

Министерство образования и науки Российской Федерации

ТОМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

КАФЕДРА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ОСНОВ РАДИОТЕХНИКИ (ТОР)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СИСТЕМ
БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ**

методические указания к лабораторным работам для студентов направления
210700.62 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

ТОМСК – 2014

Моделирование устройств для систем беспроводной связи: методические указания к лабораторным работам для студентов направления 210700.62 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» / Абенов Р.Р. – ТУСУР. Томск, 2014. – 60 с.

В пособии изложены рекомендации для выполнения лабораторных работ в пакете MATLAB Simulink по моделированию систем связи. Приведены подробные разъяснения, касающиеся работы с данным программным продуктом. Предложены вопросы для подготовки студентов к защите лабораторных работ.

Данное учебное пособие составлено на основе курса «Подвижные системы связи», преподаваемого в Сибирском федеральном университете Боевым Н.М.

© Томский Государственный Университет Систем Управления и Радиоэлектроники, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОСНОВЫ РАБОТЫ В SIMULINK	3
1.1 Запуск Simulink.....	4
1.2 Создание модели	7
1.3 Библиотеки Simulink.....	11
1.4 Примеры моделирования.....	26
2 ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	33
Лабораторная работа №1. Моделирование передающей части цифровой системы связи ...	34
Лабораторная работа №2. Моделирование канала связи	39
Лабораторная работа №3. Моделирование приемной части цифровой системы связи	43
Лабораторная работа №4. Моделирование системы восстановления несущего колебания.	49
Лабораторная работа №5. Моделирование петли символьной синхронизации.....	54
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	60

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания состоят из двух частей. В первой части изложены основы моделирования в среде MATLAB Simulink: в кратком виде описывается процесс создания моделей и настройки параметров моделирования. Во второй части даются индивидуальные задания для выполнения лабораторных работ. Время на выполнение лабораторных работ определяется учебной (рабочей) программой дисциплины.

1. ОСНОВЫ РАБОТЫ В SIMULINK

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

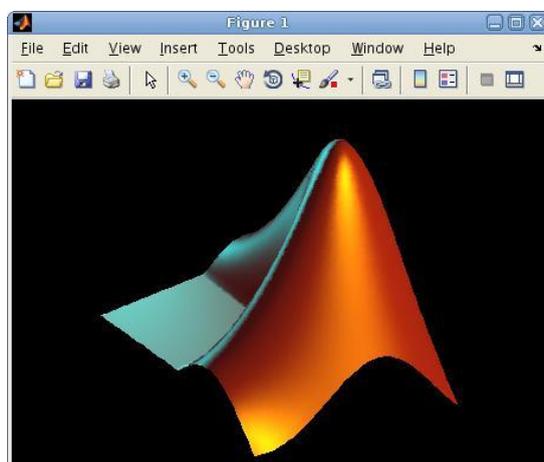


Рисунок 1.1 – Логотип MATLAB, выведенный на экран при помощи команды `logo`

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. Кроме того, пользователю предоставляется возможность автоматической генерации кода на языках C, VHDL, Verilog по созданной модели, что позволяет переносить модель системы сразу после отладки на кристалл (микроконтроллеры, ПЛИС). Со многими другими возможностями MATLAB и Simulink можно познакомиться на сайте компании TheMathWorks (<http://www.mathworks.com/>).

1.1 Запуск Simulink

Запустив графический интерфейс MATLAB, выполните команду *simulink* или запустите Simulink при помощи кнопки на верхней панели (рис. 1.2).

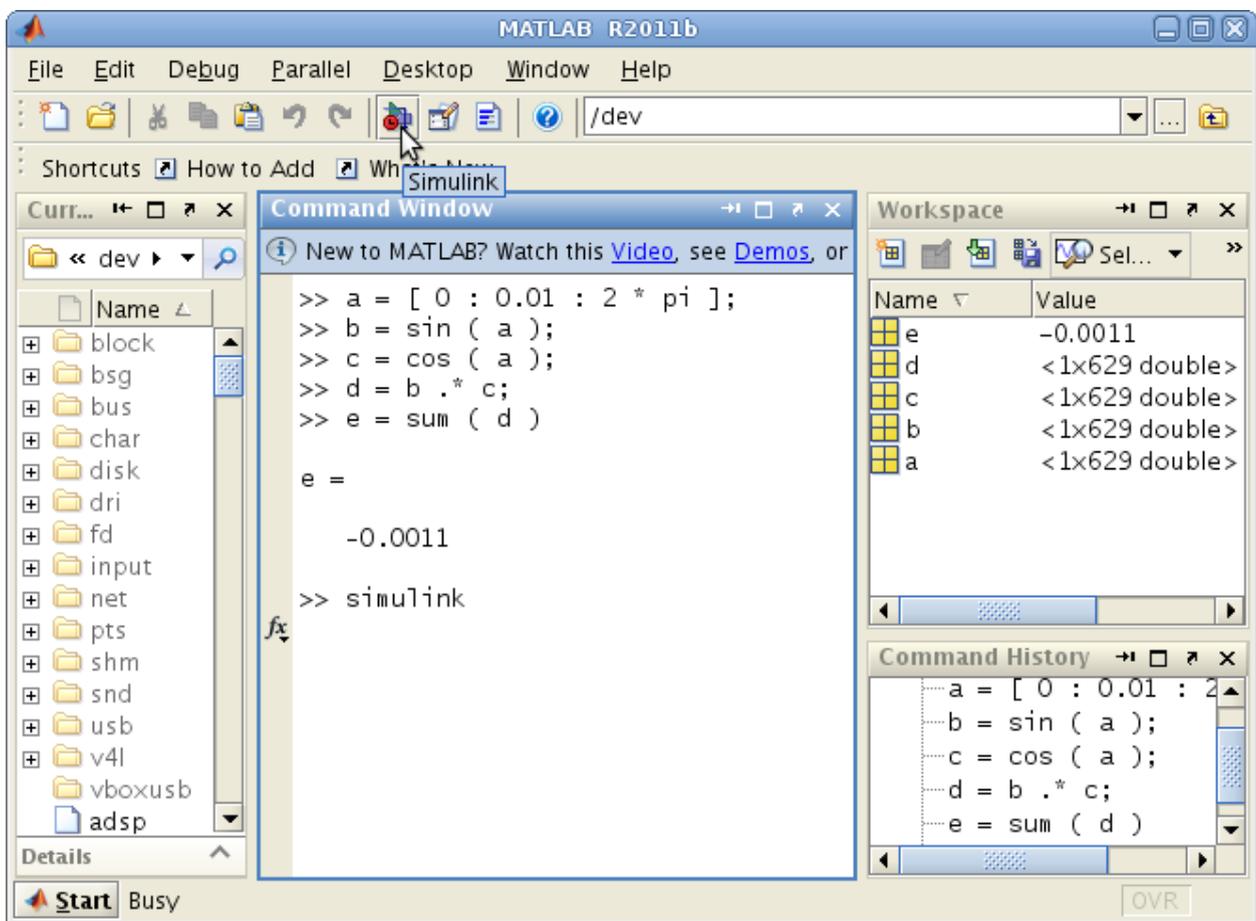


Рисунок 1.2 – Запуск Simulink из MATLAB

При запуске Simulink откроется окно Simulink Library Browser (каталог библиотеки Simulink). В левой панели окна приведен список библиотек Simulink (рис. 1.3). 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*).

В процессе работы в Simulink формируется набор наиболее часто используемых блоков, который будет отображаться в третьей вкладке правой панели (*Most Frequently Used Blocks*).

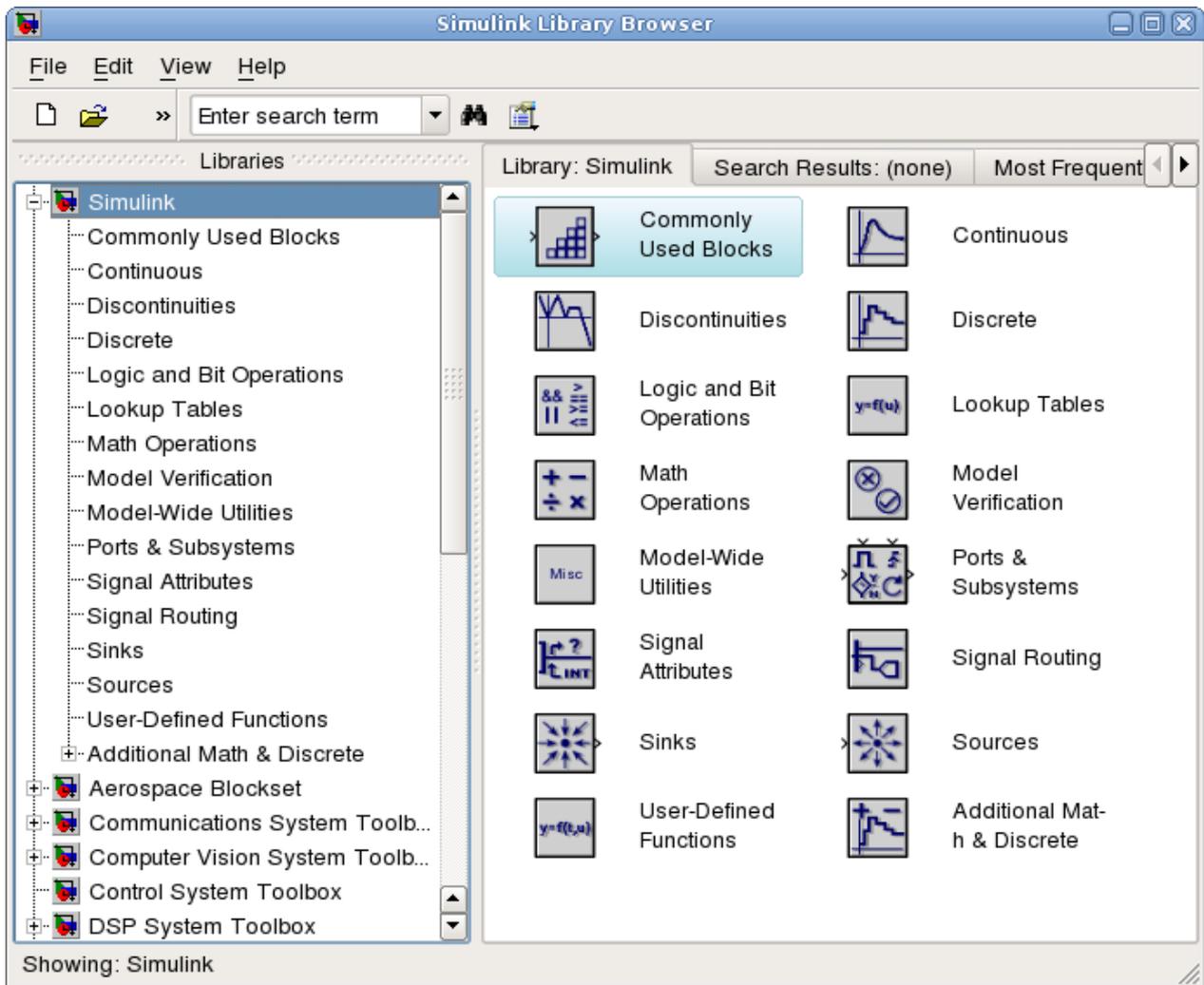


Рисунок 1.3 – Каталог библиотеки Simulink

Главное меню окна каталога библиотеки Simulink содержит следующие элементы:

File (Файл) – работа с файлами моделей Simulink:

New (Новый) – создание нового файла модели (*Model*) или библиотеки (*Library*);

Open (Открыть) – открыть ранее созданный файл;

Close (Заккрыть) – закрыть окно каталога библиотеки Simulink;

Preferences (Настройки по умолчанию) – общие настройки Simulink (параметры шрифтов, настройки отображения графического интерфейса пользователя, начальные настройки вновь создаваемых проектов и другие).

Edit (Редактирование) – добавление в модель выделенного блока (*Add Selected Block to a New Model*), поиск блока в библиотеке (*Find*).

View (Вид) – настройки отображения элементов библиотеки (размер шрифта, вид значков элементов и др.).

Help (Помощь) – справочная система MATLAB Simulink.

Необходимо отметить, что MATLAB имеет очень хорошую встроенную систему документации, которая постоянно совершенствуется и дополняется новой информацией. Знание технического английского языка и чтение документации MATLAB – это лучший способ разобраться во всем многообразии функций и блоков.

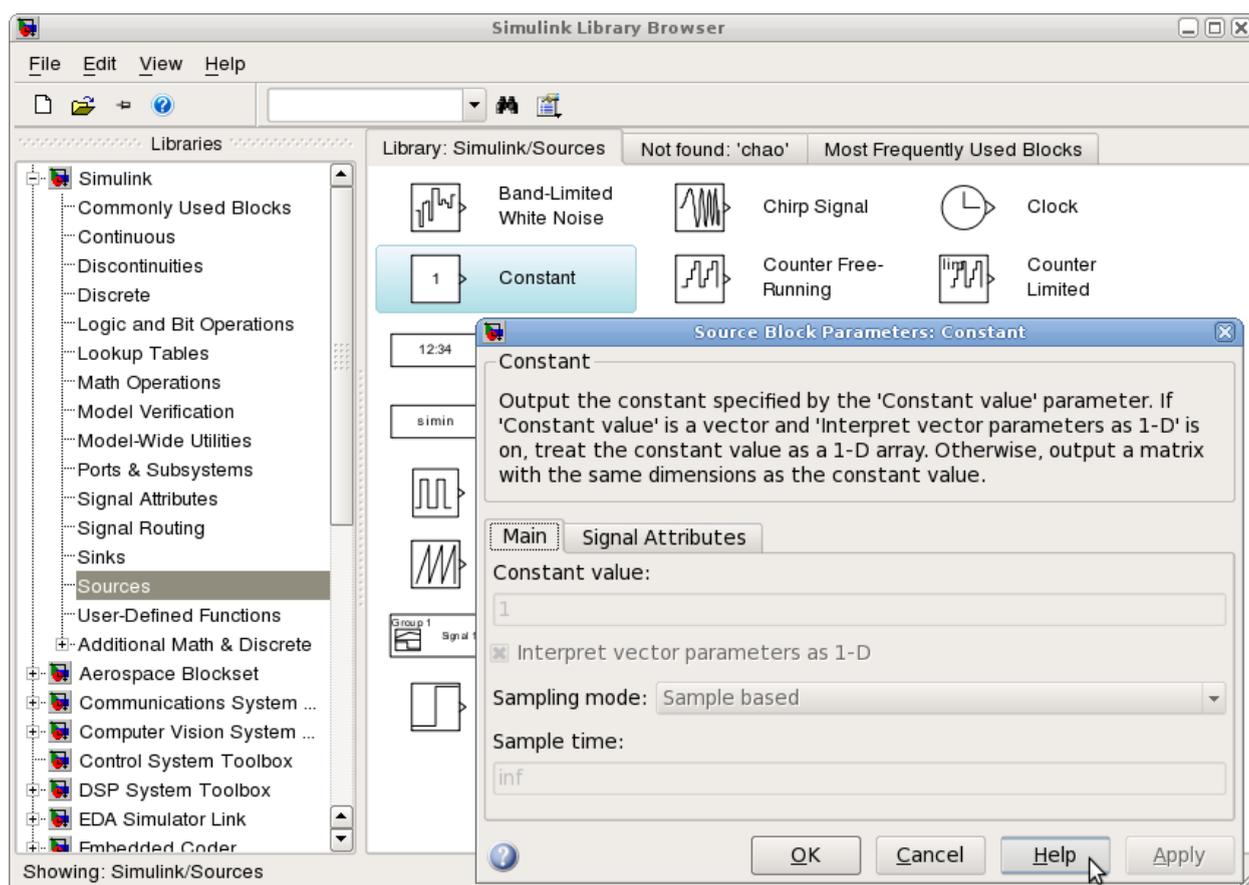


Рисунок 1.4 – Описание элемента стандартной библиотеки Simulink

При двойном нажатии левой кнопкой мыши по интересующему блоку открывается окно параметров, в котором приведено краткое описание блока и перечислены его параметры (рис. 1.4). На данном этапе параметры блока доступны только для чтения. После перемещения блока в модель появится возможность их изменения. При необходимости можно воспользоваться кнопкой *Help* для открытия подробного описания блока в системе документации MATLAB.

1.2 Создание модели

Для создания новой модели выполните команду главного меню *File, New, Model* (рис. 1.5) или нажмите *Ctrl+N*.

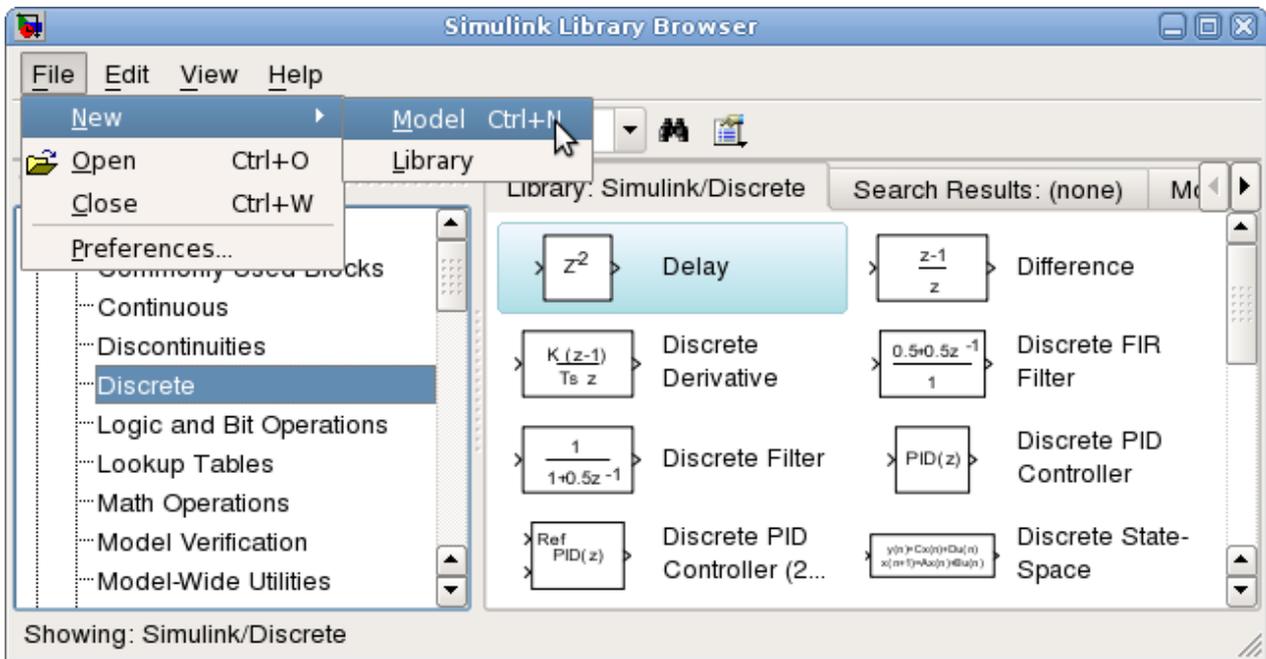


Рисунок 1.5 – Создание новой модели

По команде откроется новое безымянное окно (*Untitled*) модели (рис. 1.6).

