях параметров ЦСПС и канала наблюдаются плоские замирания?
5. При каких значениях параметров ЦСПС и канала наблюдаются частотно-селективные замирания?

6. Поясните физическую суть эффекта Доплера.
7. Каким соотношением связаны скорость передвижения и максимальный доплеровский сдвиг частоты?
8. Поясните, каким образом изменяются сигнальные созвездия и глаз-диаграммы при наличии замираний в радиоканале?
9. Поясните, что понимается под импульсной характеристикой канала с замираниями?
10. Поясните закон распределения Райса.
11. При каких условиях возникают замирания Райса?
12. Поясните закон распределения Райса.
13. Какие числовые характеристики многолучевых каналов с замираниями вы знаете?
14. Поясните модель Кларка для эффекта Доплера.

Лабораторная работа № 8.7

«Исследование помехоустойчивости ЦСРС в канале с замираниями Рэлея»

Цель работы: изучение причин возникновения замираний в ЦСРС и исследование помехоустойчивости ЦСРС в канале с замираниями.

Подготовка к работе

По указанной литературе:

- 1) изучить причины появления замираний в ЦСРС;
- 2) подготовить бланк отчета по лабораторной работе;
- 3) подготовить ответы на контрольные вопросы.

Рекомендуемая литература

1. *Маглицкий Б.Н.* Космические и наземные системы радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2014. – 300 с.
2. *Маглицкий Б.Н.* Спектрально-эффективные методы модуляции в цифровых системах радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2009. – 120 с.
3. *Носов В.И., Дроздов Н.В., Тимощук Р.С.* Моделирование систем связи в среде MATLAB : Учебное пособие. – Новосибирск: СибГУТИ, 2007. – 178 с.
4. Теоретическая часть данного учебного пособия.

При выполнении лабораторной работы используется IBM – совместимый компьютер с процессором Pentium II и выше, операционная система Windows XP, Windows 7.

Программное обеспечение: СКМ «MATLAB/Simulink» (R2009b).

Выполнение лабораторной работы

1. Запустить MATLAB.
2. Открыть модель для анализа работы блока, имитирующего радиоканал с замираниями Рэлея (рис. 1).

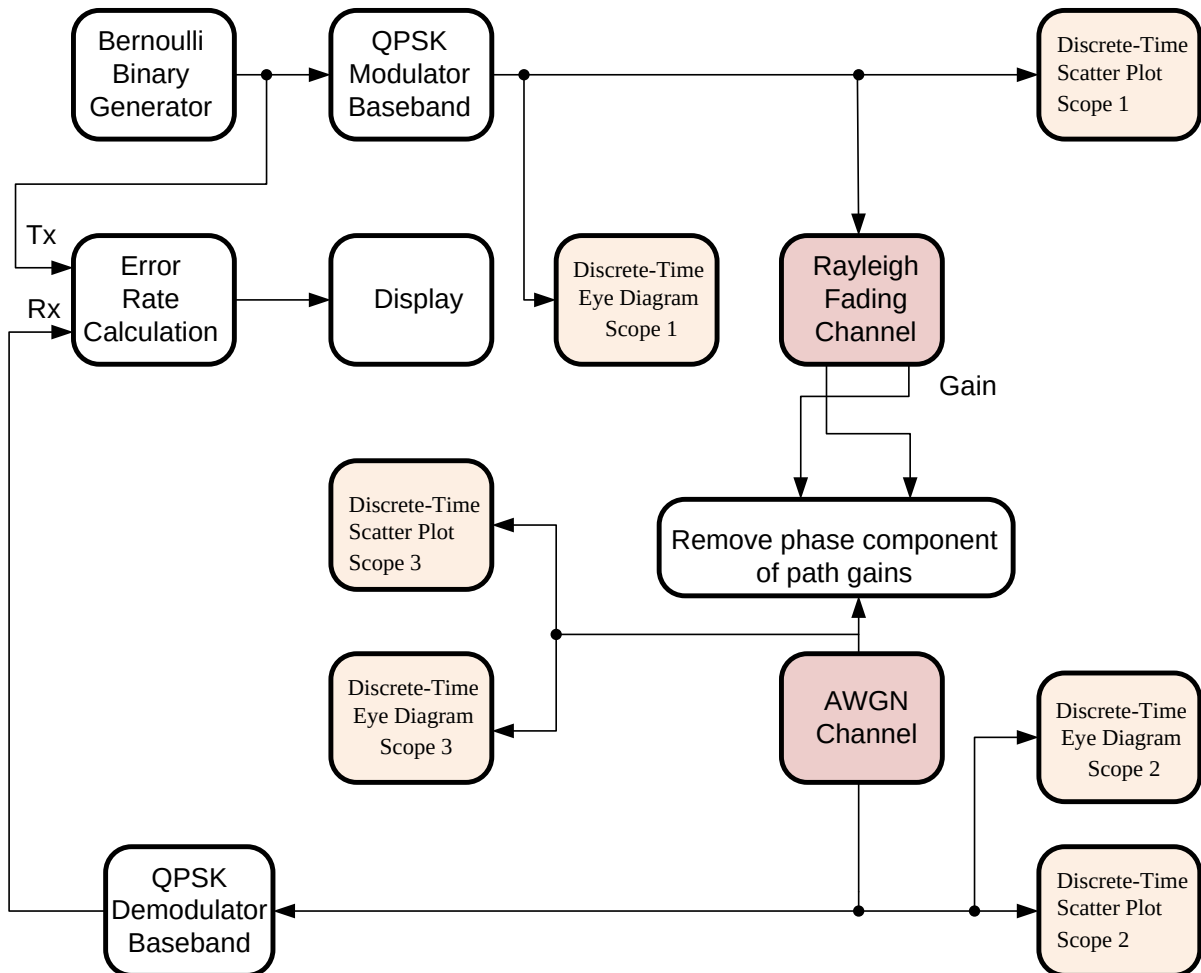


Рис. 1. Схема модели для анализа работы блока *Rayleigh Fading Channel* (канал с замираниями Рэлея)

Рассмотрим особенности моделирования в MATLAB/Simulink.

В силу своей специфики, компьютерное моделирование систем связи имеет ряд характерных особенностей, о которых необходимо упомянуть, прежде чем переходить к более подробному рассмотрению компонентов модели.

В первую очередь следует рассмотреть метод моделирования для ВЧ сигналов. Любой непрерывный сигнал за какой-либо отрезок времени принимает бесконечное число значений. Поскольку описать такой сигнал как массив значений амплитуды не представляется возможным (получится бесконечный массив), в MATLAB любой сигнал представляется как последовательность от-

счетов, взятых с периодом, величина которого в настройках обозначается как «время отсчета» (Sample Time).

Очевидно, что чем меньше этот период, тем точнее отображен сигнал. Для иллюстрации служит рисунок 2, на котором приведен синусоидальный сигнал с частотой 100 Гц, дискретизированный с периодом дискретизации 0,01 секунды, то есть за 1 секунду ЭВМ обрабатывает 100 значений, каждое из которых является амплитудой синусоиды в определенный момент времени.

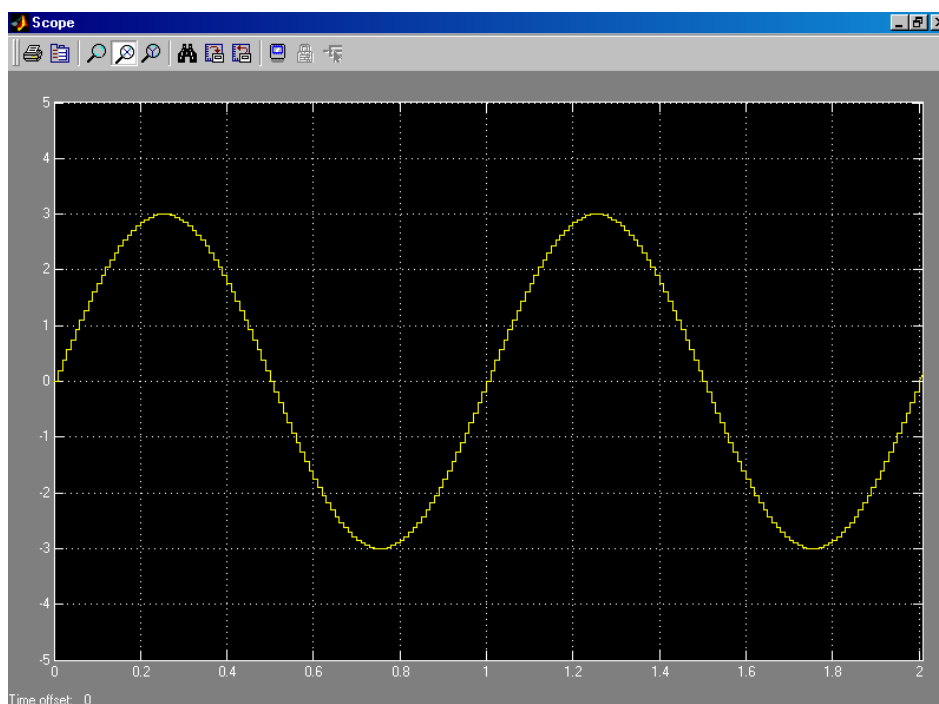


Рис. 2. Синусоидальный сигнал, дискретизированный с частотой 100 Гц

Конечно, для современных процессоров такая задача не представляет никакой сложности. Но исследование сложных систем, с многократными преобразованиями сигналов СВЧ оказывается достаточно ресурсоемким процессом, и время симуляции иногда значительно превышает время реального процесса даже на мощных компьютерах.

Для снижения нагрузки на центральный процессор и ускорения процесса симуляции в системе MATLAB для моделирования модуляции цифровых сигналов используется так называемая низкочастотная модуляция или симуляция (*baseband modulation*), известная также как эквивалентный метод низких частот (*lowpass equivalent method*).

Суть метода заключается в том, что вместо множества отсчетов амплитуды за время равное длине модуляционного символа передается комплексное число, модуль которого равен амплитуде, фаза – фазе модулированного сигнала.

Вероятность ошибки при использовании моделей с полосовой (*Passband*) и узкополосной (*Baseband*) модуляцией отличается менее чем на 1%, однако, при этом модели с использованием полосовой модуляции требуются несравнимо большее время, для обработки такого же объема данных. Разница в скорости симуляции особенно заметна, при больших значениях несущей частоты.

Еще одним способом, применяемым в MATLAB с целью уменьшить время симуляции процесса, является использование многоканальных сигналов или кадров (*Frames*). Кадр – это последовательность отсчетов, выстроенная в единый вектор (матрицу столбец). Использование моделирования на основе кадров (*Frame-Based processing*) можно сравнить с передачей двоичных сигналов в последовательном и параллельном кодах, время затраченное на передачу одного и того же количества значений во втором случае уменьшается кратно размеру используемого кадра (если говорить о параллельном коде, то это число параллельных каналов). Еще одним плюсом использования кадров является то, что при прохождении через различные блок все значения кадра обрабатываются одновременно.

Итак, использование узкополосной модуляции на основе кадров очень значительно увеличивает скорость обработки информации, и по сравнению с полосовой модуляцией, позволяет достичь того же результата за гораздо меньшее время. Кроме того, многие блоки библиотеки *Communications Blockset* требуют в качестве входного сигнала исключительно *Baseband* сигнал с определенным размером кадра (например, блок *Rician fading Channel* – канал с Райсовскими замираниями), что делает использование узкополосной модуляции необходимым условием для моделирования телекоммуникационных систем.

В модели, приведенной на рисунке 1, используются следующие блоки:
Bernoulli Binary Generator (генератор последовательности импульсов в формате NRZ – имитатор цифрового сигнала);
QPSK Modulator Baseband (QPSK модулятор в основной полосе частот);
QPSK Demodulator Baseband (QPSK демодулятор в основной полосе частот);
AWGN Channel (канал с аддитивным белым гауссовым шумом);
Rayleigh Fading Channel (канал с замираниями Рэля);
Discrete-Time Eye Diagram Scope (блок наблюдения «глаз–диаграмм»);
Discrete-Time Scatter Plot Scope (блок наблюдения сигнальных созвездий);
Error Rate Calculation (счетчик ошибок);
Display (индикатор коэффициента ошибок);
Remove Phase component of path gains (блок устранения фазовой компоненты в сигнале).

Блоки *AWGN Channel* и *Rayleigh Fading Channel* имитируют канал с аддитивным белым шумом и канал с интерференционными замираниями (замирания Рэля) соответственно. Окна параметров этих блоков показаны на рисунках 3 и 4.

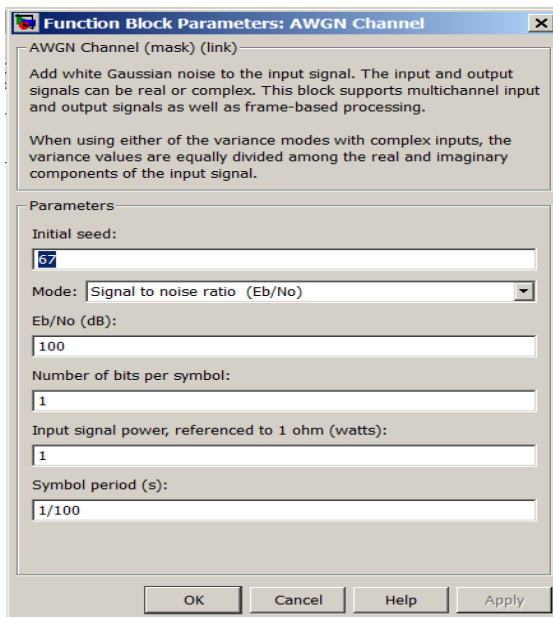


Рис. 3. Окно параметров блока *AWGN Channel*

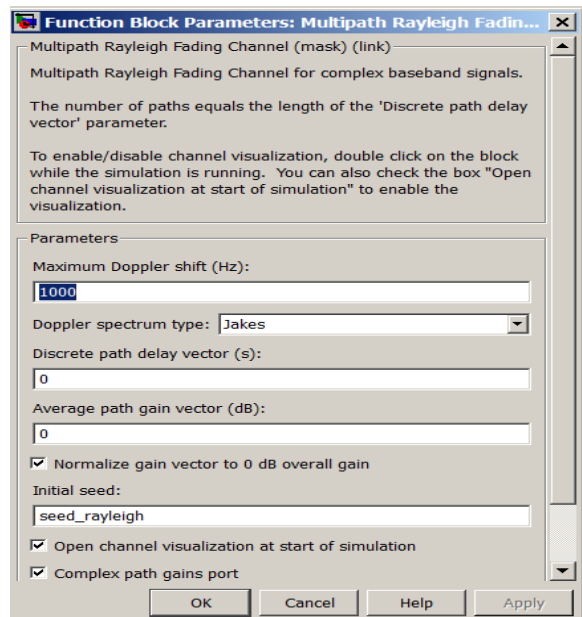


Рис. 4. Окно параметров блока *Rayleigh Fading Channel*

Блок *AWGN Channel* реализует среду распространения радиоволн в канале с аддитивным белым гауссовым шумом.

Регулируемыми параметрами блока *AWGN Channel* являются:

- *Mode* – тип отношения сигнал/шум;
- E_b/N_0 – отношение энергии сигнала на бит к спектральной плотности теплового шума;
- *Number of bits per symbol* – число бит на символ;
- *Symbol Period* – символьный период;
- *Output data type* – тип выходных данных.

Блок *Rayleigh Fading Channel* реализует среду распространения радиоволн с замираниями Рэля для узкополосных систем (в моделях должны использоваться модуляторы в основной полосе частот (Baseband Modulator)).

Относительное движение передатчика и приемника приводит к появлению доплеровского сдвига частоты сигнала.

В блоке можно задать тип доплеровского спектра, используя окно параметров блока.

Максимальный доплеровский сдвиг частоты вычисляется как:

$$\Delta f_{\max} = V \cdot f / c, \quad (1)$$

где V – скорость передвижения;

f – несущая частота;

c – скорость света.

Например, максимальный доплеровский сдвиг частоты, равный 200 Гц, соответствует скорости передвижения 65 миль/час (30 м/с) и несущей частоте 2 ГГц.

Регулируемыми параметрами блока *AWGN Channel* являются:

- *Mode* – тип отношения сигнал/шум;
- E_b/N_0 – отношение энергии сигнала на бит к спектральной плотности теплового шума;
- *Number of bits per symbol* – число бит на символ;
- *Symbol Period* – символьный период;
- *Output data type* – тип выходных данных.

Регулируемыми параметрами блока *Rayleigh Fading Channel* являются:

- *Maximum Doppler shift (Hz)* – максимальное значение доплеровского сдвига частоты;
- *Doppler Spectrum type* – модель доплеровского спектра;
- *Discrete path delay vector (s)* – значение задержки задержанного сигнала;
- *Average path gain vector* – коэффициент усиления задержанного сигнала.

3. Установите значение $E_bN_0 = 30$ дБ.

4. Запустите модель.

5. Проанализируйте работу блока *Rayleigh Fading Channel*:

– проанализируйте импульсную характеристику канала и характер доплеровского спектра (рис. 5 и 6);

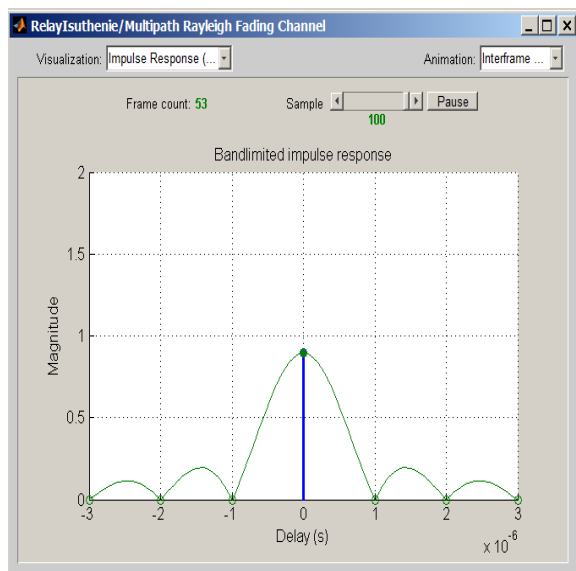


Рис. 5. Импульсная характеристика (Impulse Response)

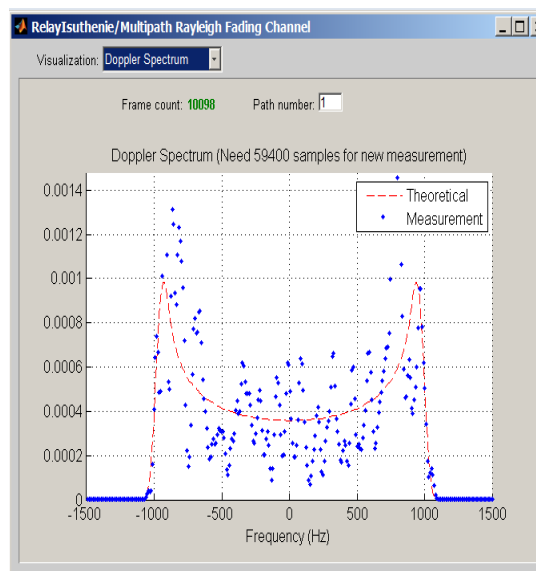


Рис. 6. Доплеровский спектр

– проанализируйте частотную характеристику канала (*Frequency Response*) и функцию *IR Waterfall* (изменение доплеровского спектра от фрейма к фрейму) (рис. 7 и 8).

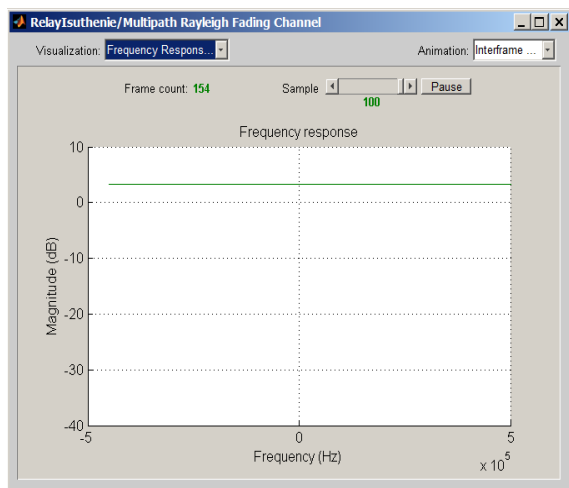


Рис. 7. Частотная характеристика канала

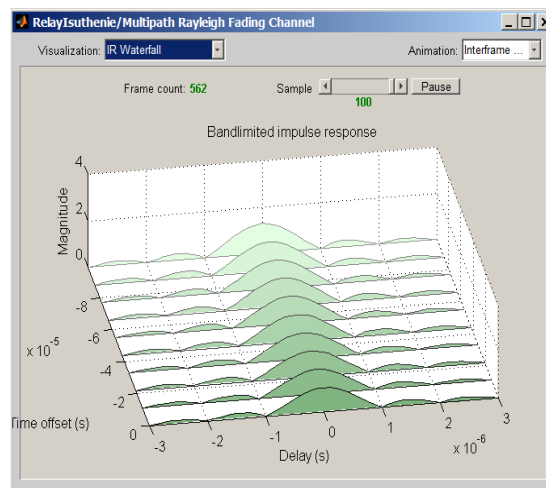


Рис. 8. Функция IR Waterfall

Приведенная на рисунке 5 импульсная характеристика соответствует одинаковым задержкам и усилениям путей распространения сигнала. На рисунке 9 показана импульсная характеристика для случая разных задержек путей и затуханий.

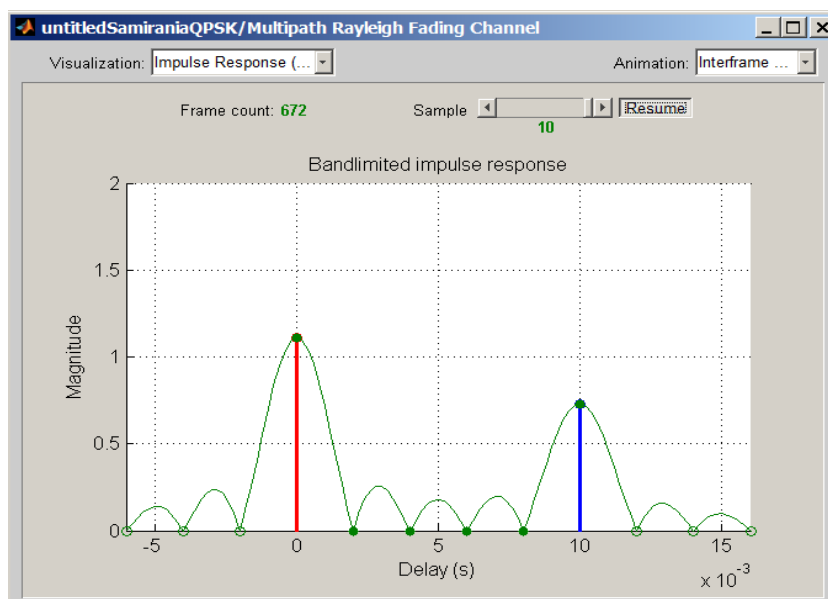


Рис. 9. Импульсная характеристика канала
Multipath Rayleigh Fading Channel

На импульсной характеристике красная линия соответствует лучу с наименьшей задержкой сигнала, а голубая линия – наибольшей задержке.

Величина этих линий соответствует затуханию соответствующего пути распространения сигнала. Форма импульсной характеристики отображается зеленой линией.

Проанализируйте «фазовую траекторию» сигнала (*Phase Trajectory*) (рис. 10).

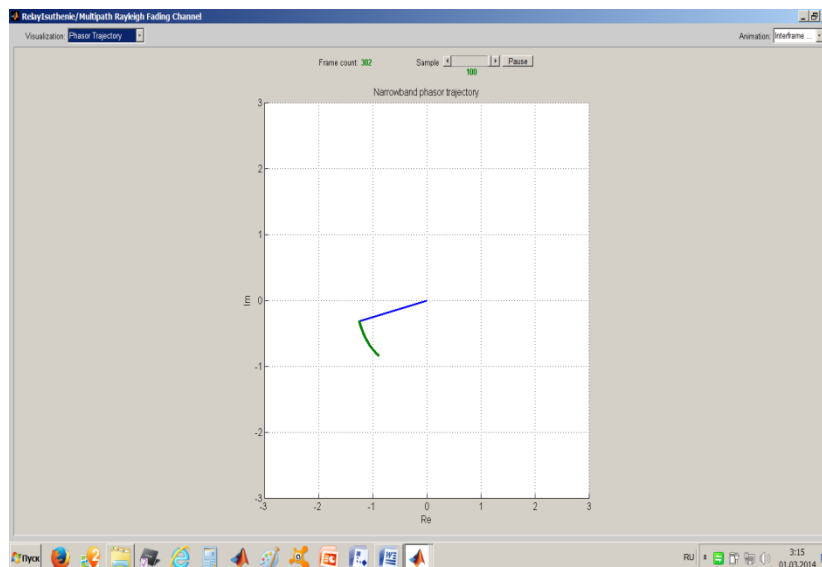


Рис. 10. «Фазовая траектория» сигнала

Замирание каждого луча сигнала моделируется как изменение комплексного коэффициента передачи, значение которого зависит от затухания и фазового сдвига сигнала. «Фазовая траектория» показывает, как изменяется комплексный коэффициент передачи в течение одного кадра моделирования системы. При этом синяя линия соответствует изменению фазы, а зеленая – изменению траектории конечной точки вектора сигнала.

Используя параметры модели:

- рассчитайте максимальную скорость передвижения абонента при значении несущей частоты, равной 2 ГГц;
- определите, какой вид замираний смоделирован в данном случае;
- объясните полученные результаты.

6. Закройте окно блока *Multipath Rayleigh Fading Channel*.

7. Проанализируйте сигнальные созвездия и глаз-диаграммы в контрольных точках модели (рис. 11–12).

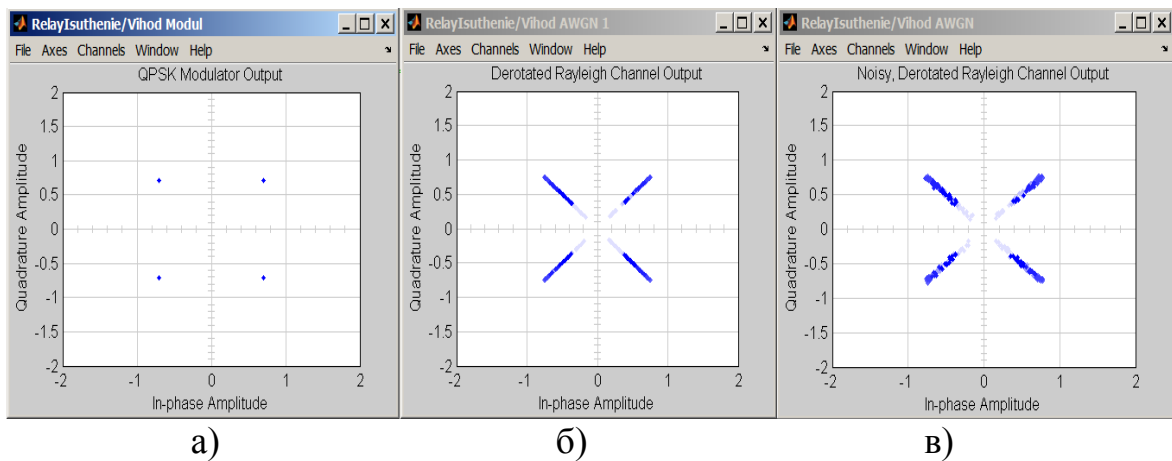


Рис. 11. Сигнальные созвездия на выходе модулятора (а), выходе блока *Rayleigh Fading Channel* (б) и выходе канала с AWGN (в)

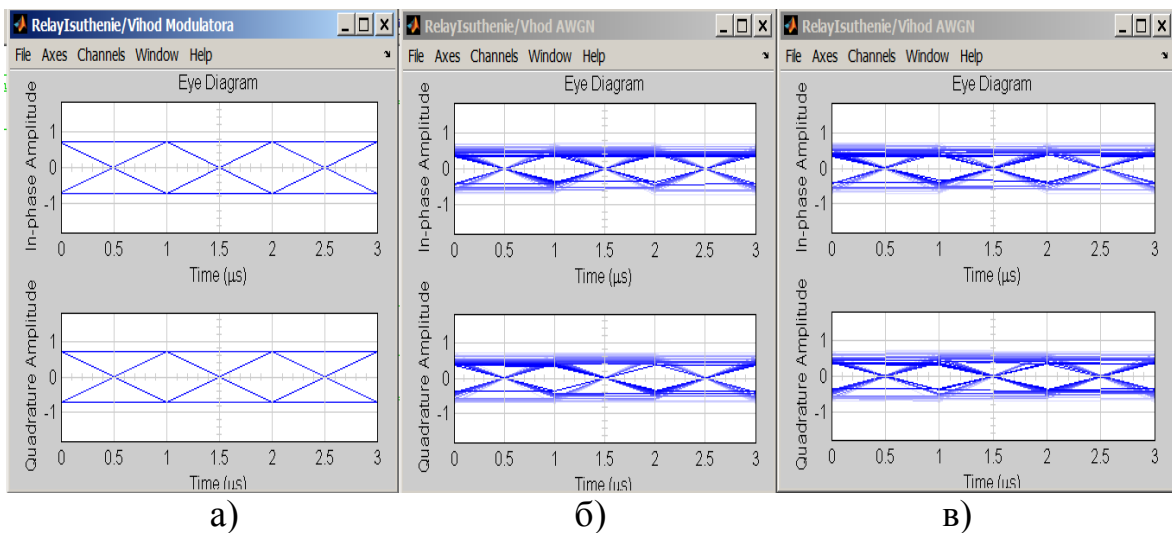
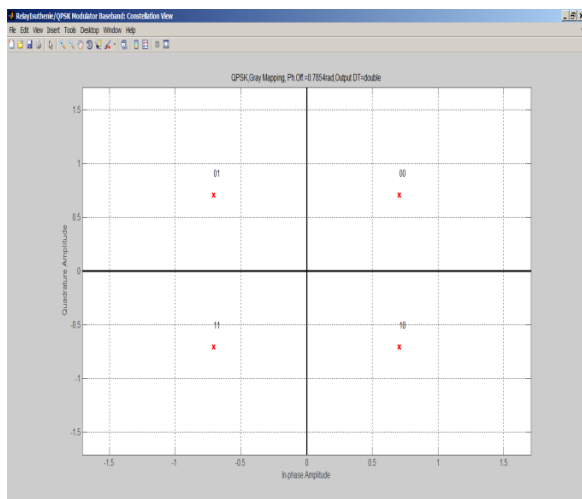
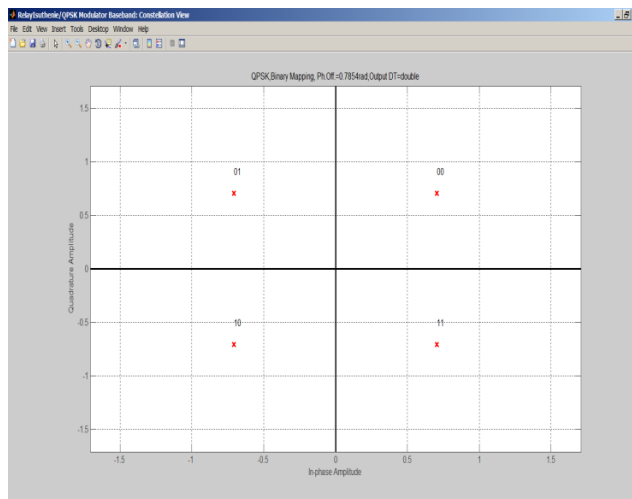


Рис. 12. Глаз-диаграммы на выходе модулятора (а), выходе блока *Rayleigh Fading Channel* (б) и выходе канала с AWGN (в)

8. Остановите работу модели.
9. Используя функцию *View Constellation* в окне параметров блока модулятора, наблюдайте и зарисуйте в отчет расположение сигнальных точек (*Constellation ordering*) для вариантов *Gray* и *Binary* (рис. 13).



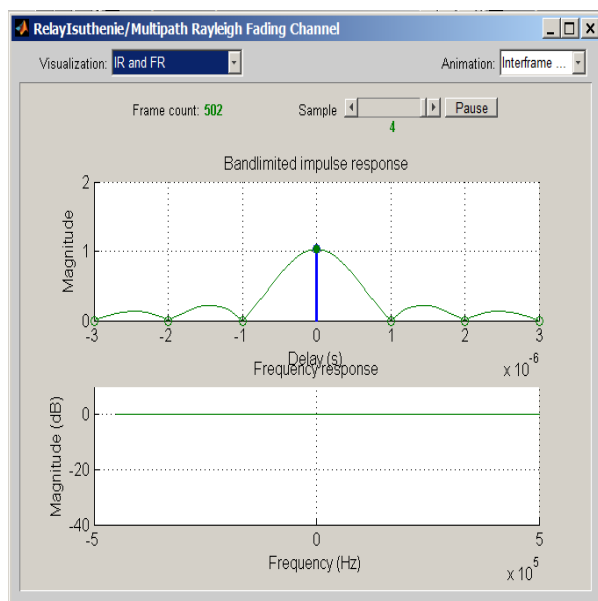
а)



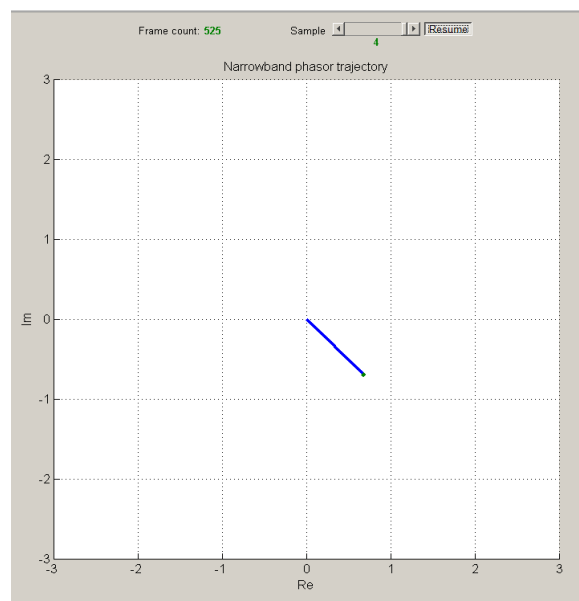
б)

Рис. 13. Сигнальные созвездия для расположения в коде Грея (а) и бинарном коде (б)

10. Установите отношение сигнал/шум в канале AWGN равным 6 дБ.
11. Запустите модель и проанализируйте сигнальные созвездия и глаз-диаграммы.
12. Проанализируйте полученные результаты.
13. Проведите сравнительную оценку значений коэффициента ошибок при $E_b/N_0 = 30$; 6 и 3 дБ для вариантов созвездий *Gray* и *Binary*.
14. Проанализируйте полученные результаты.
15. При значении $E_b/N_0 = 30$ дБ наблюдайте в окне параметров блока *Multipath Rayleigh Fading Channel* импульсную, частотную и фазовую характеристики (рис. 14).