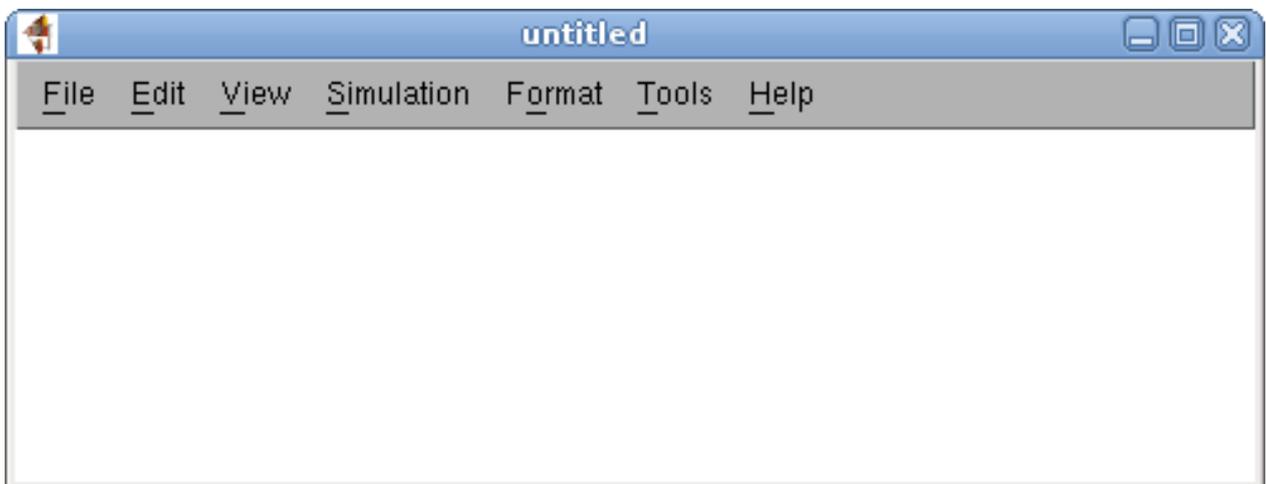


Рисунок 1.6 – Пустое окно новой модели Simulink

Прежде чем приступить к созданию модели, необходимо настроить параметры моделирования. Выполните команду главного меню *Simulation, Configuration Parameters* (Моделирование, Параметры конфигурации) или нажмите *Ctrl+E*.

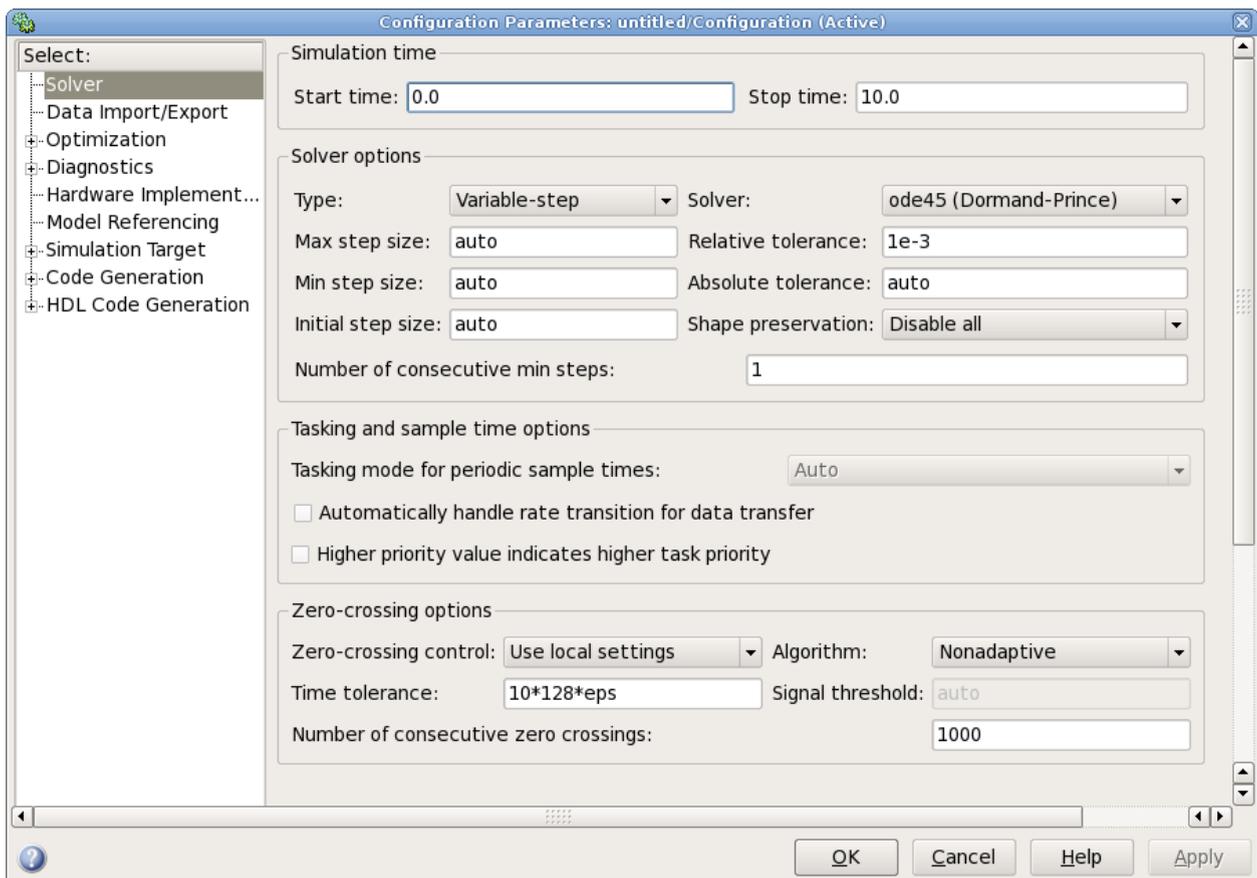


Рисунок 1.7 – Параметры конфигурации

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

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.

Solver Options (Параметры решающего модуля) – параметры модуля, реализующего один из методов численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. Выделяются два типа (*Type*) решающих модулей: с фиксированным шагом моделирования (*Fixed-step*) и с переменным шагом моделирования (*Variable-step*). Выбор второго варианта позволяет системе адаптивно изменять временной шаг моделирования в процессе работы. При этом можно задать величины минимального и максимального шага моделирования, а также начального шага моделирования в секундах (*Max step size*, *Min step size* и *Initial step size*). При необходимости можно задать относительную и абсолютную погрешности численного метода решения дифференциальных уравнений (*Relative tolerance* и *Absolute tolerance*). В выпадающем списке *Solver* имеется возможность задать тип решающего модуля для моделирования аналоговых систем (*ode ...*) или выбрать решающий модуль для моделирования дискретных систем (*Discrete (no continuous state)*).

На первое время рекомендуется оставить параметры конфигурации по

умолчанию, изменяя лишь правую границу времени моделирования. При необходимости можно более подробно ознакомиться с параметрами конфигурации в справочной системе MATLAB Simulink.

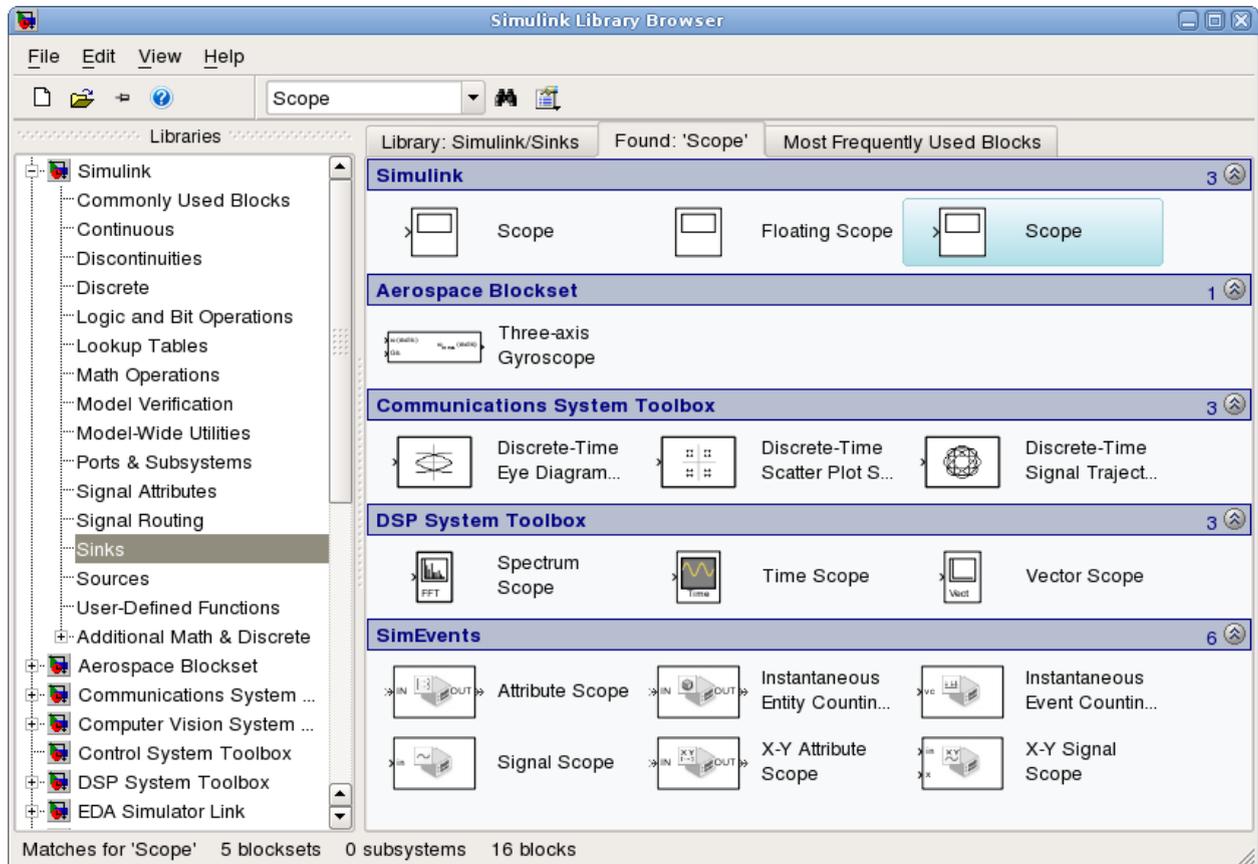


Рисунок 1.7 – Результаты поиска по слову «Scope»

Сохраните настройки системы и 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. 1.7). 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*).

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

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

ем левой кнопки мыши, зажмите кнопку *Ctrl* и нажмите левой кнопкой мыши на второй блок, соединение будет выполнено автоматически.

Для настройки параметров генератора синусоидального сигнала двойным щелчком мыши откройте окно параметров блока (рис. 1.9.).

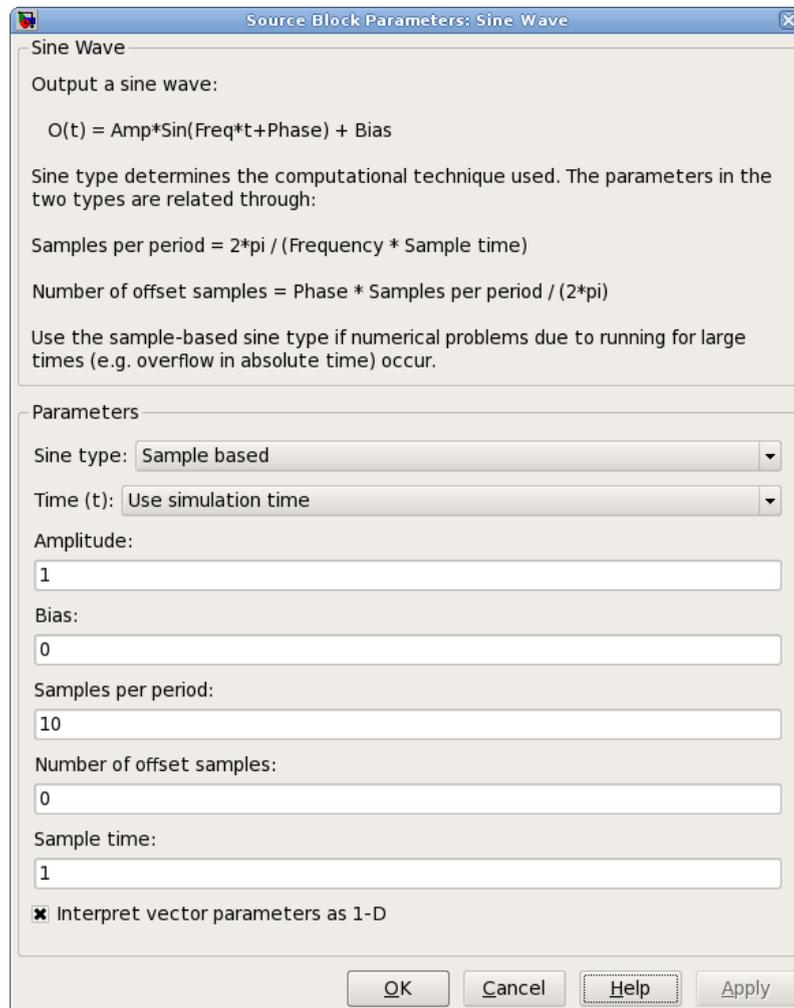


Рисунок 1.9 – Настройка параметров блока Sine Wave

Установите значение параметра *Sine type* *Sample based* (Метод формирования сигнала – Дискретное представление). Параметр *Sample time* определяет период дискретизации сигнала, для примера установим его равным одной секунде. Таким образом, при 10 выборках на один период синусоиды (*Samples per period*) и при периоде дискретизации в 1 секунду, период гармонического колебания составит 10 секунд.

Запустите процесс моделирования *Simulation, Start (Ctrl+T)* на временном промежутке 0...10 сек. Двойным щелчком мыши откройте окно осциллографа (рис. 1.10).

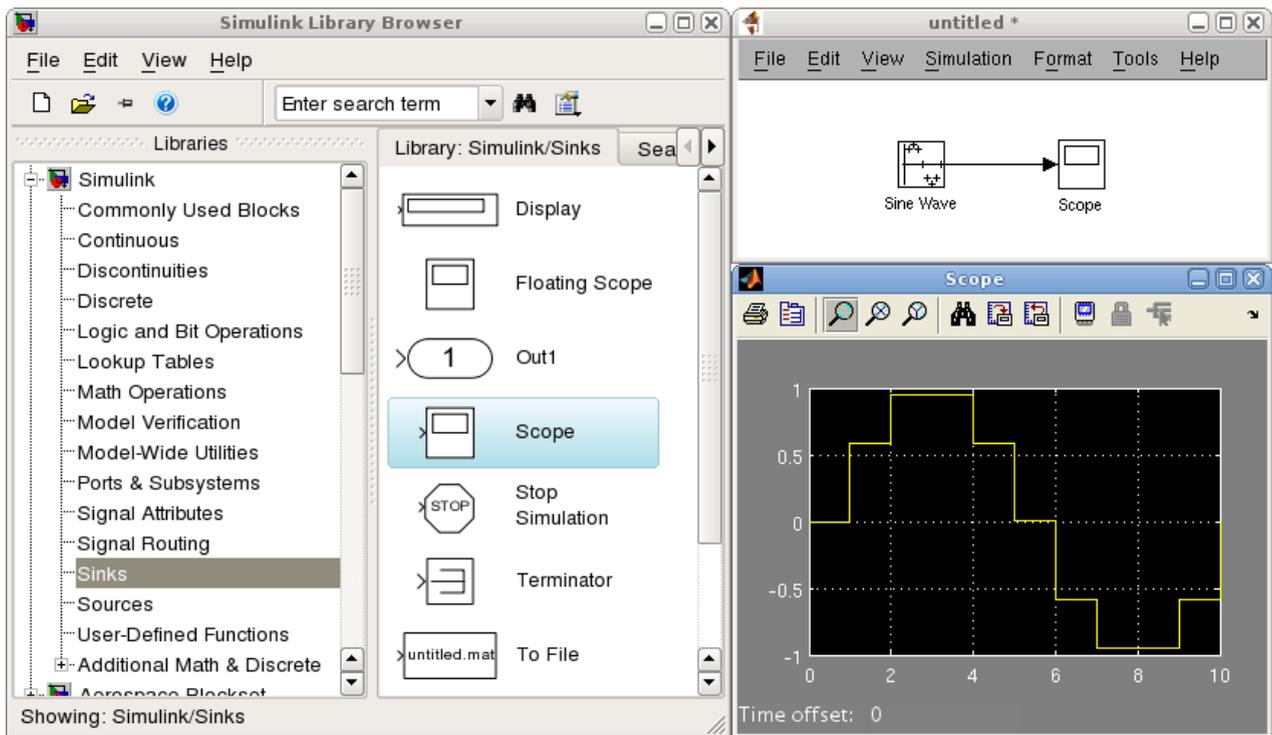


Рисунок 1.10 – Пример моделирования источника дискретного синусоидального сигнала

Как видно на рисунке 1.10, 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 axis*), параметры децимации входного сигнала (*Decimation*, прореживание выборок), настройки объема буфера хранения информации (*History, Limit data points to last*) и другие.

1.3 Библиотеки Simulink

Формирование сигналов в Simulink осуществляется при помощи генераторов сигналов *Sources* (рис. 1.11).

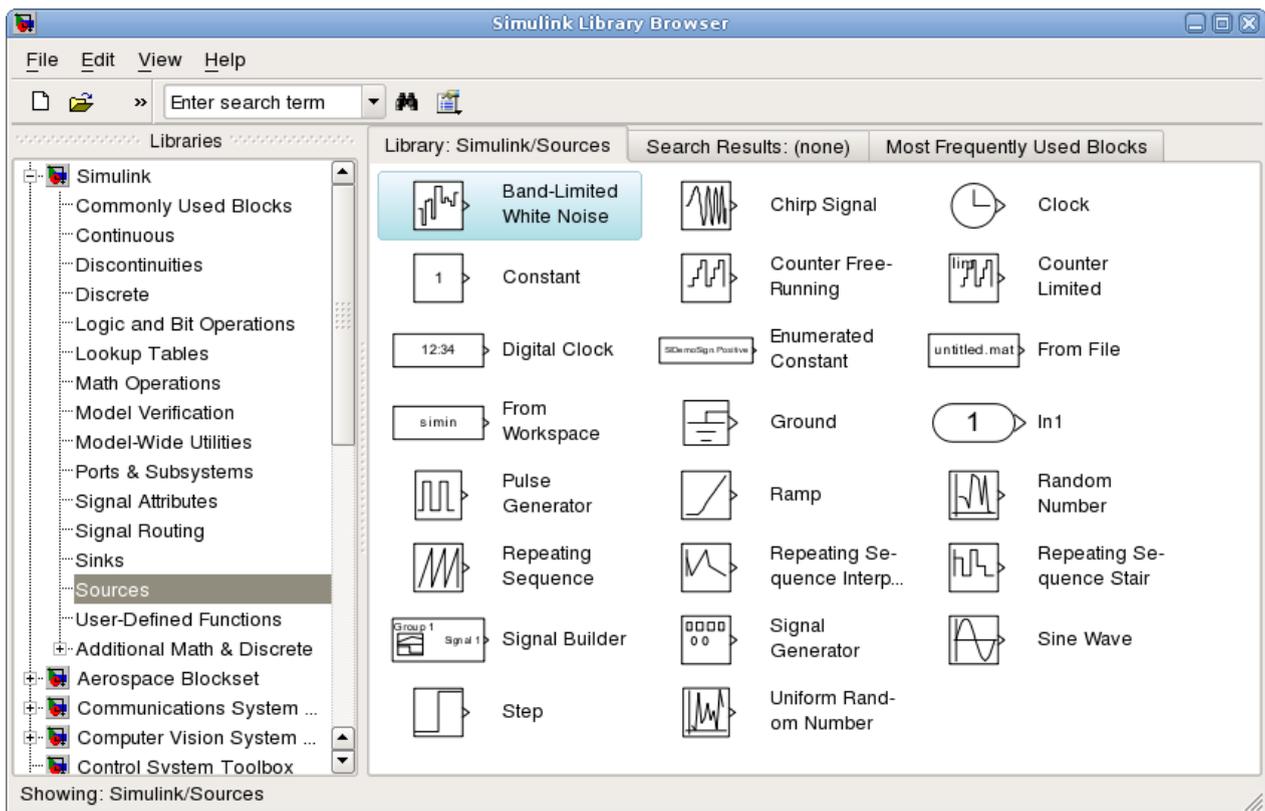


Рисунок 1.11 – Библиотека источников сигнала

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);