а)



б)

Рис.14. Импульсная, частотная (а) и фазовая характеристика (б)

16. Остановите работу и закройте модель.
17. Соберите модель для исследования помехоустойчивости ЦСРС в канале с замираниями Рэля (рис. 15).

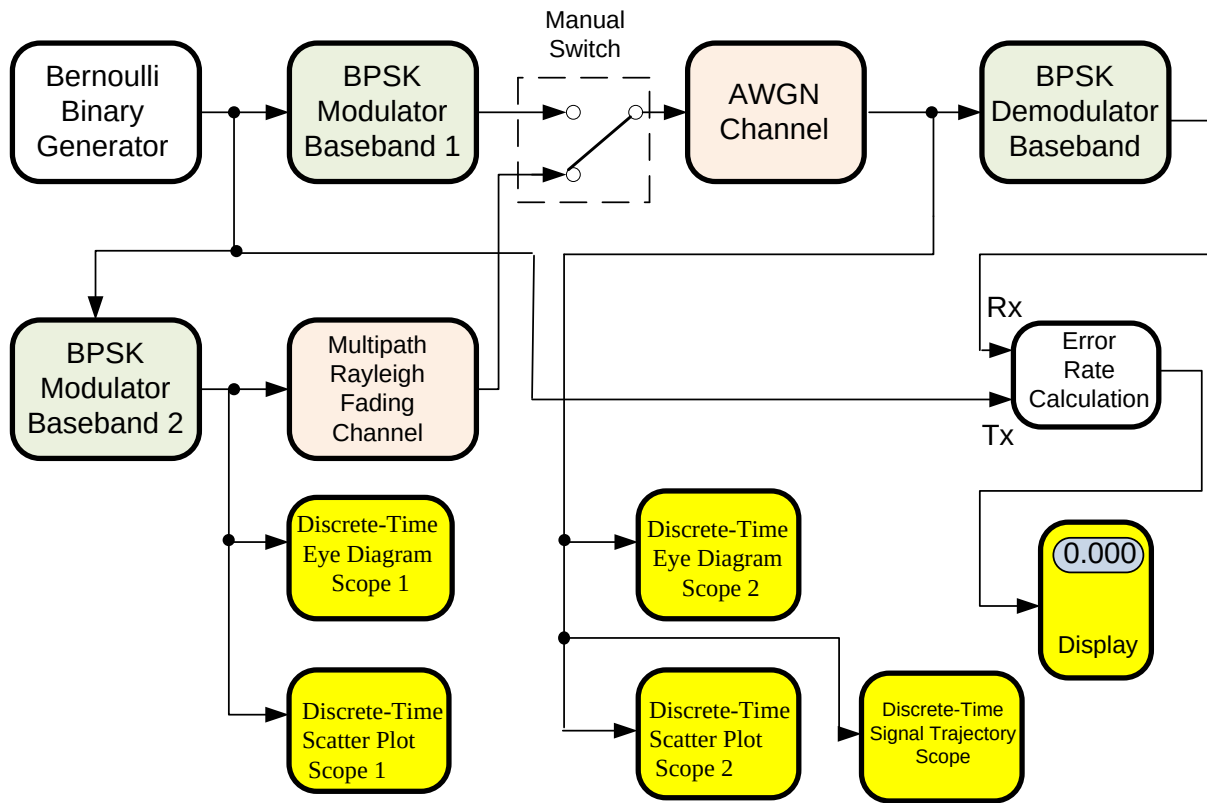


Рис.15. Схема модели цифровой системы радиосвязи

В модели используются следующие блоки:

Bernoulli Binary Generator (генератор последовательности импульсов в формате NRZ – имитатор цифрового сигнала): Communications Blockset–Comm Sources;

BPSK Modulator Baseband (фазовый модулятор в основной полосе частот): Communications Blockset–Modulation-PM;

BPSK Demodulator Baseband (фазовый демодулятор в основной полосе частот): Communications Blockset–Modulation-PM;

AWGN Channel (канал с аддитивным белым гауссовым шумом): Communications Blockset–Channels;

Multipath Rayleigh Fading Channel (канал с замираниями Рэля): Communications Blockset–Channels;

Discrete Time Eye Diagram Scope (блок наблюдения «глаз–диаграмм»): Communications Blockset–Comm Sinks;

Discrete Time Scatter Plot Scope (блок наблюдения сигнальных созвездий): Communications Blockset–Comm Sinks;

Error Rate Calculation (счетчик ошибок): Communications Blockset–Comm Sinks;

Display: Simulink–Sinks;

Manual Switch (управляемый переключатель): Simulink–Signal Routings.

Регулируемые параметры блоков модели:

Блок *Bernoulli Binary Generator* вырабатывает ПСП импульсов в формате NRZ. Регулируемые параметры блока:

- *Probability of a zero* – вероятность появления символов «0»;
- *Sample time* – длительность импульсов ПСП;
- *Samples per frame* – число переданных бит в кадре;
- *Output data type* – тип выходных данных.

Блок *BPSK Modulator Baseband* вырабатывает двухпозиционный фазомодулированный сигнал в основной полосе частот.

Регулируемым параметром блока *Error Rate Calculation* является значение *Receive delay* – задержка сигнала на входе блока.

18. Установите параметры блоков модели в соответствии с таблицей 1.

19. Рассчитайте максимальный доплеровский сдвиг частоты для мобильной скорости 3 км/час, несущей частоте равной 2 ГГц и скорости передачи данных, приведенной в таблице 1. Полученное значение вставьте в параметры блока *Multipath Rayleigh Fading Channel*.

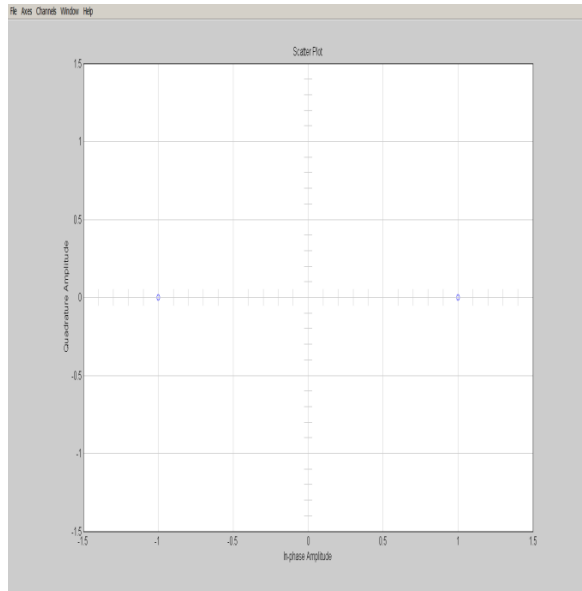
Табл. 1. Параметры блоков модели

Блок <i>Bernoulli Binary Generator</i>	
Sample Time	1/2000
Frame-based outputs	флажок
Samples per frame	4
Output data type	double
Блок <i>BPSK Modulator Baseband</i>	
Phase offset (rad)	0
Output data type	double
Блок <i>BPSK Demodulator Baseband</i>	
Phase offset (rad)	0
Decision type	Hard decision
Output data type	double
Derotate factor	Same word length as input

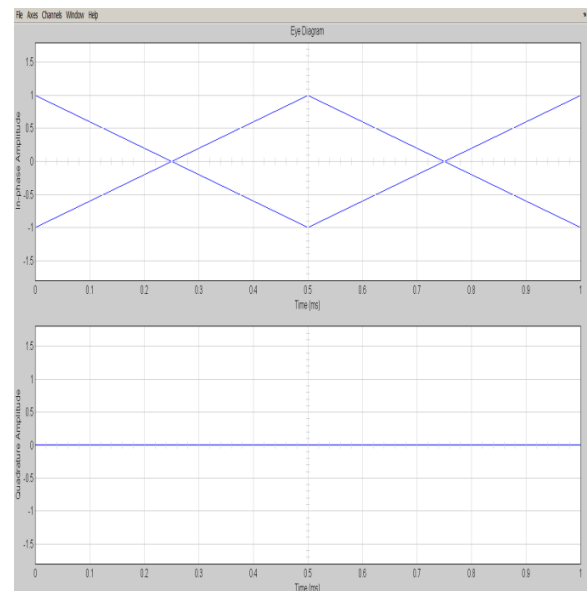
Продолжение табл. 1

Блок AWGN Channel	
Mode	Signal to noise ratio (E_b/N_0)
E_b/N_0	100
Number bits per symbol	1
Input Signal power...	1
Symbol period	0.02
Блок <i>Multipath Rayleigh Fading Channel</i>	
Maximum Doppler shift (Hz)	По ходу работы
Doppler spectrum type	Jakes
Discrete path delay vector	[0]
Average path gain vector (dB)	[0]
Normalise gain vector to 0 dB overall gain	флажок
Блок <i>Discrete-Time Scatter Plot Scope</i>	
Samples per symbol	4
Offset (samples)	0
Points displayed	400
New points per display	10
Блок <i>Discrete-Time Eye Diagram Scope</i>	
Samples per symbol	4
Offset (samples)	0
Symbol per trace	1
Traces displayed	400
New points per display	10
Блок <i>Error Rate Calculation</i>	
Receive delay	0
Computation delay	0
Computation mode	Entire frame
Output data	Port
Параметры модели	
Start	0.0
Stop	inf

20. Установите режим работы модели без замираний при помощи управляемого ключа *Manual Switch*:
- запустите модель и проанализируйте сигнальное созвездие и глаз–диаграмму на выходе канала AWGN (рис. 16);



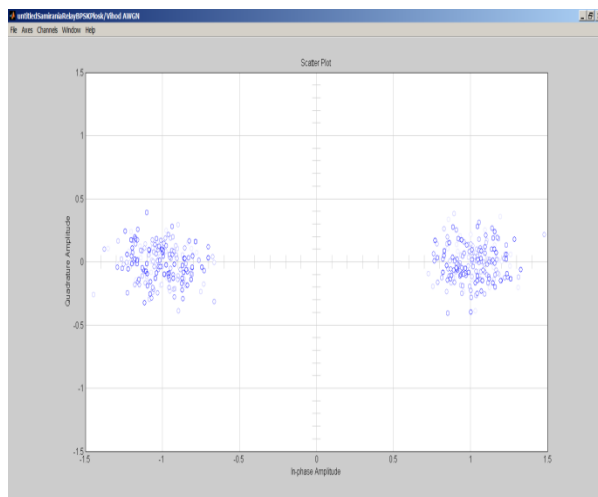
а)



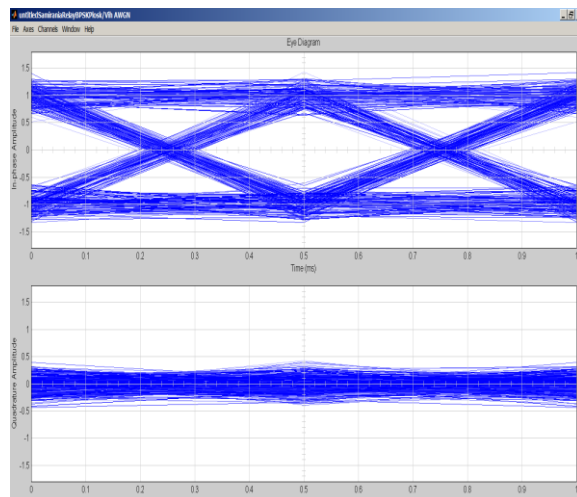
б)

Рис. 16. Сигнальное созвездие (а) и глаз–диаграмма (б) на выходе канала с AWGN при низком уровне шума

- по сигнальному созвездию определите амплитуду и фазы сигнальных точек;
- зафиксируйте значение коэффициента ошибок;
- установите значение $E_b/N_0 = 30$ дБ и проанализируйте изменения сигнальных созвездий и глаз–диаграммы (рис. 17);
- объясните полученные результаты;
- остановите работу модели.



а)



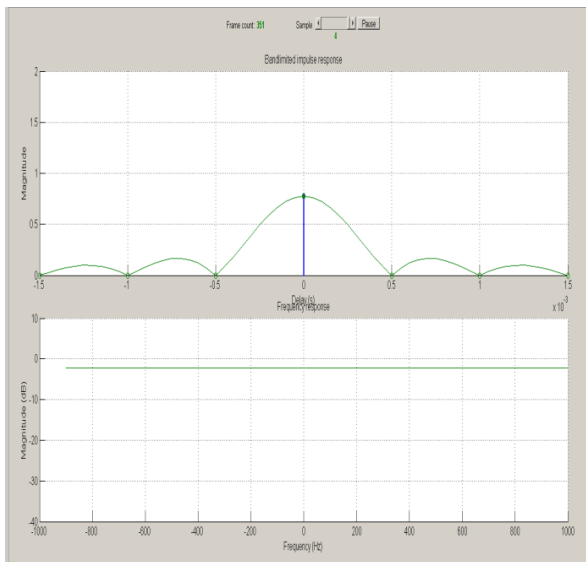
б)

Рис. 17. Сигнальное созвездие (а) и глаз-диаграмма (б) на выходе канала с AWGN при высоком уровне шума

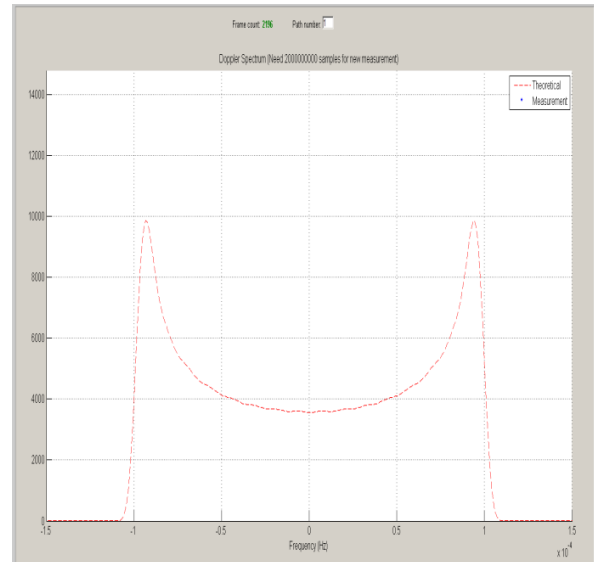
21. Установите режим работы модели с замираниями при значении $E_b/N_0 = 100$ дБ;
22. Установите параметры блока *Multipath Rayleigh Fading Channel*, соответствующие «плоским замираниям» и неподвижному мобильному устройству:

```
maxDopplerShift = 0.0001
delayVector: [ 0 ]
gainVector: [ 0 ]
```

- запустите модель;
- проанализируйте импульсную и частотную характеристики канала (рис. 18) и форму доплеровского спектра;



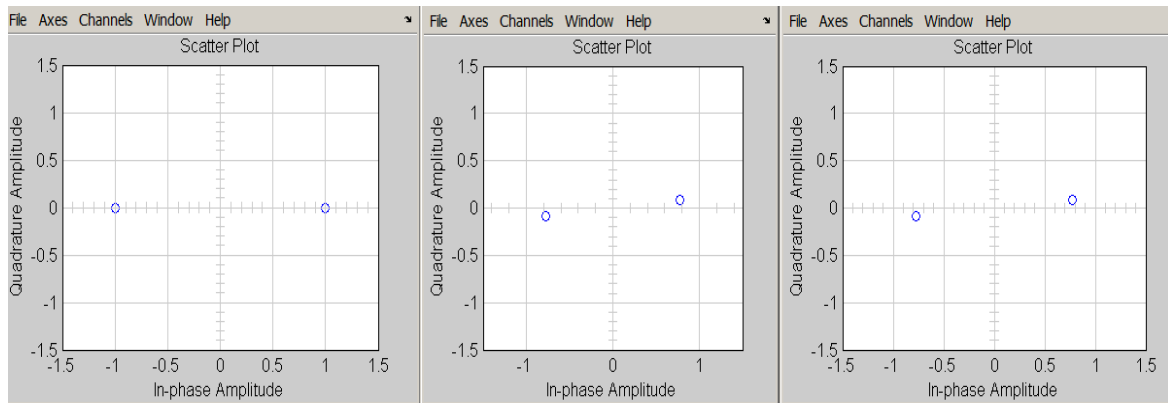
а)



б)

Рис. 18. Импульсная и частотная характеристики (а) и доплеровский спектр (б)

- проанализируйте сигнальные созвездия (рис. 19);
- проанализируйте фазовую траекторию сигнала (рис. 20);



а)

б)

в)

Рис. 19. Сигнальные созвездия на выходе модулятора (а), выходе блока *Multipath Rayleigh Fading* (б) и выходе канала с AWGN (в)

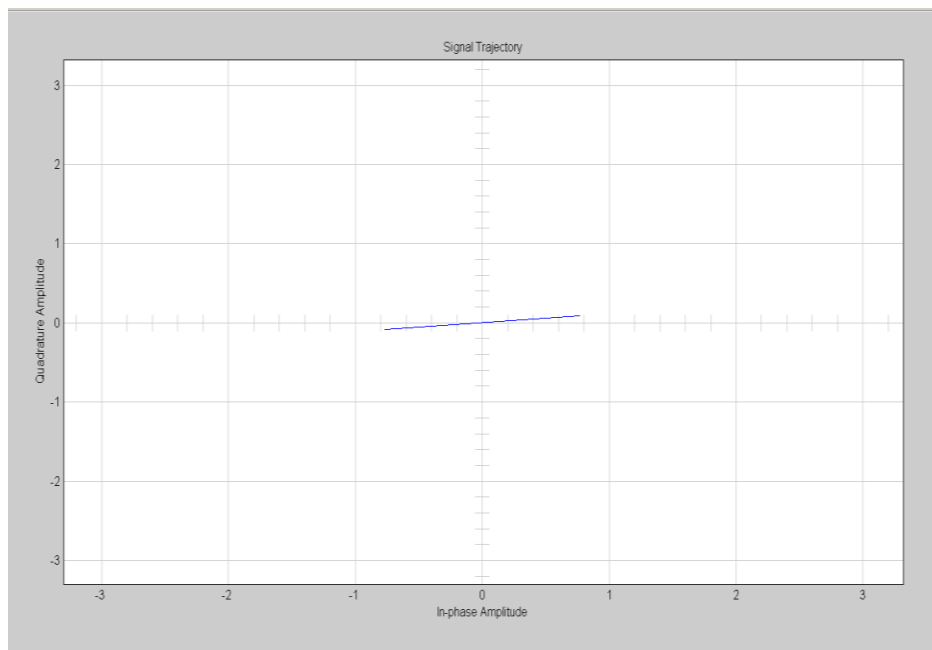


Рис. 20. Фазовая траектория сигнальных точек

- проанализируйте глаз-диаграммы (рис. 21);
- зафиксируйте значение коэффициента ошибок;
- объясните полученные результаты;
- остановите работу модели.

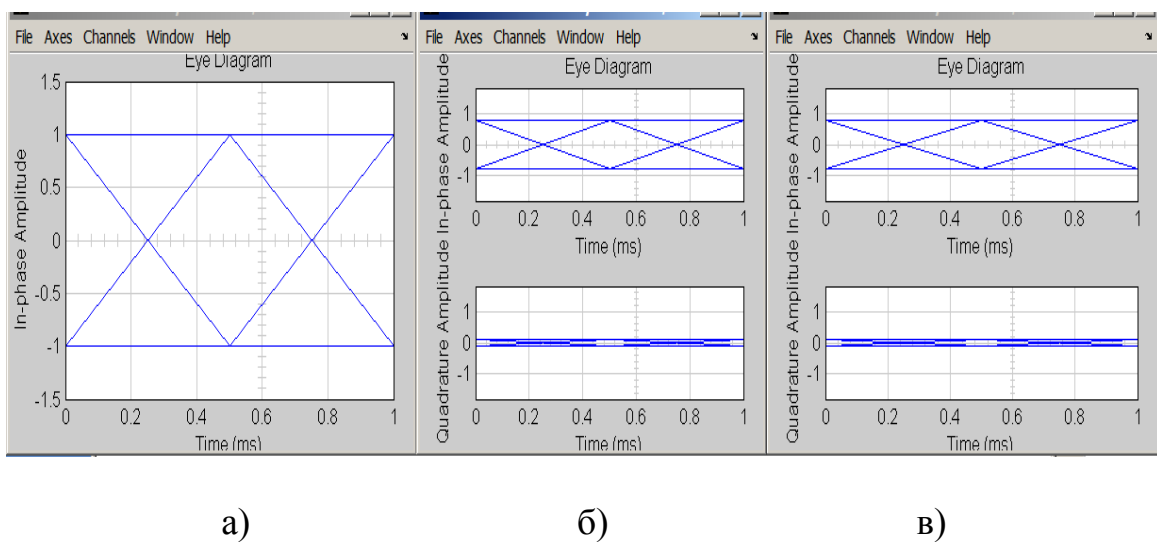


Рис. 21. Сигнальные созвездия на выходе модулятора (а), выходе блока *Multipath Rayleigh Fading* (б) и выходе канала с AWGN (в)

23. Установите режим работы модели с замираниями при значении $E_b/N_0 = 10$ дБ.

24. Проанализируйте сигнальные созвездия и глаз–диаграммы (рис. 22).

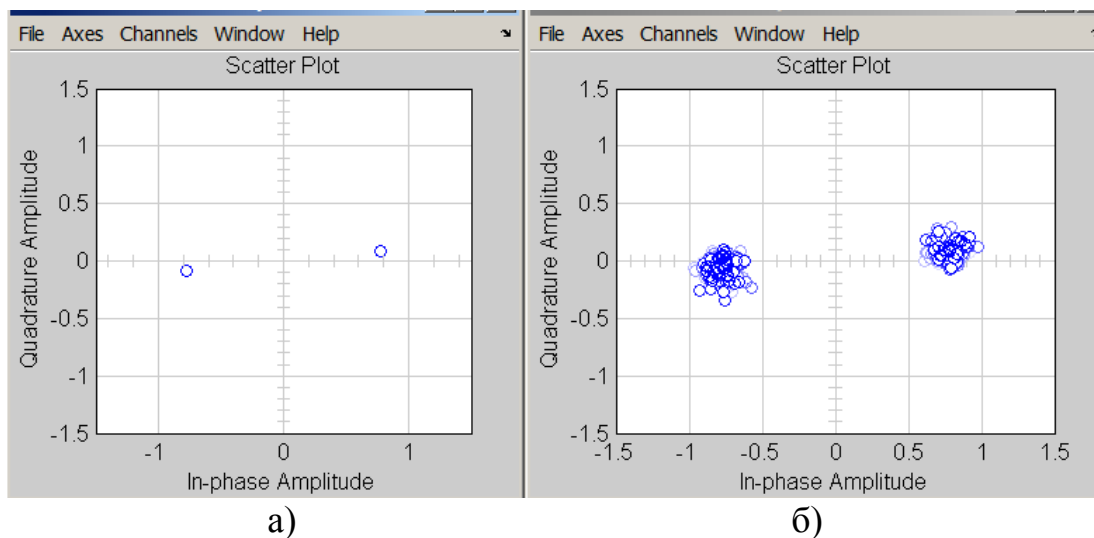


Рис. 22. Сигнальные созвездия на выходе блока *Multipath Rayleigh Fading* (а) и выходе канала с AWGN (б)

25. Проанализируйте глаз–диаграммы (рис. 23):

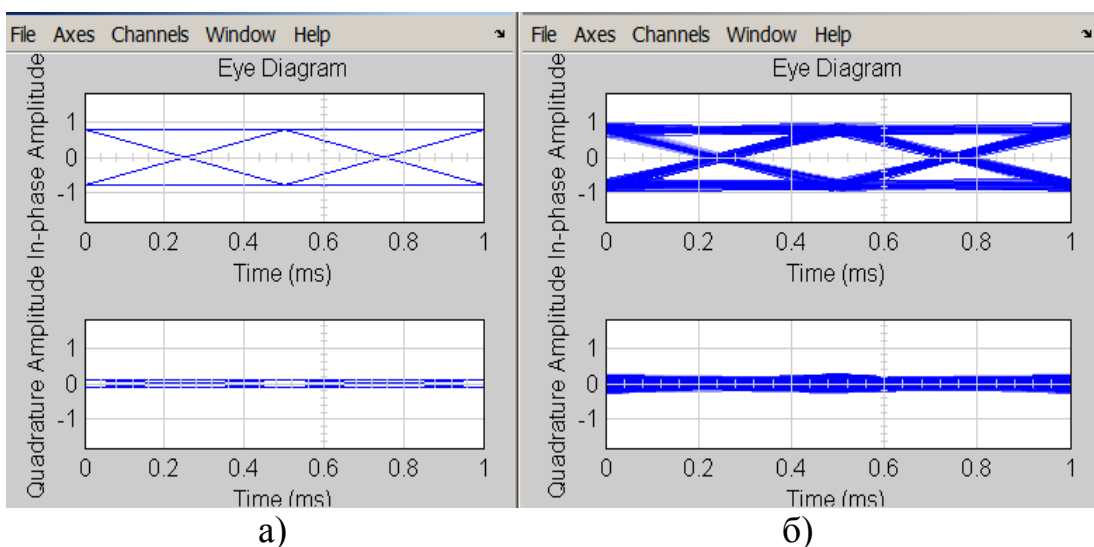


Рис. 23. Глаз–диаграммы на выходе блока *Multipath Rayleigh Fading* (а) и выходе канала с AWGN (б)

- проанализируйте фазовую траекторию сигнала (рис. 24);
- зафиксируйте значение коэффициента ошибок;
- проанализируйте полученные результаты;
- остановите работу модели.

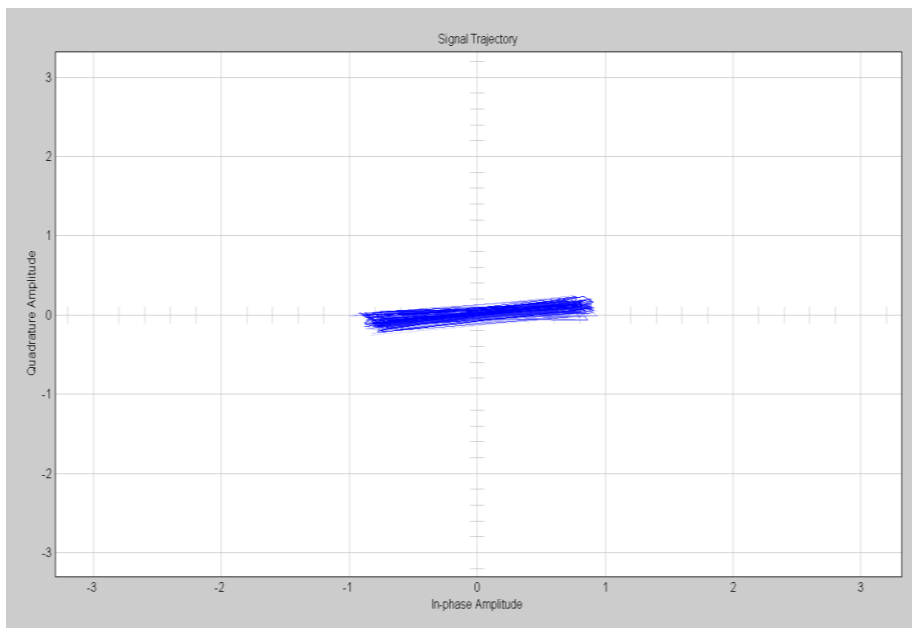


Рис. 24. Фазовая траектория сигнальных точек

26. Установите параметры блока *Multipath Rayleigh Fading Channel*, соответствующие «плоским замираниям» и низкой скорости перемещения мобильного устройства.

maxDopplerShift = 0.1
 delayVector: [0]
 gainVector: [0]

27. Установите значение $E_b/N_0 = 100$ дБ.

28. Запустите модель и проанализируйте сигнальные созвездия (рис. 25) и глаз-диаграммы (рис. 26).

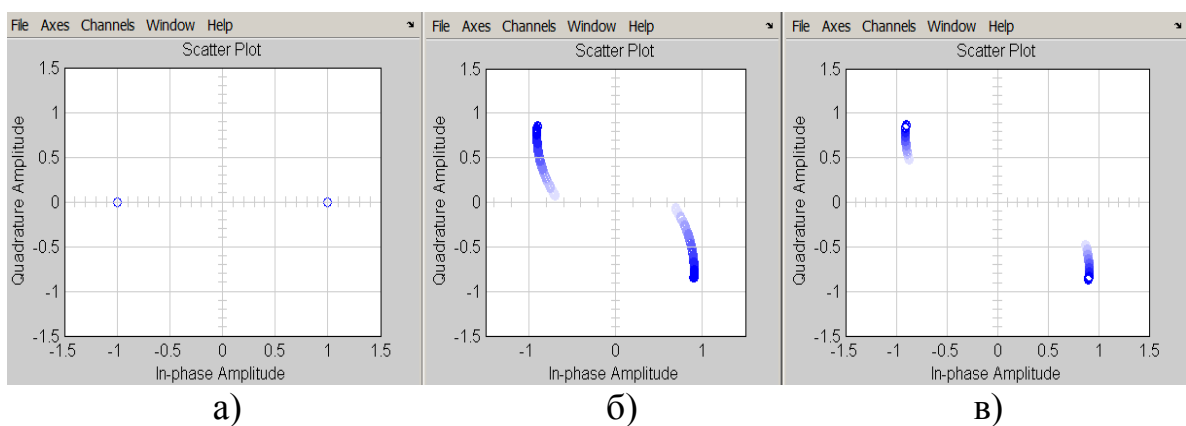
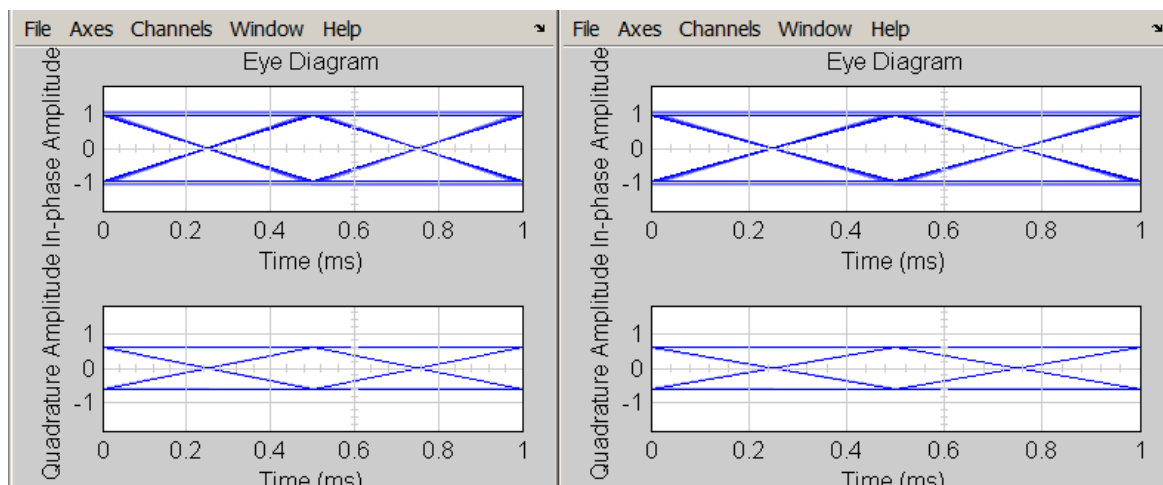


Рис. 25. Сигнальные созвездия на выходе модулятора (а), выходе блока *Rayleigh Fading Channel* (б) и выходе канала с AWGN (в)



а) б)
Рис. 26. Глаз–диаграммы на выходе блока *Rayleigh Fading Channel* (а) и выходе канала с *AWGN* (б)

29. Проанализируйте фазовую траекторию сигнала (рис. 27).

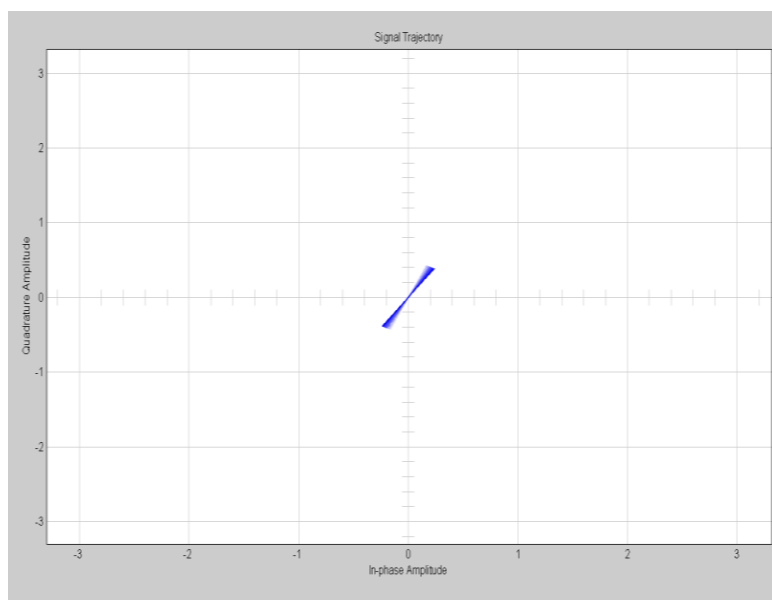


Рис. 27. Фазовая траектория сигнала

30. Объясните полученные результаты.
31. Установите режим работы модели с замираниями при значении $E_b/N_0 = 30$ дБ.
32. Повторите измерения п. 25–26.
33. Проанализируйте полученные результаты.
34. Установите режим работы модели с замираниями при значении $E_b/N_0 = 20$ дБ и максимальном значении доплеровского сдвига частоты 0.3 Гц.

35. Проанализируйте сигнальные созвездия и глаз-диаграммы (рис. 28–29). Обратите внимание на взаимосвязь сигнальных созвездий и глаз-диаграмм.

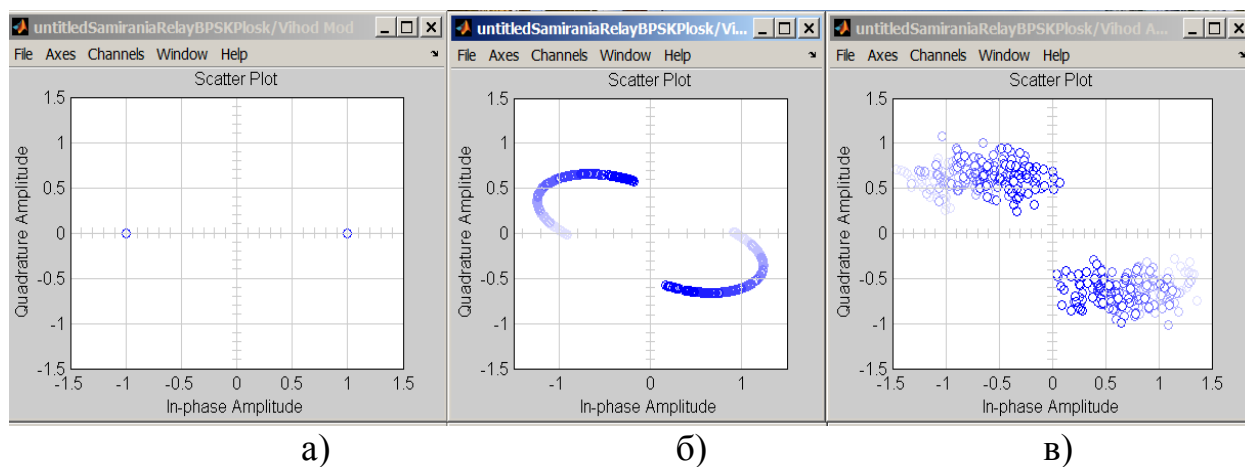


Рис. 28. Сигнальные созвездия на выходе модулятора (а), выходе блока *Rayleigh Fading Channel* (б) и выходе канала с AWGN (в)

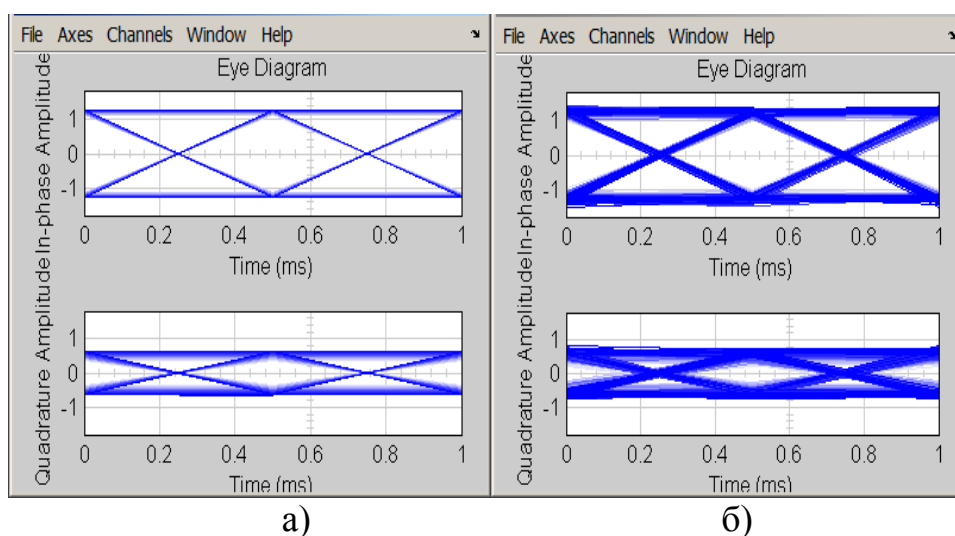


Рис. 29. Глаз-диаграммы на выходе блока *Rayleigh Fading Channel* (а) и выходе канала с AWGN (б)

36. Проанализируйте фазовую траекторию сигнала (рис. 30).
 37. Зафиксируйте значение коэффициента ошибок.
 38. Объясните полученные результаты.
 39. Остановите и закройте модель.

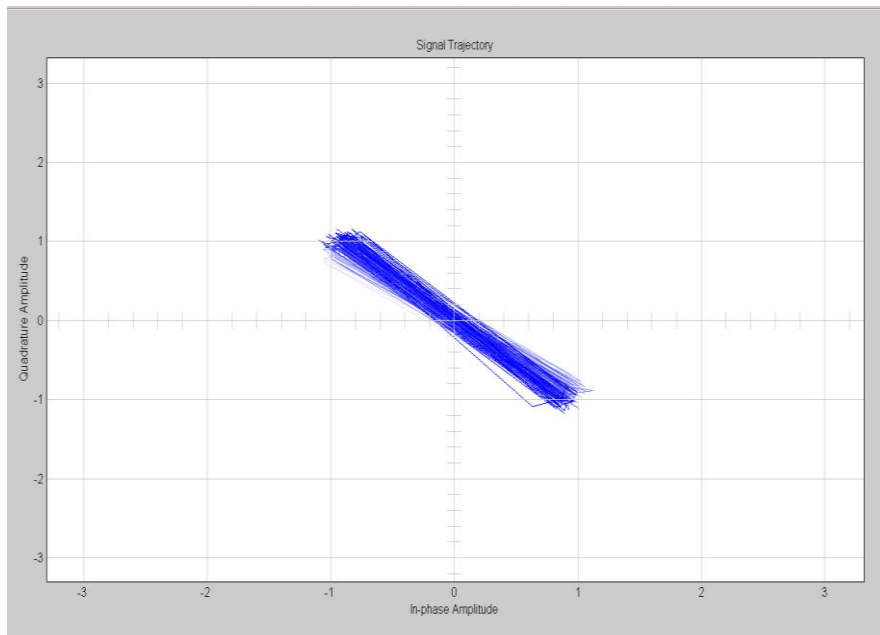


Рис. 30. Фазовая траектория сигнала

40. Используя инструмент BERTool, получите теоретические зависимости $\kappa_{out} = f(E_b/N_0)$ для канала AWGN и канала с замираниями Рэлея (рис. 31).

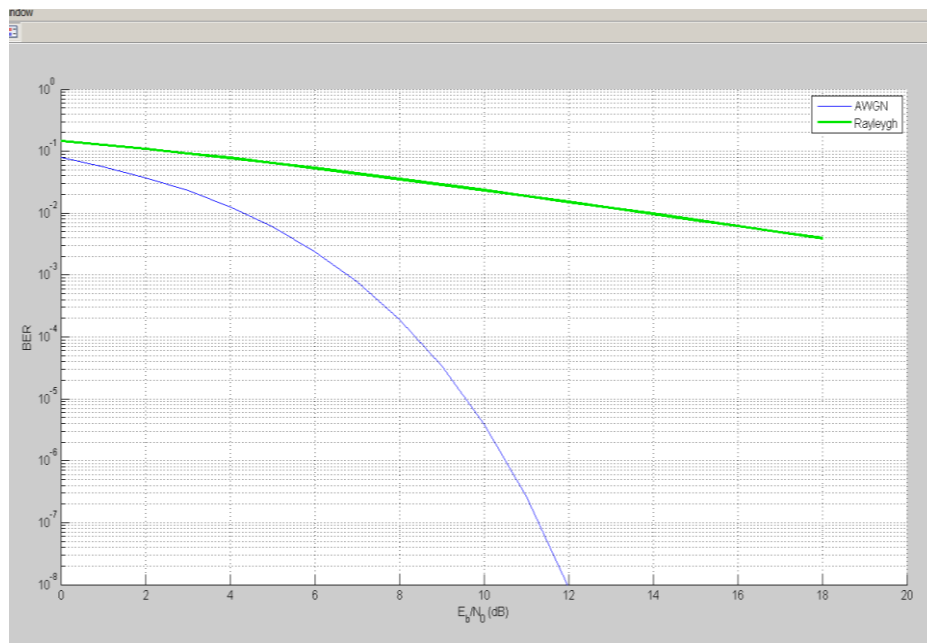


Рис. 31. Теоретические зависимости $\kappa_{out} = f(E_b/N_0)$ для канала AWGN и канала с замираниями Рэлея

41. Полученные результаты сравните с данными моделирования и проанализируйте результат.
42. Установите режим работы модели с замираниями.
43. **Проведите анализ влияния частотно-селективных замираний** на помехоустойчивость ЦСПС, установив следующие параметры блока *Multipath Rayleigh Fading*:

$\text{maxDopplerShift} = 0.0001$
 $\text{delayVector}: [0 \ 0.5]$
 $\text{gainVector}: [0 \ 0]$

44. В окне параметров блока модулятора установите значение *Sample time* = 1/10, а в окне параметров блока AWGN значение параметра *Symbol period* = 1/0.
45. Запустите модель.
46. Проанализируйте импульсную и частотные характеристики канала с частотно-селективными замираниями Рэлея (рис. 32) при значении $E_b/N_0 = 100 \text{ dB}$.
47. Проанализируйте сигнальные созвездия (рис. 33) и глаз-диаграммы (рис. 34).
48. Проанализируйте фазовую траекторию сигнала (рис. 35).

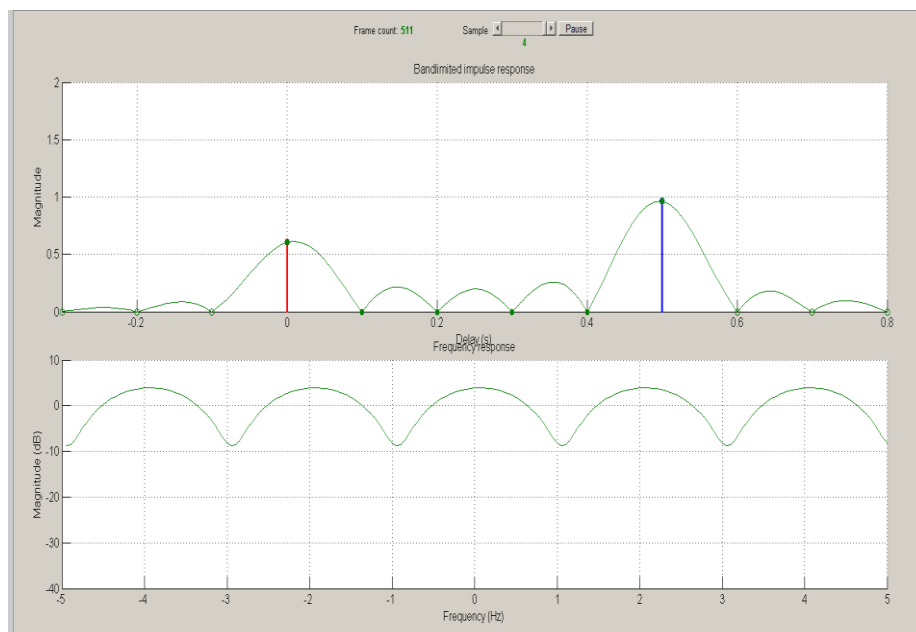
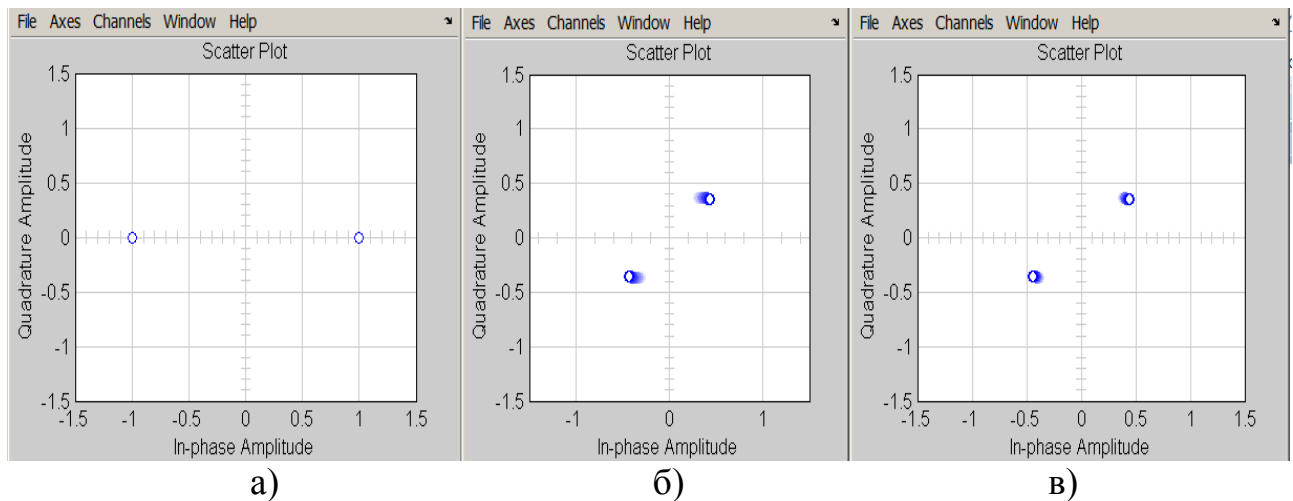
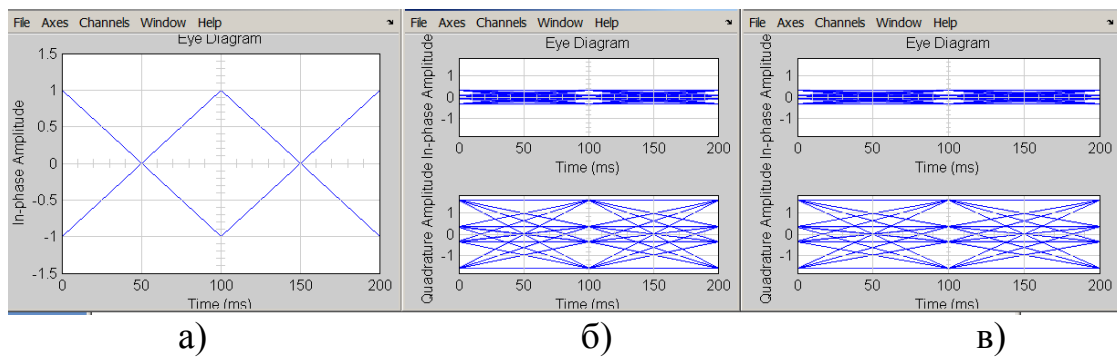


Рис. 32. Импульсная и частотная характеристика канала с ЧСЗ



а) б) в)
Рис. 33. Сигнальные созвездия на выходе модулятора (а), выходе блока *Multipath Rayleigh Fading* (б) и выходе блока AWGN (в)



а) б) в)
Рис. 34. Глаз-диаграммы на выходе модулятора (а), выходе блока *Multipath Rayleigh Fading* (б) и выходе блока AWGN (в)

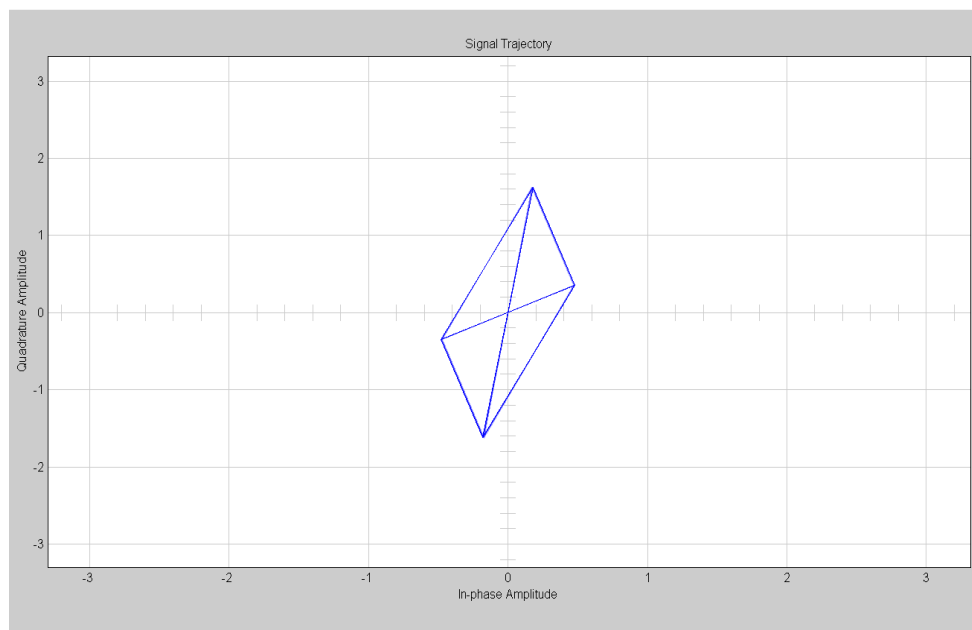


Рис. 35. Фазовая траектория сигнала

49. Зафиксируйте значение коэффициента ошибок.
50. Проанализируйте сигнальное созвездие и глаз-диаграмму сигнала на выходе блока AWGN при значении $E_b/N_0 = 20 \text{ dB}$ (рис. 36).

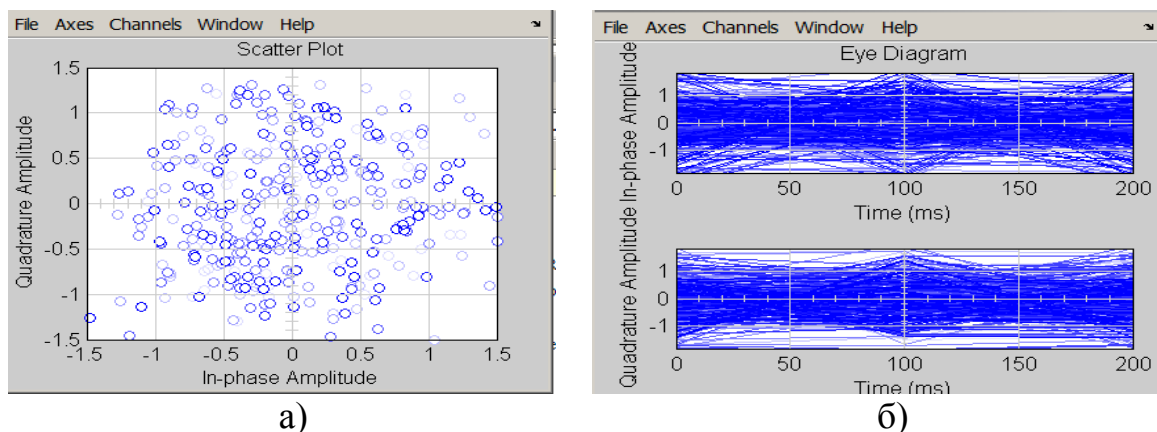


Рис. 36. Сигнальное созвездие (а) и глаз-диаграмма (б) на выходе канала с AWGN при большом уровне шума

51. Проанализируйте фазовую траекторию сигнала (рис. 37).

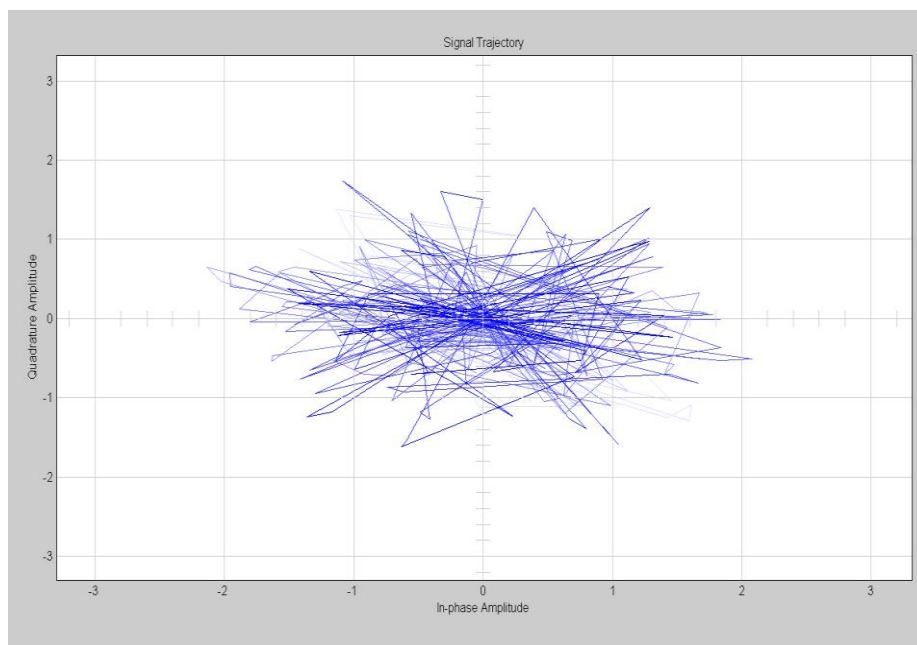


Рис. 37. Фазовая траектория сигнала при высоких уровнях МСИ и шума

52. Проведите оценку полученных результатов.
53. Остановите работу модели и закройте модель.
54. Объясните полученные результаты.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Схемы исследуемых моделей ЦСПС.
2. Результаты исследований в виде таблиц и графиков.
3. Выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы

1. Поясните особенности моделирования телекоммуникационных устройств в MATLAB/Simulink.
2. Какие замирания называются плоскими?
3. Какие замирания называются частотно-селективными?
4. При каких значениях параметров ЦСПС и канала наблюдаются плоские замирания?
5. При каких значениях параметров ЦСПС и канала наблюдаются частотно-селективные замирания?
6. Поясните физическую суть эффекта Доплера.
7. Каким соотношением связаны скорость передвижения и максимальный доплеровский сдвиг частоты?
8. Поясните, каким образом изменяются сигнальные созвездия и глаз-диаграммы при наличии замираний в радиоканале?
9. Поясните, что понимается под импульсной характеристикой канала с замираниями?
10. Поясните закон распределения Рэля.
11. При каких условиях возникают замирания Рэля?
12. Какие числовые характеристики многолучевых каналов с замираниями вы знаете?
13. Поясните модель Кларка для эффекта Доплера.

Лабораторная работа № 8.8

«Исследование помехоустойчивости системы связи с BFSK в канале с замираниями Рэлея»

Цель работы: изучение причин возникновения замираний в ЦСПС и исследование помехоустойчивости ЦСПС в канале с замираниями.

Подготовка к работе

По указанной литературе:

- 1) изучить причины появления замираний в ЦСПС;
- 2) подготовить бланк отчета по лабораторной работе;
- 3) подготовить ответы на контрольные вопросы.

Рекомендуемая литература

1. *Маглицкий Б.Н.* Космические и наземные системы радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2014. – 300 с.
2. *Маглицкий Б.Н.* Спектрально-эффективные методы модуляции в цифровых системах радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2009. – 120 с.
3. *Носов В.И., Дроздов Н.В., Тимошук Р.С.* Моделирование систем связи в среде MATLAB : Учебное пособие. – Новосибирск: СибГУТИ, 2007. – 178 с.
4. Теоретическая часть данного учебного пособия.

При выполнении лабораторной работы используется IBM – совместимый компьютер с процессором Pentium II и выше, операционная система Windows XP, Windows 7.

Программное обеспечение: СКМ «MATLAB/Simulink» (R2009b).

Выполнение лабораторной работы

1. Запустить MATLAB.
2. Открыть модель для анализа работы блока, имитирующего радиоканал с замираниями Рэлея (рис. 1).

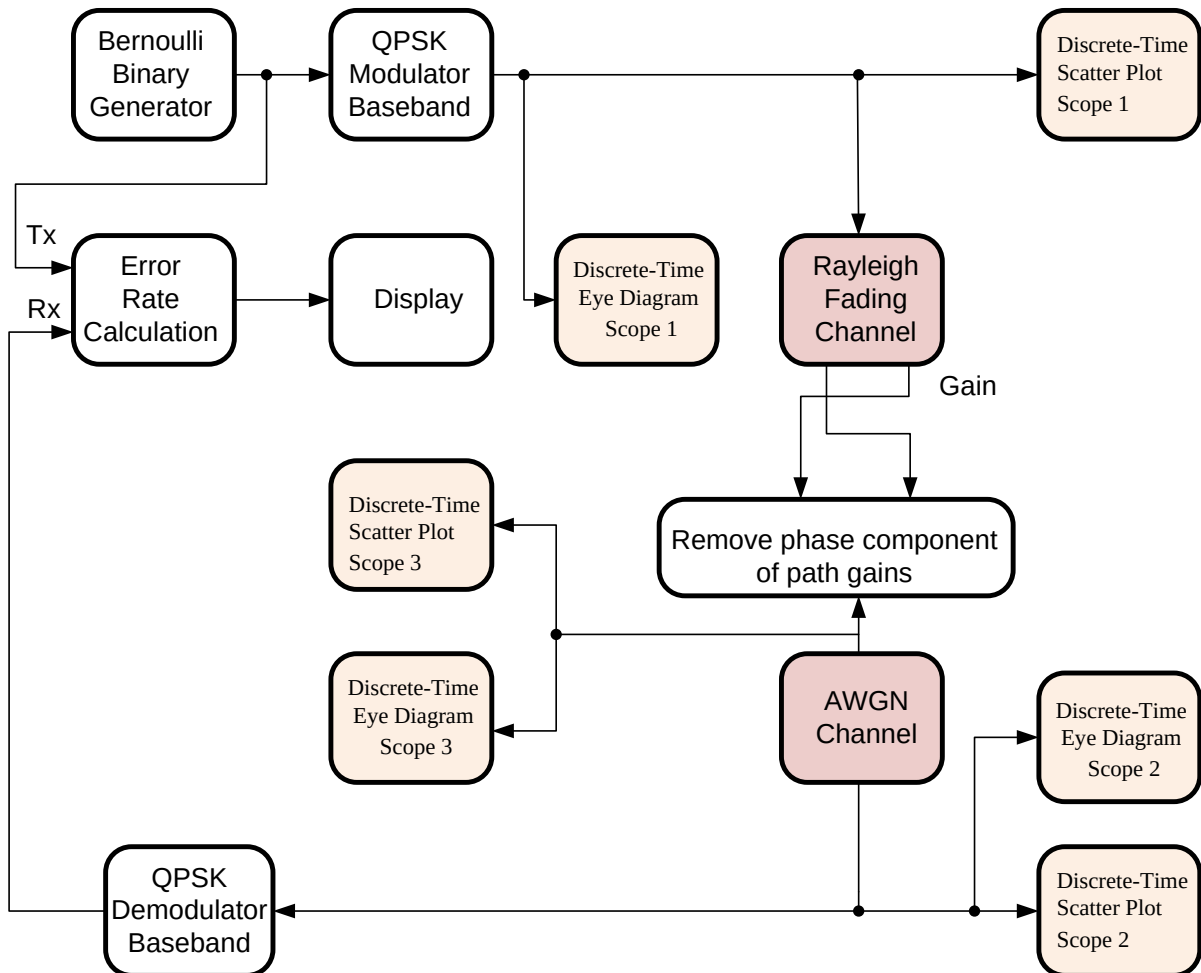


Рис. 1. Схема модели для анализа работы блока *Rayleigh Fading Channel* (канал с замираниями Рэлея)

Рассмотрим особенности моделирования в MATLAB/Simulink.

В силу своей специфики, компьютерное моделирование систем связи имеет ряд характерных особенностей, о которых необходимо упомянуть, прежде чем переходить к более подробному рассмотрению компонентов модели.

В первую очередь следует рассмотреть метод моделирования для ВЧ сигналов. Любой непрерывный сигнал за какой-либо отрезок времени принимает бесконечное число значений. Поскольку описать такой сигнал как массив значений амплитуды не представляется возможным (получится бесконечный массив), в MATLAB любой сигнал представляется как последовательность

отсчетов, взятых с периодом, величина которого в настройках обозначается как «время отсчета» (Sample Time).

Очевидно, что чем меньше этот период, тем точнее отображен сигнал. Для иллюстрации служит рисунок 2, на котором приведен синусоидальный сигнал с частотой 100 Гц, дискретизированный с периодом дискретизации 0,01 секунды, то есть за 1 секунду ЭВМ обрабатывает 100 значений, каждое из которых является амплитудой синусоиды в определенный момент времени.

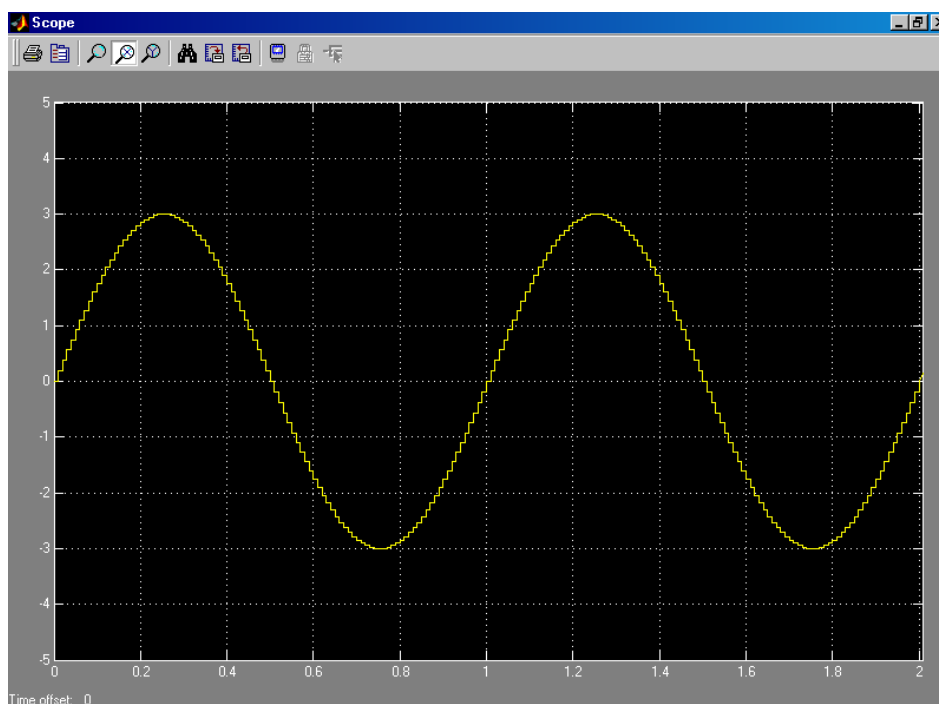


Рис. 2. Синусоидальный сигнал, дискретизированный с частотой 100 Гц

Конечно, для современных процессоров такая задача не представляет никакой сложности. Но исследование сложных систем, с многократными преобразованиями сигналов СВЧ оказывается достаточно ресурсоемким процессом, и время симуляции иногда значительно превышает время реального процесса даже на мощных компьютерах.

Для снижения нагрузки на центральный процессор и ускорения процесса симуляции в системе MATLAB для моделирования модуляции цифровых сигналов используется так называемая низкочастотная модуляция или симуляция (*baseband modulation*), известная также как эквивалентный метод низких частот (*lowpass equivalent method*).

Суть метода заключается в том, что вместо множества отсчетов амплитуды за время равное длине модуляционного символа передается комплексное число, модуль которого равен амплитуде, фаза – фазе модулированного сигнала.

Вероятность ошибки при использовании моделей с полосовой (*Passband*) и узкополосной (*Baseband*) модуляцией отличается менее чем на 1%, однако, при этом модели с использованием полосовой модуляции требуются несравнимо большее время, для обработки такого же объема данных. Разница в скорости симуляции особенно заметна, при больших значениях несущей частоты.

Еще одним способом, применяемым в MATLAB с целью уменьшить время симуляции процесса, является использование многоканальных сигналов или кадров (*Frames*). Кадр – это последовательность отсчетов, выстроенная в единый вектор (матрицу столбец). Использование моделирования на основе кадров (*Frame-Based processing*) можно сравнить с передачей двоичных сигналов в последовательном и параллельном кодах, время затраченное на передачу одного и того же количества значений во втором случае уменьшается кратно размеру используемого кадра (если говорить о параллельном коде, то это число параллельных каналов). Еще одним плюсом использования кадров является то, что при прохождении через различные блоки все значения кадра обрабатываются одновременно.

Итак, использование узкополосной модуляции на основе кадров очень значительно увеличивает скорость обработки информации, и по сравнению с полосовой модуляцией, позволяет достичь того же результата за гораздо меньшее время. Кроме того, многие блоки библиотеки *Communications Blockset* требуют в качестве входного сигнала исключительно *Baseband* сигнал с определенным размером кадра (например, блок *Rician fading Channel* – канал с Райсовскими замираниями), что делает использование узкополосной модуляции необходимым условием для моделирования телекоммуникационных систем.

В модели, приведенной на рисунке 1, используются следующие блоки:

Bernoulli Binary Generator (генератор последовательности импульсов в формате NRZ – имитатор цифрового сигнала);

QPSK Modulator Baseband (QPSK модулятор в основной полосе частот);

QPSK Demodulator Baseband (QPSK демодулятор в основной полосе частот);

AWGN Channel (канал с аддитивным белым гауссовым шумом);

Rayleigh Fading Channel (канал с замираниями Рэлея);

Discrete-Time Eye Diagram Scope (блок наблюдения глаз-диаграмм);

Discrete-Time Scatter Plot Scope (блок наблюдения сигнальных созвездий);

Error Rate Calculation (счетчик ошибок);

Display (индикатор коэффициента ошибок);

Remove Phase component of path gains (блок устранения фазовой компоненты в сигнале).

Блоки *AWGN Channel* и *Rayleigh Fading Channel* имитируют канал с аддитивным белым шумом и канал с интерференционными замираниями (замирания Рэлея) соответственно. Окна параметров этих блоков показаны на рисунках 3 и 4.

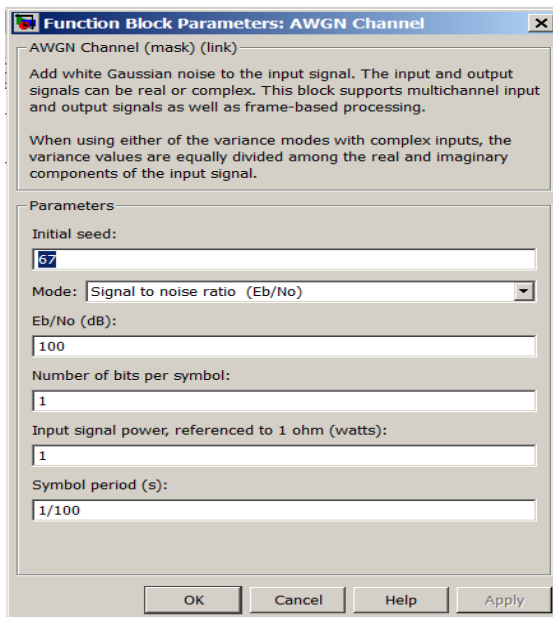


Рис. 3. Окно параметров блока *AWGN Channel*

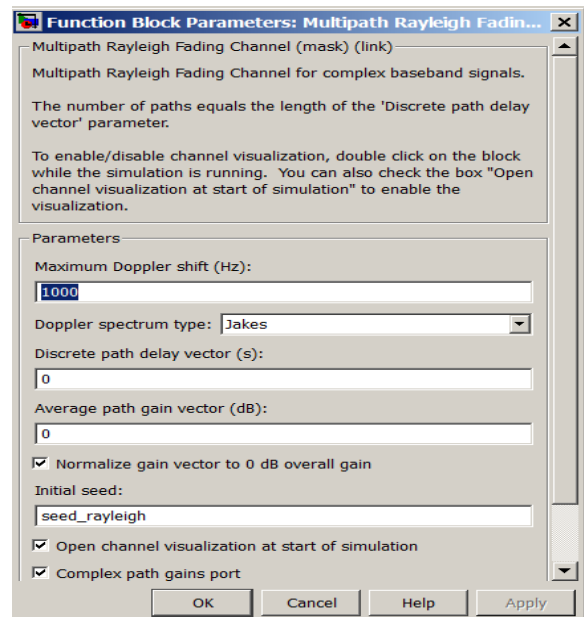


Рис. 4. Окно параметров блока *Rayleigh Fading Channel*

Блок *AWGN Channel* реализует среду распространения радиоволн в канале с аддитивным белым гауссовым шумом.