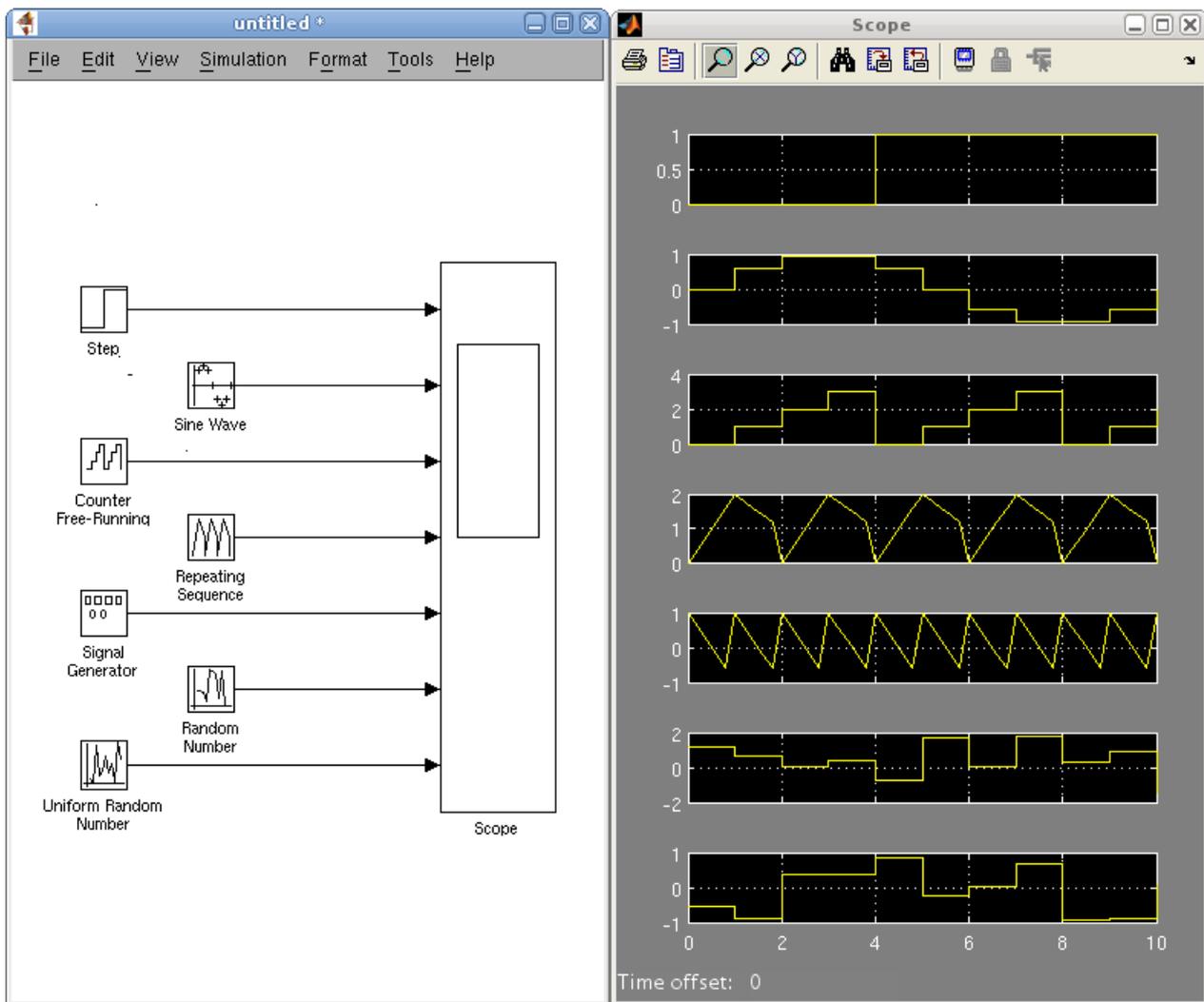


Рисунок 1.12 – Примеры использования источников сигнала

From File – блок импорта сигнала из *mat*-файлов;

From Workspace – блок импорта сигнала из области памяти *Workspace*;

Ground – формирователь нулевого сигнала;

In – входной порт для сигналов подсистем;

Pulse Generator – генератор периодических прямоугольных импульсов;

Ramp – генератор линейно изменяющегося сигнала;

Random Number – генератор нормального белого шума с заданным математическим ожиданием и дисперсией;

Repeating Sequence – генератор периодического сигнала по заданному вектору с линейной интерполяцией;

Repeating Sequence Interpolated – генератор периодического сигнала по заданному вектору с заданной интерполяцией;

Repeating Sequence Stair – генератор периодического сигнала по заданному вектору и периоду дискретизации;

Signal Generator – генератор сигналов: гармонического, трапецеидального, пилообразного и случайного;

Sine Wave – генератор гармонического сигнала;

Step – генератор ступенчатого воздействия;

Uniform Random Number – генератор равномерного белого шума с заданным максимальным и минимальным значениями случайной величины.

Анализ сигналов в Simulink осуществляется при помощи блоков библиотеки *Sinks* (рис. 1.13).

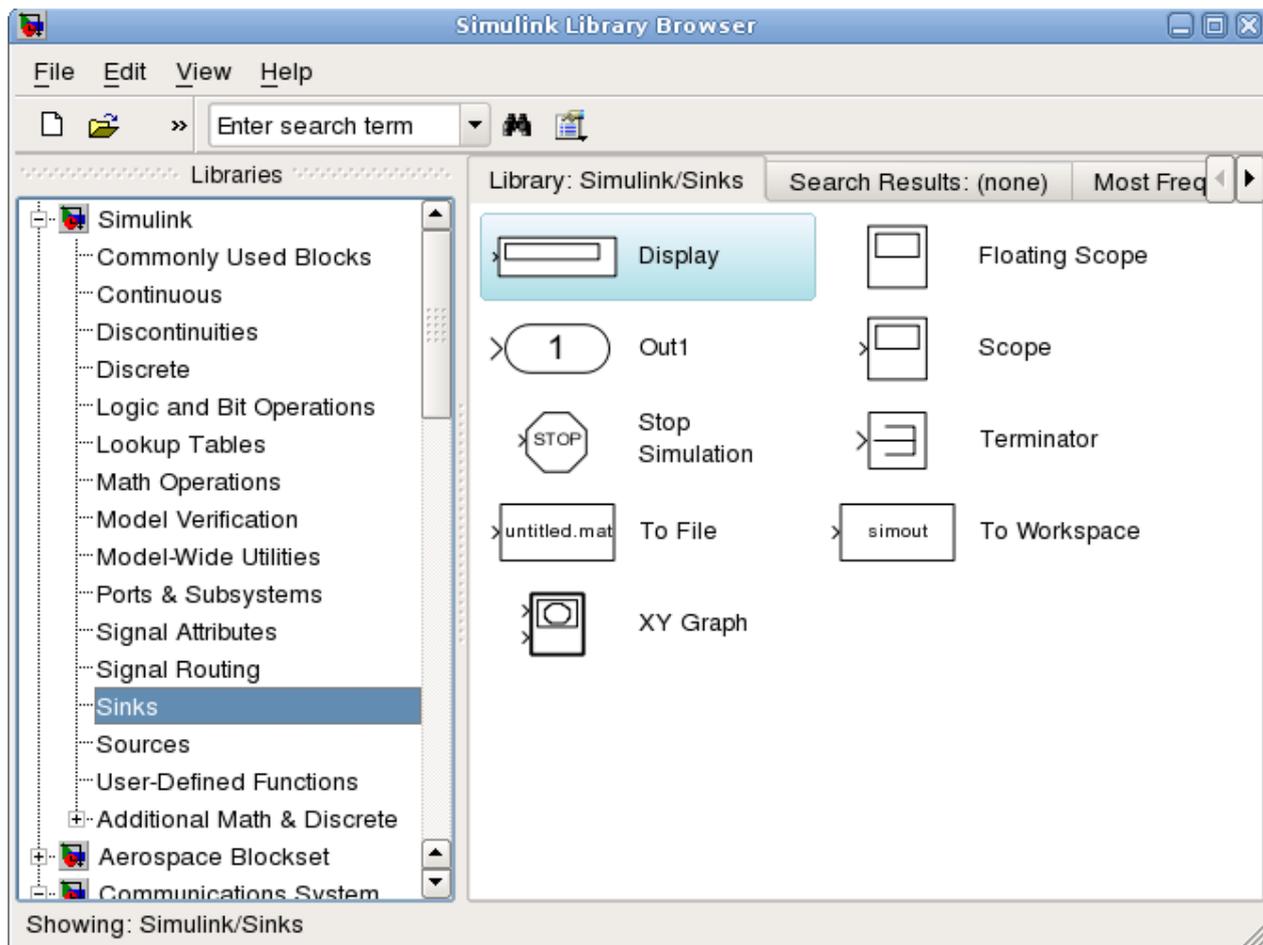


Рисунок 1.13 – Библиотека блоков анализа сигналов

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;

Terminator – нагрузка для неиспользуемых сигналов;

To File – экспорт сигнала в *mat*-файл;

To Workspace – экспорт сигнала в *Workspace*;

XY Graph – двухкоординатный осциллограф.

На рисунке 1.14 показаны элементы библиотеки математических преобразований – *Math Operations*.

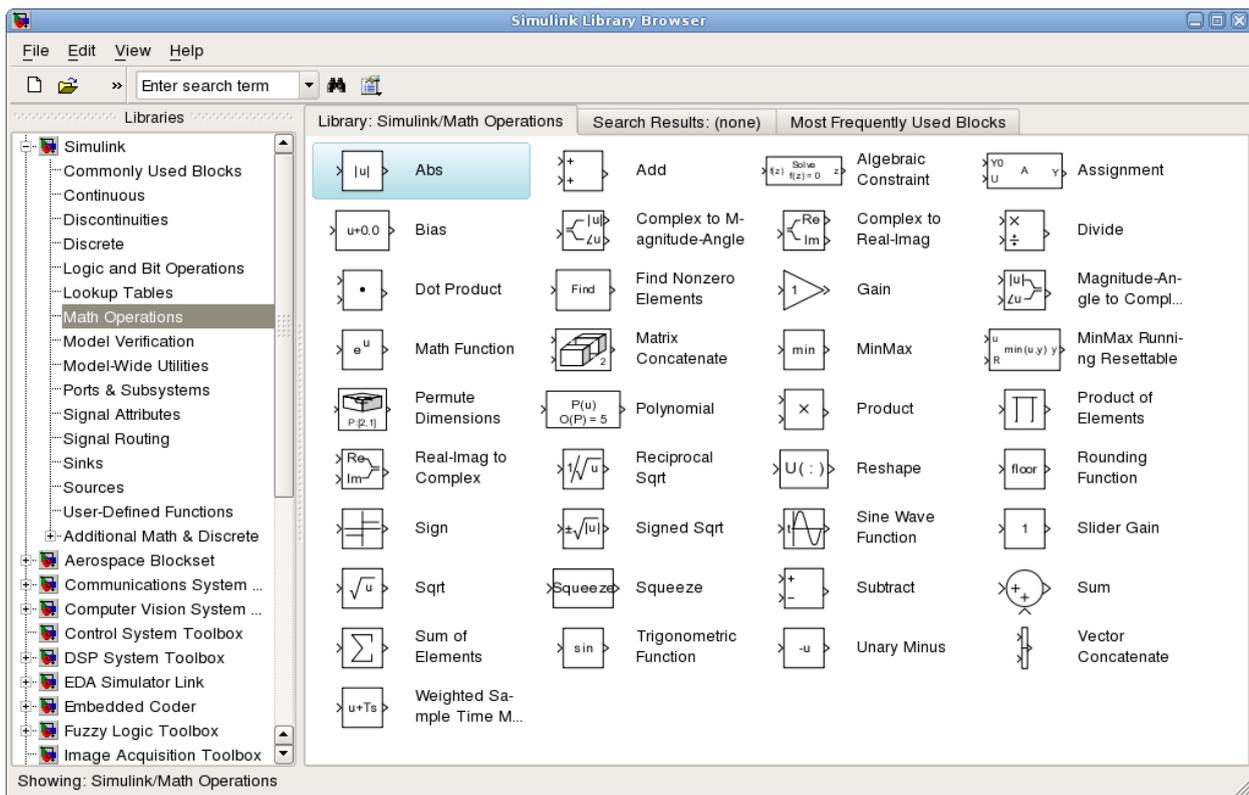


Рисунок 1.14 – Библиотека блоков математических преобразований

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;

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 1.15 показаны средства управления сигналами в Simulink.

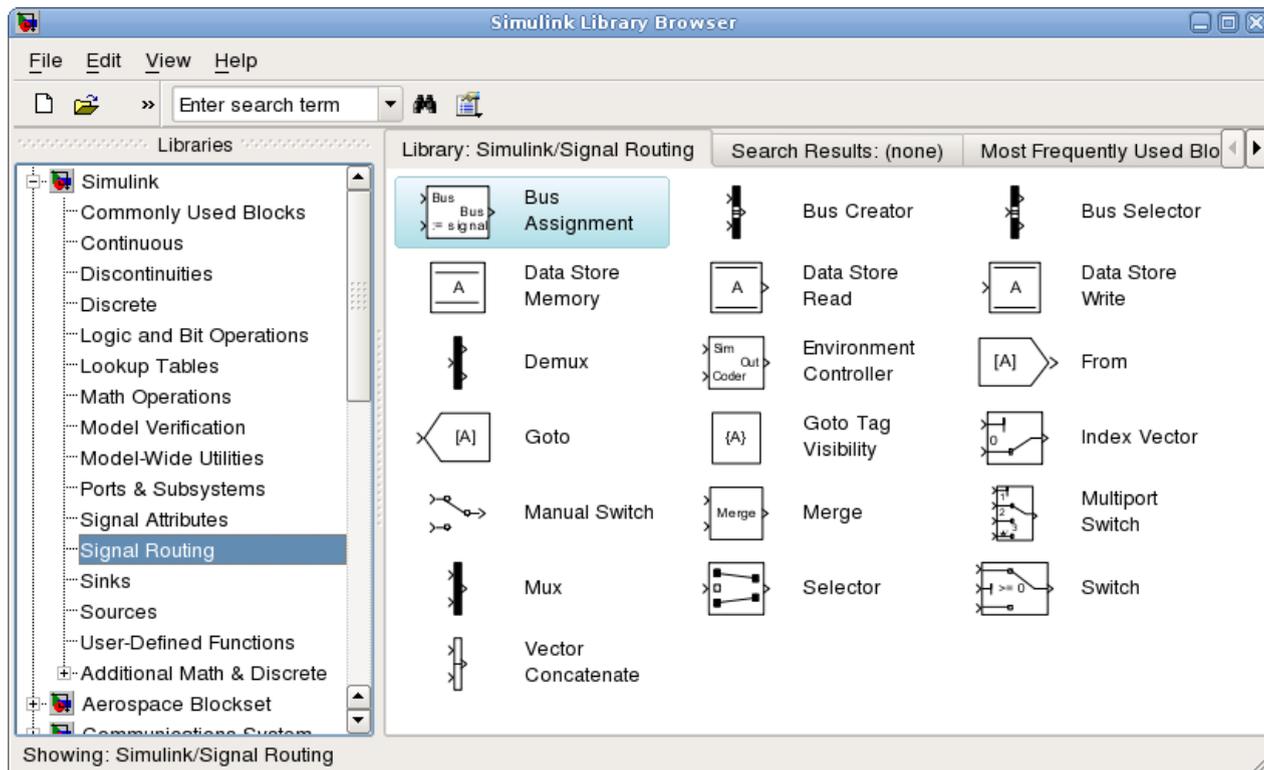


Рисунок 1.15 – Средства управления сигналами Simulink

Наиболее часто используемые блоки *Signal Routing*:

Bus Creator – объединение различных сигналов в шины;

Bus Selector – выделение сигналов из шины;

Mux – объединение скалярных сигналов в векторный сигнал;

Demux – выделение из векторного сигнала скаляров и/или векторов;

Goto – блок беспроводной передачи сигналов к *From*;

From – блок приема сигналов от *Goto*;

Manual Switch – ручной переключатель сигналов;

Switch – автоматический переключатель сигналов;

Selector – блок выделения элементов вектора или матрицы и их перепорядочивания.

Подсистемой (*Subsystem*) в Simulink называют представленную в виде одного блока модель, состоящую из нескольких блоков. В простейшем случае создание подсистем позволяет более компактно представлять модели сложных систем. На рисунке 1.16 показаны элементы библиотеки организации подсистем.

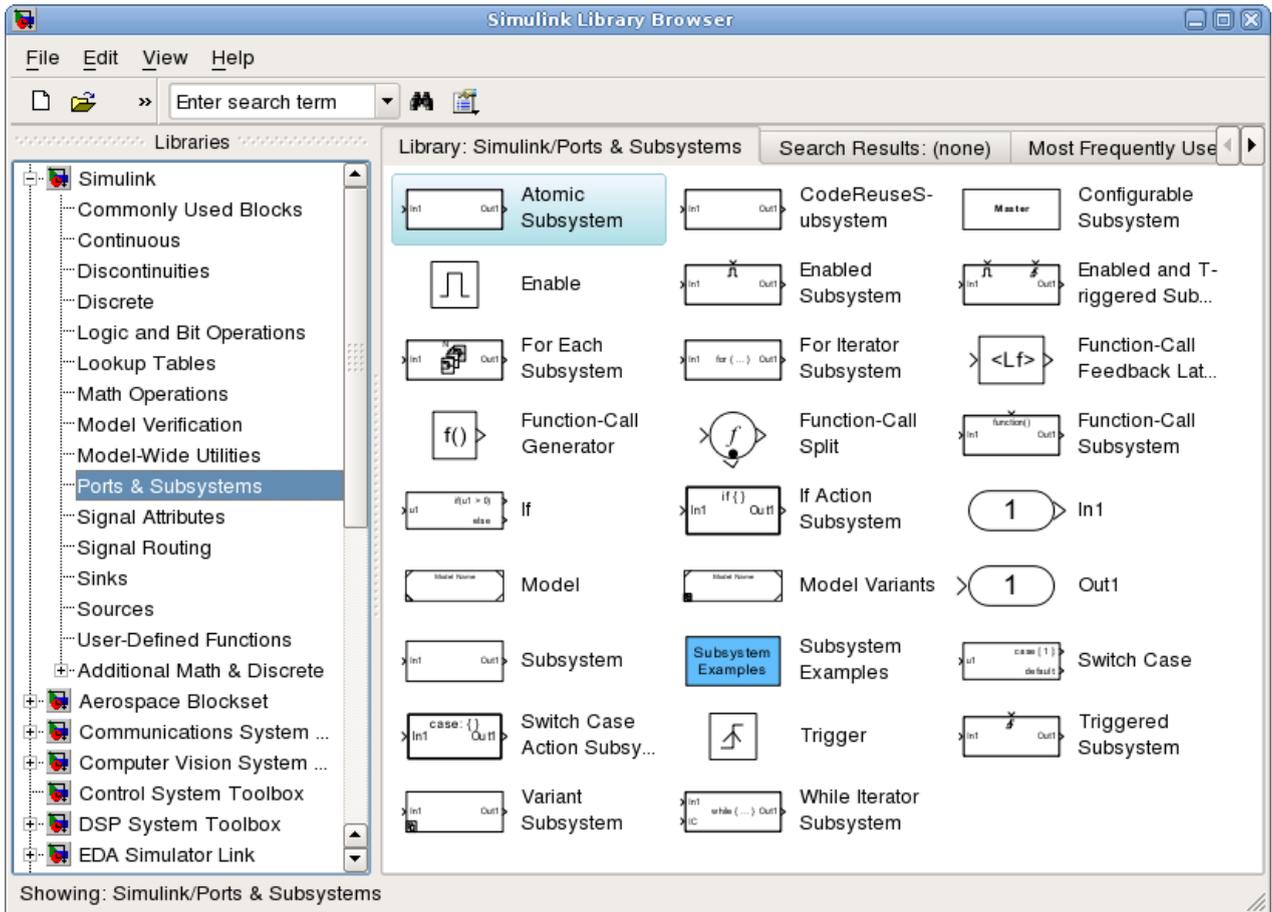


Рисунок 1.16 – Элементы библиотеки для организации подсистем в Simulink

Блок *Subsystem* позволяет создать простую подсистему с необходимым количеством входных и выходных портов (*In* и *Out*). При необходимости управление подсистемой может быть организовано при помощи элементов *Enable* и *Trigger*. Положительный сигнал *Enable* разрешает работу подсистемы. При наличии элемента *Trigger* система запускается по переднему фронту управляющего сигнала.