Регулируемыми параметрами блока *AWGN Channel* являются:

- *Mode* – тип отношения сигнал/шум;
- E_b/N_0 – отношение энергии сигнала на бит к спектральной плотности теплового шума;
- *Number of bits per symbol* – число бит на символ;
- *Symbol Period* – символьный период;
- *Output data type* – тип выходных данных.

Блок *Rayleigh Fading Channel* реализует среду распространения радиоволн с замираниями Рэлея для узкополосных систем (в моделях должны использоваться модуляторы в основной полосе частот (Baseband Modulator)).

Относительное движение передатчика и приемника приводит к появлению доплеровского сдвига частоты сигнала.

В блоке можно задать тип доплеровского спектра, используя окно параметров блока.

Максимальный доплеровский сдвиг частоты вычисляется как:

$$\Delta f_{\max} = V \cdot f / c, \quad (1)$$

где V – скорость передвижения;

f – несущая частота;

c – скорость света.

Например, максимальный доплеровский сдвиг частоты, равный 200 Гц, соответствует скорости передвижения 65 миль/час (30 м/с) и несущей частоте 2 ГГц.

Регулируемыми параметрами блока *AWGN Channel* являются:

- *Mode* – тип отношения сигнал/шум;
- E_b/N_0 – отношение энергии сигнала на бит к спектральной плотности теплового шума;
- *Number of bits per symbol* – число бит на символ;
- *Symbol Period* – символьный период;
- *Output data type* – тип выходных данных.

Регулируемыми параметрами блока *Rayleigh Fading Channel* являются:

- *Maximum Doppler shift (Hz)* – максимальное значение доплеровского сдвига частоты;
- *Doppler Spectrum type* – модель доплеровского спектра;
- *Discrete path delay vector (s)* – значение задержки задержанного сигнала;
- *Average path gain vector* – коэффициент усиления задержанного сигнала.

3. Установите значение $E_bN_0 = 30$ дБ.

4. Запустите модель.

5. Проанализируйте работу блока *Rayleigh Fading Channel*:

- проанализируйте импульсную характеристику канала и характер доплеровского спектра (рис. 5 и 6);

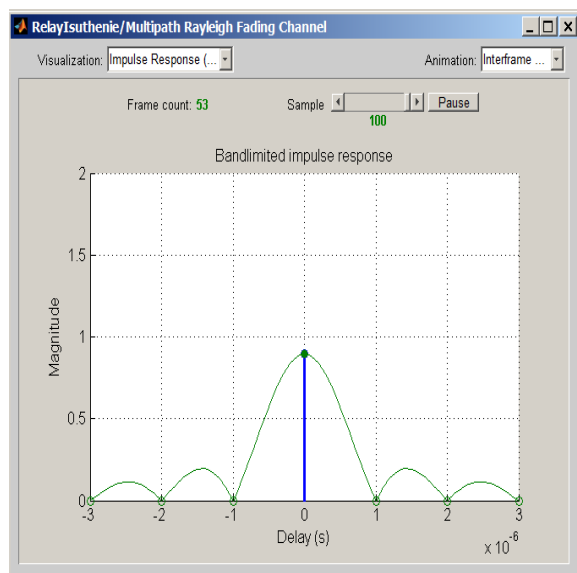


Рис. 5. Импульсная характеристика (Impulse Response)

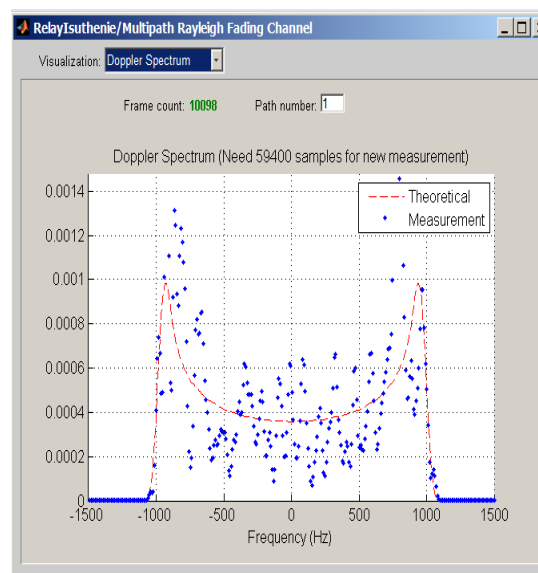


Рис. 6. Доплеровский спектр

- проанализируйте частотную характеристику канала (*Frequency Respons*) и функцию *IR Waterfall* (изменение доплеровского спектра от фрейма к фрейму) (рис. 7 и 8).

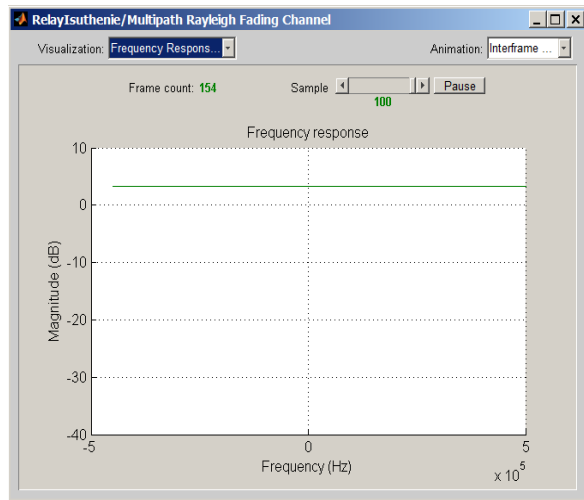


Рис. 7. Частотная характеристика канала

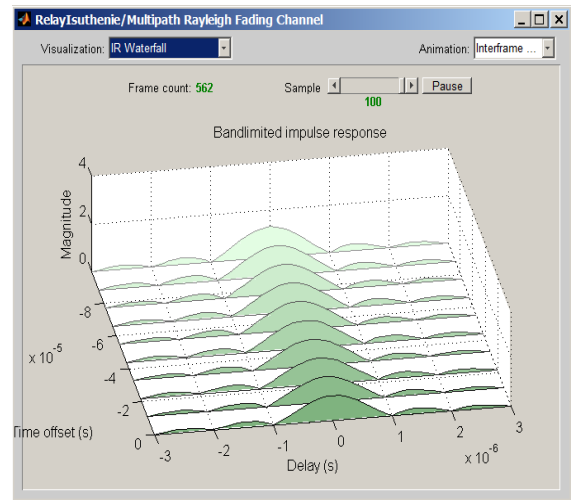


Рис. 8. Функция *IR Waterfall*

Приведенная на рисунке 5 импульсная характеристика соответствует одинаковой задержке путей распространения сигнала и одинаковому усилению путей.

На рисунке 9 показана импульсная характеристика для случая разных задержек путей и затуханий.

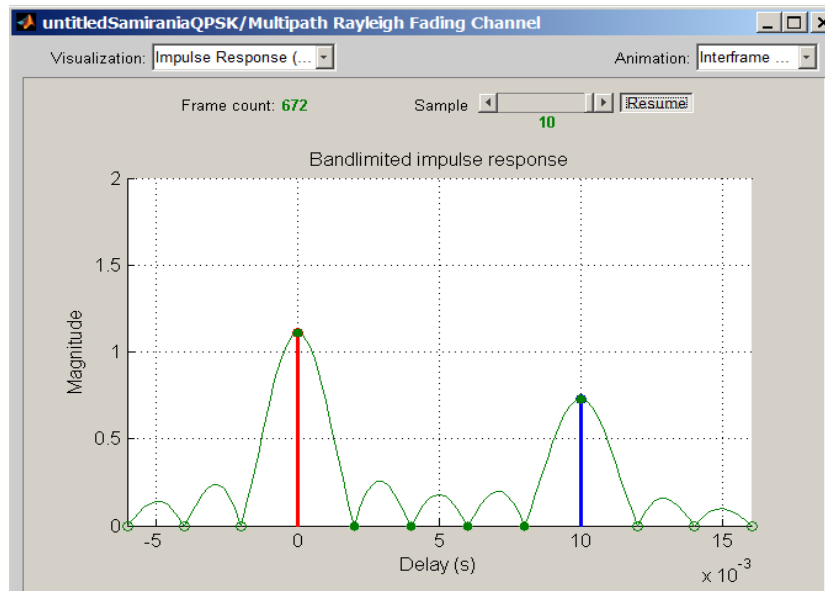


Рис. 9. Импульсная характеристика канала *Multipath Rayleigh Fading Channel*

На импульсной характеристике красная линия соответствует лучу с наименьшей задержкой сигнала, а голубая линия – наибольшей задержке.

Величина этих линий соответствует затуханию соответствующего пути распространения сигнала. Форма импульсной характеристики отображается зеленой линией.

Проанализируйте «фазовую траекторию» сигнала (Phase Trajectory) (рис. 10).

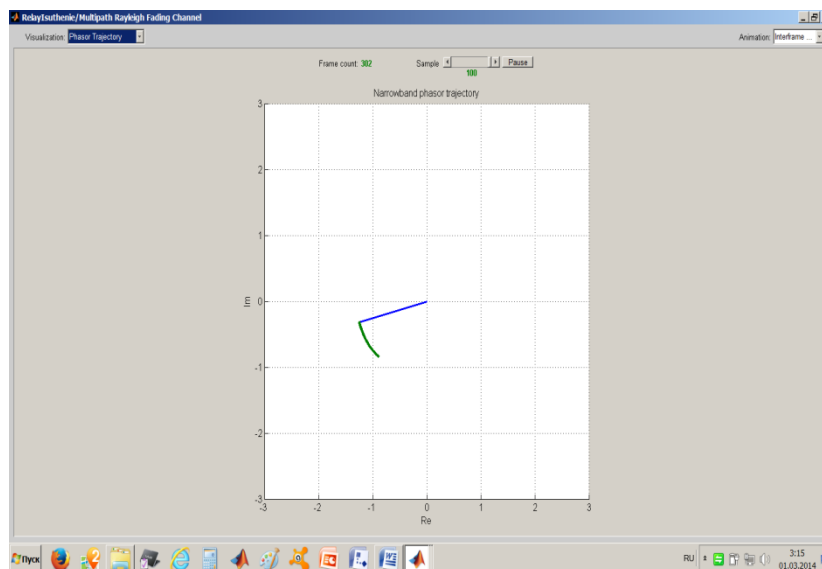


Рис. 10. «Фазовая траектория» сигнала

Замирание каждого луча сигнала моделируется как изменение комплексного коэффициента передачи, значение которого зависит от затухания и фазового сдвига сигнала. «Фазовая траектория» показывает, как изменяется комплексный коэффициент передачи в течение одного кадра моделирования системы. При этом синяя линия соответствует изменению фазы, а зеленая – изменению траектории конечной точки вектора сигнала.

Используя параметры модели:

- рассчитайте максимальную скорость передвижения абонента при значении несущей частоты равной 2 ГГц;
- определите какой вид замираний смоделирован в данном случае;
- объясните полученные результаты.

6. Закройте окно блока *Multipath Rayleigh Fading Channel*.

7. Проанализируйте сигнальные созвездия и глаз-диаграммы в контрольных точках модели (рис. 11).

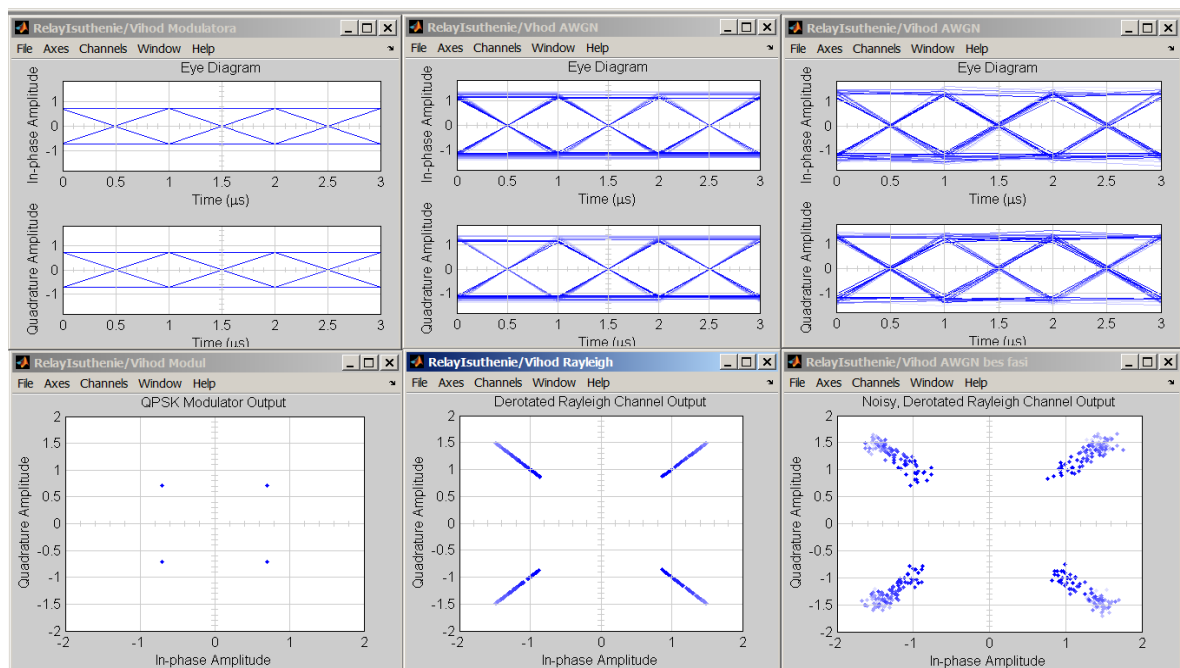


Рис. 11. Сигнальные созвездия и глаз-диаграммы

8. Остановите работу модели.
9. Используя функцию *View Constellation* в окне параметров блока модулятора, наблюдайте и зарисуйте в отчет расположение сигнальных точек (*Constellation ordering*) для вариантов *Gray* и *Binary* (рис. 12 и 13).

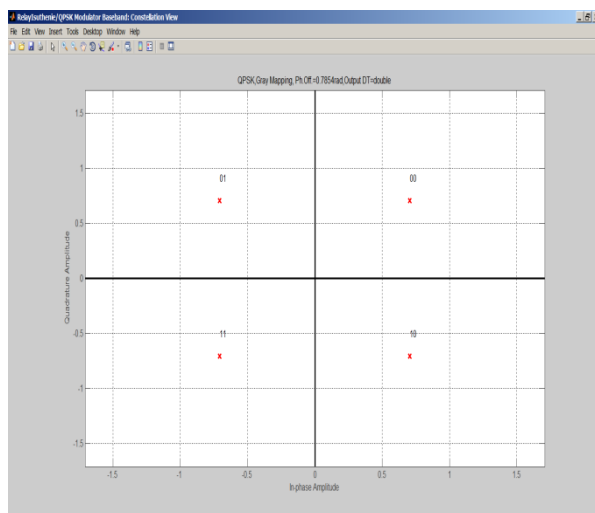


Рис. 12. Расположение сигнальных точек в коде Грея

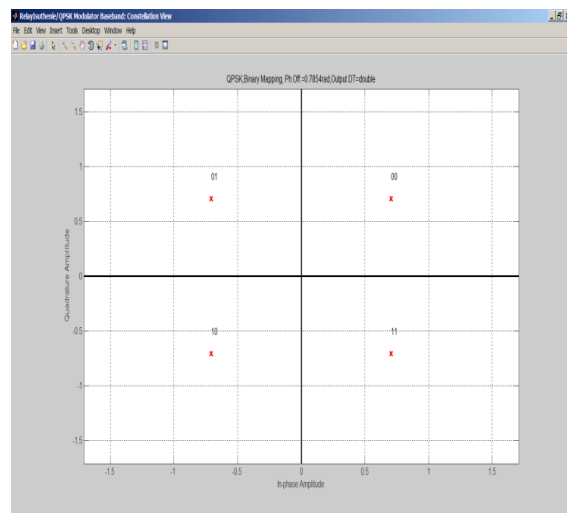


Рис. 13. Расположение сигнальных точек в бинарном коде

10. Установите отношение сигнал/шум в канале AWGN равным 6 дБ.
11. Запустите модель и проанализируйте сигнальные созвездия и глаз-диаграммы (рис. 14).

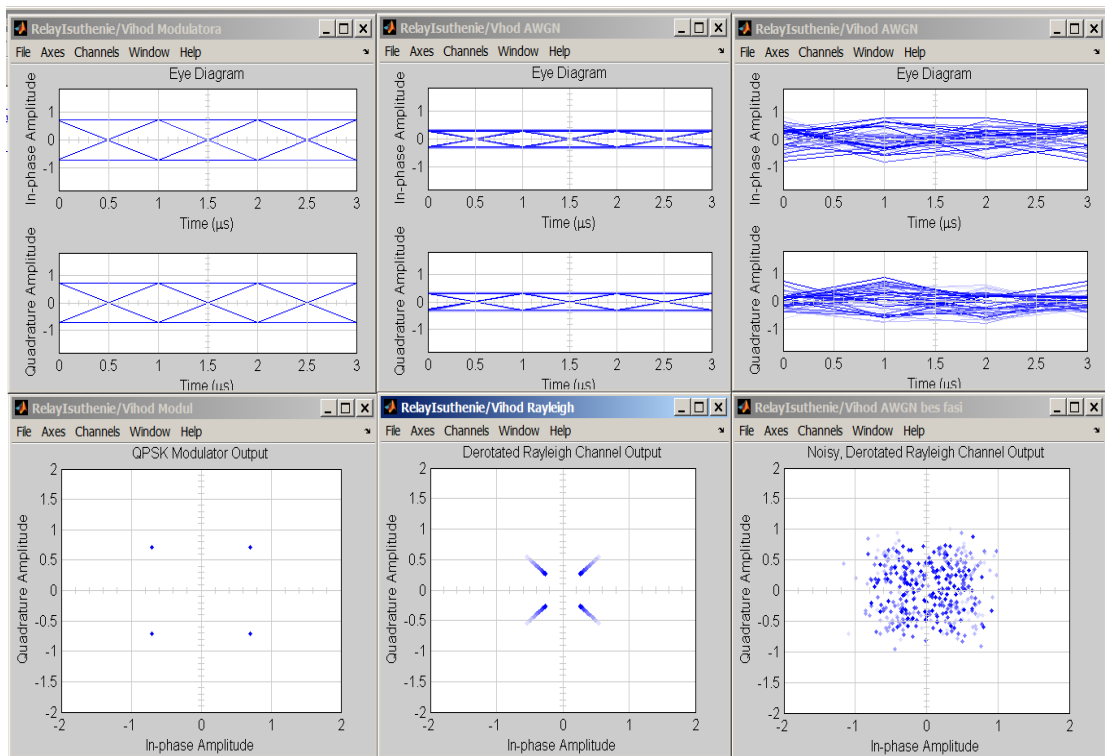


Рис. 14. Сигнальные созвездия и глаз-диаграммы при $E_b/N_0 = 7$ дБ

12. Проанализируйте полученные результаты.
13. Проведите сравнительную оценку значений коэффициента ошибок при $E_b/N_0 = 30$; 6 и 3 дБ для вариантов созвездий *Gray* и *Binary*.
14. Проанализируйте полученные результаты.
15. При значении $E_b/N_0 = 30$ дБ наблюдайте в окне параметров блока *Multipath Rayleigh Fading Channel* импульсную, частотную и фазовую характеристики одновременно (окно *Components*, *IR*, and *Phasor*) (рис. 15).

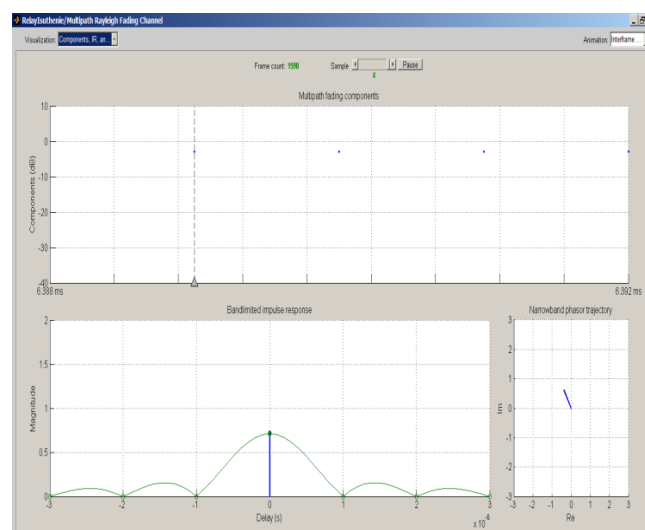


Рис. 15. Окно модели *Components*, *IR*, and *Phasor*

16. Закройте модель.

17. Соберите модель для исследования помехоустойчивости ЦСПС в канале с замираниями Рэлея (рис. 16).

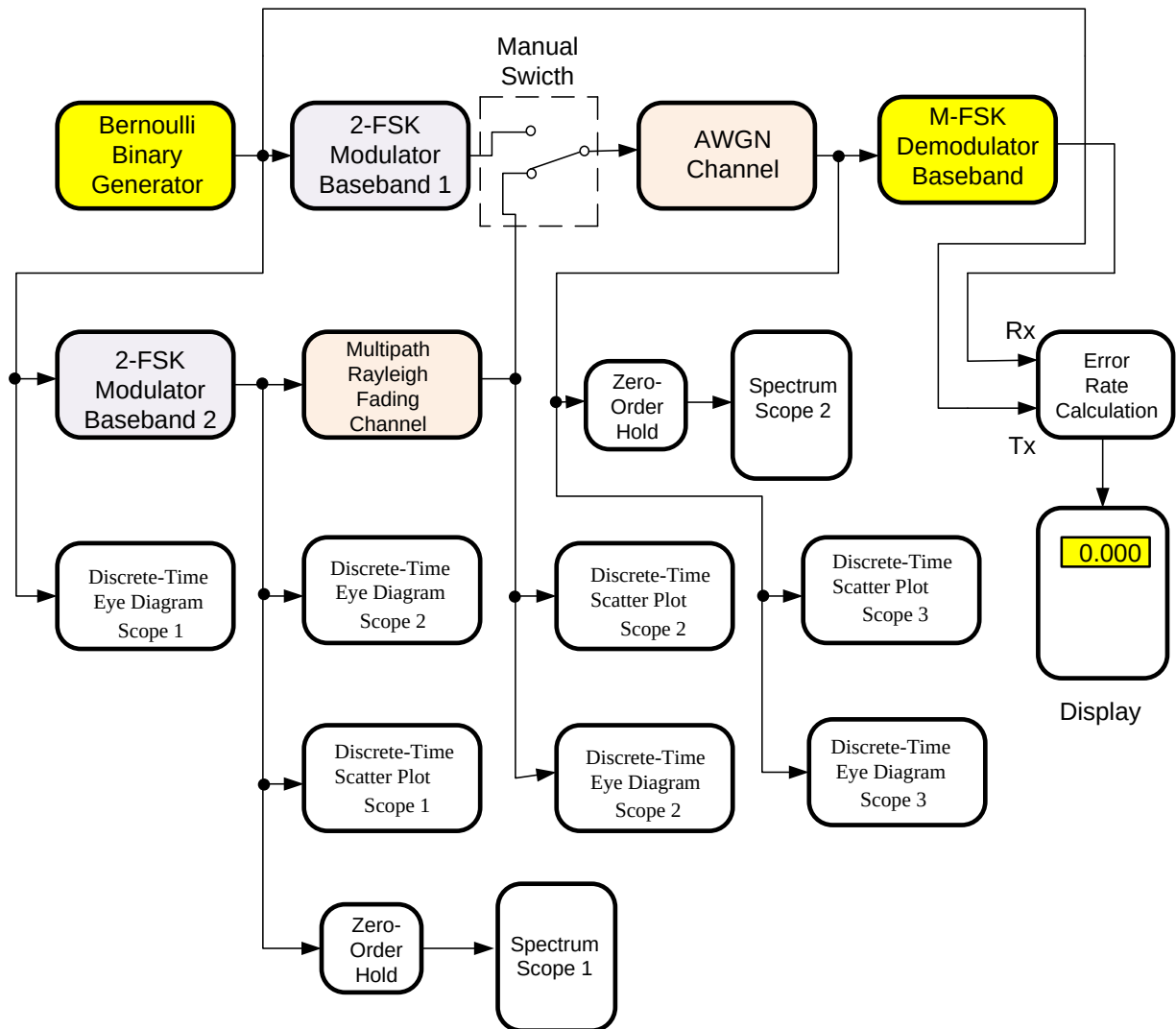


Рис. 16. Схема исследуемой модели ЦСПС

В модели используются следующие блоки:

Bernoulli Binary Generator (генератор последовательности импульсов в формате NRZ – имитатор цифрового сигнала): Communications Blockset–Comm Sources;

M-FSK Modulator Baseband (частотный модулятор в основной полосе частот): Communications Blockset–Modulation-PM;

M-FSK Demodulator Baseband (частотный демодулятор в основной полосе частот): Communications Blockset–Modulation-PM;

AWGN Channel (канал с аддитивным белым гауссовым шумом): Communications Blockset–Channels;

Multipath Rayleigh Fading Channel (канал с замираниями Рэлея): Communications Blockset–Channels;

Discrete-Time Eye Diagram Scope (блок наблюдения глаз–диаграмм): Communications Blockset–Comm Sinks;

Discrete-Time Scatter PlotScope (блок наблюдения сигнальных созвездий): Communications Blockset–Comm Sinks;

Error Rate Calculation (счетчик ошибок): Communications Blockset–Comm Sinks;

Display: Simulink–Sinks;

Manual Switch (управляемый переключатель): Simulink–Signal Routings.

Регулируемые параметры блоков модели:

- блок *Bernoulli Binary Generator* вырабатывает ПСП импульсов в формате NRZ. Регулируемые параметры блока:
- *Probability of a zero* – вероятность появления символов «0»;
- *Sample time* – длительность импульсов ПСП;
- *Samples per frame* – число переданных бит в кадре;
- *Output data type* – тип выходных данных.

Блок *M-FSK Modulator Baseband* вырабатывает двухпозиционный фазомодулированный сигнал в основной полосе частот.

Регулируемым параметром блока *Error Rate Calculation* является значение *Receive delay* – задержка сигнала на входе блока.

18. Проанализируйте временные и частотные характеристики ЦСПС в канале с AWGN без замираний.

18.1. Установите следующие параметры блоков модели ЦСПС (табл. 1).

Табл. 1. Параметры блоков модели

Блок <i>Bernoulli Binary Generator</i>	
Sample Time	1/50000
Frame-based outputs	флажок
Samples per frame	2
Output data type	double
Блок 2 – <i>FSK Modulator Baseband</i>	
M-ary number	2
Input type	Integer
Symbol set ordering	Binary
Frequency separation (Hz)	50000
Phase continuity	Continuous
Samples per Symbol	17
Output data type	double

Продолжение табл. 1

Блок 2 – FSK Demodulator Baseband	
M-ary number	2
Output type	Integer
Symbol set ordering	Binary
Frequency separation (Hz)	50000
Samples per Symbol	17
Output data type	double
Блок AWGN Channel	
Mode	Signal to noise ratio (E_b/N_0)
E_b/N_0	100
Number bits per symbol	1
Input Signal power...	1
Symbol period	1/50000
Блок Multipath Rayleigh Fading Channel	
Maximum Doppler shift (Hz)	0.01
Doppler spectrum type	Jakes
Discrete path delay vector	[0]
Average path gain vector (dB)	[0]
Normalise gain vector to 0 dB overall gain	флажок
Блок Discrete Time Scatter Plot Scope	
Samples per symbol	4
Offset (samples)	0
Points displayed	400
New points per display	10
Блок Discrete Time Eye Diagram Scope	
Samples per symbol	4
Offset (samples)	0
Symbol per trace	1
Traces displayed	400
New points per display	10
Блоки Spectrum Scope	
Spectrum units	dbW/Hertz
Spectrum type	Two-sided ((- $F_s/2 \dots F_s/2$))
Buffer size	1024
Buffer input	флажок

Продолжение табл. 1

Buffer overlap	64
Window	Hann
Number of spectral averages	30
Блок <i>Error Rate Calculation</i>	
Receive delay	0
Computation delay	0
Computation mode	Entre frame
Output data	Port
Параметры модели	
Start	0.0
Stop	inf

- 18.2. Установите блоки анализаторов спектра и *Multipath Rayleigh Fading Channel* в режим ожидания при запуске модели.
- 18.3. Установите режим работы модели без замираний при помощи управляемого ключа *Manual Switch*.
- 18.4. Запустите модель и проанализируйте сигнальные созвездия на выходе модулятора и на выходе канала с AWGN (рис. 17 и 18).

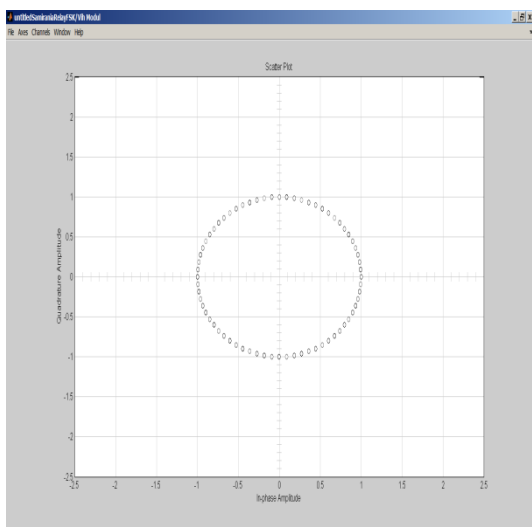


Рис. 17. Сигнальное созвездие на выходе модулятора

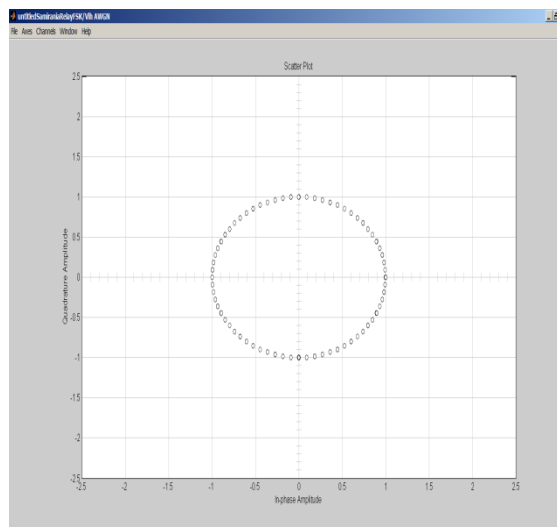


Рис. 18. Сигнальное созвездие на выходе AWGN

- 18.5. Проанализируйте глаз-диаграммы на выходах генератора, модулятора и выходе канала с AWGN (рис. 19–21).

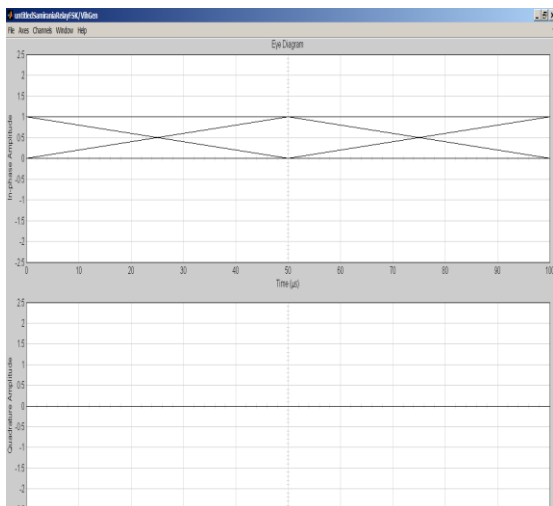


Рис. 19. Глаз–диаграмма на выходе генератора

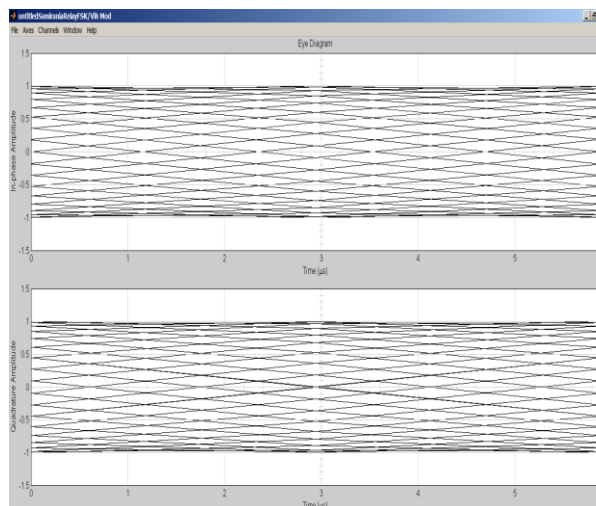


Рис. 20. Глаз–диаграмма на выходе модулятора

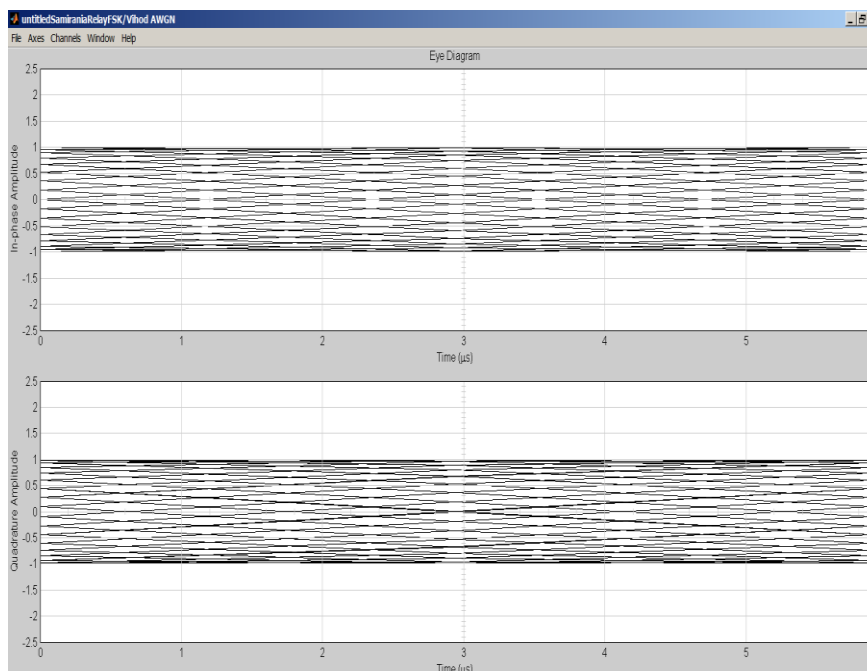


Рис. 21. Глаз–диаграмма на выходе канала с AWGN

- 18.6. Зафиксируйте значение коэффициента ошибок.
- 18.7. Объясните полученные результаты.
- 18.8. Остановите работу модели.
- 18.9. Установите значение $E_b/N_0 = 30$ dB.
- 18.10. Запустите модель и проанализируйте влияние шума на форму сигнальных созвездий и глаз–диаграмм (рис. 22–23).