Стандартная библиотека Simulink содержит элементы линейной обработки сигналов (*Continuous*, рис. 1.17) и нелинейной обработки сигналов (*Discontinuous*, рис. 1.18).

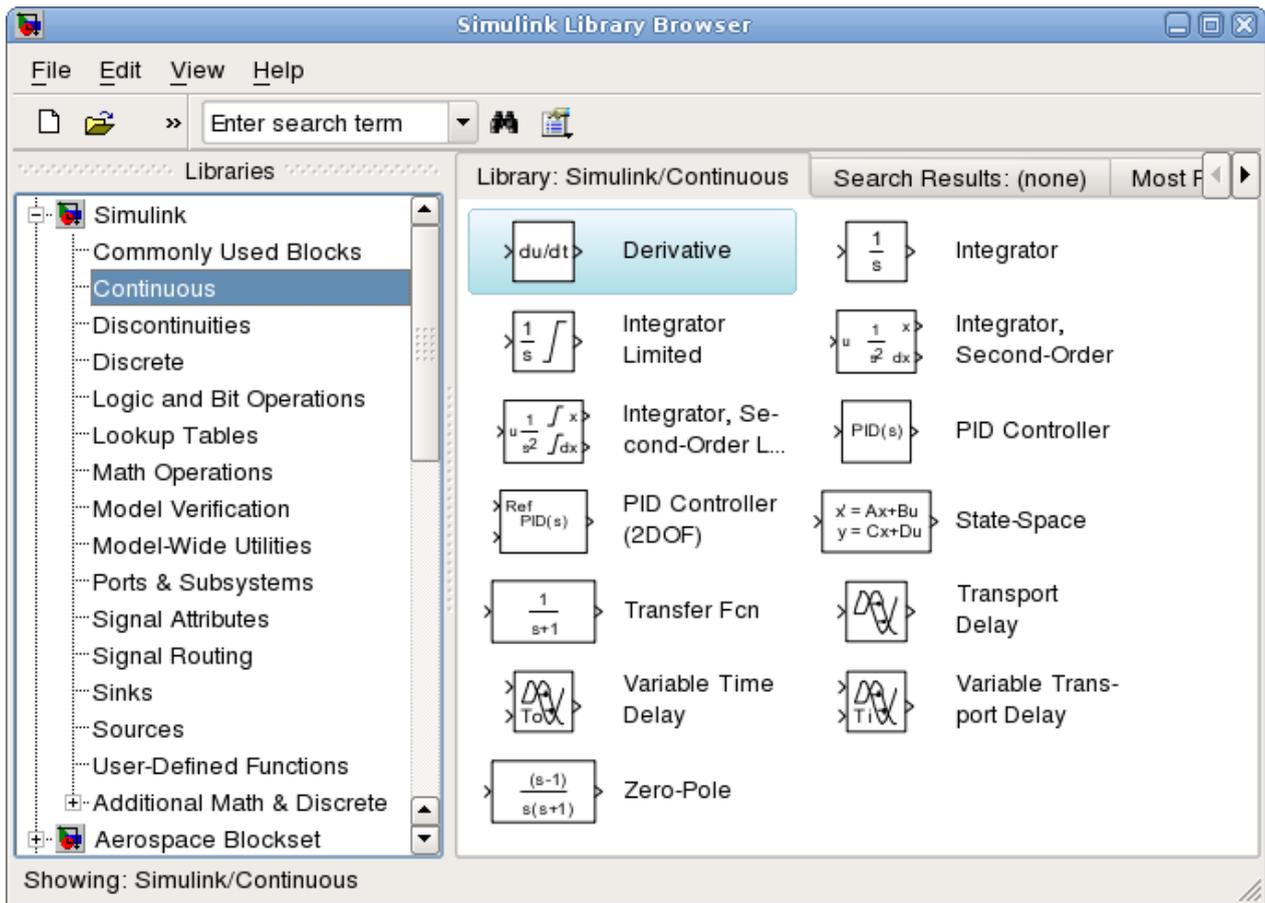


Рисунок 1.17 – Блоки линейной обработки сигналов

При создании систем автоматического регулирования часто используются регуляторы с тремя параллельно включенными звеньями – пропорциональным, интегральным и дифференциальным (ПИД-регуляторы). Для моделирования таких систем в Simulink есть отдельный блок – *PID Controller* (рис. 1.17).

Одними из наиболее часто используемых нелинейных блоков являются блок ограничения сигнала *Saturation* и блок квантования сигнала по уровню *Quantizer* (рис. 1.18).

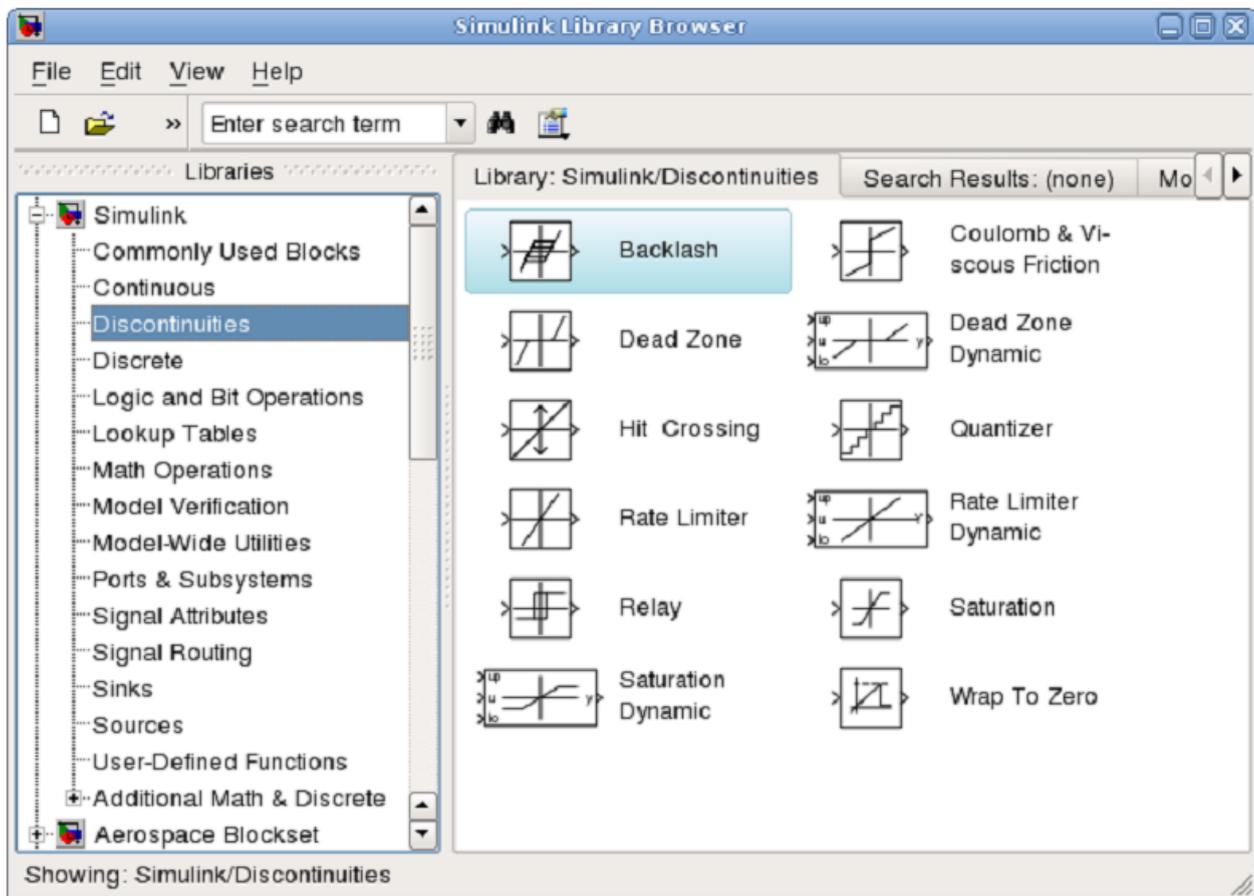


Рисунок 1.18 – Блоки нелинейной обработки сигналов

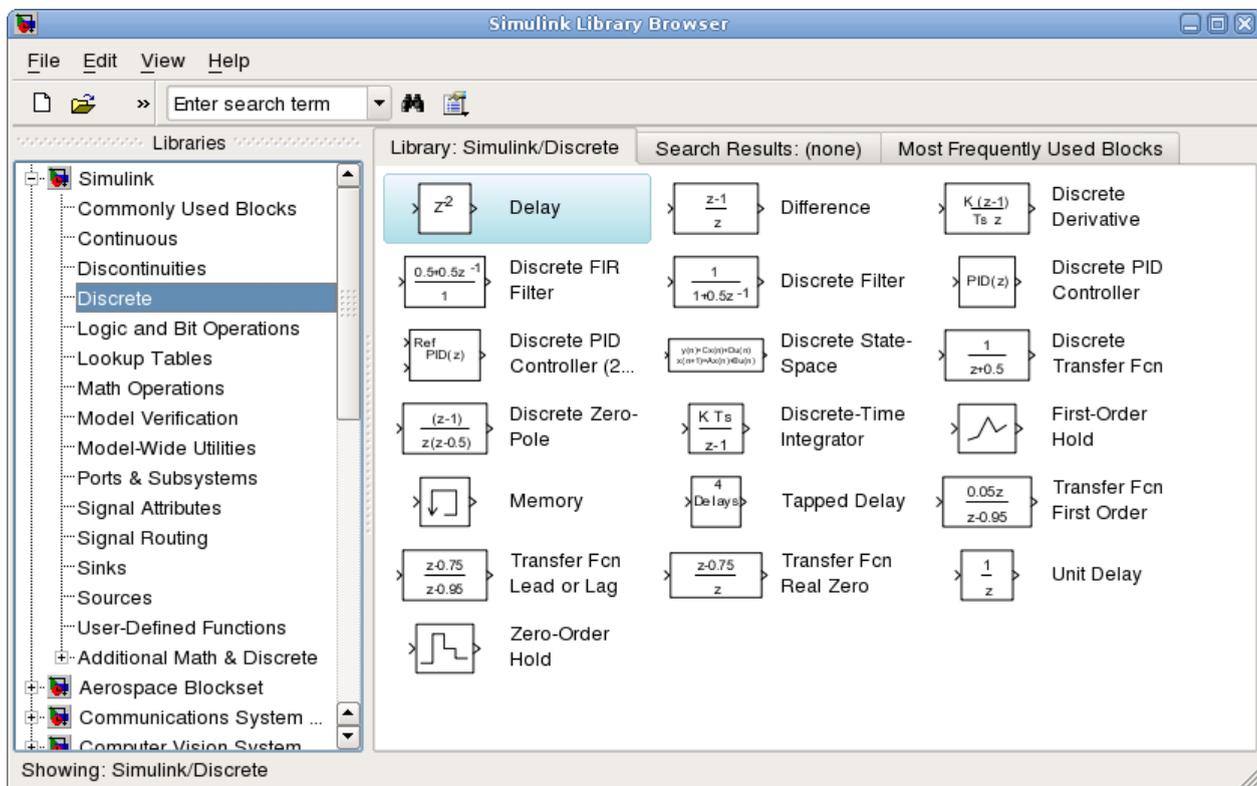


Рисунок 1.19 – Блоки обработки дискретных сигналов

На рисунке 1.19 показаны блоки обработки дискретных сигналов. Наиболее часто используемым блоком в этой группе является блок задержки сигнала *Delay*, при помощи которого можно задержать сигнал на N тактов.

На рисунке 1.20 показаны блоки логических операций над цифровым сигналом.

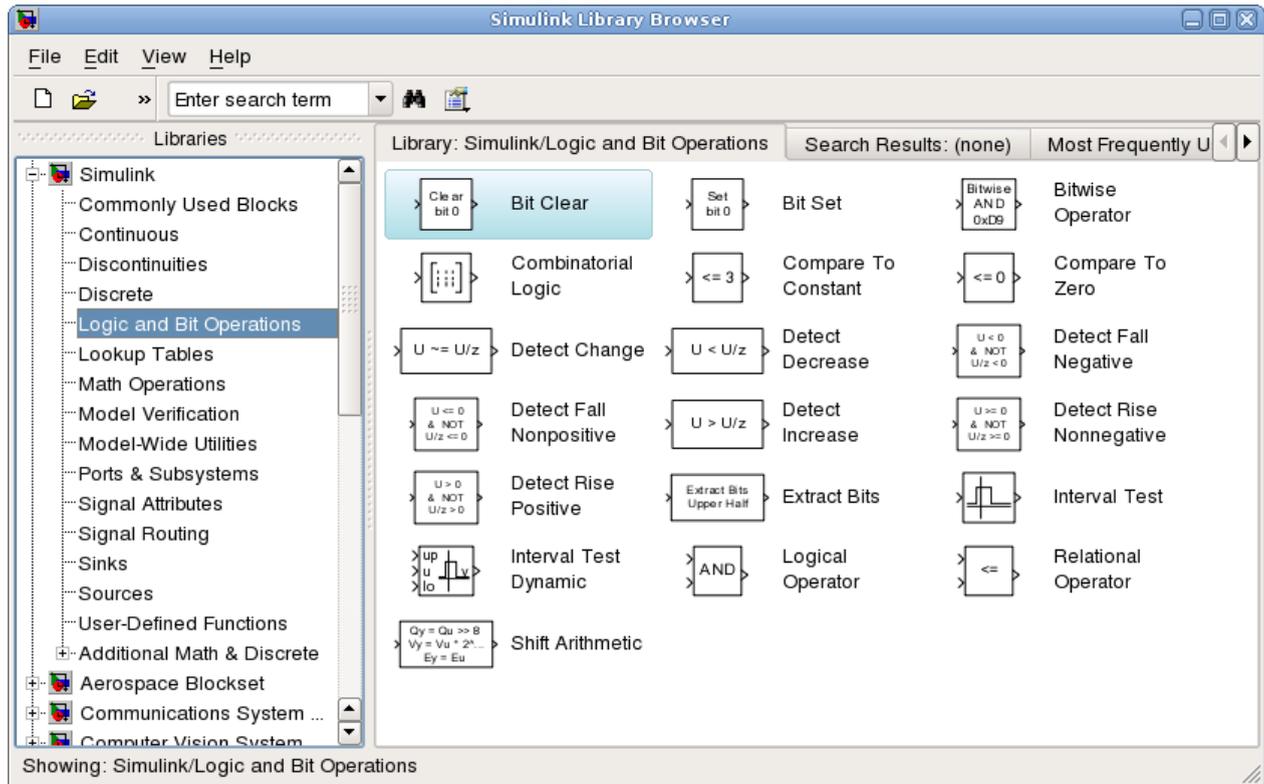


Рисунок 1.20 – Блоки логических операций

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.

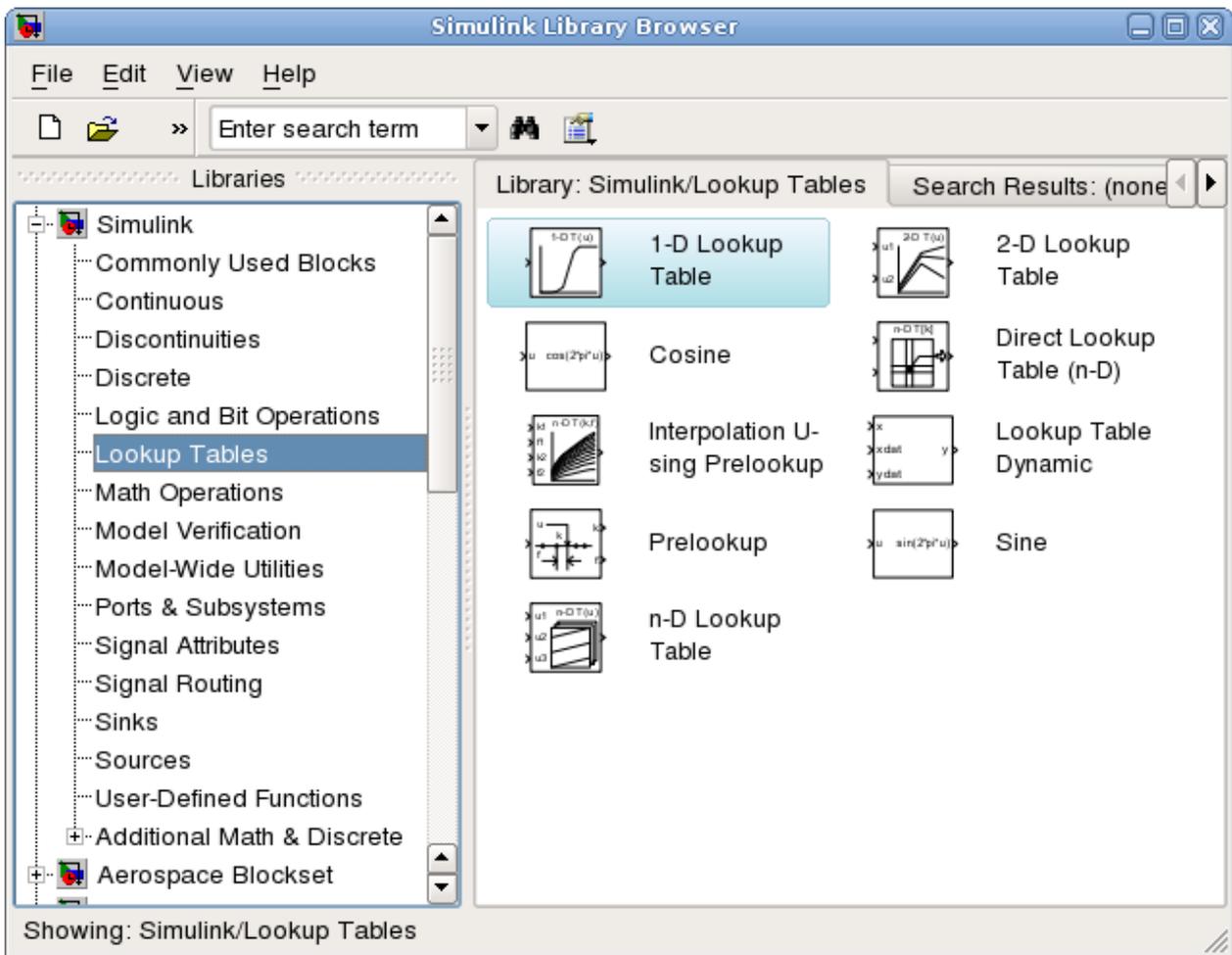


Рисунок 1.21 – Реализация таблиц истинности в Simulink

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.

В случае необходимости есть возможность самостоятельно создавать новые блоки (рис. 1.22). При двойном нажатии в модели левой кнопкой мыши по блоку *MATLAB Function* открывается окно *MATLAB Function Block Editor*, с описанием создаваемой функции (рис. 1.23). Для реализации простых выражений на языке MATLAB предназначен блок *Fcn*, позволяющий записать функциональное выражение зависимости выходного сигнала от входного.