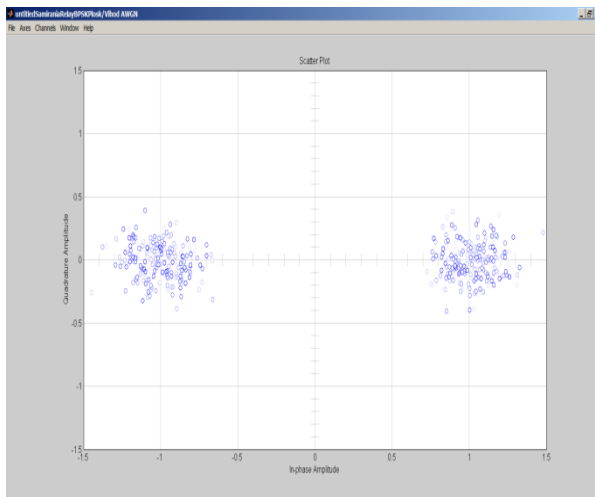


Рис. 22. Сигнальное созвездие на выходе канала с AWGN

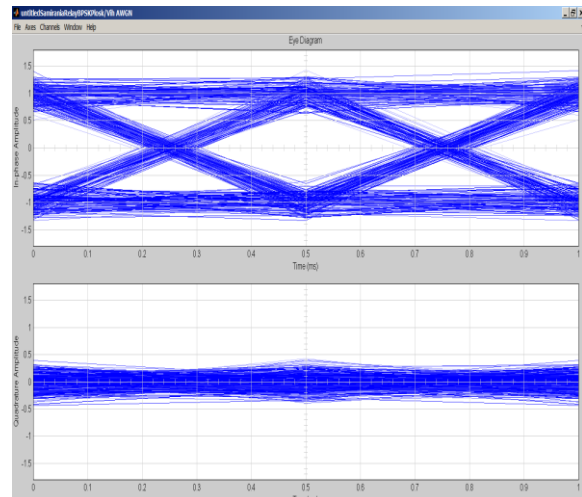


Рис. 23. Глаз-диаграмма на выходе канала с AWGN

- 18.11. Зафиксируйте значение коэффициента ошибок.
- 18.12. Объясните полученные результаты.
- 18.13. Остановите работу модели.
- 18.14. Установите блоки анализа сигнальных созвездий и глаз-диаграмм в режим ожидания при запуске модели.
- 18.15. Установите блоки *Spectrum Scope* в режим открытия при запуске модели.
- 18.16. Установите значение $E_b/N_0 = 100$ дБ.
- 18.17. Запустите модель и проанализируйте спектры сигналов на выходах модулятора и канала с AWGN (рис. 24).

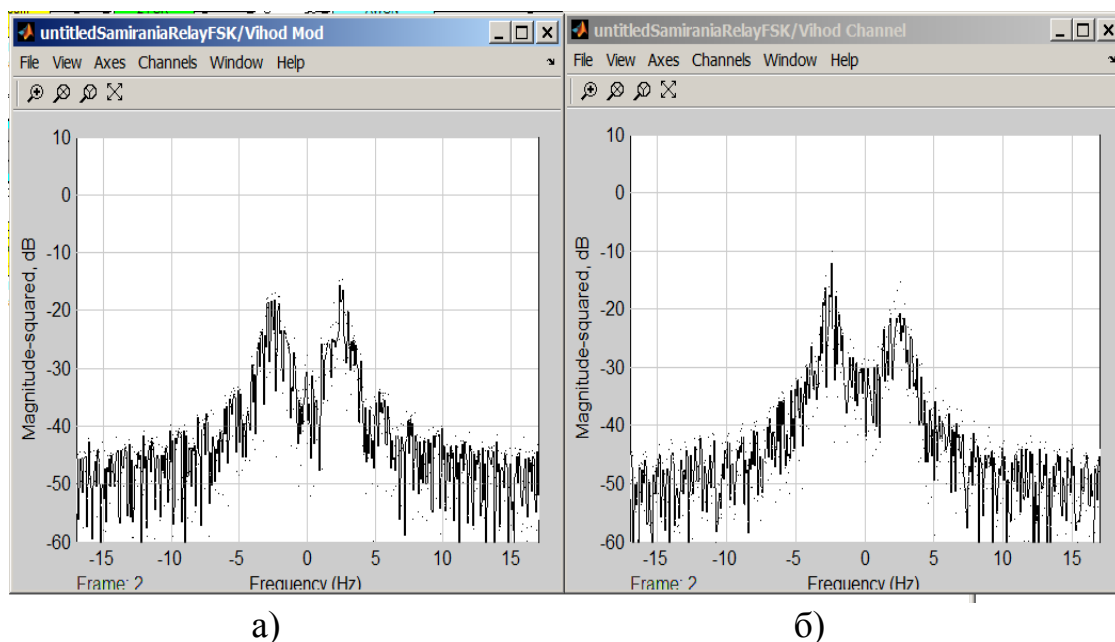


Рис. 24. Спектры сигналов на выходе модулятора (а) и выходе канала с AWGN (б)

- 18.18. Рассчитайте индекс частотной модуляции.
- 18.19. Определите ширину спектра модулированного сигнала по «первым нулям спектра».
- 18.20. Рассчитайте спектральную эффективность 2-FSK.
- 18.21. Повторите измерения п.п. 17.16–17.17 при $E_b/N_0 = 30$ дБ.
- 18.22. Объясните полученные результаты.
- 18.23. Остановите работу модели.
19. Произведите оценку помехоустойчивости ЦСПС в канале с «плоскими замираниями» при отсутствии шума.
- 19.1. Установите режим работы модели с замираниями при значении $E_b/N_0 = 100$ дБ.
- 19.2. Установите следующие параметры блока *Multipath Rayleigh Fading Channel*:
- *Maximum Doppler shift (Hz)* = 15;
 - *Discrete path delay Vector* [0 1e-6];
 - *Average path vector (dB)*: [0 0].
- 19.3. В блоке *Error Rate calculation* установите значение параметра *Receive delay* = 1.
- 19.4. Запустите модель.
- 19.5. Проанализируйте импульсную характеристику канала с замираниями (рис. 25), частотную характеристику канала (рис. 26), форму доплеровского спектра (рис. 27), изменение доплеровского спектра в течение одного кадра моделирования (рис. 28) и «фазовую траекторию» сигнала (рис. 29).

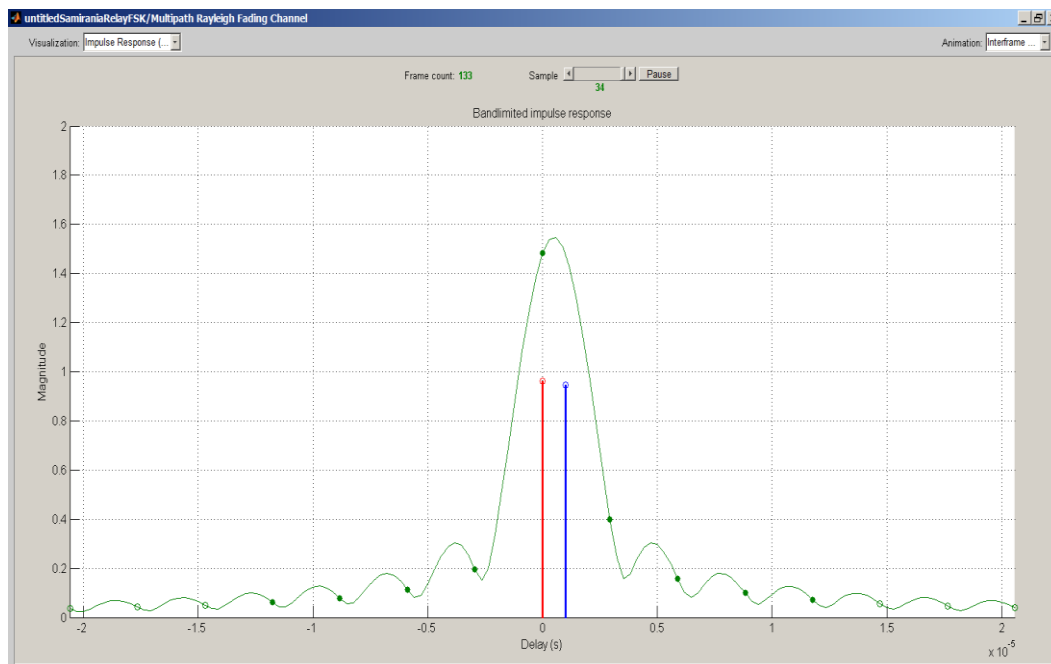


Рис. 25. Импульсная характеристика канала с замираниями

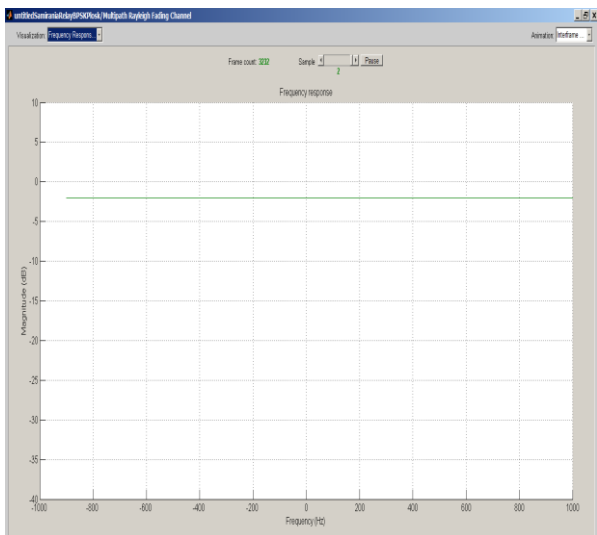


Рис. 26. Частотная характеристика канала

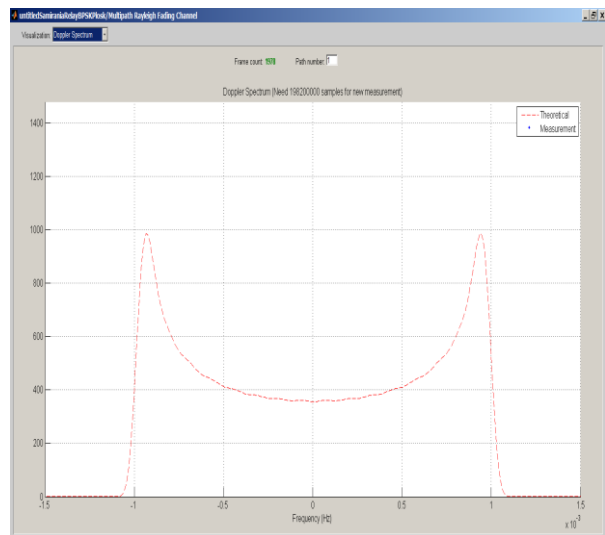


Рис. 27. Доплеровский спектр

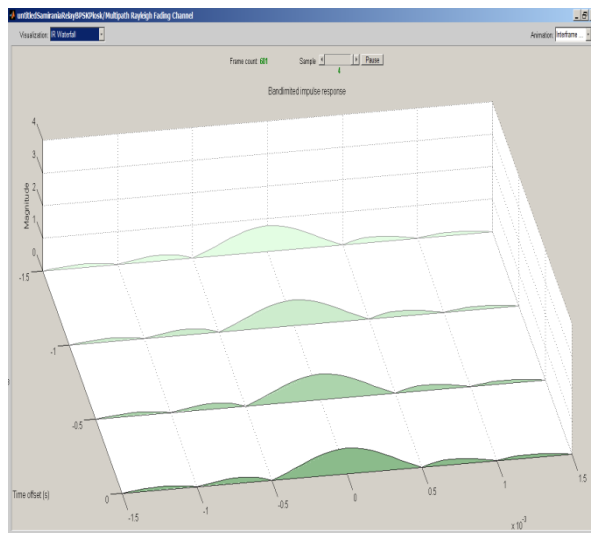


Рис. 28. Изменение Доплеровского спектра

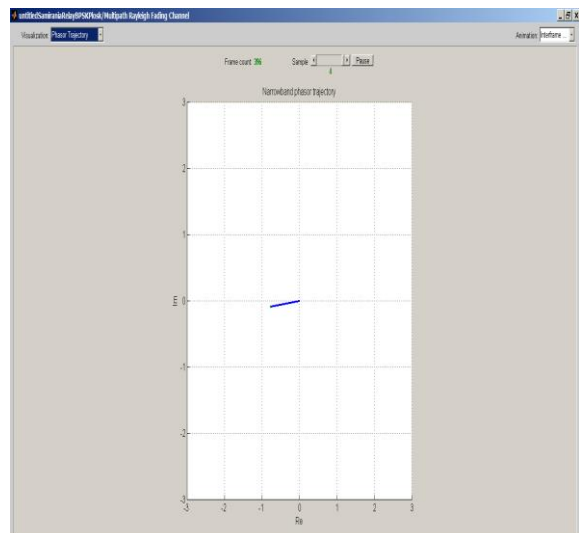


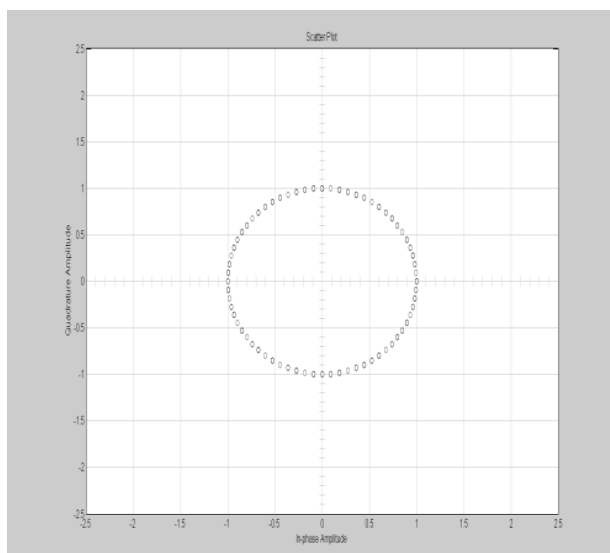
Рис. 29. «Фазовая траектория» сигнала

19.6. Закройте окно бока *Multipath Rayleigh Fading Channel*.

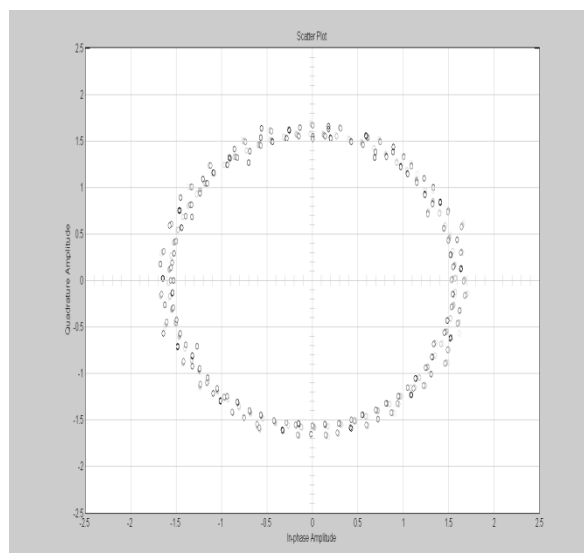
19.7. Проанализируйте сигнальные созвездия и глаз-диаграммы в контрольных точках модели (рис. 30–33).

19.8. Объясните полученные результаты.

19.9. Зафиксируйте значение коэффициента ошибок.



а)



б)

Рис. 30. Сигнальные созвездия на выходе модулятора (а) и выходе блока *Multipath Rayleigh Fading Channel*

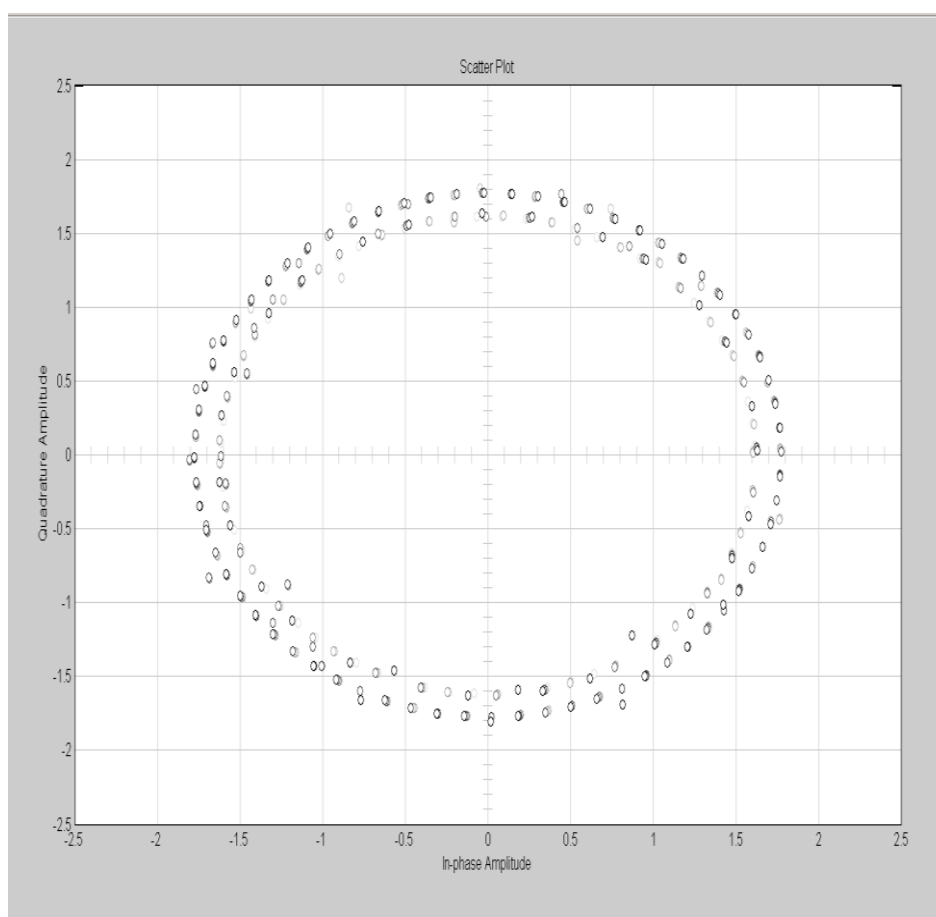
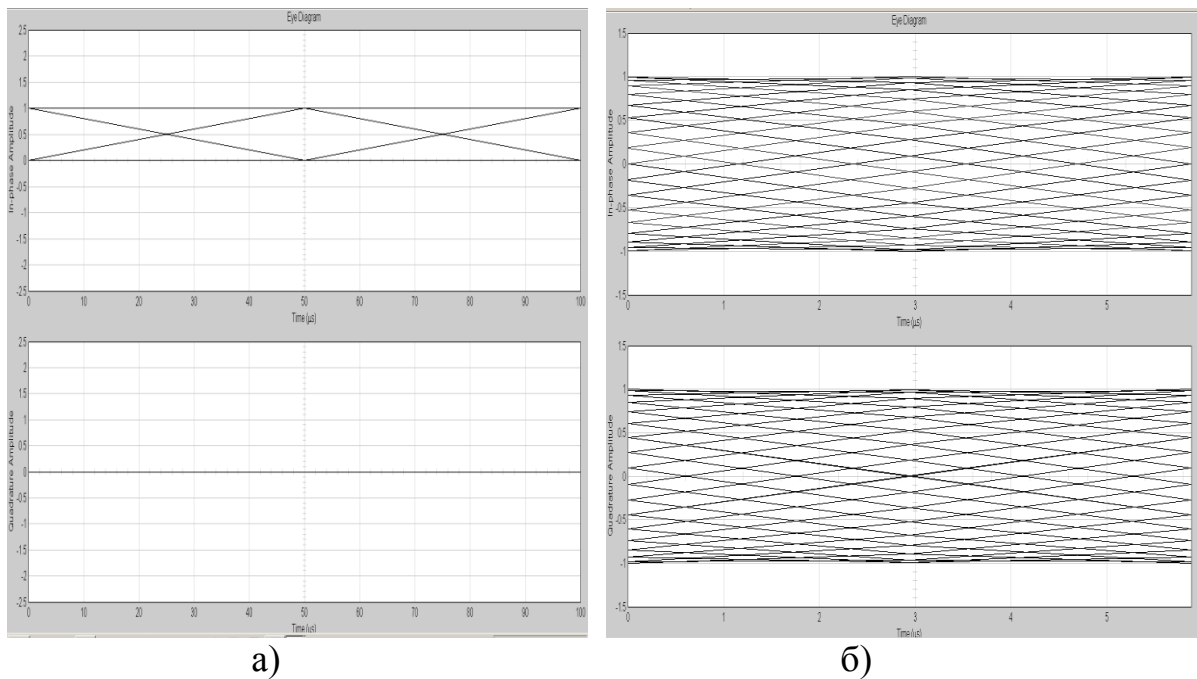
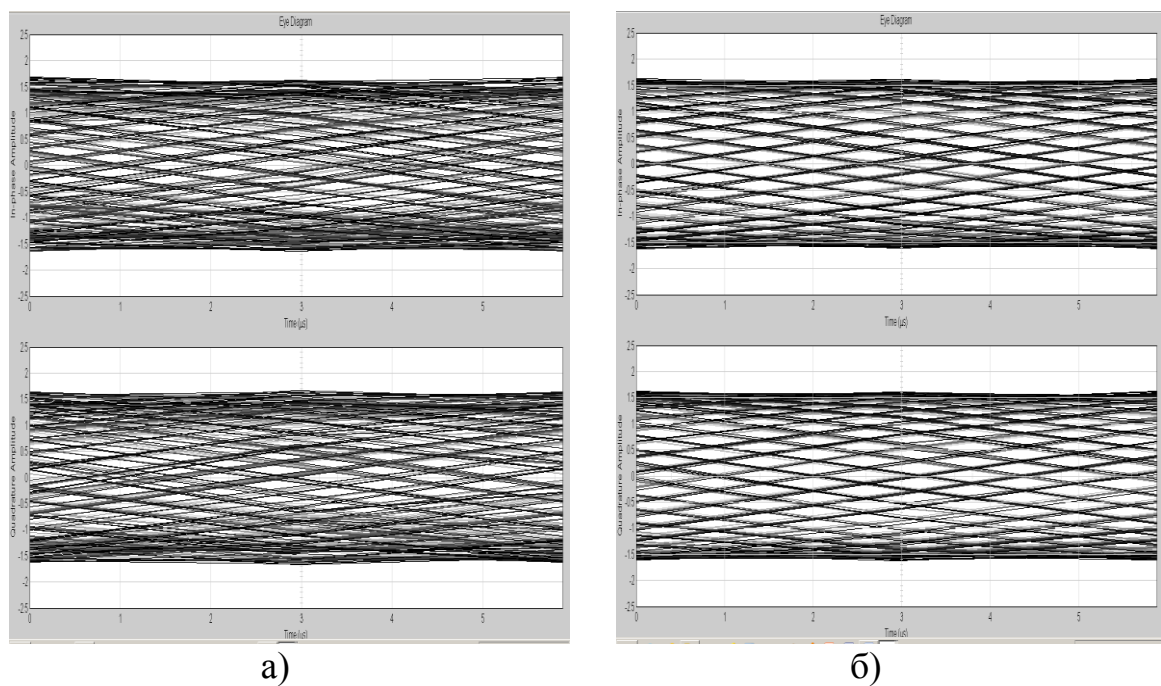


Рис. 31. Сигнальное созвездие на выходе *AWGN Channel*



а) б)
Рис. 32. Глаз–диаграммы на выходе генератора (а) и выходе модулятора (б)



а) б)
Рис. 33. Глаз–диаграммы на выходе блока *Multipath Rayleigh Fading Channel* (а) и выходе блока *AWGN Channel* (б)

19.10. Проведите оценку помехоустойчивости ЦСПС в канале с плоскими замираниями при наличии шума:
- установите режим работы модели с замираниями при значении $E_b/N_0 = 30$ дБ;

- установите следующие параметры блока *Multipath Rayleigh Fading Channel*:
- *Maximum Doppler shift (Hz)* = 15;
- *Discrete path delay Vector* [0 1e-6];
- *Average path vector (dB)*: [0 0];
- в блоке *Error Rate calculation* установите значение параметра *Receive delay* = 1;
- запустите модель;
- проанализируйте глаз-диаграмму и сигнальное созвездие на выходе канала с AWGN (рис. 34);
- зафиксируйте значение коэффициента ошибок;
- объясните полученные результаты;
- остановите работу модели.

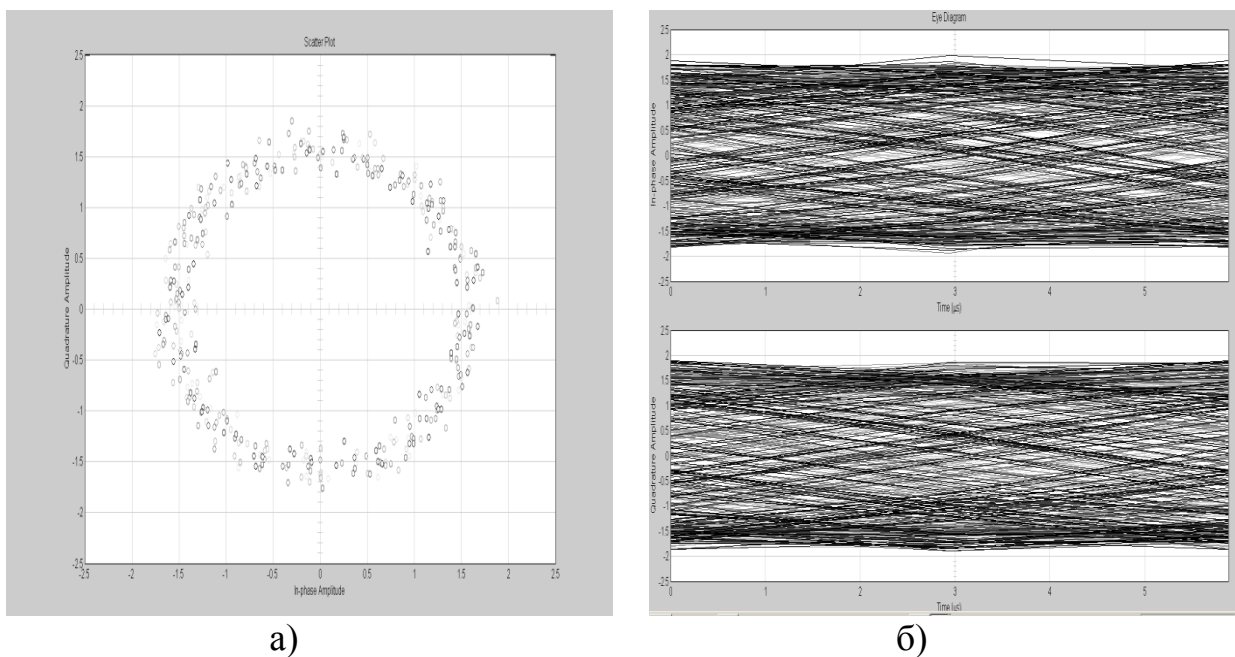


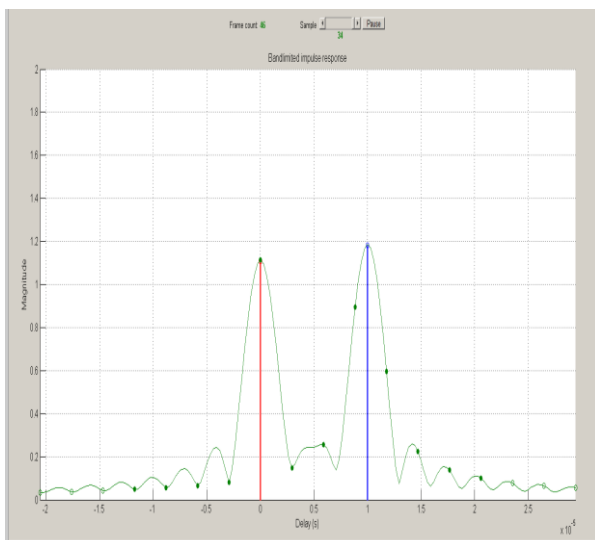
Рис. 34. Сигнальное созвездие (а) и глаз-диаграмма на выходе канала с AWGN (б)

20. Произведите оценку помехоустойчивости ЦРС в канале с ЧСЗ и белым шумом.

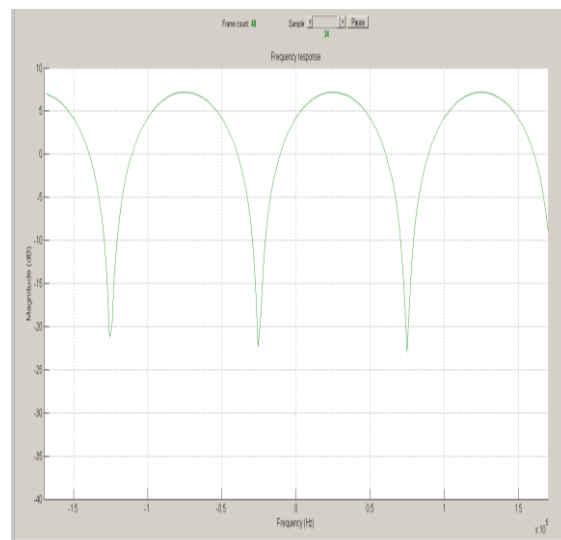
20.1. Установите следующие параметры модели:

- $E_b/N_0 = 30$ дБ;
- параметры блока *Multipath Rayleigh Fading Channel*:
 - *Maximum Doppler shift (Hz)* = 15;
 - *Discrete path delay Vector* [0 1e-5];
 - *Average path vector (dB)*: [0 0];
- в блоке *Error Rate calculation* установите значение параметра *Receive delay* = 1.

20.2. Запустите модель и проанализируйте импульсную и частотную характеристики канала с ЧСЗ (рис. 35).



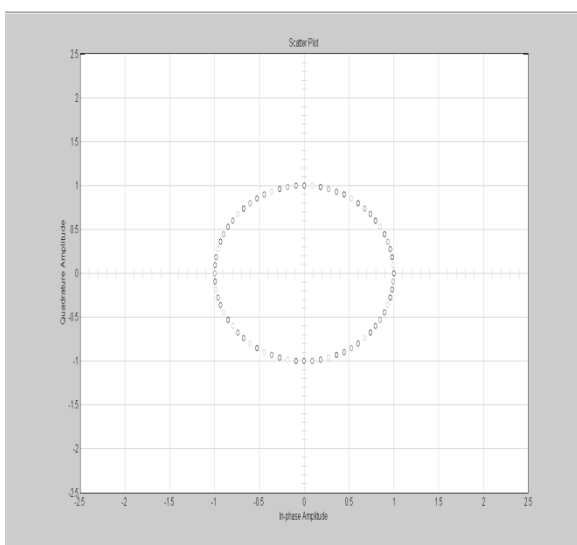
а)



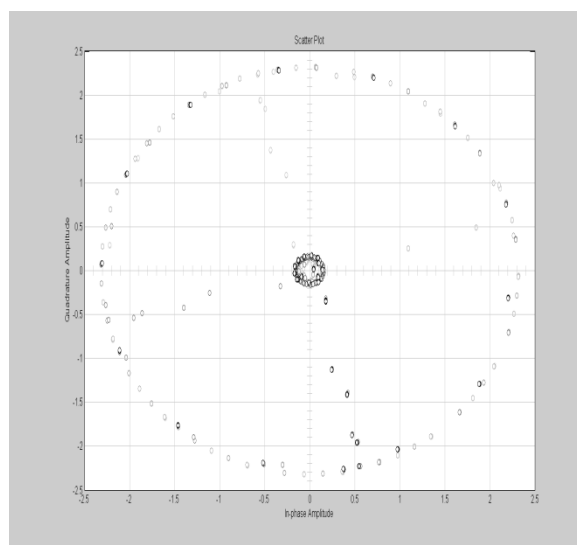
б)

Рис. 35. Импульсная (а) и частотная характеристики (б) канала с ЧСЗ

20.3. Проанализируйте сигнальные созвездия и глаз-диаграммы в контрольных точках модели (рис. 36–38).



а)



б)

Рис. 36. Созвездия сигнальных точек на выходе модулятора (а) и выходе блока *Multipath Rayleigh Fading Channel* (б)

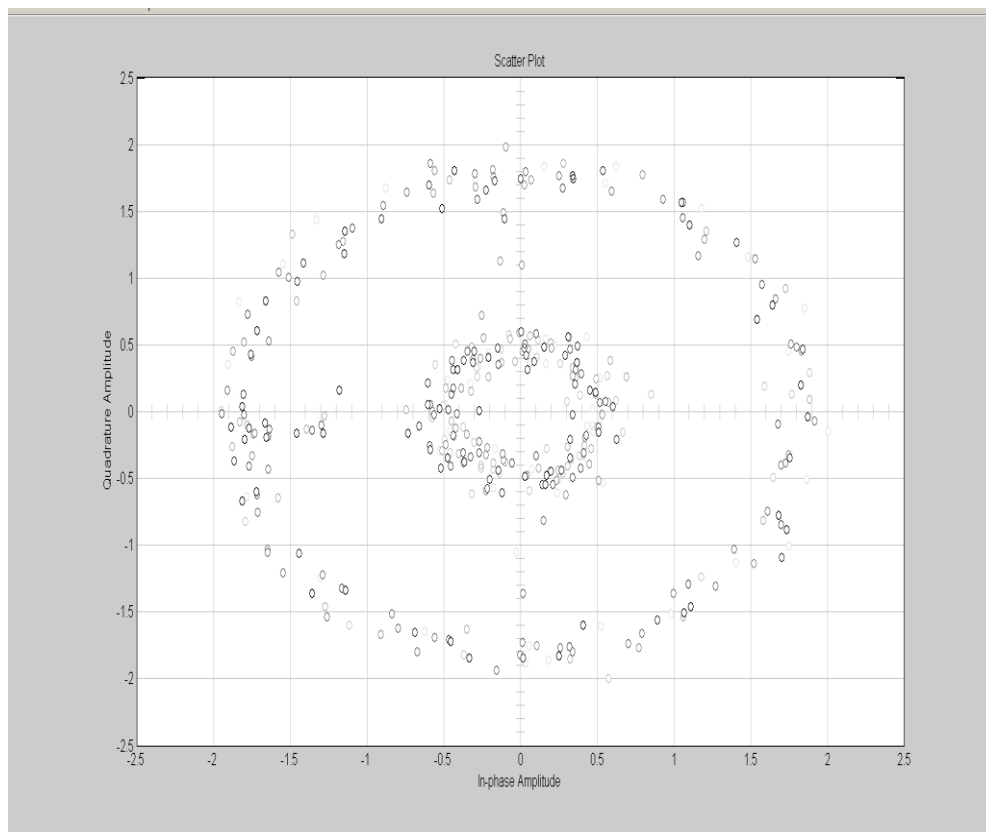


Рис. 37. Созвездие сигнальных точек на выходе канала с AWGN

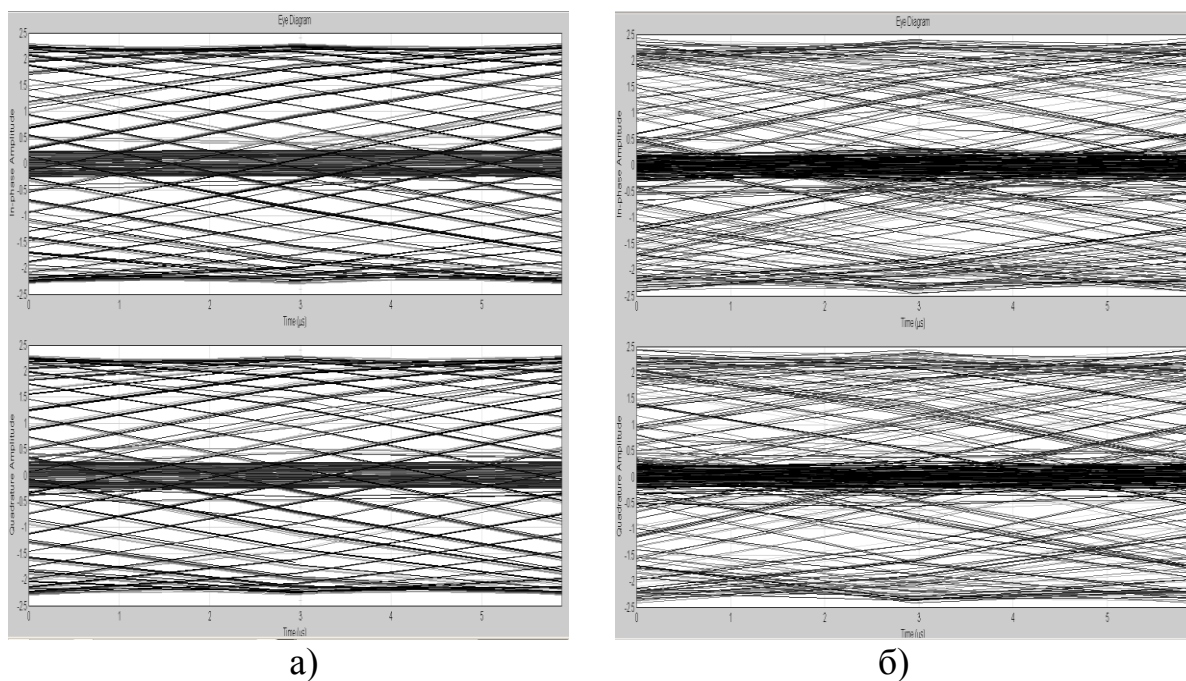


Рис. 38. Глаз-диаграммы на выходе блока *Multipath Rayleigh Fading Channel* (а) и выходе канала с AWGN (б)

- 20.4. Зафиксируйте значение коэффициента ошибок.
- 20.5. Остановите работу модели.
21. Используя инструмент BERTool СКМ MATLAB, получите зависимости $\kappa_{\text{ош}}$ (с/ш) для канала с AWGN, канала с замираниями Рэлея и канала с AWGN и помехоустойчивым кодированием (код Рида–Соломона) (рис. 39).
22. Объясните полученные результаты.
23. Закройте модель.

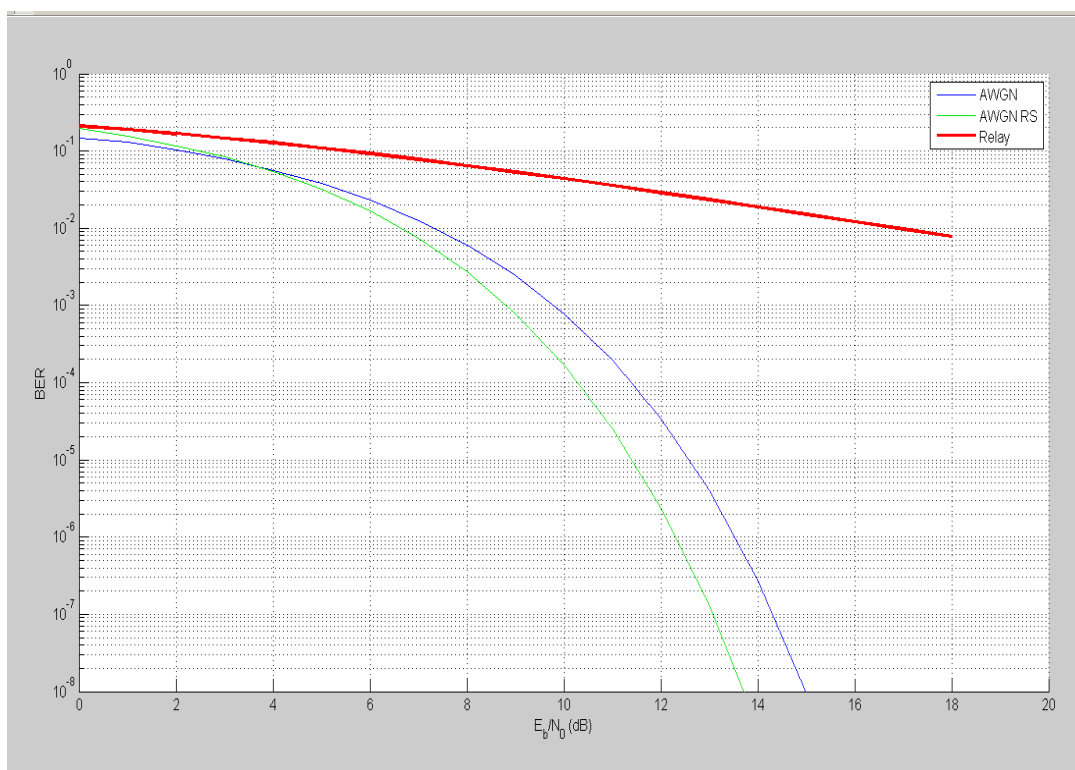


Рис. 39. Результаты расчета помехоустойчивости системы связи с BPSK

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Схемы исследуемых моделей ЦСРС.
2. Результаты исследований в виде таблиц и графиков.
3. Выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы

1. Поясните особенности моделирования телекоммуникационных устройств в MATLAB/Simulink.
2. Какие замирания называются плоскими?
3. Какие замирания называются частотно-селективными?
4. При каких значениях параметров ЦСРС и канала наблюдаются плоские замирания?
5. При каких значениях параметров ЦСРС и канала наблюдаются частотно-селективные замирания?
6. Поясните физическую суть эффекта Доплера.
7. Каким соотношением связаны скорость передвижения и максимальный доплеровский сдвиг частоты?
8. Поясните, каким образом изменяются сигнальные созвездия и глаз-диаграммы при наличии замираний в радиоканале?
9. Поясните, что понимается под импульсной характеристикой канала с замираниями?
10. Поясните закон распределения Рэлея.
11. При каких условиях возникают замирания Рэлея?
12. Поясните закон распределения Райса.
13. При каких условиях возникают замирания Райса?
14. Какие числовые характеристики многолучевых каналов с замираниями вы знаете?
15. Поясните модель Кларка для эффекта Доплера.

Лабораторная работа № 8.9

«Исследование влияния параметров канала связи на ЦСПС»

Цель работы: исследование влияния межсимвольной интерференции на помехоустойчивость системы связи с BPSK в канале с AWGN и измерение энергетической эффективности BPSK в канале с AWGN.

Подготовка к работе

По указанной литературе:

- 1) изучить принципы измерения энергетической эффективности методов модуляции;
- 2) изучить причины появления МСИ в радио тракте ЦСПС;
- 3) подготовить бланк отчета по лабораторной работе;
- 4) подготовить ответы на контрольные вопросы.

Рекомендуемая литература

1. *Маглицкий Б.Н.* Спектрально-эффективные методы модуляции в цифровых системах радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2009. – 120 с.

При выполнении лабораторной работы используется IBM – совместимый компьютер с процессором Pentium II и выше, операционная система Windows XP, Windows 7.

Программное обеспечение: СКМ «MATLAB/Simulink» (R2009b).

Выполнение работы

1. Запустите программу MATLAB, откройте окно библиотеки Simulink, создайте окно для новой модели.
2. *Собрать модель для анализа влияния МСИ на глаз-диаграммы и созвездия сигнальных точек (рис. 1).*

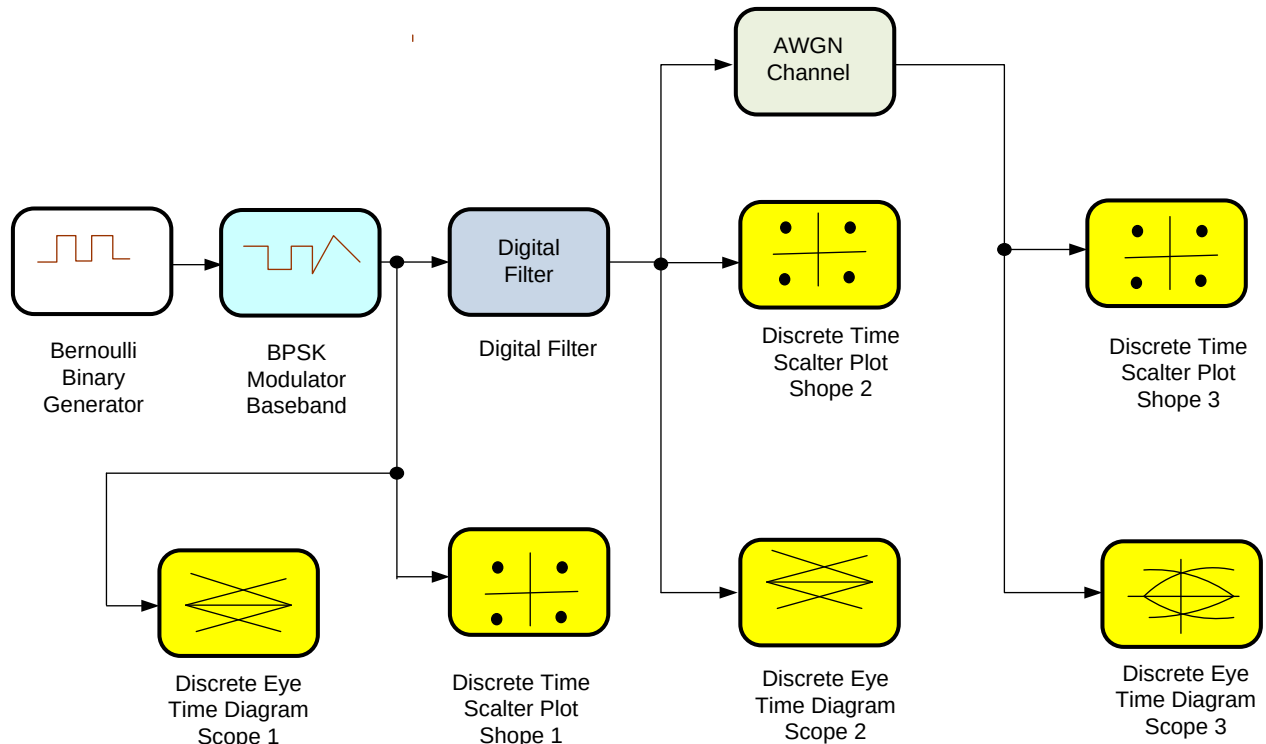


Рис. 1. Схема имитационной модели

Принцип работы лабораторной модели

Цифровой сигнал в коде NRZ, генерируемый блоком *Bernoulli binary generator* (генератор ПСП) поступает на вход модулятора BPSK. Изменение вероятности двоичных символов производится путем установки вероятности нуля « $p = \dots$ ». При этом вероятность появления единиц равна « $1 - p$ ».

В исследуемой модели межсимвольная интерференция вводится блоком дискретного цифрового фильтра **Digital Filter**.

Местонахождение блоков модели в библиотеке *Simulink*, используемых при моделировании:

Bernoulli Binari Generator: Communication Blockset–Comm Sources–Data Sources;

BPSK Modulator Baseband: Communication Blockset–Modulation–Digital Basedand Modulation–PM;

AWGN Channel: Communication Blockset–Channel –AWGN Channel;

Digital Filter: Signal Processing Blockset–Filtering–Filter designs–Digital Filter;

Discrete Time Eye Diagram Scope: Communication Blockset–Com Sinks;

Discrete Time Scatter Scope: Communication Blockset–Com Sinks.

3. Установить параметры блоков модели (табл. 1).

Табл. 1. Параметры блоков лабораторной модели (MATLAB–R2009b)

Bernoulli Binary Generator	
Initial seed – номер ПСП	61
Probability of a zero	0.5
Simple time – период двоичных символов	1.0
Frame based outputs	флажок
Samples per frame	1
Output data type	double
Модулятор BPSK (BPSK Modulator Baseband)	
Main: Phase offset (rad)	pi
Data Types	double
Демодулятор BPSK (BPSK Demodulator Baseband)	
Main: Phase offset (rad)	pi
Decision type	Hard decision
Data Types Output: Mode: Derotate factor	double Same word length as input
Имитатор канала с гауссовским шумом (AWGN Channel)	
Initial seed	61
Mode:	Signal to noise ratio (E_b/N_0)
(E_b/N_0) (dB)	по ходу работы
Input signal power. Referenced to 1 Ohm (Watts)	по ходу работы
Наблюдение глаз–диаграмм Discrete Time Eye Diagram Scope	
Samples per symbol	4
Offset (Samples)	0

Продолжение табл. 1

Symbol per trace	1
Traces per trace	1000
New traces per display	10
Наблюдение созвездия Discrete Time Scatter Plot Scope	
Samples per symbol	1
Offset (samples)	0
Points displayed	400
New points per display	10

Задайте не рекурсивный фильтр (**Transfer function type: FIR**) и импульсную характеристику (ИХ) канала связи, вызывающую слабую МСИ, создав в главном окне MATLAB переменную **h = [0.1 1 0.1]** и указав ее идентификатор **h** в поле **Numerator coefficients** блока фильтра.

В канале с AWGN установите значение отношения сигнал/шум $E_b/N_0 = 100$ дБ (для оценки влияния на качество передачи только МСИ).

4. Задайте значение средней мощности сигнала в блоке AWGN в поле Input signal power равным 1.0.

Рассматриваемая модель не содержит аналоговых блоков, поэтому целесообразно использовать режим моделирования с дискретным временем. Для этого откройте окно параметров моделирования командой меню **Simulation-Configuration Parameters** и для параметров **Type** и **Solver** в разделе **Solver options** выберите **Fixed Stop** и **discrete (no continuous)** соответственно.

Установите параметры **Start time = 0.0** и **Stop time = 10 000**.

5. Запустите модель.
6. Пронаблюдайте глаз–диаграммы и созвездия сигнальных точек.
7. Определите раскрыв глаз–диаграммы и расстояние между ближайшими сигнальными точками созвездий.
8. Зарисуйте осциллограммы в отчет по лабораторной работе.
9. Для значений боковых лепестков цифрового фильтра, равных 0.4 и 0.5, глаз–диаграммы и созвездия сигнальных точек.
10. В канале с AWGN установите значение отношения сигнал/шум $E_b/N_0 = 15$ дБ (для оценки влияния на качество передачи МСИ и теплового шума).
11. Повторите измерения п.5, п.6 и п.7.
12. Сформулируйте выводы по проведенному анализу.
13. Закройте модель. **Модель не сохранять.**
14. Проведите *анализ влияния МСИ на спектр модулированного сигнала, для чего соберите модель, приведенную на рисунке 2.*

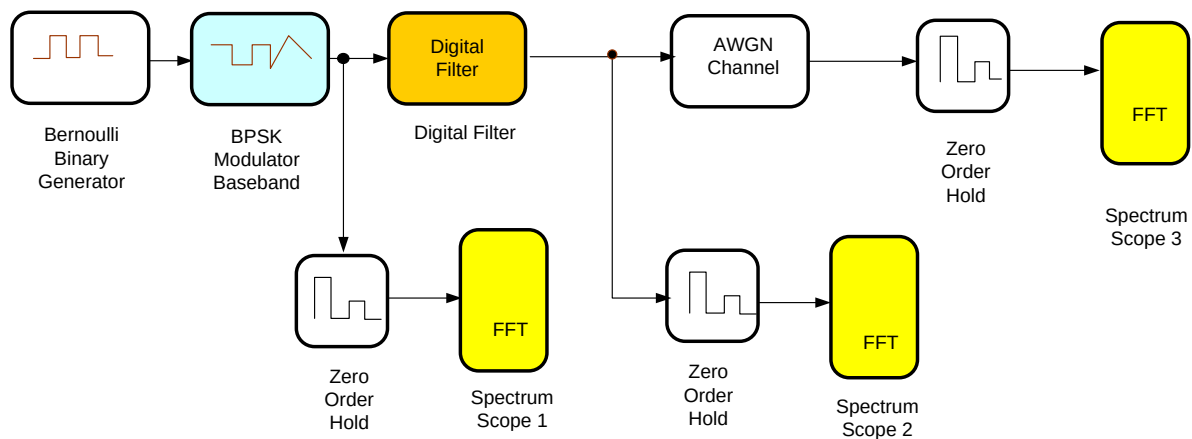


Рис. 2. Имитационная модель для оценки влияния МСИ на спектр сигнала

Местонахождение отдельных блоков в библиотеке *Simulink*, используемых при моделировании:

Bernoulli Binari Generator: Communication Blockset–Comm Sources–Data Sources;

BPSK Modulator Baseband: Communication Blockset–Modulation–Digital Basedand Modulation–PM;

AWGN Channel: Communication Blockset–Channel–AWGN Channel;

Digital Filter: Signal Processing Blockset–Filtering–Filter designs–Digital Filter;

Spectrum Scope: Simulink–Signal Processing–Signal Processing–Sinks;

Zero Order Hold: Simulink–Discrete.

15. Установите следующие параметры блоков модели (табл. 2).

Табл. 2. Параметры блоков модели

Bernoulli Binary Generator	
Initial seed- номер ПСП	61
Simple time – период двоичных символов	4.0
Probability of a zero	0.5
Frame based outputs	флажок
Samples per frame – дискретизация выходного сигнала. Поле активно, если флажок Frame-based outputs установлен.	1
Output data type	double

Продолжение табл. 2

Модулятор BPSK (BPSK Modulator Baseband)	
Main:	
Phase offset (rad)	pi
Data Types	double
Анализатор спектра (Spectrum Scope)	
Spectrum units	dBW/Hertz
Spectrum type	Two-Sided ((-F _s /2...F _s /2))
Buffer size	1024
Buffer input	флажок
Buffer overlap	128
Window	Hann
Window sampling	Periodic
Number of spectral averages	16
Axis propereties:	
Inlert sample time from input	флажок
Frequency display offset (Hz)	0
Frequency display limits	Auto
Minimum Y-limit	-60
Maximum Y-limit	12
Y-axis label	Magnitude, dB
Display Properties:	флажок
Show grid	флажок
Open Scope at start of Simulation	флажок

16. Задайте не рекурсивный фильтр (**Transfer function type: FIR**) и импульсную характеристику (ИХ) канала связи, вызывающую слабую МСИ, создав в главном окне MATLAB переменную **h = [0.1 1 0.1]** и указав ее идентификатор **h** в поле **Numerator coefficients** блока фильтра. В канале с AWGN установите значение отношения сигнал/шум $E_b/N_0 = 100$ дБ (для оценки влияния на качество передачи только МСИ).
17. Задайте значение средней мощности сигнала в блоке AWGN в поле **Input signal power** равным 1.0.
18. Для параметров **Type** и **Solver** в разделе **Solver options** выберите **Variable Step** и ode45 (Dormand – Prince).
19. Задайте значения **Start time = 0.0** и **Stop time = 10 000**.
20. Запустите модель.

21. Проанализируйте спектры сигналов:
 - рассчитайте спектральную эффективность BPSK;
 - проведите оценку изменения спектра сигнала (изменение уровней основного и боковых лепестков спектра).
22. Установите параметры цифрового фильтра: $\mathbf{h} = [0.5 \ 1 \ 0.5]$ и идентификатор $\mathbf{h}$ в поле **Numerator coefficients** блока фильтра.
23. Задайте значение средней мощности сигнала в блоке AWGN в поле Input signal power равным 1.3.
24. Запустите модель и проведите оценку спектров сигналов в контрольных точках модели:
 - рассчитайте спектральную эффективность BPSK;
 - проведите оценку изменения спектра сигнала (изменение уровней основного и боковых лепестков спектра).
25. Зарисуйте спектрограммы в отчет и проведите оценку полученных результатов.
26. Повторите измерения при значениях п. 22 при $E_b/N_0 = 20$ и 8 дБ.
27. Установите параметры цифрового фильтра: $\mathbf{h} = [0.8 \ 1 \ 0.8]$ и идентификатор $\mathbf{h}$ в поле **Numerator coefficients** блока фильтра.
28. Задайте значение средней мощности сигнала в блоке AWGN в поле Input signal power равным 1.35.
29. Запустите модель и проведите оценку спектров сигналов в контрольных точках модели:
 - рассчитайте спектральную эффективность BPSK;
 - проведите оценку изменения спектра сигнала (изменение уровней основного и боковых лепестков спектра).
30. Зарисуйте спектрограммы в отчет и проведите оценку полученных результатов.
31. Повторите измерения при значениях $E_b/N_0 = 20$ и 8 дБ .
32. Закройте окно модели. **Созданную модель сохранить.**
33. *Проведите оценку энергетической эффективности BPSK, для чего соберите модель, приведенную на рисунке 3.*

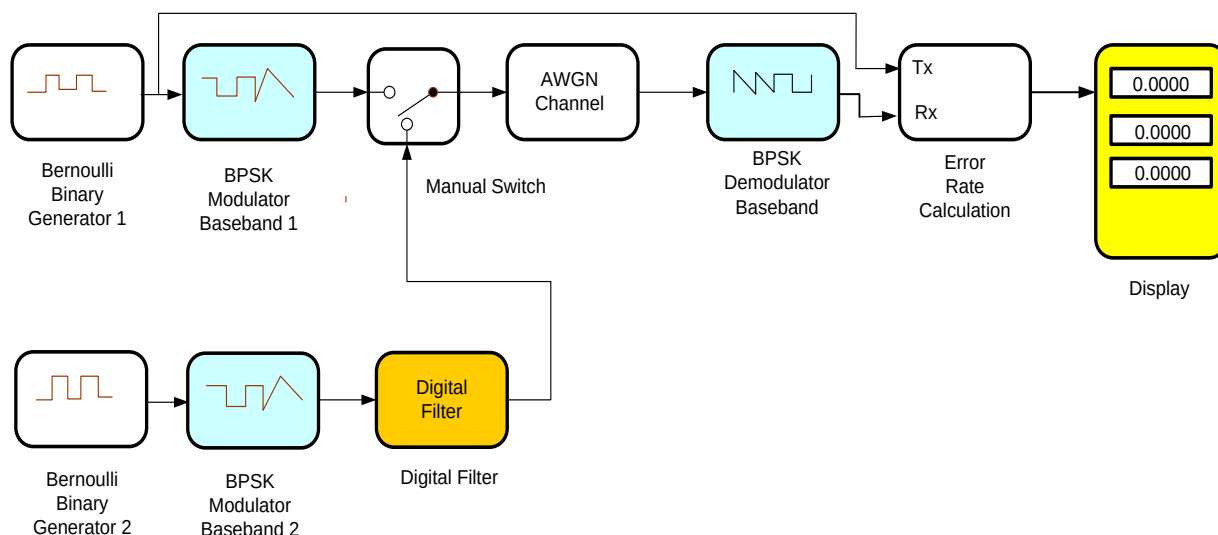


Рис. 3. Схема модели для оценки энергетической эффективности BPSK

Местонахождение отдельных блоков в библиотеке *Simulink*, используемых при моделировании:

Bernoulli Binari Generator: Communication Blockset–Comm Sources–Data Sources;

BPSK Modulator Baseband: Communication Blockset–Modulation–Digital Basedand Modulation–PM;

AWGN Channel: Communication Blockset–Channel–AWGN Channel;

Error Rate Calculation: Communication Blockset–Commsinks–Error Calculation;

Display: Simulink–DSP Blockset–DSP Sincs–Display;

Digital Filter: Signal Processing Blockset–Filtering–Filter designs–Digital Filter;

Manual Switch: Simulink–Signal Routing.

34. Установить параметры блоков модели (табл. 3).

Табл. 3. Параметры блоков лабораторной модели (MATLAB–R2009b)

Bernoulli Binary Generator	
Initial seed – номер ПСП	61
Probability of a zero	2.0
Simple time – период двоичных символов	1.0
Frame based outputs	флажок
Samples per frame	2.0
Output data type	duble

Продолжение табл. 3

Модулятор BPSK (BPSK Modulator Baseband)	
Main: Phase offset (rad)	pi
Data Types	double
Демодулятор BPSK (BPSK Demodulator Baseband)	
Main: Phase offset (rad)	pi
Decision type	Hard decision
Data Types Output: Mode: Derotate factor	double Same word length as input
Счетчик ошибок (Error Rate Calculation)	
Receive delay	<i>по ходу работы</i>
Computation mode	Entire frame
Output data	Port
Регистратор ошибок (Display)	
Режим	Short-e
Decimation	1
Имитатор канала с гауссовским шумом (AWGN Channel)	
Initial seed	61
Mode:	Signal to noise ratio (E_b/N_0)
(E_b/N_0) (dB)	<i>по ходу работы</i>
Input signal power. Referenced to 1 Ohm (Watts)	<i>по ходу работы</i>

В исследуемой модели межсимвольная интерференция вводится блоком дискретного фильтра **Digital Filter**.

Задайте не рекурсивный фильтр (**Transfer function type: FIR**) и импульсную характеристику (ИХ) канала связи, вызывающую слабую МСИ, создав в главном окне MATLAB переменную **h = [0.1 1 0.1]** и указав ее идентификатор **h** в поле **Numerator coefficients** блока фильтра.

35. Установите значение параметра задержки **Receive delay = 0** в блоке **Error Rate Calculation**).

- 35.1. Задайте значение средней мощности сигнала в блоке AWGN в поле Input signal power равным 1.0.
- 35.2. Установите режим работы модели без МСИ.
- 35.3. Снимите и постройте зависимость $k_{\text{ош}} = f(E_b/N_0)$ при изменении E_b/N_0 в пределах от 0 до 8 дБ с шагом 0.5 дБ.
- 35.4. Объясните полученные результаты.
- 35.5. Установите в модели режим с межсимвольной интерференцией.
- 35.6. В канале с AWGN установите значение отношения сигнал/шум $E_b/N_0 = 100$ дБ (для оценки влияния на качество передачи только МСИ).
- 35.7. Установите значение параметра задержки Receive delay = 1 в блоке **Error Rate Calculation**.
- 35.8. Для правильного задания сигнал/шум необходимо учесть влияние увеличение уровня мощности сигнала из-за боковых отсчетов ИХ канала. Средняя мощность сигнала в данном случае равна сумме квадратов отсчетов ИХ канала. Для случая [0.1 1 0.1] это 1.02 и т. д. Задайте значение средней мощности сигнала в блоке AWGN в поле Input signal power равным 1.02. Чтобы мощность вычислялась автоматически, в поле Input signal power блока AWGN выражение (**h. ^2**).
- 35.9. Повторите измерения п. 35.3.
- 35.10. Для значений боковых лепестков импульсной характеристики фильтра в пределах от 0 до 10 с шагом 0.2 снимите зависимость коэффициента ошибок от степени ограничения полосы частот цифровым фильтром.
- 35.11. Постройте полученные зависимости и объясните полученные результаты.
- 35.12. Установите отношение сигнал/шум в канале AWGN равное 15дБ.
- 35.13. Повторите измерения п. 35.3.
- 35.14. Объясните полученные результаты.
- 35.15. Используя инструмент МАТЛАВ BERTool, снимите зависимости коэффициента ошибок от отношения сигнал/шум в канале AWGN без МСИ.
- 35.16. Сравните полученный результат с п.35.3.
- 35.17. Закройте модель. **Модель сохранить.**

Содержание отчета

1. Схемы исследуемых моделей ЦСПС.
2. Результаты измерений в виде таблиц и графиков.
3. Выводы по результатам измерений.

Контрольные вопросы

1. Назовите причины и поясните механизм возникновения МСИ.
2. Каким образом наличие МСИ сказывается на созвездии сигнальных точек?
3. Каким образом наличие МСИ сказывается на спектре модулированного сигнала?
4. Каким образом наличие МСИ сказывается на форме глаз–диаграммы?
5. Какими техническими средствами можно снизить влияние МСИ?
6. Поясните, что понимается под глаз–диаграммой.
7. Каким образом изменяется глаз–диаграмма при значительном увеличении мощности тепловых шумов?

Лабораторная работа № 8.10

«Изучение принципов формирования спектра модулированного сигнала в ЦСРС»

Цель работы: изучение принципов формирования спектра модулированного сигнала в ЦСРС.

Подготовка к работе

По указанной литературе:

- 1) изучить принципы формирования спектра модулированного сигнала в ЦСРС;
- 2) подготовить бланк отчета по лабораторной работе;
- 3) подготовить ответы на контрольные вопросы.

Рекомендуемая литература

1. *Маглицкий Б.Н.* Космические и наземные системы радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2014. – 300 с.
2. *Маглицкий Б.Н.* Спектрально-эффективные методы модуляции в цифровых системах радиосвязи : Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2009. – 120 с.
3. *Носов В.И., Дроздов Н.В., Тимошук Р.С.* Моделирование систем связи в среде MATLAB : Учебное пособие. – Новосибирск: СибГУТИ, 2007. – 178 с.
4. Теоретическая часть данного учебного пособия.

При выполнении лабораторной работы используется IBM – совместимый компьютер с процессором Pentium II и выше, операционная система Windows XP, Windows 7.

Программное обеспечение: СКМ «MATLAB/Simulink» (R2009b).

1. Теоретическая часть

1.1. Полосовые радиосигналы

При передаче информации в радиосвязи используются полосовые радиосигналы. Для строгости дальнейшего рассмотрения введем несколько определений.

Модулирующим сигналом $S_m(t)$ будем называть низкочастотный информационный сигнал (речевой сигнал, цифровой сигнал и т. д.), который требуется передать на частоте $\omega \gg \omega_v$, где ω_v – верхняя частота спектра модулирующего сигнала.

Полосовыми сигналами называются модулированные сигналы, спектры которых сосредоточены в некоторой полосе Π около несущей частоты ω_0 . На рисунке 1.1 приведены спектры вещественного модулирующего (а) и полосового (б) сигналов.

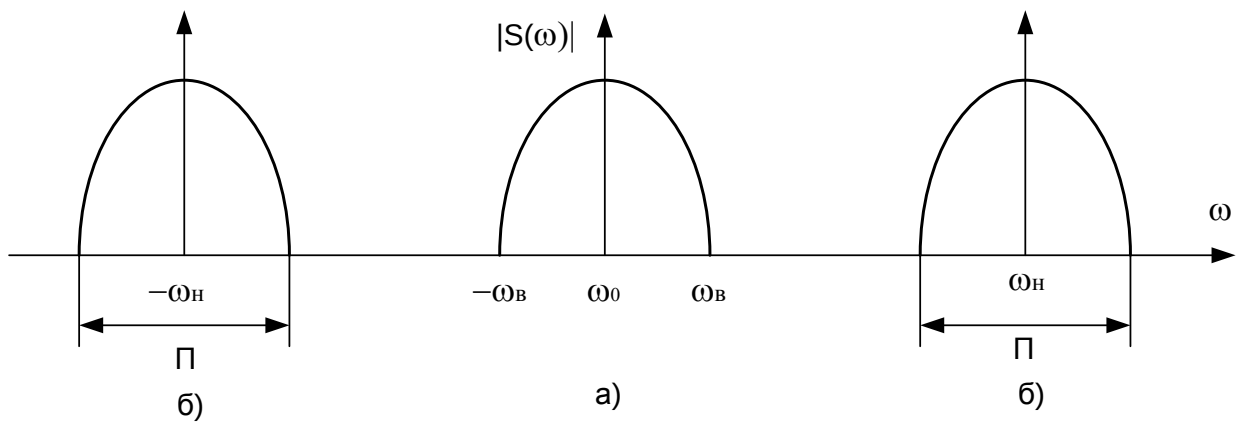


Рис. 1.1. Спектры модулирующего (а) и полосового сигналов (б)

Так как сигналы вещественные, то их спектры симметричны относительно нулевой частоты. Перенос модулирующего сигнала $S_m(t)$ на несущую частоту ω_n называется модуляцией.

Сигнал несущей частоты $S_{нec}(t)$ можно представить в виде:

$$S_{нec}(t) = a \cos (\omega t + \Phi), \quad (1)$$

где a – амплитуда несущего колебания,
 Φ – начальная фаза.

Полная фаза несущего колебания:

$$\Phi(t) = \omega t + \Phi. \quad (2)$$

Выражение для мгновенной частоты сигнала, как производной от полной фазы, запишем в виде:

$$\omega(t) = d/dt (\Phi(t)). \quad (3)$$

Мгновенная частота несущего сигнала – постоянная величина, равная ω . Таким образом, при модуляции можно изменять два параметра несущего колебания: амплитуду и полную фазу.

При изменении амплитуды получим амплитудную модуляцию, при управлении полной фазой получим угловую модуляцию (фазовую и частотную). При управлении и амплитудой, и полной фазой можно получить все известные виды модуляции. Теперь можно рассмотреть общую запись полосового сигнала:

$$S(t) = a(t) \cos (\Phi(t)) = a(t) \cos (\omega t + \Phi(t)), \quad (4)$$

где $a(t)$ – закон изменения амплитуды несущего колебания;

$\Phi(t)$ – изменение фазы несущего колебания в соответствии с модулирующим сигналом.

1.2. Комплексная огибающая. Векторное представление сигнала

Введем понятие комплексной огибающей и векторного представления сигнала. Для этого рассмотрим комплексный сигнал

$$Z(t) = a(t) \cos (\omega t + \Phi(t)) + ja(t) \sin (\omega t + \Phi(t)). \quad (5)$$

Из выражения (5) можно заметить, что $R[z(t)]$ (реальная часть комплексного сигнала) совпадает с полосовым радиосигналом. По формуле Эйлера можно представить:

$$Z(t) = a(t) \exp (j(\omega t + \Phi(t))) = a(t) \exp (j \Phi(t)) \exp (j \omega t). \quad (6)$$

Сигнал $z_m(t) = a(t) \exp (j \Phi(t))$ носит название комплексной огибающей сигнала $z(t)$.