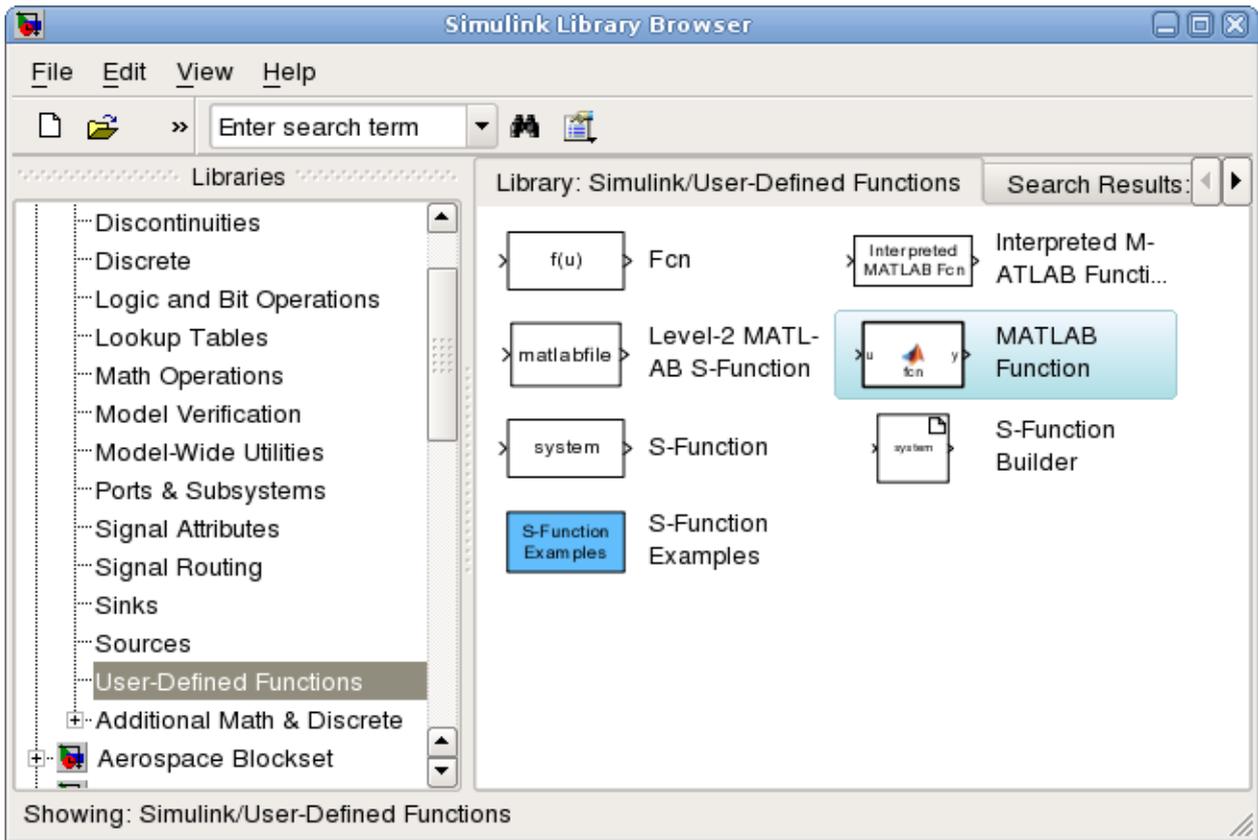


Рисунок 1.22 – Пользовательские блоки в Simulink

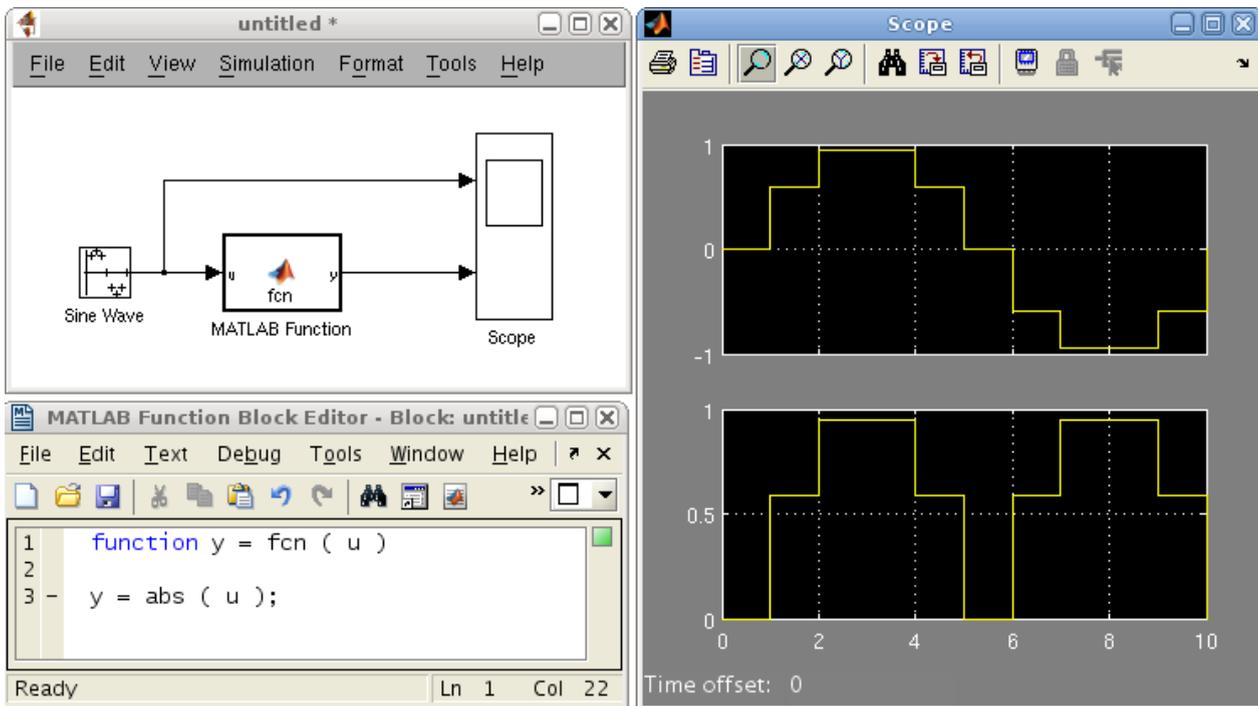


Рисунок 1.23 – Пример описания нового блока на языке MATLAB

При моделировании цифровых систем передачи информации используется библиотека *Communication System Toolbox*, на рисунке 1.24 показаны блоки формирования различных последовательностей (коды Баркера, Голда,

Касами и др.).

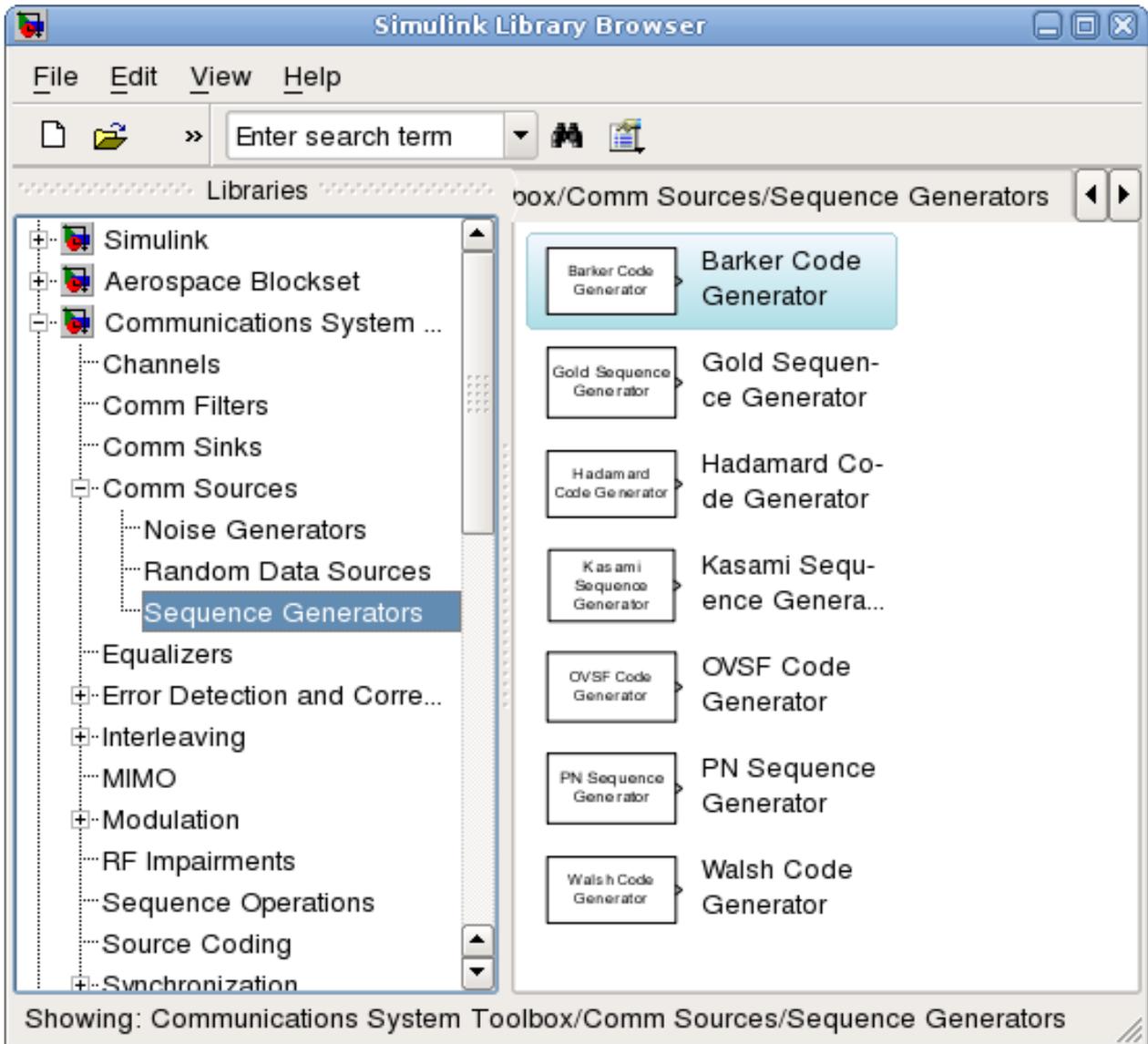


Рисунок 1.24 – Генераторы последовательностей библиотеки *Communication System Toolbox*

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. 1.25).

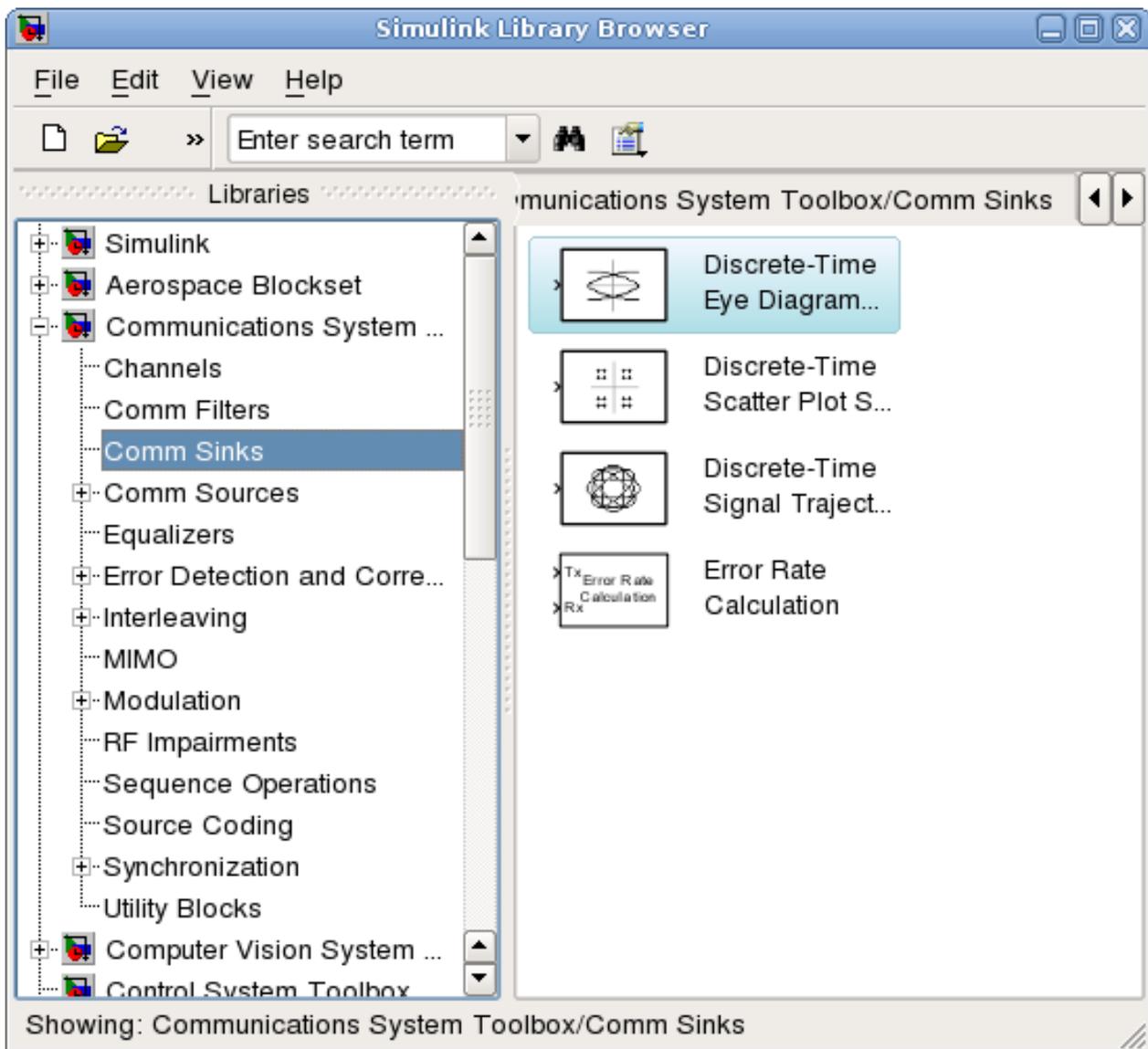


Рисунок 1.25 – Блоки анализа сигналов цифровых систем связи

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.

ажнейшие 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. 1.26).

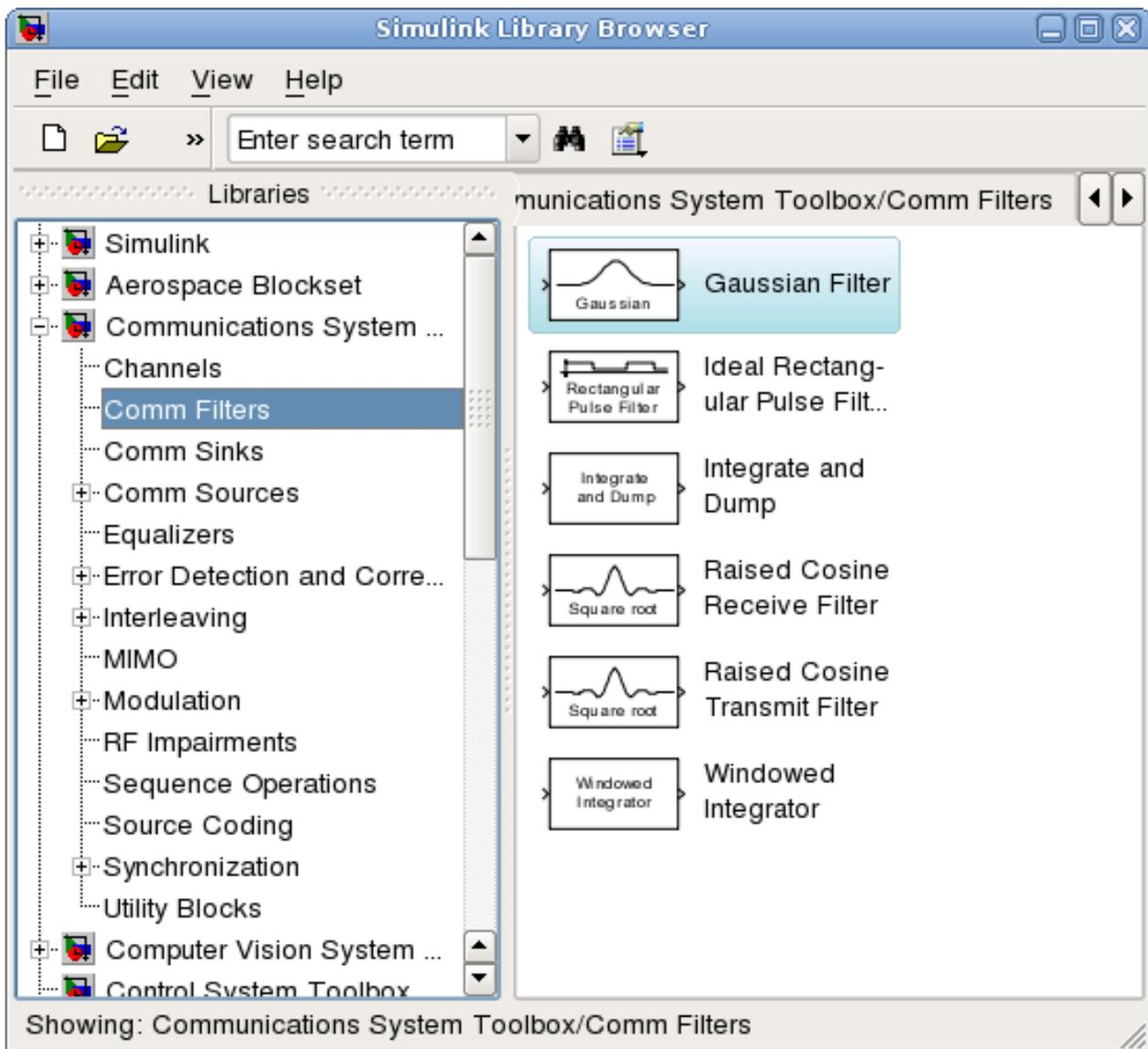


Рисунок 1.26 – Блоки формирования спектра и согласованной фильтрации сигнала

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

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

Одной из наиболее часто используемых библиотек Simulink является библиотека блоков цифровой обработки сигналов (*DSP System Toolbox*), показанная на рисунке 1.27.

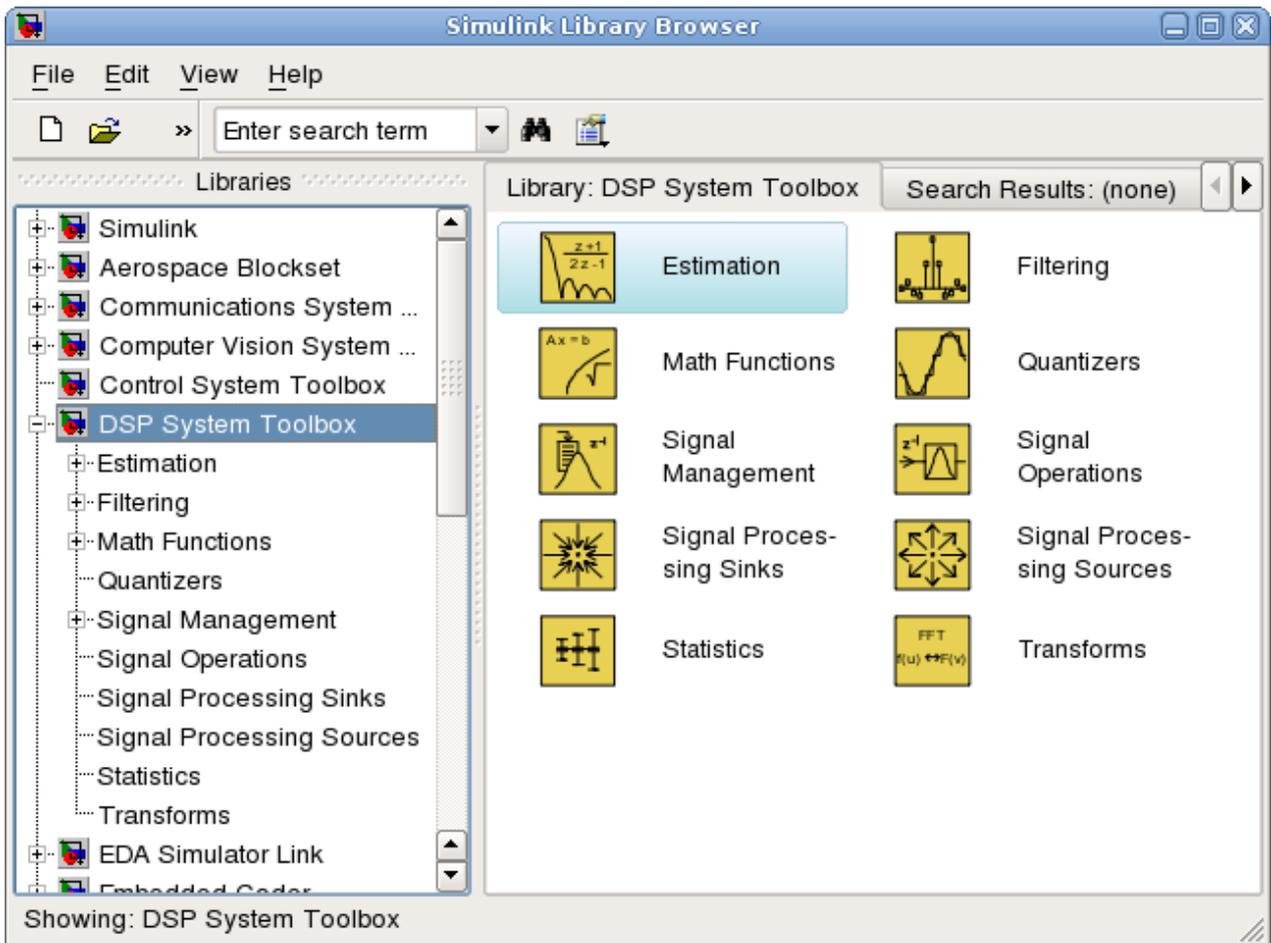


Рисунок 1.27 – Библиотека блоков цифровой обработки сигналов

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

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.

1.4 Примеры моделирования

Создайте новый проект и поместите на лист следующие блоки: *Gaussian Noise Generator*, *Digital Filter Design*, *Spectrum Scope* (рис. 1.28).

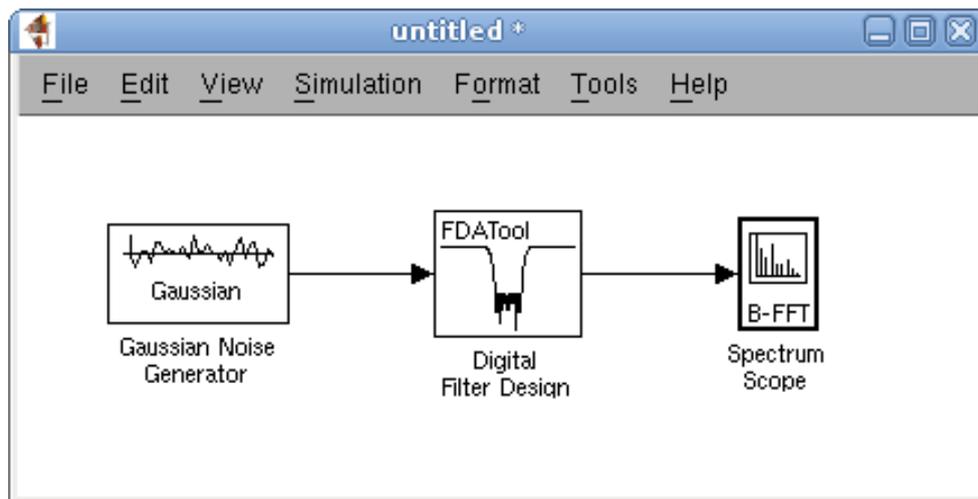


Рисунок 1.28 – Пример моделирования цифрового фильтра

В настройках генератора шума установите *Sample time* 1/100000 (рис. 1.29), что соответствует частоте дискретизации 100 кГц.

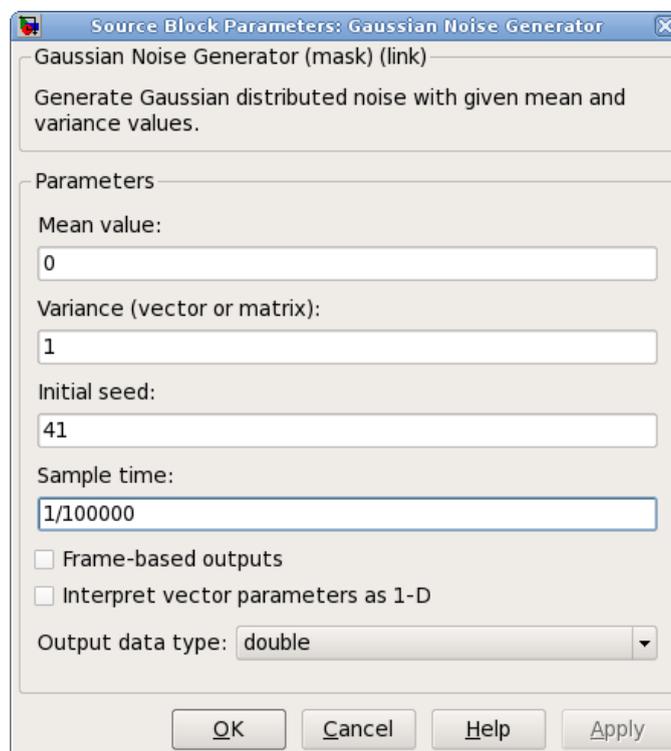


Рисунок 1.29 – Настройки генератора шума

Установите настройки блока цифровой фильтрации сигнала в соответствии с рисунком 1.30.

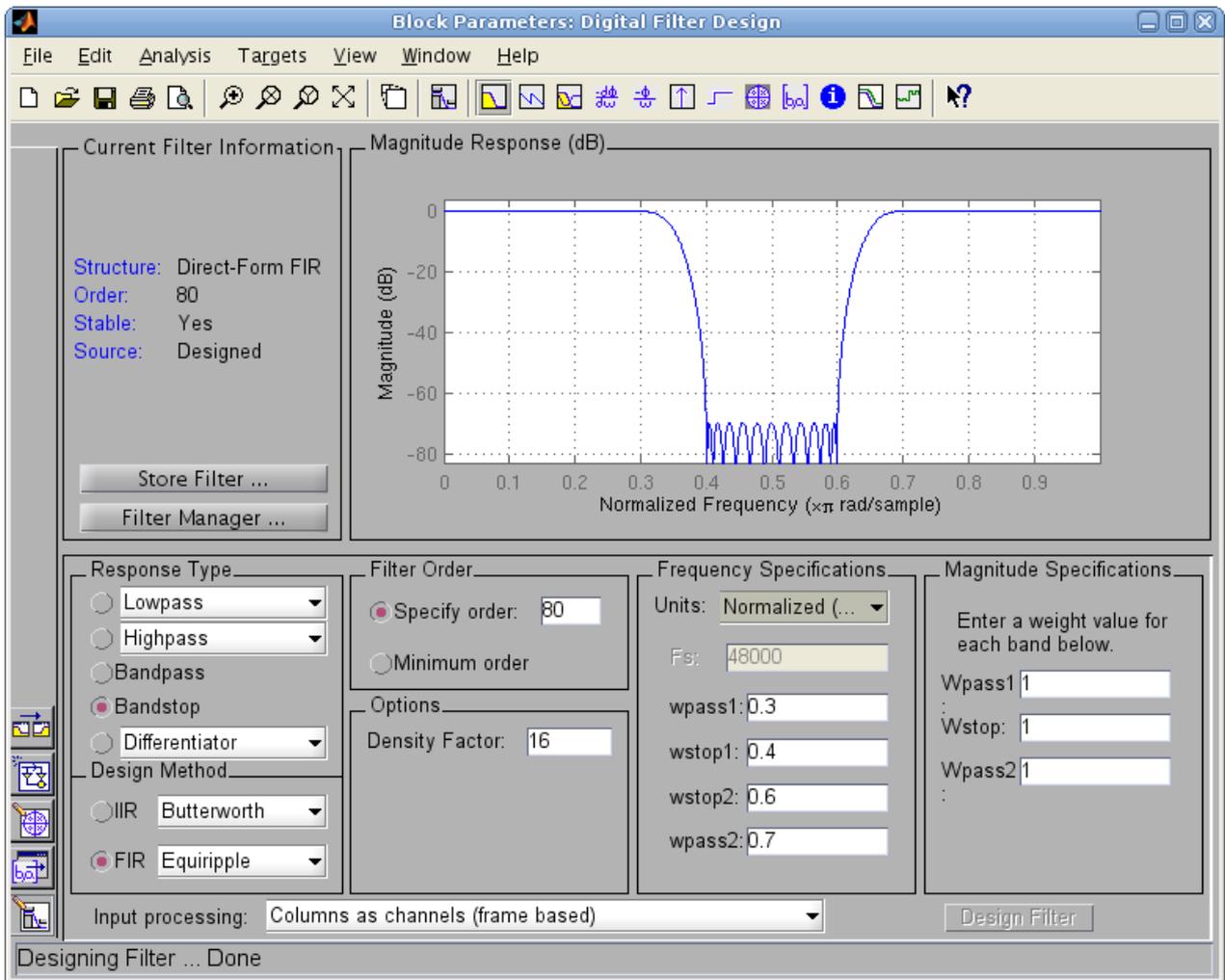


Рисунок 1.30 – Настройки блока цифровой фильтрации сигнала

Для примера выбран режекторный (*Bandstop*) фильтр с конечной импульсной характеристикой (*FIR*) 80-го порядка (*Specify order*), нормализованными частотами 0,3; 0,4; 0,6; 0,7. По нажатию кнопки *Design Filter* производится расчет фильтра (рис. 1.30).

На рисунке 1.31 показаны настройки блока анализатора спектра.

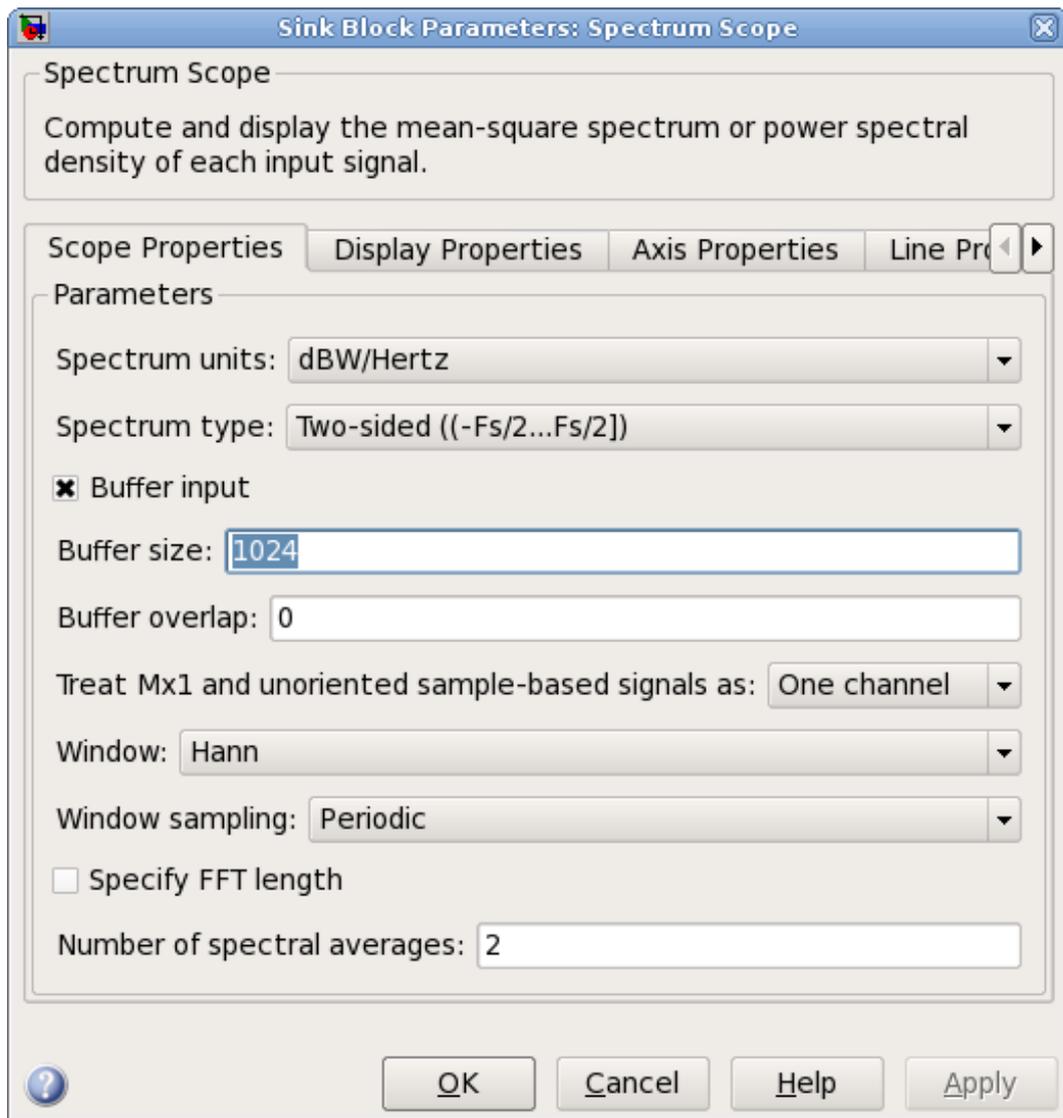


Рисунок 1.31 – Настройки блока анализатора спектра

В настройках анализатора спектра необходимо включить буферизацию входного сигнала (*Buffer input*) и установить размер буфера (*Buffer size*).

Запустите моделирование (*Simulation, Start*), автоматически откроется окно анализатора спектра. Нажмите правой кнопкой мыши в окне анализатора спектра, выберите пункт *Autoscale*. На экране должен отобразиться отфильтрованный спектр сигнала генератора белого шума (рис. 1.32). Как видно на рисунке, спектр повторяет амплитудно-частотную характеристику фильтра.

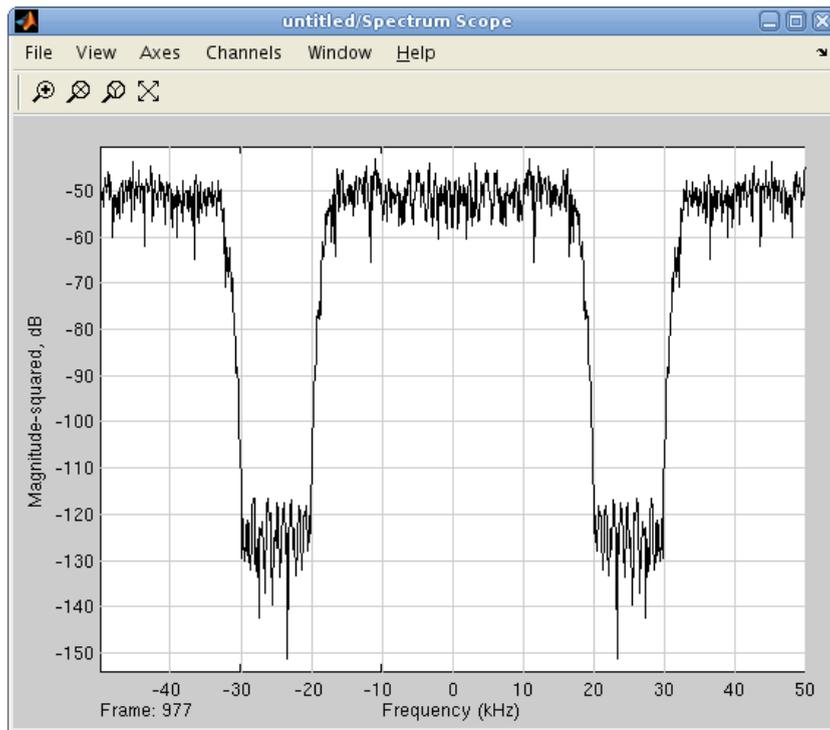


Рисунок 1.32 – Отфильтрованный спектр генератора белого шума

Дополните модель согласно рисунку 1.33.

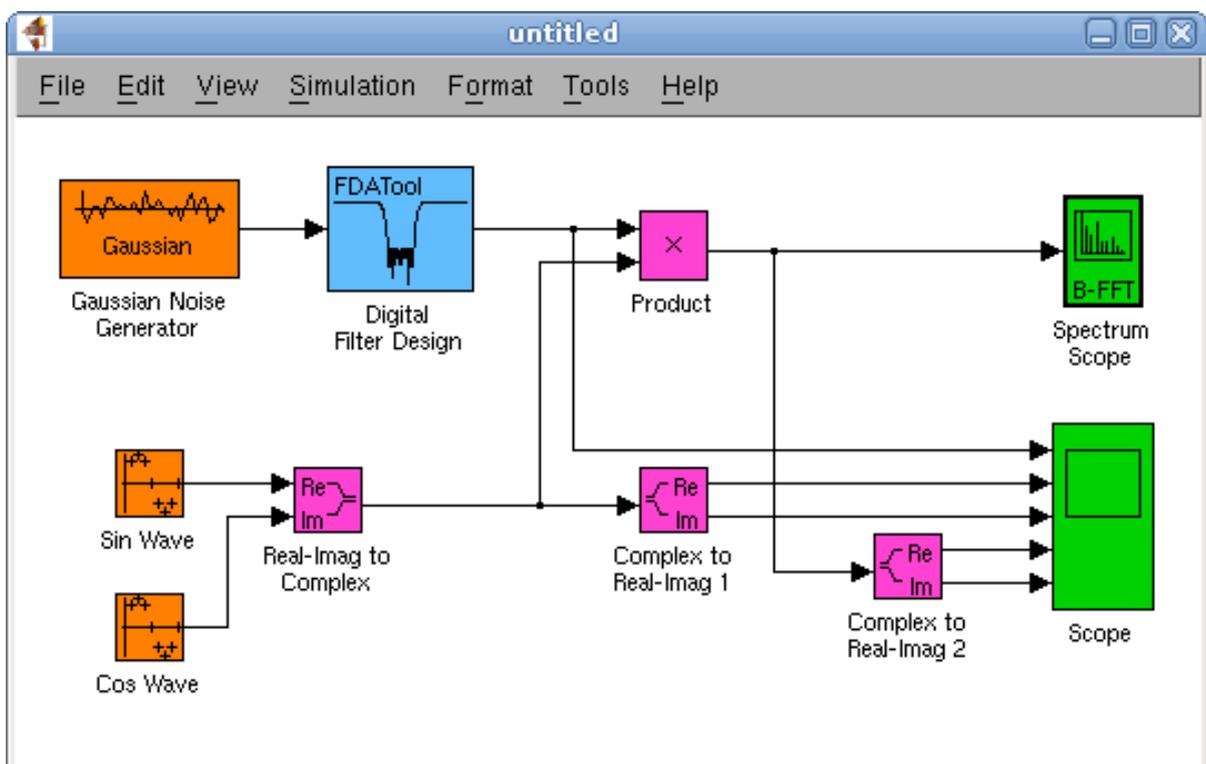


Рисунок 1.33 – Формирование комплексного сигнала и смещение спектра

Для визуального выделения блоков присутствует возможность изменения их цвета, для этого нужно нажать правой кнопкой мыши по блоку и вы-

брать цвет (*Background Color*).