Таким образом:

$$Z(t) = z_m(t) \exp (j \omega t). \quad (7)$$

Рассмотрим свойства этого сигнала.

Сигнал $z_m(t)$ является комплексным, с изменяющимися во времени амплитудой и фазой, причем изменение амплитуды сигнала $z_m(t)$ полностью совпадает с изменением амплитуды радиосигнала $s(t)$, а изменение фазы полностью совпадает с изменением фазы радиосигнала $s(t)$. Однако отсутствие множителя $\exp(j\omega t)$ говорит о том, что сигнал $z_m(t)$ представляет собой «перенесенный на нулевую частоту комплексный сигнал $z(t)$ ».

Комплексная огибающая сигнала существенно упрощает анализ сигнала. Любое комплексное число можно представить в виде точки на комплексной плоскости или вектора выходящего из 0 до этой точки, а комплексный сигнал можно трактовать как комплексную функцию времени, т. е. вектор, который описывает на комплексной плоскости некоторую траекторию в течение времени (рис. 1.2).

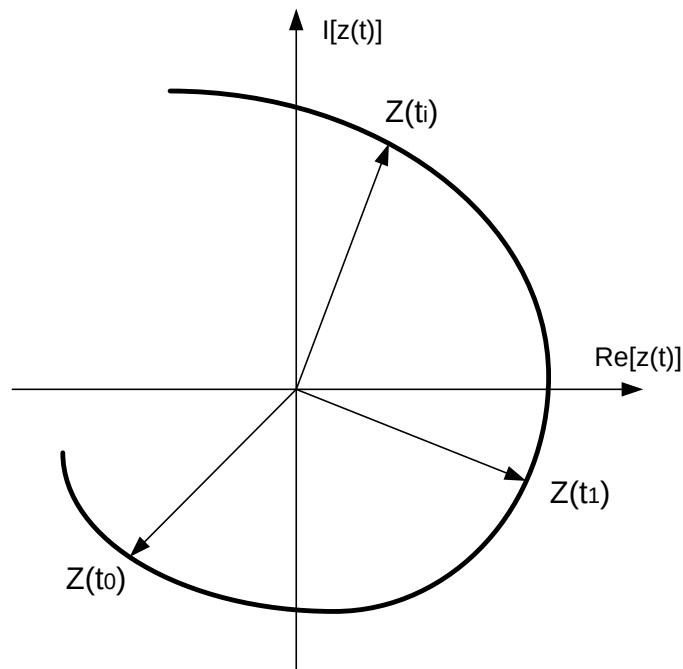


Рис. 1.2. Векторное представление комплексного сигнала

Комплексную экспоненту $\exp(j\omega t)$ на комплексной плоскости можно представить вектором единичной амплитуды, который поворачивается за одну секунду на угол ω , совершая при этом $f_0 = \omega/(2\pi)$ оборотов в секунду.

Таким образом, при наблюдении за $\exp(j\omega t)$ мы увидим окружность единичного радиуса, которую вычерчивает вектор с частотой f_0 . При этом единичная окружность будет искажаться сигналом $z_m(t) = a(t)\exp(j\Phi(t))$, а именно в течение времени вектор $z(t)$, будет менять амплитуду в соответствии с $a(t)$ и скорость вращения в соответствии с $\Phi(t)$.

Комплексная амплитуда позволяет нам остановить вращение вектора с частотой f_0 и посмотреть, как меняется его амплитуда и фаза во время вращения. Это равносильно тому, что ученый пытается рассмотреть муху, когда она летает по комнате, выписывая круги. Делать это не очень удобно, в то время как ее можно очень детально рассмотреть, если поймать. Так же и комплексная огибающая – это как бы пойманная неподвижная муха, мы можем детально изучить траекторию вектора комплексной огибающей.

Теперь вернемся к рассмотрению комплексной огибающей. $Z_m(t)$ можно представить в виде реальной и мнимой частей:

$$Z_m(t) = a(t)\exp(j\Phi(t)) = a(t)\cos(\Phi(t)) + ja(t)\sin(\Phi(t)), \quad (8)$$

где $I(t) = a(t)\cos(\Phi(t))$ – синфазная составляющая комплексной огибающей (или координата по оси абсцисс),

$Q(t) = ja(t)\sin(\Phi(t))$ – квадратурная составляющая или координата по оси ординат (рис. 1.3).

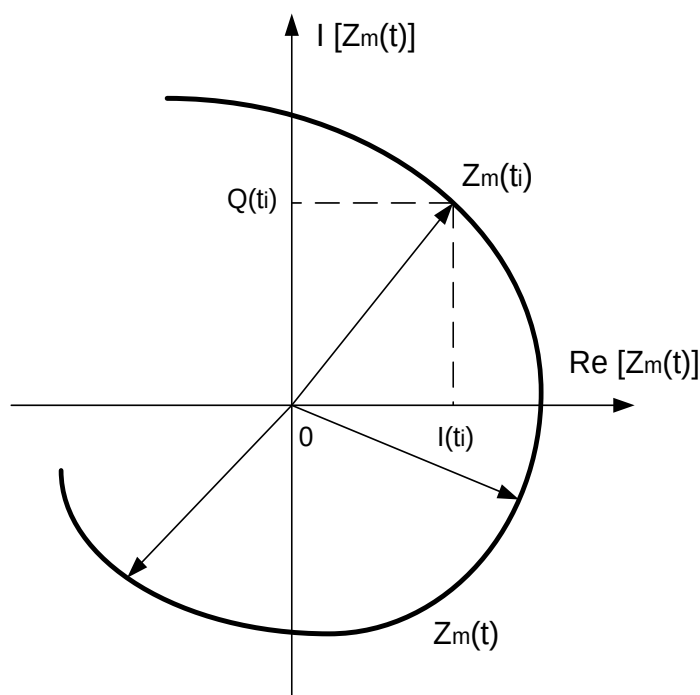


Рис. 1.3. Векторное представление комплексной огибающей

1.3. Структурная схема универсального квадратурного модулятора

Вернемся к выражению для комплексного сигнала (7), подставив в него выражение для комплексной огибающей (8):

$$\begin{aligned}
Z(t) &= (I(t) + jQ(t))\exp(j\omega t) = \dots \\
\dots &= (I(t) + jQ(t)\exp(j\omega t)) + j\sin(\omega t) = \dots \\
\dots &= I(t)\cos(\omega t) - Q(t)\sin(\omega t) + \dots \\
\dots &+ j(I(t)\sin(\omega t) + Q(t)\cos(\omega t)).
\end{aligned} \tag{9}$$

Тогда из выражения (9) полосовой сигнал:

$$S(t) = \operatorname{Re}[z(t)] = I(t) \cos(\omega t) - Q(t) \sin(\omega t). \tag{10}$$

Таким образом, если имеется модулирующий сигнал, из которого сформированы синфазная и квадратурная компоненты комплексной огибающей сигнала, то можно перенести ее на любую частоту при помощи схемы универсального квадратурного преобразователя, представленной на рисунке 1.4.

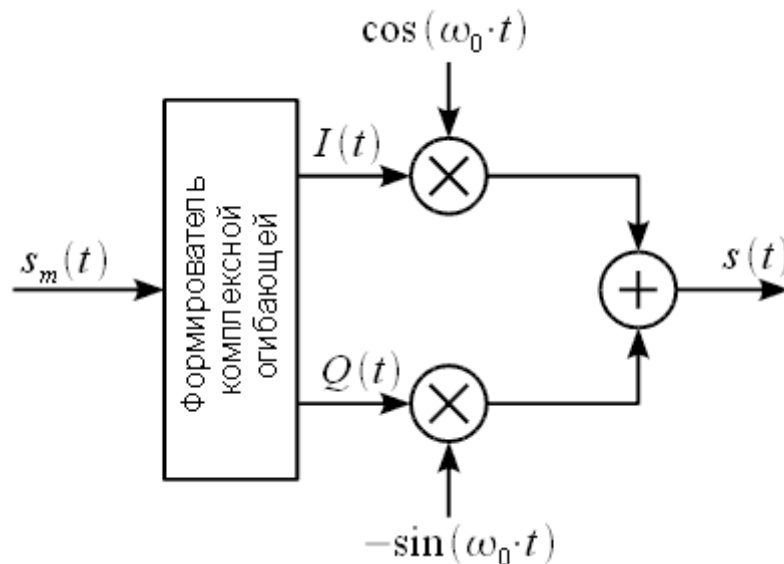


Рис. 1.4. Универсальный квадратурный модулятор

Если заметить, что $\cos(\omega t + \pi/2) = -\sin(\omega t)$, то схему универсального квадратурного модулятора можно представить, как показано на рисунке 1.5.

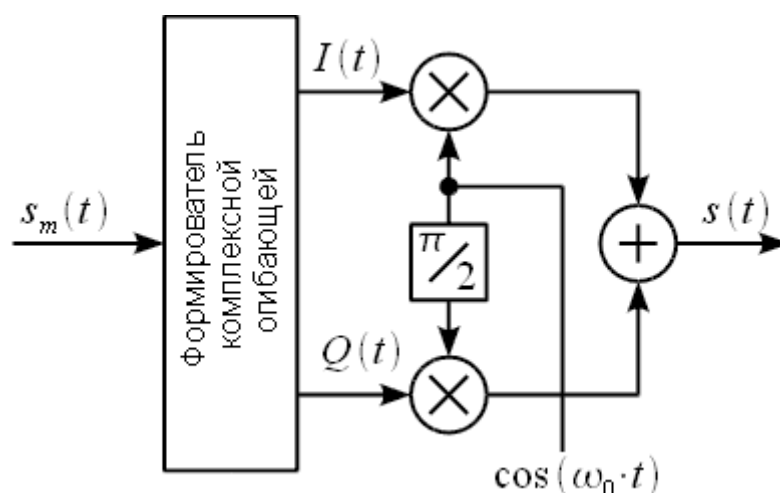


Рис. 1.5. Универсальный квадратурный модулятор с фазовращателем

Поскольку исходный модулирующий сигнал является низкочастотным, то формирование комплексной огибающей можно производить в цифровом виде.

Способ формирования комплексной огибающей в зависимости от модулирующего сигнала определяет вид модуляции.

Таким образом, комплексная огибающая может быть представлена синфазной и квадратурной составляющими и модуляцию можно осуществить квадратурным модулятором. Для того чтобы задать способ модуляции необходимо выбрать способ формирования комплексной огибающей сигнала путем изменения амплитуды и фазы.

1.4. Формирователь комплексной огибающей сигнала

Модулятор современных цифровых систем связи выполняется при помощи простых таблиц соответствий, в которых для каждого символа данных соответствует одна точка на комплексной плоскости (рис. 1.6).

В таблице 1.1 приведены примеры созвездий для манипуляций BPSK и QPSK.

Табл. 1.1. Таблицы соответствий для различных видов модуляции

Вид модуляции	Позиционность созвездия	Символы для передачи		Выход формирователя комплексной огибающей	
BPSK	2	0	1	-1 -1j	+1 +1j
QPSK	4	0	1	-1 +1j	+1 +1j
		2	3	+1 -1j	-1 -1j

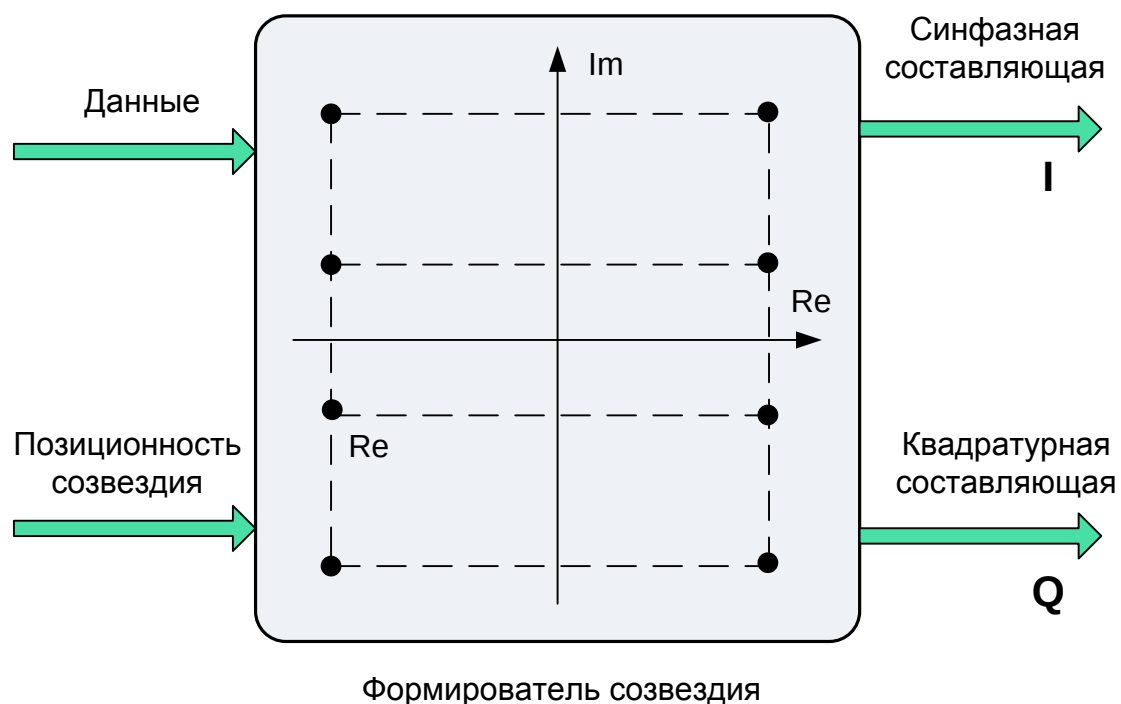


Рис. 1.6. Формирователь комплексной огибающей сигнала

Приведенные в таблице 1 созвездия могут нормироваться для конкретных реализаций систем связи. Кроме того, иногда формирование созвездий совмещают с кодированием (например, кодирование Грея).

Столь простая реализация формирователя сигнала цифровой системы связи позволяет создавать устройства с адаптивно изменяемыми в процессе работы созвездиями, что дает возможность подстраиваться под изменение условий распространения радиосигналов в среде и использовать спектральный и энергетический ресурс наиболее эффективно.

1.5. Формирующий фильтр

Вопросы ограничения спектра сигнала и межсимвольной интерференции подробно рассматривались в разделе 3.2 данного учебного пособия. Показано, что для полного исключения влияния межсимвольной интерференции необходимо использовать идеальный фильтр Найквиста, который не может быть реализован на практике. Как правило, при реализации формирующих фильтров в системах связи используют фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ), в которых бесконечная импульсная характеристика фильтра Найквиста усекается оконной (весовой) функцией. Использование прямоугольной весовой функции приводит к появлению больших боковых лепестков формирующего фильтра, низкой скорости спада АЧХ и пульсациям в области пропускания фильтра. Для уменьшения этих эффектов Найквист предложил сгладить фронты АЧХ фильтра, аппроксимировав их функцией приподнятого косинуса.

При коэффициенте *скругления* равном 0, АЧХ фильтра становится прямоугольной, а при коэффициенте *скругления* равном 1, получаем фильтр с АЧХ в виде приподнятого косинуса.

При реализации приемного устройства системы связи на практике используют согласованную фильтрацию сигнала (рис.1.7).

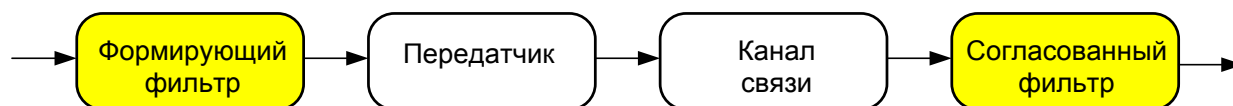


Рис. 1.7. Формирующий фильтр и согласованная фильтрация в системе цифровой связи

Выходной сигнал формирующего фильтра проходит через канал связи и поступает на вход согласованного фильтра, частотная характеристика которого является комплексно сопряженной с формирующим фильтром.

Общая частотная характеристика системы находится как произведение АЧХ формирующего фильтра и АЧХ согласованного фильтра. Именно эта общая частотная характеристика и должна удовлетворять требованиям Найквиста. Поэтому при реализации устройств связи на передающей и приемной сторонах используют фильтры с характеристикой корень из приподнятого косинуса, которые вместе имеют частотную характеристику фильтра Найквиста, что позволяет устранять МСИ при приеме информации.

2. Выполнение лабораторной работы

1. Соберите модель для проведения анализа формирования сигнала в ЦСРС (рис. 2.1).

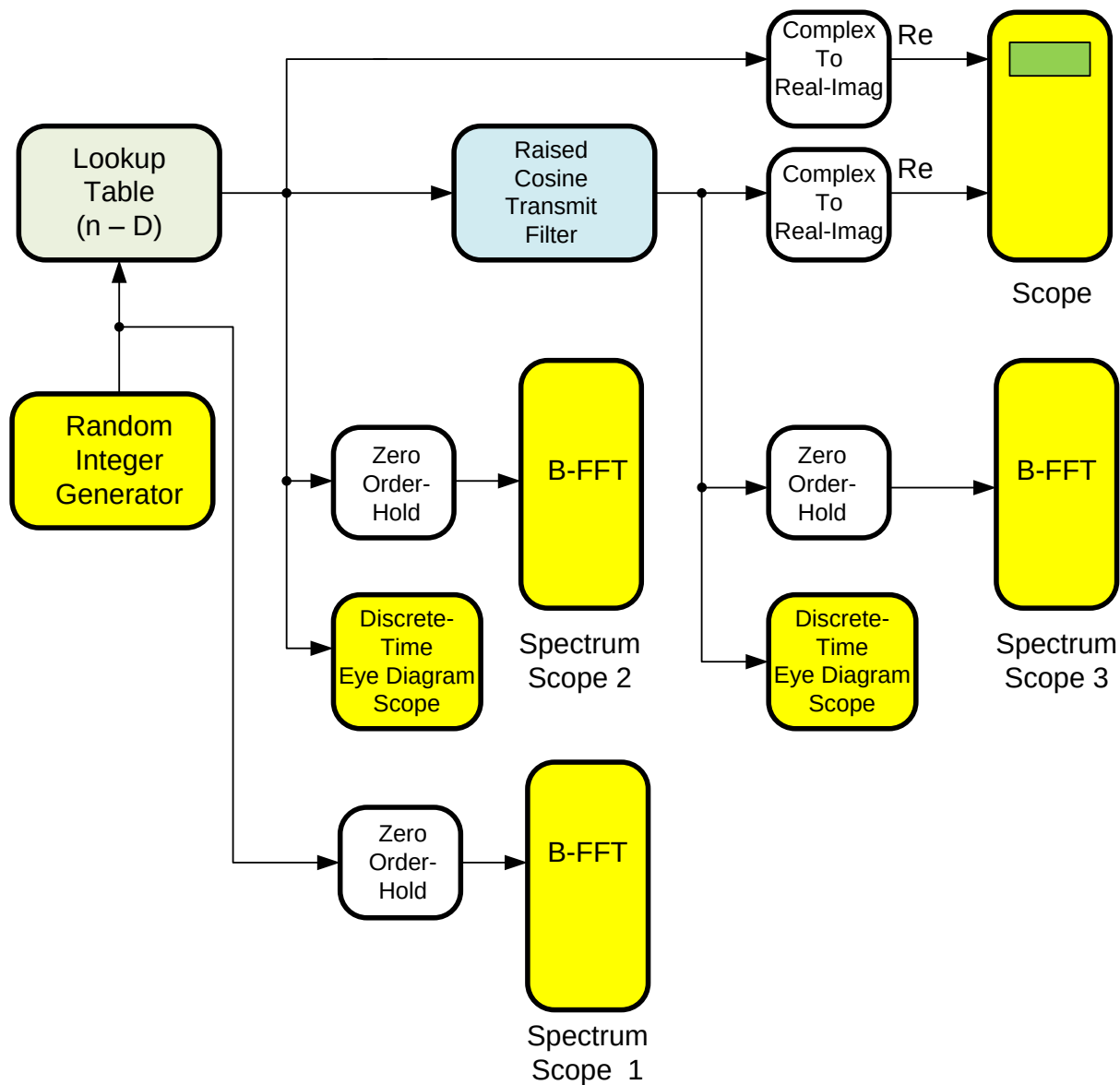


Рис. 2.1. Схема имитационной модели

В модели используются следующие блоки:

Блок генератора случайных чисел (**Random Integer Generator**):

Communications Blockset–Comm Sources;

Таблица соответствий (**Lookup Table (n-D)**): Simulink–Lookup Tabels;

Блок фильтра типа «приподнятый косинус» (**Raised Cosine Transmit Filter**):

Communications Blockset–Comm Filters;

Блок выделения реальной и мнимой части комплексного числа (**Complex to Real – Imag**): Simulink–Math Operations;

Блок (**Zero-Order Hold**): Simulink–Discrete;

Блок анализатора спектра (**Spectrum Scope**): Simulink–Signal Processing–Spectrum Scope;

Блок наблюдения «глаз–диаграмм» (**Discrete-Time Eye Diagram Scope**): Communications Blockset–Comm Sinks.

Формирование спектра модулированного сигнала производится при помощи блока таблицы соответствий, где задаются координаты точек «созвездия» на комплексной плоскости, блока фильтра типа «приподнятый косинус» и блока генератора случайных чисел (в режиме генератора сигнала в формате NRZ).

Для наблюдения и регистрации сигналов используются блоки анализаторов спектра, блоки наблюдения глаз–диаграмм и осциллограф.

2. Проанализируйте процесс формирования сигнала с BPSK.

2.1. Установите следующие параметры блоков формирования созвездия сигнала:

- в настройках таблицы истинности (*n-D Lookup Table*) необходимо указать соответствие между вектором входных символов и точками сигнального созвездия;
- в строке *Breakpoints* укажите вектор входных символов согласно позиционности созвездия. Для **BPSK** это: $[-1+0*i, 1+0*i]$;
- в строке Table data укажите точки созвездия, соответствующие входным символам (рис. 2.2).

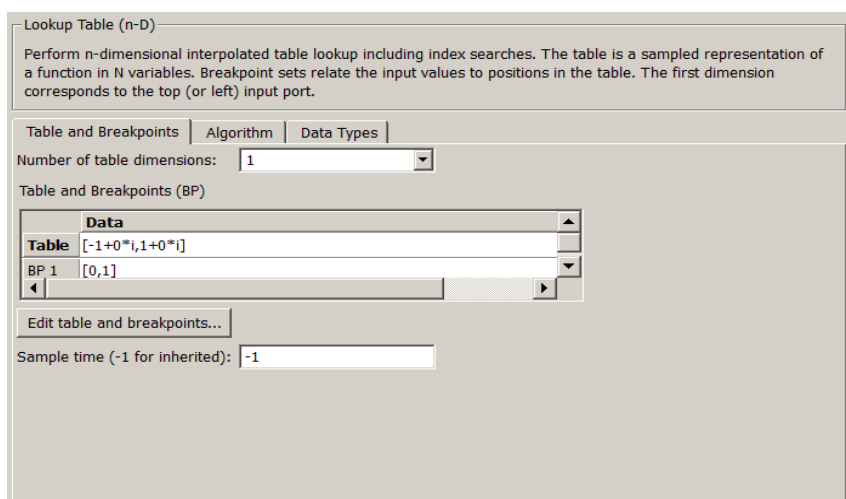


Рис. 2.2. Настройки блока Lookup Table (n-D)

2.2. Установите следующие параметры формирующего фильтра (*Raised Cosine Transmit Filter*):

- тип фильтра (Filter Type) – корень из приподнятого косинуса (Square Root);
- групповая задержка, определяющая длину ИХ фильтра (Group Delay) – 5 символов;
- параметр округления (Roll-off Factor) – 0.1;
- коэффициент повышения частоты дискретизации (Upsamplingfactor) – 8;
- характер обработки сигнала (Input Processing) – sample based.

Окна настроек блока *Raised Cosine Transmit Filter* приведены на рис. 2.3.

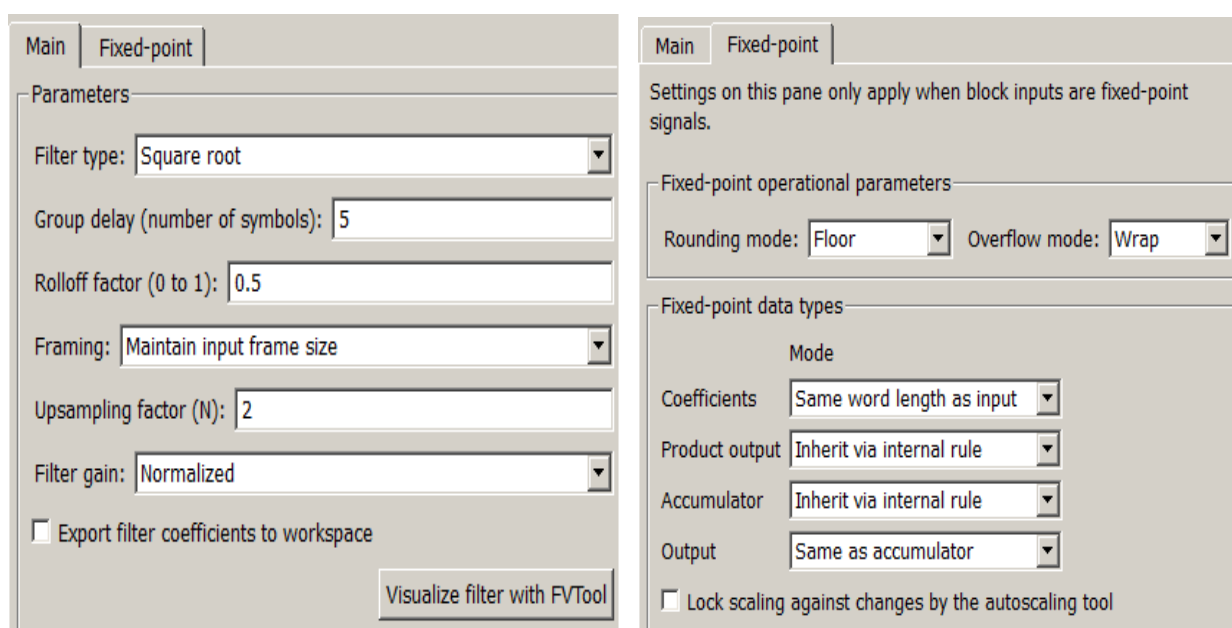


Рис. 2.3. Настройки блока *Raised Cosine Transmit Filter*

Для исследования процессов формирования сигнала необходимо использовать блоки отображения глаз–диаграмм, блоки анализаторов спектра и осциллограф.

Настройки анализаторов спектра *Spectrum Scope*, *Discrete-Time Eye Diagram Scope*, *Zero-Order Hold* приведены в таблице 2.1.

Табл. 2.1. Параметры блоков Spectrum Scope, Discrete-Time Eye Diagram Scope, Zero-Order Hold

Анализатор спектра (Spectrum Scope)	
Spectrum units	dBW/Hertz
Spectrum type	Two-Sided $((-F_s/2 \dots F_s/2))$
Buffer size – <i>размер буфера</i>	1024
Buffer input – <i>подтверждение необходимости буферизации входного сигнала</i>	флажок
Buffer overlap – <i>перекрывание буфера, число значений для повторной буферизации</i>	128
Window	Hann
Window sampling	Periodic
Number of spectral averages	16
<i>Axis propereties:</i> Inert sample time from input Frequency display offset (Hz) Frequency display limits Minimum Y-limit Maximum Y-limit Y-axis label <i>Display Properties:</i> Show grid Frame number Open Scope at start of Simulation	флажок 0 Auto - 50 10 Magnitude, dB флажок флажок флажок флажок
Блок Наблюдения глаз–диаграмм (Discrete TimeEye Diagram Scope)	
Samples per Symbol	8
Offset (Samples)	0
Simbel per trace	1
Traces displayed	400
New traces per display	10
Блок Zero–Order Hold	
Sample – time (- 1 for inherited)	1
Блок (Random Integer Generator): M-ary number Initial seed Sample time Output data type	2 0 1 2 3 <i>по ходу</i> <i>выполнения работы</i> double

Продолжение табл. 2.1

Осциллограф (Scope): На вкладке General задаются следующие параметры: Number of axes – число входов (систем координат) осциллографа Time range Sampling Установка размеров изображения Производится при выполнении работы	5 по ходу выполнения работы
--	---

2.3. Проанализируйте работу модели по временным диаграммам:

- установите следующие параметры блока генератора Random Integer Generator: Simple time = 1/40;
- установите параметры блока Scope: на вкладке General блока Time range = 2;
- блоки анализаторов спектра переведите в режим ожидания открытия;
- установите параметры модели: **Start = 0.0, Stop = inf**;
- запустите модель;
- по осциллограммам блока Scope определите правильность соответствие действительной части огибающей модулированного сигнала на выходе формирователя огибающей заданному «созвездию» сигнальных точек (рис. 2.4);

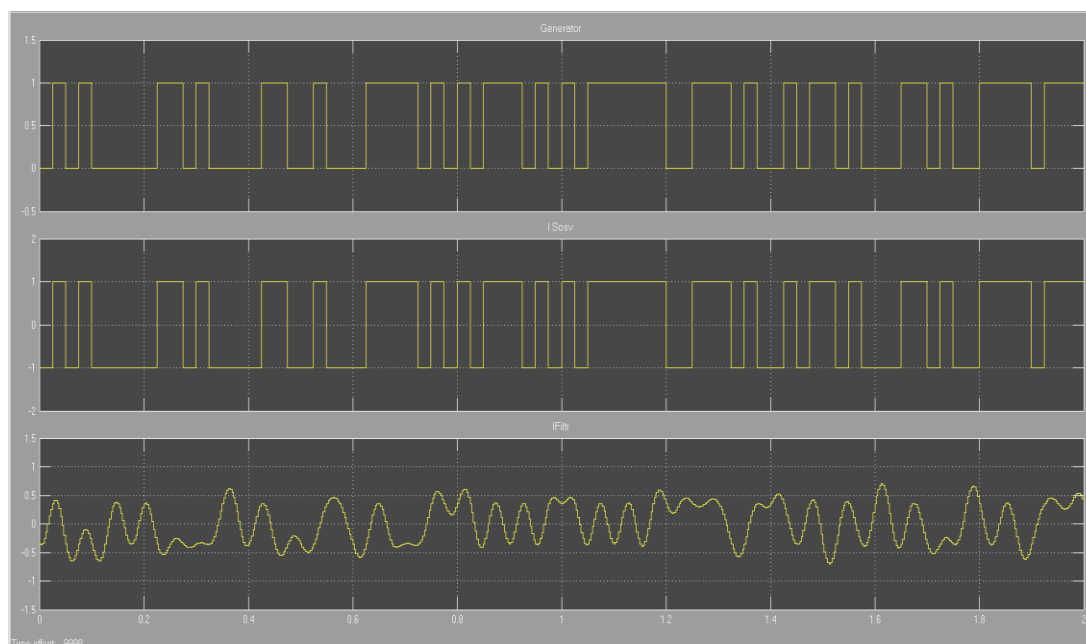


Рис. 2.4. Временные диаграммы

- проанализируйте временную диаграмму на выходе формирующего фильтра;
- зарисуйте полученные диаграммы в отчет по лабораторной работе;
- повторите измерения при значениях параметра округления (*Roll-off Factor*) – 0.5 и 1.0;
- закройте окно осциллографа и проанализируйте глаз–диаграммы сигнала при значениях (*Roll-off Factor*) – 0.1; 0.5 и 1.0 (рис. 2.5);

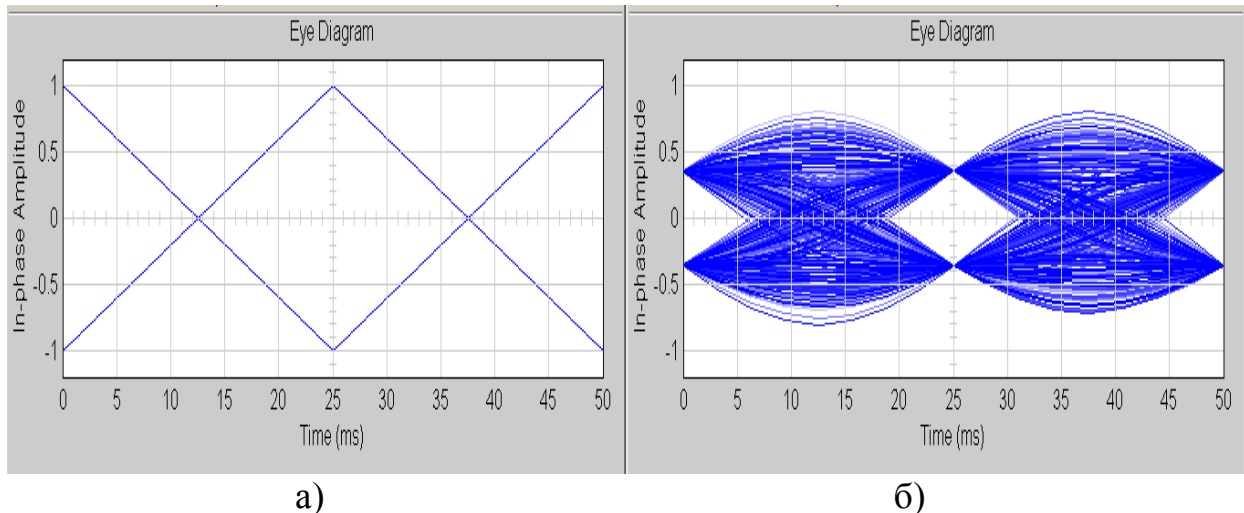


Рис. 2.5. Глаз–диаграммы сигналов на выходе формирователя огибающей (а) и выходе формирующего фильтра (б)

- зарисуйте глаз–диаграммы в отчет по лабораторной работе;
- остановите работу модели;
- объясните полученные результаты.