Процесс формирования комплексного сигнала заключается в генерировании гармонических колебаний одной частоты со сдвигом фазы на 90° . Для этого используются блоки *Sine Wave*, настроенные соответствующим образом (рис. 1.34).

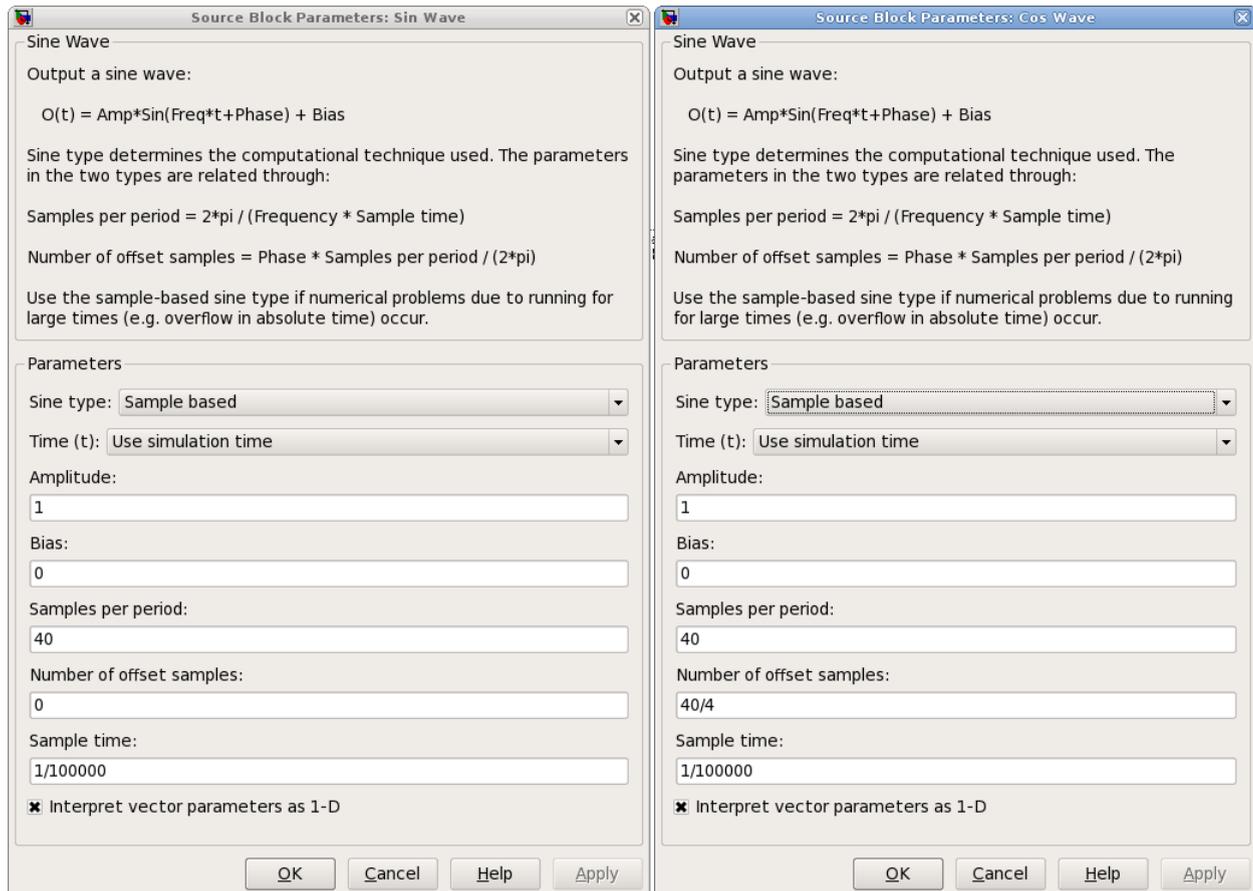


Рисунок 1.44 – Настройки формирователей сигналов комплексного генератора

При помощи блока *Real-Imag to Complex* из двух составляющих формируется комплексный сигнал. Блок *Product* выполняет перемножение сигналов, что в данном случае приводит к квадратурному переносу спектра. На рисунке 1.45 показаны осциллограммы сигналов модели, на рисунке 1.46 изображен смещенный спектр сигнала.

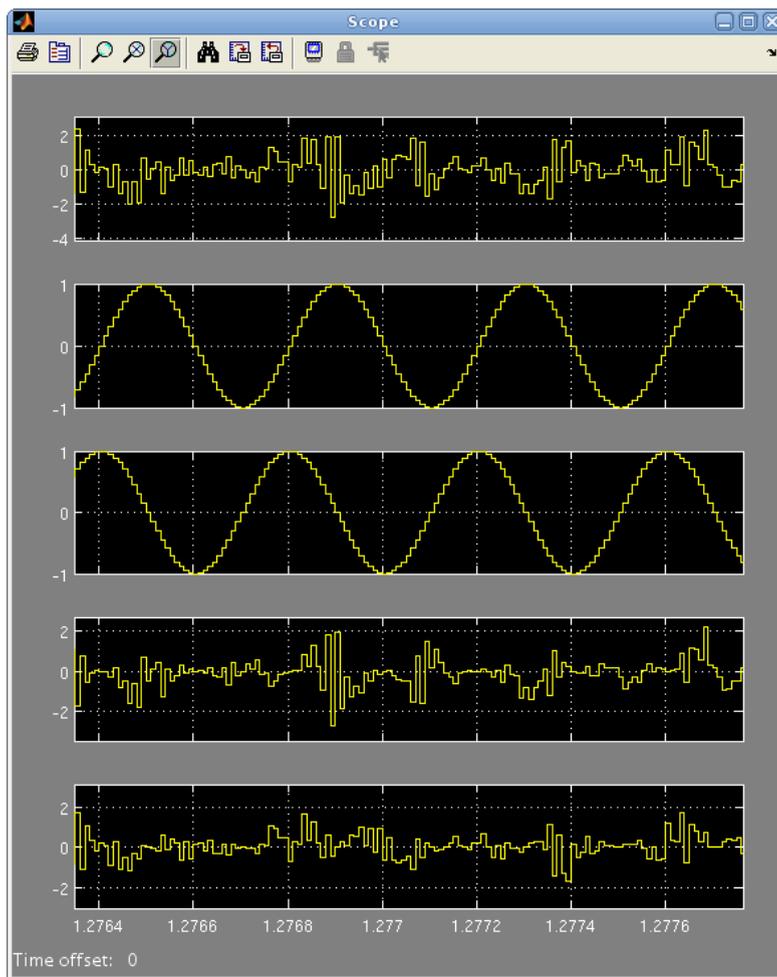


Рисунок 1.45 – Осциллограммы сигналов модели

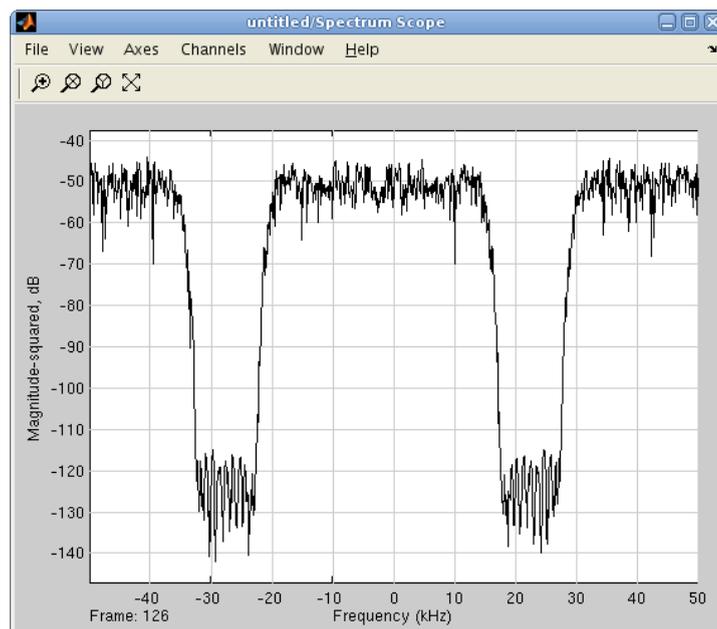


Рисунок 1.46 – Смещенный спектр сигнала

2 ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Практическая часть изучения курса выполняется в программном пакете блочного имитационного моделирования Simulink MATLAB версии R2011b. Для того чтобы открыть Simulink, зайдите в MATLAB и выполните в консоли команду *simulink* (рис. 2.1).

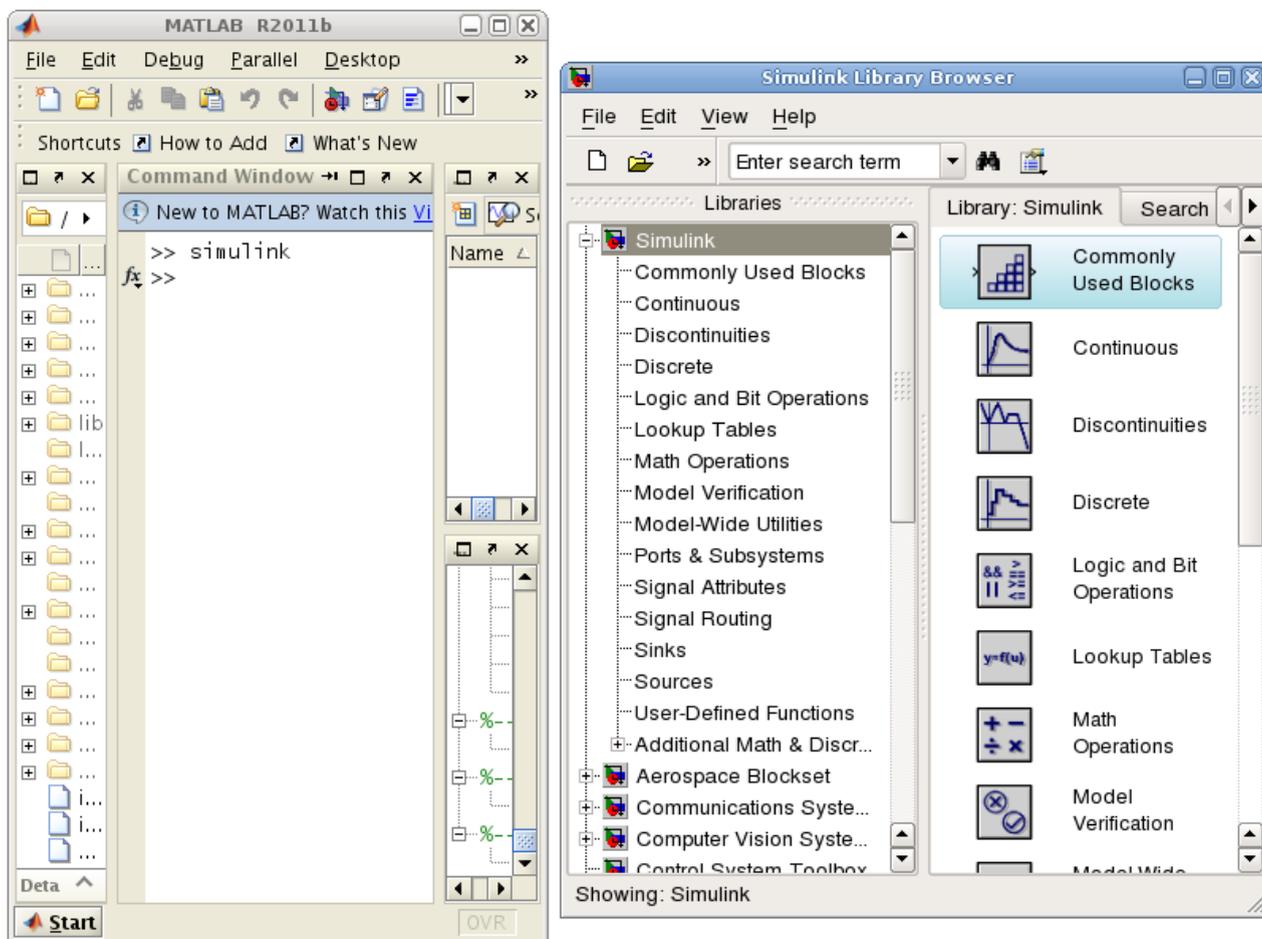


Рисунок 2.1 – Окно MATLAB и библиотека Simulink

Для создания новой модели нажмите *File, New, Model* (Ctrl+N). Необходимые элементы модели перетаскиваются из библиотеки в проект. Настройки моделирования задаются через *Simulation, Configuration Parameters* (Ctrl+E).

В процессе выполнения заданий необходимо использовать блоки из общего пакета (*Simulink*), *Communications System Toolbox* и *DSP System Toolbox*. Для поиска блоков необходимо использовать встроенный поиск (*Enter search term*). Основы работы в MATLAB Simulink приведены в разделе 1.

Лабораторная работа №1. Моделирование передающей части цифровой системы связи

Цель работы: изучение принципов формирования сигнала в системах цифровой связи.

Задачи работы: описание теоретической модели исследуемой системы передачи данных; создание модели передающего устройства цифровой системы связи в Simulink; моделирование работы системы при различных начальных условиях; измерение основных параметров работы передающей системы.

Исходные данные для работы приведены в таблице 2.1. Вариант выбирается согласно последней цифре зачетной книжки или назначается преподавателем.

Исходные данные

Таблица 2.1

Вариант	Вид манипуляции	Позиционность созвездия	Кратность созвездия
0	BPSK	2	1
1	QPSK	4	2
2	8PSK	8	3
3	16PSK	16	4
4	32PSK	32	5
5	16QAM	16	4
6	32QAM	32	5
7	64QAM	64	6
8	128QAM	128	7
9	256QAM	256	8

Для выполнения задания необходимо использовать следующие блоки:

Random Integer Generator – генератор случайных целых чисел;

1-D Lookup Table – таблица соответствий (истинности);

Raised Cosine Transmit Filter – формирующий фильтр с характеристикой корень из приподнятого косинуса;

Gain – усилитель сигнала;

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

Scope – осциллограф;

Discrete-Time Eye Diagram Scope – блок отображения глазковой диаграммы сигнала;

Discrete-Time Signal Trajectory Scope – блок отображения траектории вектора комплексной огибающей сигнала на плоскости;

Discrete-Time Scatter Plot Scope – блок отображения диаграммы рассеяния сигнала;

Subsystem – подсистема, позволяет оформить часть модели в виде отдельного блока;

Spectrum Scope – анализатор спектра сигнала.

Из указанных блоков необходимо собрать модель, показанную на рисунке 2.2. *Modulator* – подсистема формирователя сигнала цифрового передатчика (рис. 2.3).

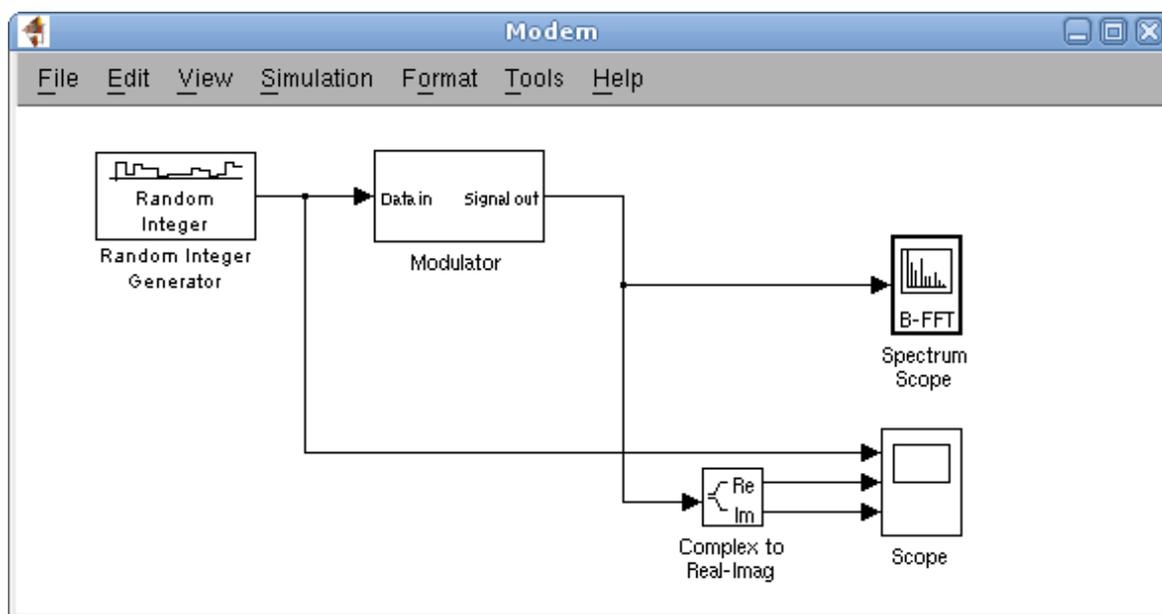


Рисунок 2.2 – Общий вид модели передающей системы

В настройках генератора случайных чисел необходимо задать позиционность созвездия (*M-ary number*) согласно варианту и частоту дискретизации (*Sample Time*) $1/9600$, что соответствует символьной скорости передачи данных 9600 бод/сек. В настройках анализатора спектра (*Spectrum Scope*) необходимо выставить размер окна БПФ 1024 и включить буферизацию входного сигнала с размером буфера 1024 отсчета. Входными сигналами осциллографа являются сигнал данных и составляющие выходного комплексного сигнала передатчика, которые выделяются при помощи блока *Complex to Real-Imag*.

На рисунке 2.3 показана модель формирователя сигнала. В настройках таблицы истинности (*1-D Lookup Table*) необходимо указать соответствие между вектором входных символов и точками сигнального созвездия. В строке *Breakpoints* укажите вектор входных символов согласно позиционности созвездия, например, для QAM16: [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15]. В строке *Table Data* укажите точки созвездия, соответствующие входным символам, для QAM16 это: [$-3+3*i$ $-3+1*i$ $-3-3*i$ $-3-1*i$ $-1+3*i$ $-1+1*i$ $-1-3*i$ $-1-1*i$ $+3+3*i$ $+3+1*i$ $+3-3*i$ $+3-1*i$ $+1+3*i$ $+1+1*i$ $+1-3*i$ $+1-1*i$]. Для манипуляций высокого порядка необходимо использовать методы автоматической генерации векторов в MATLAB, например [0 : 1 : 255] и т. п.