2.4. Проанализируйте спектры сигналов:

- установите блоки наблюдения глаз–диаграмм в режим ожидания открытия, а блоки анализаторов спектра переведите в режим открытия при запуске модели;
- проверьте правильность настройки параметров блоков анализаторов спектра (табл. 2.1);
- установите следующий параметр блока генератора Random Integer Generator Simple time = 4;
- запустите модель и проанализируйте спектры сигналов при значениях (*Roll-off Factor*) – 0.1; 0.5 и 1.0 (рис. 2.6–2.7);

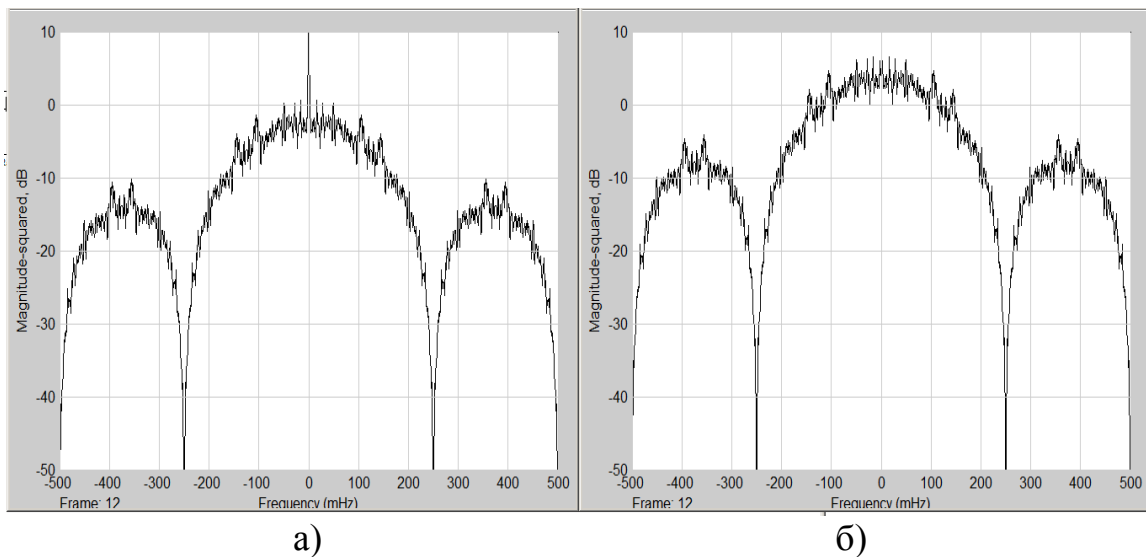


Рис. 2.6. Спектры сигналов на выходе блока *Random Integer Generator* (а) и выходе формирователя созвездия (б)

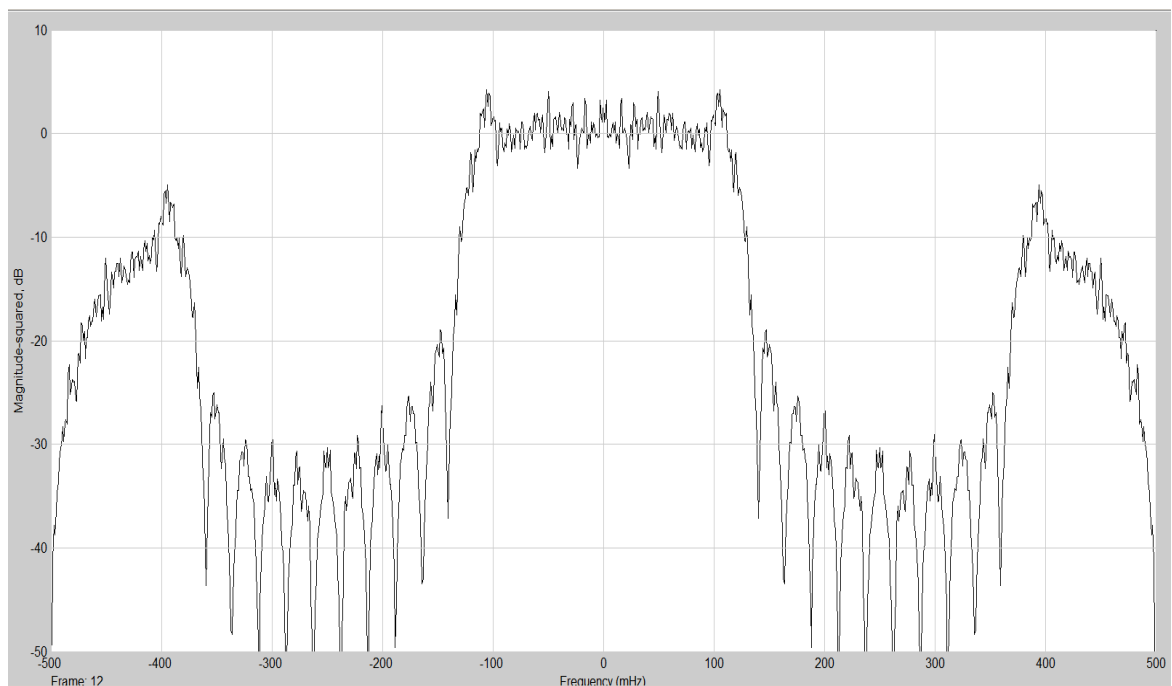


Рис. 2.7. Вариант спектра сигнала на выходе формирующего фильтра

- рассчитайте спектральную эффективность BPSK при значениях (*Roll-off Factor*) – 0.1; 0.5 и 1.0;
- объясните полученные результаты;
- остановите работу модели. **Модель сохранить.**

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Схема исследуемой модели.
2. Результаты выполнения работы в виде осциллограмм.
3. Выводы по результатам проведенного анализа.

Контрольные вопросы

1. Поясните алгоритм формирования сигнала BPSK.
2. Каким образом осуществляется формирование комплексной огибающей модулированного сигнала?
3. Поясните форму глаз–диаграммы сигнала BPSK.
4. Изобразите и поясните частотные характеристики формирующего фильтра при разных значениях параметра округления.
5. Изобразите и поясните характер спектра сигнала при BPSK.
6. Каким образом изменится (не изменится) спектр сигнала BPSK при изменении параметров таблицы соответствия на противоположные по отношению к установленным?
7. Каким образом изменяется форма глаз–диаграммы при изменении параметра округления формирующего фильтра?
8. Дайте определение спектральной эффективности метода модуляции.
9. Поясните форму частотной характеристики фильтра типа «приподнятый косинус» при разных значениях параметра округления.
10. Сформулируйте теорему Найквиста о минимальной полосе частот канала связи.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине «Системы подвижной радиосвязи» для
студентов направления подготовки

11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Направленность (профиль)

«Интеллектуальная обработка данных в инфокоммуникационных
системах и сетях»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	9
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА	12
3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	13
4. ВОПРОСЫ ДЛЯ СОБЕСЕДОВАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ЛИТЕРАТУРЫ	14
5. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕСТЫ ДЛЯ САМОТЕСТИРОВАНИЯ, ПОДГОТОВКИ К ТЕСТИРОВАНИЮ	18
6. КОМПЛЕКТ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ РЕДАКТОРОВ	22
7. ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ	28

ВВЕДЕНИЕ

1. Цель и задачи освоения дисциплины (модуля)

Цель освоения дисциплины: формирование набора профессиональных компетенций будущего бакалавра изучения принципов и методов исследования современных инфокоммуникационных систем и сетей различных типов передачи, распределения, обработки и хранения информации (радиосистемы передачи информации).

Задачи освоения дисциплины:

1) технологической деятельности по проверке работоспособности и испытанию вводимых в эксплуатацию устройств путем освоения принципов построения и работы современных и перспективных радиосистем передачи информации;

2) исследовательской деятельности по улучшению технико-экономических показателей радиосистем передачи информации, математического моделирования базовых узлов радиосистем на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований, по составлению отчетов по выполненным заданиям путем проведения экспериментов по заданной методике, анализа полученных результатов и выработке практических рекомендаций;

эксплуатационной деятельности по проведению измерений основных параметров радиосистем передачи информации, по получению практики поиска и устранения неисправностей в них на базе создаваемых математических моделей.

2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Системы подвижной радиосвязи» относится к части «Дисциплины (модули) по выбору 5 (ДВ.5)», Б1.В.ДВ.05.02. Ее освоение происходит в 8 семестре.

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ПК-1. Способен к развитию коммутационных подсистем и сетевых платформ, сетей передачи данных, транспортных сетей и сетей радиодоступа, спутниковых систем связи	ИД-3пк-1. анализирует статистику основных показателей эффективности радиосистем и систем передачи данных, разрабатывает мероприятия по их поддержанию на требуемом уровне, выполняет расчет пропускной способности сетей телекоммуникаций.	Анализирует статистику основных показателей эффективности сетей радиодоступа, разрабатывает мероприятия по их поддержанию на требуемом уровне, выполняет расчет пропускной способности систем подвижной радиосвязи.
ПК-3. Способен проводить расчеты по проекту сетей, сооружений и средств инфо-коммуникаций в соответствии с техническим заданием с использованием как стандартных методов, приемов и средств автоматизации проектирования, так и	ИД-2пк-3 оперирует технологиями, используемыми на транспортной сети, современными требованиями по производительности, доступности, безопасности, масштабируемости,	Применяет современные требования по производительности, доступности, безопасности, масштабируемости, интеграции технологий, управляемости систем

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
самостоятельно создаваемых оригинальных программ	интеграции технологий, управляемости систем связи (телекоммуникаций); принципами планирования емкости сетей радиодоступа.	подвижной радиосвязи; принципы планирования емкости систем подвижной радиосвязи.
	ИД-3пк-3 проводит расчеты параметров и характеристик сети и средств инфокоммуникаций, анализирует их качественные показатели на основе данных статистики и радиоизмерений, использует специализированное программное обеспечение для проектирования.	Проводит расчеты параметров и характеристик сетей радиодоступа, анализирует их качественные показатели на основе данных статистики и радиоизмерений, использует специализированное программное обеспечение для проектирования систем подвижной радиосвязи.
	ИД-4пк-3 выявляет и анализирует преимущества и недостатки вариантов проектных решений, оценивает риски, связанные с реализацией проекта.	Анализирует преимущества и недостатки вариантов проектных решений систем подвижной радиосвязи, оценивает риски, связанные с реализацией проекта.
ПК-4. Способен осуществлять подготовку типовых технических проектов и первичный контроль соответствия разрабатываемых проектов и технической документации на различные инфокоммуникационные объекты национальным и международным стандартам и техническим регламентам	ИД-1пк-4 соблюдает принципы системного подхода в проектировании систем связи (телекоммуникаций), средств инфокоммуникаций и их компонентов, требования к разработке технической документации.	Соблюдает принципы системного подхода в проектировании систем подвижной радиосвязи.
	ИД-2пк-4 знает принципы построения и работы сетей средств инфокоммуникаций и их компонентов, современные технические решения по реализации систем связи (телекоммуникационных систем) и ее компонентов,	Изучает принципы построения и работы сетей радиодоступа, современные технические решения по реализации систем подвижной радиосвязи.

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
	используемое программное обеспечение	

4. Объем учебной дисциплины (модуля) и формы контроля

Объем занятий: всего: 3 з.е. 81 астр.ч.	ОФО, в астр. часах
Контактная работа:	48
Лекции/из них практическая подготовка	24 / -
Лабораторных работ/из них практическая подготовка	24 / 24
Практических занятий/из них практическая подготовка	- / -
Самостоятельная работа	33
Формы контроля	
Экзамен	
Зачет	
Зачет с оценкой	2
Расчетно-графические работы	
Курсовые работы	
Контрольные работы	

5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием количества часов и видов занятий

№	Раздел (тема) дисциплины и краткое содержание	Формируемые компетенции, индикаторы	очная форма			
			Контактная работа обучающихся с преподавателем /из них в форме практической подготовки, часов			Самостоятельная работа, часов
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1	Радиорелейные и тропосферные радиосистемы передачи информации.	ПК-1 ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-3 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ПК-4 ИД-1 _{ПК-4} ИД-2 _{ПК-4}	1,5 / -		1,5/1,5	9,0

2	Радиосистемы передачи информации декаметрового и метрового диапазонов.	ПК-1 ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-3 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ПК-4 ИД-1 _{ПК-4} ИД-2 _{ПК-4}	1,5 / -		1,5/1,5	3,0
3	Методы модуляции с расширением спектра.	ПК-1 ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-3 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ПК-4 ИД-1 _{ПК-4} ИД-2 _{ПК-4}	3,0 / -		3,0/3,0	3,0
4	Цифровые методы модуляции в радиосистемах передачи информации.	ПК-1 ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-3 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ПК-4 ИД-1 _{ПК-4} ИД-2 _{ПК-4}	3,0 / -		3,0/3,0	3,0
5	Аналоговые методы модуляции в радиосистемах передачи информации.	ПК-1 ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-3 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ПК-4 ИД-1 _{ПК-4} ИД-2 _{ПК-4}	3,0 / -		3,0/3,0	3,0
6	Каналы связи радиосистем передачи информации.	ПК-1 ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-3 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ПК-4 ИД-1 _{ПК-4} ИД-2 _{ПК-4}	3,0 / -		3,0/3,0	3,0
7	Обобщенная структурная схема радиосистем передачи информации, их основные характеристики.	ПК-1 ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-3 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ПК-4 ИД-1 _{ПК-4} ИД-2 _{ПК-4}	3,0 / -		3,0/3,0	3,0

8	Безопасность систем беспроводного доступа.	ПК-1 ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-3 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ПК-4 ИД-1 _{ПК-4} ИД-2 _{ПК-4}	3,0 / -		3,0/3,0	3,0
9	Сверхширокополосные технологии в системах радиодоступа.	ПК-1 ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-3 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ПК-4 ИД-1 _{ПК-4} ИД-2 _{ПК-4}	3,0 / -		3,0/3,0	3,0
	ИТОГО за семестр		24		24	33
	ИТОГО					

1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы

Код оцениваемой компетенции, индикатора (ов)	Этап формирования компетенции (№ темы) (в соответствии с рабочей программой дисциплины)	Средства и технологии оценки	Вид контроля, аттестация (текущий/промежуточный)	Тип контроля (устный, письменный или с использованием технических средств)	Наименование оценочного средства
8 семестр					
ПК-1 ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-3 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ПК-4 ИД-1 _{ПК-4} ИД-2 _{ПК-4}	Темы № 1–9	Собеседование, оценка ответов по вопросам заданных тем	текущий	устный	вопросы для собеседования
ПК-1 ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-3 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ПК-4 ИД-1 _{ПК-4} ИД-2 _{ПК-4}	Темы № 1–9	Зачетное задание (контрольная точка), выполнение индивидуальных (групповых) заданий из лабораторных работ	текущий	письменный	комплект разноуровневых заданий

2. Описание показателей и критериев оценивания на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

Уровни сформированности компетенций, индикаторов	Дескрипторы			
	Минимальный уровень не достигнут (Неудовлетворительно) 2 балла	Минимальный уровень (удовлетворительно) 3 балла	Средний уровень (хорошо) 4 балла	Высокий уровень (отлично) 5 баллов
Компетенция: ПК-1				
ИД-3ПК-1. анализирует статистику основных показателей эффективности радиосистем и систем передачи данных, разрабатывает мероприятия по их поддержанию на требуемом уровне, выполняет расчет пропускной способности сетей телекоммуникаций	Не может выполнить задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции	Выполняет на репродуктивном уровне задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции	Выполняет в стандартных ситуациях задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции, допуская незначительные ошибки	Выполняет в полном объеме задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции, в том числе в нестандартных ситуациях

ИД-2ПК-3 оперирует технологиями, используемыми на транспортной сети, современными требованиями по производительности, доступности, безопасности, масштабируемости, интеграции технологий, управляемости систем связи (телекоммуникаций); принципами планирования емкости сетей радиодоступа	Не может выполнить задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции	Выполняет на репродуктивном уровне задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции	Выполняет в стандартных ситуациях задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции, допуская незначительные ошибки	Выполняет в полном объеме задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции, в том числе в нестандартных ситуациях
ИД-3ПК-3 проводит расчеты параметров и характеристик сети и средств инфокоммуникаций, анализирует их качественные показатели на основе данных статистики и радиоизмерений, использует специализированное программное обеспечение для проектирования.	Не может выполнить задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции	Выполняет на репродуктивном уровне задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции	Выполняет в стандартных ситуациях задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции, допуская незначительные ошибки	Выполняет в полном объеме задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции, в том числе в нестандартных ситуациях
ИД-4ПК-3 выявляет и анализирует преимущества и недостатки вариантов проектных решений, оценивает риски, связанные с реализацией проекта	Не может выполнить задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции	Выполняет на репродуктивном уровне задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции	Выполняет в стандартных ситуациях задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции, допуская незначительные ошибки	Выполняет в полном объеме задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции, в том числе в нестандартных ситуациях
Компетенция: ПК-4				
ИД-1ПК-4 соблюдает принципы системного подхода в проектировании систем связи (телекоммуникаций), средств инфокоммуникаций и их	Не может выполнить задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции	Выполняет на репродуктивном уровне задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции	Выполняет в стандартных ситуациях задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции,	Выполняет в полном объеме задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции, в том числе в

компонентов, требования к разработке технической документации			допуская незначительные ошибки	нестандартных ситуациях
ИД-2ПК-4 знает принципы построения и работы средств инфокоммуникаций и их компонентов, современные технические решения по реализации систем связи (телекоммуникационных систем) и ее компонентов, используемое программное обеспечение	Не может выполнить задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции	Выполняет на репродуктивном уровне задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции	Выполняет в стандартных ситуациях задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции, допуская незначительные ошибки	Выполняет в полном объеме задачи, относящиеся к данному индикатору достижения компетенции, в том числе в нестандартных ситуациях

Описание шкалы оценивания

В рамках рейтинговой системы успеваемость студентов по каждой дисциплине оценивается в ходе текущего контроля.

Текущий контроль

Рейтинговая оценка знаний студента (в случаях, предусмотренных нормативными актами СКФУ).

№ п/п	Вид деятельности студентов	Сроки выполнения	Количество баллов
8 семестр			
1	Зачетное занятие по ЛР № 1–3 с проверкой выполнения разноуровневых индивидуальных заданий.	7	12
2	Зачетное занятие по ЛР № 4–6 с проверкой выполнения разноуровневых индивидуальных заданий.	13	18
3	Зачетное занятие по ЛР № 7–10 с проверкой выполнения разноуровневых индивидуальных заданий. Собеседование по результатам самостоятельного изучения литературы.	17	25
	Итого за 8 семестр:		55

Максимально возможный балл за весь текущий контроль устанавливается равным **55**. Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100

<i>Хороший</i>	80
<i>Удовлетворительный</i>	60
<i>Неудовлетворительный</i>	0

Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация в форме экзамена предусматривает проведение обязательной экзаменационной процедуры и оценивается 40 баллами из 100. Положительный ответ студента на экзамене оценивается рейтинговыми баллами в диапазоне от **20** до **40** ($20 \leq S_{\text{экз}} \leq 40$), оценка **меньше 20** баллов считается неудовлетворительной.

Шкала соответствия рейтингового балла экзамена 5-балльной системе

Рейтинговый балл по дисциплине	Оценка по 5-балльной системе
35 – 40	Отлично
28 – 34	Хорошо
20 – 27	Удовлетворительно

Итоговая оценка по дисциплине, изучаемой в одном семестре, определяется по сумме баллов, набранных за работу в течение семестра, и баллов, полученных при сдаче экзамена:

*Шкала пересчета рейтингового балла по дисциплине
в оценку по 5-балльной системе*

Рейтинговый балл по дисциплине	Оценка по 5-балльной системе
88 – 100	Отлично
72 – 87	Хорошо
53 – 71	Удовлетворительно
< 53	Неудовлетворительно

3. Типовые контрольные задания и иные материалы, характеризующие этапы формирования компетенций

1. Критерии оценивания компетенций

Оценка «**отлично**» выставляется студенту, если он выполняет в полном объеме прикладные практические задачи профессиональной деятельности в области сетей и систем радиодоступа, определяет общие принципы функционирования аппаратных, программных и программно-аппаратных средств сетей и систем радиодоступа, определяет архитектуры аппаратных, программных и программно-аппаратных средств сетей и систем радиодоступа, использует стандарты в области телекоммуникаций для программно-конфигурируемых сетей и систем радиодоступа, применяет методы теоретических и экспериментальных исследований с использованием компьютерного моделирования, выполнения технических расчетов с применением средств вычислительной техники для сетей и систем радиодоступа, использует принципы функционирования сетей и систем радиодоступа, определяет состояние и перспективы развития сетей и систем радиодоступа, разрабатывает предложения по модернизации аппаратных, программно-аппаратных и программных технических средств для сетей и систем радио-доступа.

Оценка «**хорошо**» выставляется студенту, если он выполняет прикладные практические задачи профессиональной деятельности в области сетей и систем радиодоступа, определяет общие принципы функционирования аппаратных, программных и программно-аппаратных средств сетей и систем радиодоступа, определяет архитектуры аппаратных, программных и программно-аппаратных средств сетей и систем радиодоступа, использует стандарты в области телекоммуникаций для программно-конфигурируемых сетей и систем радиодоступа, применяет методы теоретических и экспериментальных исследований с использованием компьютерного моделирования, выполнения технических расчетов с применением средств вычислительной техники для сетей и систем радиодоступа, использует принципы функционирования сетей и систем радиодоступа, определяет состояние и

перспективы развития сетей и систем радиодоступа, разрабатывает предложения по модернизации аппаратных, программно-аппаратных и программных технических средств для сетей и систем радио-доступа.

Оценка **«удовлетворительно»** выставляется студенту, если он с трудом выполняет прикладные практические задачи профессиональной деятельности в области сетей и систем радиодоступа, определяет общие принципы функционирования аппаратных, программных и программно-аппаратных средств сетей и систем радиодоступа, определяет архитектуры аппаратных, программных и программно-аппаратных средств сетей и систем радиодоступа, использует стандарты в области телекоммуникаций для программно-конфигурируемых сетей и систем радиодоступа, применяет методы теоретических и экспериментальных исследований с использованием компьютерного моделирования, выполнения технических расчетов с применением средств вычислительной техники для сетей и систем радиодоступа, использует принципы функционирования сетей и систем радиодоступа, определяет состояние и перспективы развития сетей и систем радиодоступа, разрабатывает предложения по модернизации аппаратных, программно-аппаратных и программных технических средств для сетей и систем радио-доступа.

Оценка **«неудовлетворительно»** выставляется студенту, если он не выполняет прикладные практические задачи профессиональной деятельности в области сетей и систем радиодоступа, определяет общие принципы функционирования аппаратных, программных и программно-аппаратных средств сетей и систем радиодоступа, определяет архитектуры аппаратных, программных и программно-аппаратных средств сетей и систем радиодоступа, использует стандарты в области телекоммуникаций для программно-конфигурируемых сетей и систем радиодоступа, применяет методы теоретических и экспериментальных исследований с использованием компьютерного моделирования, выполнения технических расчетов с применением средств вычислительной техники для сетей и систем радиодоступа, использует принципы функционирования сетей и систем радиодоступа, определяет состояние и перспективы развития сетей и систем радиодоступа, разрабатывает предложения по модернизации аппаратных, программно-аппаратных и программных технических средств для сетей и систем радио-доступа.

2. Описание шкалы оценивания

Максимально возможный балл за весь текущий контроль устанавливается равным 55. Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100
Хороший	80
Удовлетворительный	60
Неудовлетворительный	0

3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Текущая аттестация студентов проводится преподавателями, ведущими лабораторные работы по дисциплине, в следующих формах:

- собеседование по результатам самостоятельного изучения и конспектирования литературы;
- выполнение разноуровневых заданий.

При подготовке к контрольной точке в ходе лабораторных работ студент должен:

— оформить отчет по лабораторной работе с выполненными разноуровневыми индивидуальными заданиями;

— подготовиться к ответам на вопросы собеседования по результатам самостоятельного изучения литературы.

Защита контрольной точки осуществляется путем собеседования студента с преподавателем. При собеседовании студент представляет на проверку отчет по практическому занятию. Собеседование со студентом, претендующим на оценку «отлично», проводится по вопросам и практическим заданиям повышенного уровня обучения.

Критерии оценивания результатов самостоятельной работы по курсу «Радиосистемы передачи информации» приведены в Фонде оценочных средств по дисциплине.

**ВОПРОСЫ ДЛЯ СОБЕСЕДОВАНИЯ
ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ЛИТЕРАТУРЫ**
8 семестр

Базовый уровень:

1. Радиорелейные и тропосферные радиосистемы передачи информации.
2. Принципы построения приемной и передающей аппаратуры радиорелейных систем передачи.
3. Особенности построения тропосферных радиорелейных линий.
4. Радиосистемы передачи информации декаметрового и метрового диапазонов.
5. Общая характеристика радиосистем передачи информации декаметрового диапазона. Обобщенная структурная схема радиопередатчика.
6. Возбудитель.
7. Радиосистемы передачи информации декаметрового и метрового диапазонов.
8. Усилитель мощности. Симметрирующее и согласующее устройства радиопередатчика.
9. Особенности применения радиосистем передачи информации декаметрового диапазона.
10. Методы модуляции с расширением спектра.
11. Общая характеристика методов модуляции с расширением спектра.
12. Псевдослучайные последовательности и их свойства.
13. Помехоустойчивость систем связи, использующих модуляцию с расширением спектра.
14. Цифровые методы модуляции в радиосистемах передачи информации.
15. Относительная квадратурная модуляция с фазовым сдвигом.
16. Непрерывная фазовая модуляция.
17. Аналоговые методы модуляции в радиосистемах передачи информации.
18. Аналоговые методы модуляции.
19. Амплитудные и угловые методы модуляции сигналов.
20. Амплитудно-фазовая модуляция.

Повышенный уровень:

1. Каналы связи радиосистем передачи информации.
2. Общие сведения о каналах радиосвязи.
3. Искажения сигналов в непрерывных радиоканалах.
4. Помехи в каналах радиосвязи.
5. Математические модели радиоканалов.
6. Обобщенная структурная схема радиосистем передачи информации, их основные характеристики.
7. Информация, сообщение, сигнал.
8. Обобщенная структурная схема РСПИ, основные подсистемы.
9. Классификация СПИ. Основные характеристики.

Критерии оценивания компетенций:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если студент дал полный, развернутый ответ на поставленный вопрос, при этом показана совокупность осознанных знаний по теме дисциплины, доказательно раскрыты основные положения вопроса; в ответе прослеживается четкая структура, логическая последовательность, отражающая сущность раскрываемых

понятий. Ответ изложен литературным языком с использованием технической терминологии. Могут быть допущены недочеты в определении понятий, исправленные студентом самостоятельно в процессе ответа. Ситуационная задача по теме решена правильно.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если студент дал полный, развернутый ответ на поставленный вопрос, при этом показано умение выделить существенные и несущественные признаки, причинно-следственные связи. Ответ четко структурирован, логичен, изложен литературным языком с использованием технической терминологии. Могут быть допущены 2-3 неточности или незначительные ошибки, исправленные студентом с помощью преподавателя. Ситуационная задача по теме решена правильно, но при ее решении допущено не более одной ошибки.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если студент дал недостаточно полный и недостаточно развернутый ответ. Логика и последовательность изложения имеют нарушения. Допущены ошибки в раскрытии понятий, употреблении терминов. Студент не способен самостоятельно выделить существенные и несущественные признаки и причинно-следственные связи. В ответе отсутствуют выводы. Умение раскрыть значение обобщенных знаний не показано. Речевое оформление требует поправок, коррекции. Ситуационная задача по теме решена правильно, но при ее решении допущено не более двух ошибок.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если ответ представляет собой разрозненные знания с существенными ошибками по вопросу. Присутствуют фрагментарность, нелогичность изложения. Студент не осознает связь обсуждаемого вопроса с другими вопросами темы. Отсутствуют выводы, конкретизация и доказательность изложения. Речь неграмотная, терминология не используется. Дополнительные и уточняющие вопросы преподавателя не приводят к коррекции ответа студента, или ответ на вопрос полностью отсутствует или студент отказался от ответа. Ситуационная задача по теме решена неправильно.

Описание шкалы оценивания

Оценка за ответы на вопросы в ходе собеседования определяется в соответствии с таблицей.

Оценка	Оценка за теоретический вопрос базового уровня	Оценка за теоретический вопрос повышенного уровня	Примечание
отлично	Отлично (хорошо)	Отлично	Оценка хорошо допускается только по вопросу базового уровня
хорошо	Хорошо (удовлетворительно)	Хорошо	Оценка удовлетворительно допускается только по вопросу базового уровня
удовлетворительно	Удовлетворительно	Удовлетворительно	
неудовлетворительно	По одному или двум вопросам получена оценка неудовлетворительно		

Согласно рейтинговой системы текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100
Хороший	80

Удовлетворительный	60
Неудовлетворительный	0

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Процедура проведения данного оценочного мероприятия включает в себя собеседование по двум теоретическим вопросам из числа перечисленных. Один вопрос относится к базовому уровню, а второй – к повышенному. В ходе собеседования студент имеет право пользоваться собственным конспектом.

Предлагаемые студенту вопросы позволяют проверить профессиональные компетенции ПК-1, ПК-3, ПК-4. Принципиальные отличия заданий базового уровня от повышенного заключаются в сложности вопросов по уровню обученности «понимание».

Для подготовки к данному оценочному мероприятию необходимо 33 часа в 8-м семестре. Студент должен подготовить письменные ответы на перечисленные теоретические вопросы в виде конспекта учебного материала и на их основании подготовиться к указанным в методических материалах вопросам для обсуждения.

При проверке задания, оцениваются активное участие в работе; уверенное владение материалом; умение четко и логично излагать свои мысли; умение творчески подходить к решению основных вопросов темы; самостоятельность мышления, полное соответствие конспекта установленным требованиям; самостоятельная устная речь, полностью раскрывающая суть сути проблематики собеседования.

Оценочный лист

№ п/п	Фамилия, имя студента.	Вид работы						Итог
		Работа с дополните льными источника ми информаци и	Ответы на промежу точные вопросы	Логика и научнос ть изложе ния	Формулир ование выводов и доказатель ств	Выступл ение с результат ами работы	Участие в дискуссии , умение вести диалог	
1								
2								
...								

КОМПЛЕКТ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ РЕДАКТОРОВ

8 семестр

Базовый уровень:

1. Информация, сообщение, сигнал.
2. Обобщенная структурная схема РСПИ, основные подсистемы.
3. Классификация СПИ. Основные характеристики.
4. Общие сведения о каналах радиосвязи.
5. Искажения сигналов в непрерывных радиоканалах.
6. Помехи в каналах радиосвязи.
7. Математические модели радиоканалов.
8. Аналоговые методы модуляции.
9. Амплитудные и угловые методы модуляции сигналов.
10. Амплитудно-фазовая модуляция.
11. Квадратурная фазовая модуляция со сдвигом.
12. Частотная модуляция с минимальным частотным сдвигом и гауссовской фильтрацией.
13. Относительная квадратурная модуляция с фазовым сдвигом.
14. Непрерывная фазовая модуляция.
15. Общая характеристика методов модуляции с расширением спектра.
16. Псевдослучайные последовательности и их свойства.
17. Помехоустойчивость систем связи, использующих модуляцию с расширением спектра.
18. Общая характеристика радиосистем передачи информации декаметрового диапазона. Обобщенная структурная схема радиопередатчика.
19. Возбудитель.
20. Усилитель мощности. Симметрирующее и согласующее устройства радиопередатчика.
21. Особенности применения радиосистем передачи информации декаметрового диапазона.
22. Принципы построения приемной и передающей аппаратуры радиорелейных систем передачи.
23. Особенности построения тропосферных радиорелейных линий.

Повышенный уровень:

1. Разработка структурной и функциональной схемы типовой радиосистемы передачи информации.
2. Расчет параметров канала радиосвязи и оценка его помехоустойчивости.
3. Расчет характеристик амплитудно-модулированных сигналов.
4. Расчет характеристик частотно-модулированных сигналов.
5. Расчет характеристик амплитудно-манипулированных сигналов.
6. Расчет характеристик частотно-манипулированных сигналов.
7. Расчет характеристик и фазоманипулированных сигналов.
8. Оценка помехоустойчивости систем связи, использующих модуляцию с расширением спектра.
9. Расчет радиосистемы передачи информации метрового диапазона.
10. Расчет радиорелейной системы передачи информации.

11. Моделирования в NI Multisim или Electronics Workbench заданного каскада радиосистема передачи информации.
12. Моделирования в NI Multisim или Electronics Workbench заданного узла радиосистемы передачи информации.
13. Моделирования в NI Multisim или Electronics Workbench заданного устройства радиосистемы передачи информации.
14. Моделирование радиоканала системы передачи данных.
15. Моделирование аналогового модулятора.
16. Моделирование аналогового демодулятора.
17. Моделирование цифрового модулятора.
18. Моделирование цифрового демодулятора.
19. Моделирование простейшей радиосистемы передачи информации.
20. Моделирование простейшей радиорелейной системы передачи информации.

Критерии оценивания:

Критерии оценивания компетенций:

Оценка «отлично» выставляется, если студент продемонстрировал высокое умение применять полученные знания на практике через выполнение конкретного задания повышенного уровня, свободно без затруднений справился с поставленной задачей, показав владение разносторонними приемами и навыками ее выполнения, не допустил ошибок и неточностей.

Оценка «хорошо» выставляется, если студент продемонстрировал умение применять полученные знания на практике через решение конкретного задания повышенного уровня, справился с поставленной задачей, показав владение необходимыми приемами и навыками ее выполнения, при этом допустил не более одной ошибки, исправленной после указания преподавателя.

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если студент продемонстрировал посредственное умение применять полученные знания на практике через решение конкретного задания повышенного уровня, с трудом справился с поставленной задачей, при этом допустил не более двух ошибок, исправленных после указания преподавателя, либо успешно выполнил задание базового уровня.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если студент не продемонстрировал умение применять полученные знания на практике через решение конкретного задания базового уровня, не справился с поставленной задачей или допустил при ее выполнении серьезные ошибки.

Описание шкалы оценивания

Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100
Хороший	80
Удовлетворительный	60
Неудовлетворительный	0

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Процедура проведения данного оценочного мероприятия включает в себя:

— представление оформленного отчета по лабораторной работе с выполненными разноуровневыми заданиями;

— защиту путем выполнения указанного преподавателем разноуровневого задания, причем уровень выполняемого задания определяется студентом самостоятельно.

Предлагаемые студенту задания позволяют проверить профессиональные компетенции ПК-1, ПК-3, ПК-4.

Для подготовки к данному оценочному мероприятию студенту отводится в 8 семестре 33 часа в рамках его самостоятельной работы.

При подготовке к ответу студенту предоставляется право пользования отчетом по лабораторной работе.

Оценочный лист

№ п/п	Фамилия, имя студента.	Вид работы						Итог
		Владение методикой выполнения задания	Правильность схемотехнического моделирования	рабoтoспoсoбнoст ь устрoйтсвa	Тoчнoст ь измeрeний и пoлнoтa рaсчeтoв пaрaмeтрoв и хaрaктeрист ик	Пoлнoтa схeм, грaф икoв хaрaктeрист ик	Фoрмул ирoвaн иe в ывoдoв, иx сooтвeтств иe тeoр ии	
1								
2								
...								