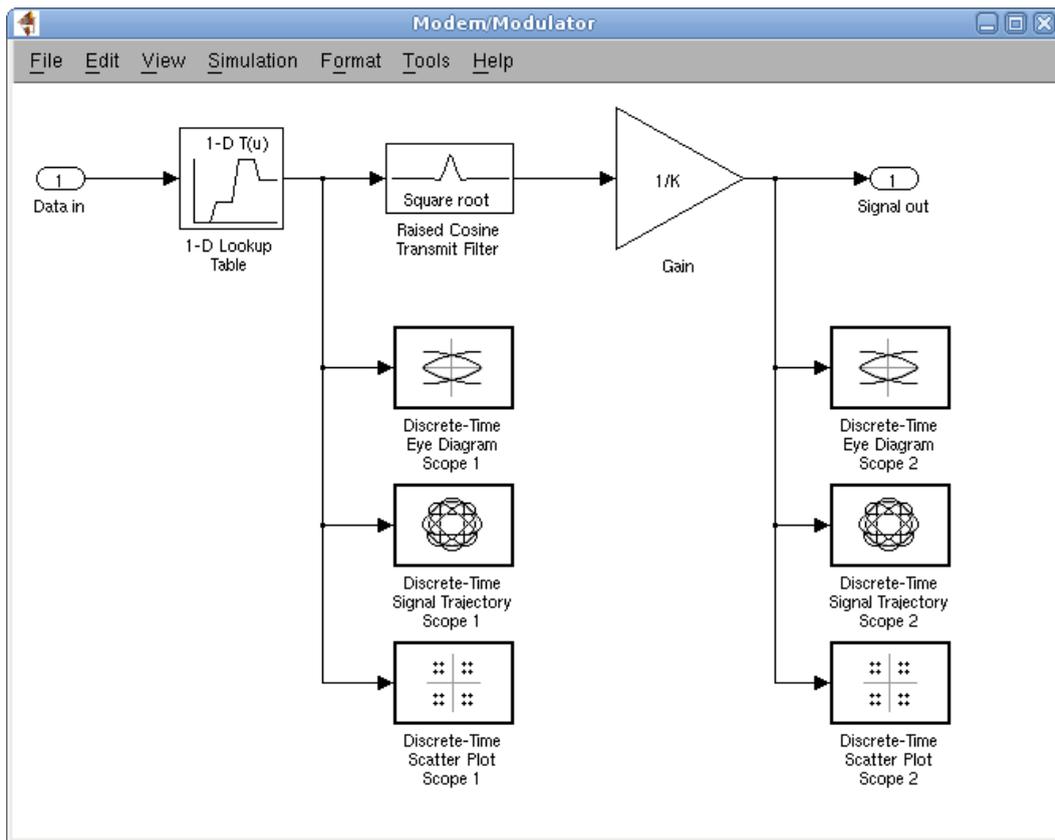


Рисунок 2.3 – Формирователь сигнала

Ограничение спектра сигнала выполняется при помощи формирующего фильтра с характеристикой корень из приподнятого косинуса (рис. 2.3) со следующими настройками: тип фильтра (*Filter Type*) – корень из приподнятого косинуса (*Square Root*); групповая задержка, определяющая длину ИХ фильтра, (*Group Delay*) – 5 символов; коэффициент скругления (*Rolloff Factor*) – 0.8; коэффициент повышения частоты дискретизации (*Upsampling factor*) – 8; характер обработки сигнала (*Input Processing*) – *sample based*.

Комплексный сигнал с выхода формирующего фильтра поступает на усилитель, в котором выполняется его нормировка. Коэффициент передачи усилителя равен $1/K$, где

$$K = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |s_i|^2},$$

где N – позиционность созвездия.

Для исследования процессов формирования сигнала необходимо использовать блоки отображения глазковых диаграмм, блоки отображения траектории вектора комплексной огибающей и блоки отображения диаграммы рассеяния (рис. 2.4).

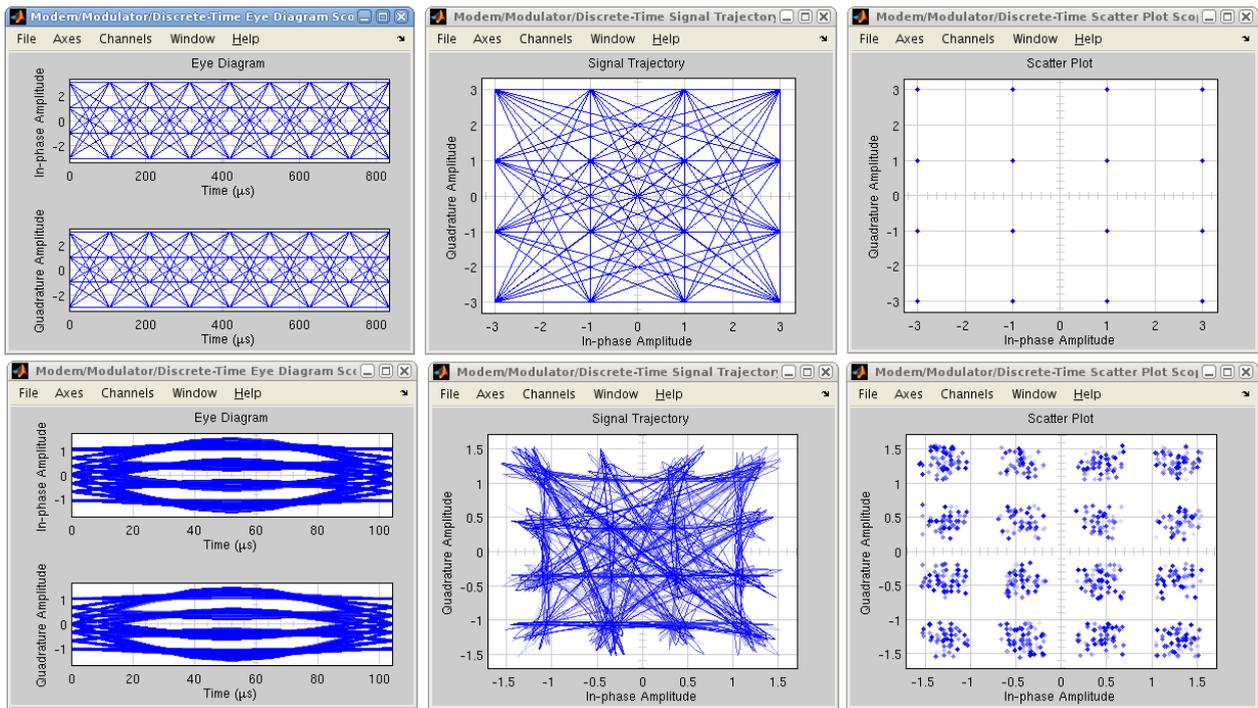


Рисунок 2.4 – Блоки отображения информации о сигналах

На рисунке 2.5 показан пример работы анализатора спектра.

При помощи трехканального осциллографа имеется возможность сопоставить сигнал данных и компоненты сигнала комплексной огибающей (рис. 2.6).

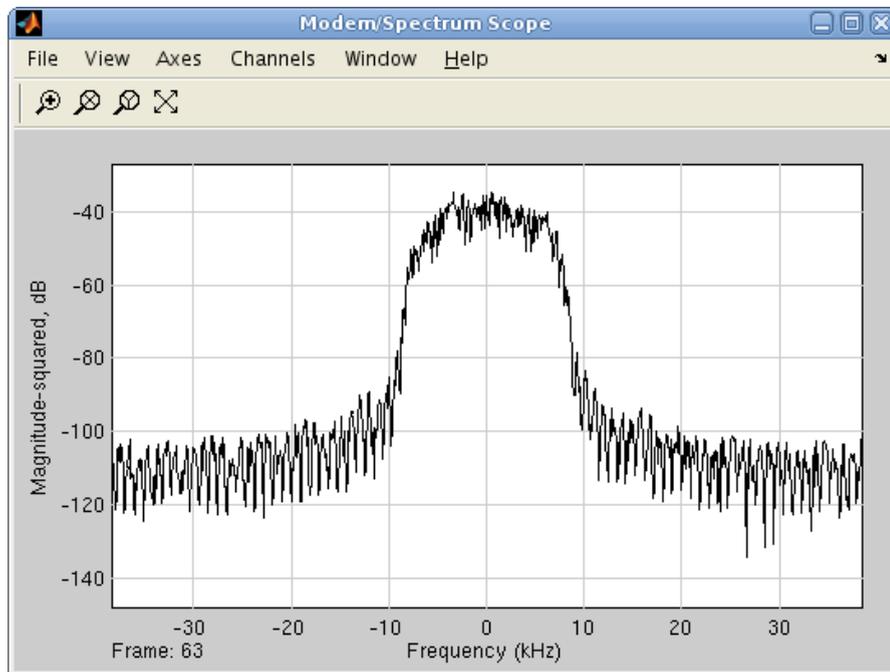


Рисунок 2.5 – Спектр формируемого сигнала

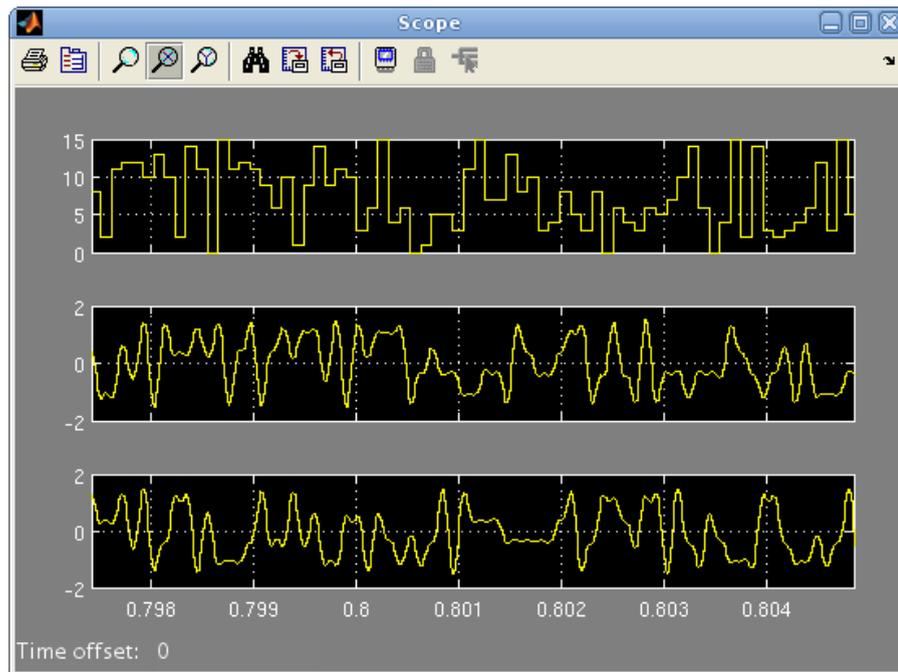


Рисунок 2.6 – Осциллограммы шины данных и комплексной огибающей сформированного сигнала

Порядок выполнения работы:

- 1) Согласно приведенным выше рисункам, создайте модель передатчика в Simulink, убедитесь в ее работоспособности.
- 2) Установите коэффициент скругления формирующего фильтра равным 0 и запустите модель. Сохраните для отчета все графики, полученные в ходе моделирования. Произведите оценку ширины спектра сигнала, крутизны скатов, уровня первого бокового лепестка и занесите эти данные в таблицу. При помощи осциллографа оцените амплитуду квадратурных составляющих для внешних точек сигнального созвездия (точек с максимальной амплитудой) и для внутренних (точек с минимальной амплитудой). Занесите полученные данные в таблицу, найдите отношение максимального значения к минимальному.
- 3) Повторите задание пункта 2 для коэффициентов скругления фильтра 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 и 1.
- 4) По результатам выполнения моделирования составьте отчет, который должен содержать: цели и задачи работы, вид модели в Simulink, графики, полученные при выполнении пунктов 2 и 3, выводы по результатам моделирования.

Список тем для подготовки к защите:

- 1) Общая структура систем цифровой связи.
- 2) Структурная схема передатчика цифровой системы связи, варианты реализации.
- 3) Дискретизация и квантование сигнала.
- 4) Кодирование источника.

- 5) Канальное кодирование.
- 6) Теорема Шеннона.
- 7) Предел Шеннона.
- 8) Формирователь комплексной огибающей сигнала (модулятор).
- 9) Амплитудная манипуляция. Частотная манипуляция. Сигнальные созвездия BPSK, QPSK, QAM16, 8PSK. Характеристики и сравнение различных видов цифровой модуляции.
- 10) Квадратурный модулятор.
- 11) Передача данных в канале с ограниченной полосой.
- 12) Теорема Найквиста о МСИ.
- 13) Идеальный фильтр Найквиста. Взаимное влияние импульсов при передаче через фильтр Найквиста.
- 14) Формирующий фильтр системы связи. Фильтр приподнятого косинуса и его характеристики.
- 15) Глазковая диаграмма. Диаграмма рассеяния.

Лабораторная работа №2. Моделирование канала связи

Цель работы: исследование явлений, возникающих в канале связи системы передачи цифровой информации.

Задачи работы: описание теоретических моделей процессов, происходящих в канале связи; моделирование канала связи в Simulink.

Для выполнения задания необходимо использовать следующие блоки:

AWGN Channel – канал с АБГШ;

Phase/Frequency Offset – блок, осуществляющий фазовый и частотный сдвиг входного сигнала;

Variable Fractional Delay – блок дробной задержки сигнала;

Constant – источник неизменяемого сигнала (константа);

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

Scope – осциллограф;

Discrete-Time Eye Diagram Scope – блок отображения глазковой диаграммы сигнала;

Discrete-Time Signal Trajectory Scope – блок отображения траектории вектора комплексной огибающей сигнала на плоскости;

Discrete-Time Scatter Plot Scope – блок отображения диаграммы рассеяния сигнала;

Subsystem – подсистема, позволяющая оформить часть модели в виде отдельного блока;

Spectrum Scope – анализатор спектра сигнала.

Для моделирования канала связи в Simulink необходимо создать отдельную подсистему (*Subsystem*) и подключить ее к выходу передатчика (рис.

2.7).

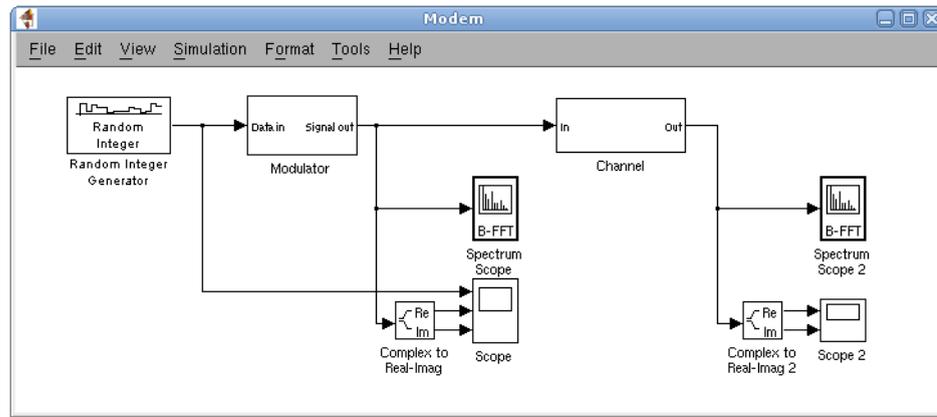


Рисунок 2.7 – Цифровой передатчик и канал системы связи

Модель канала связи показана на рисунке 2.8, она включает в себя блок добавления к сигналу АБГШ, блок частотного и фазового сдвига и блок дробной задержки, которая задается константой.

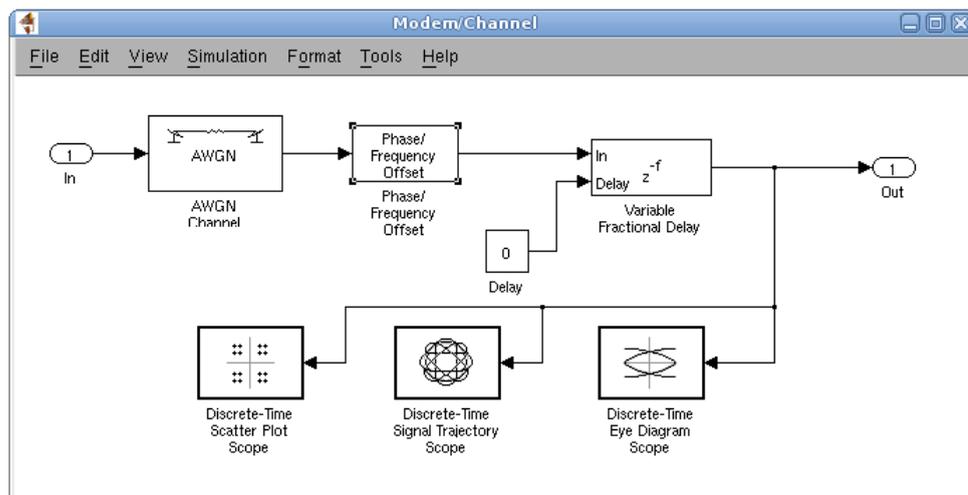


Рисунок 2.8 – Модель канала связи

В настройках блока *AWGN Channel* выберите режим (*Mode*) *SNR* и задайте отношение сигнал/шум 13 дБ. Установите нулевой фазовый (*Phase offset*) и частотный сдвиг (*Frequency offset*) сигнала в настройках блока *Phase/Frequency Offset*. Выберите режим линейной интерполяции (*Interpolation mode - Linear*) в блоке дробной задержки *Variable Fractional Delay*. Запустите модель и при помощи блоков отображения информации о сигнале убедитесь в ее работоспособности. На рисунке 2.9 показаны графики сигнала с воздействием АБГШ. Как видно на верхних рисунках, даже в отсутствие шума точки созвездия размыты, что связано с отсутствием согласованной фильтрации сигнала. Добавление шума в канал связи приводит к еще большему размытию точек созвездия. На рисунке 2.10 показано влияние частотного рассогласования на сигнал, в результате которого созвездие начинает вращаться. Также частотный сдвиг сигнала можно наблюдать на анализаторе спектра (рис.

2.11). Дробная задержка в канале связи, как и фазовое рассогласование, приводят к повороту сигнального созвездия (рис. 2.12). В силу отсутствия петли слежения за символьной частотой демодуляция сигнала становится невозможной.

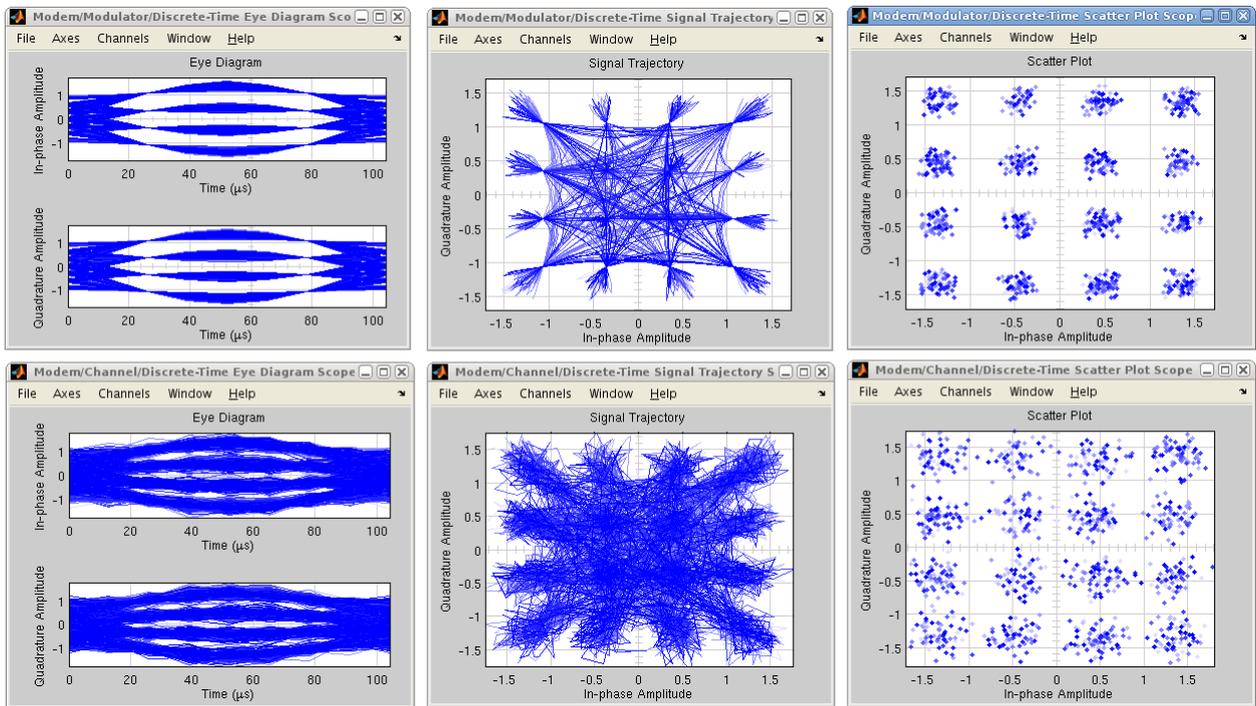


Рисунок 2.9 – Влияние воздействия на сигнал АБПС

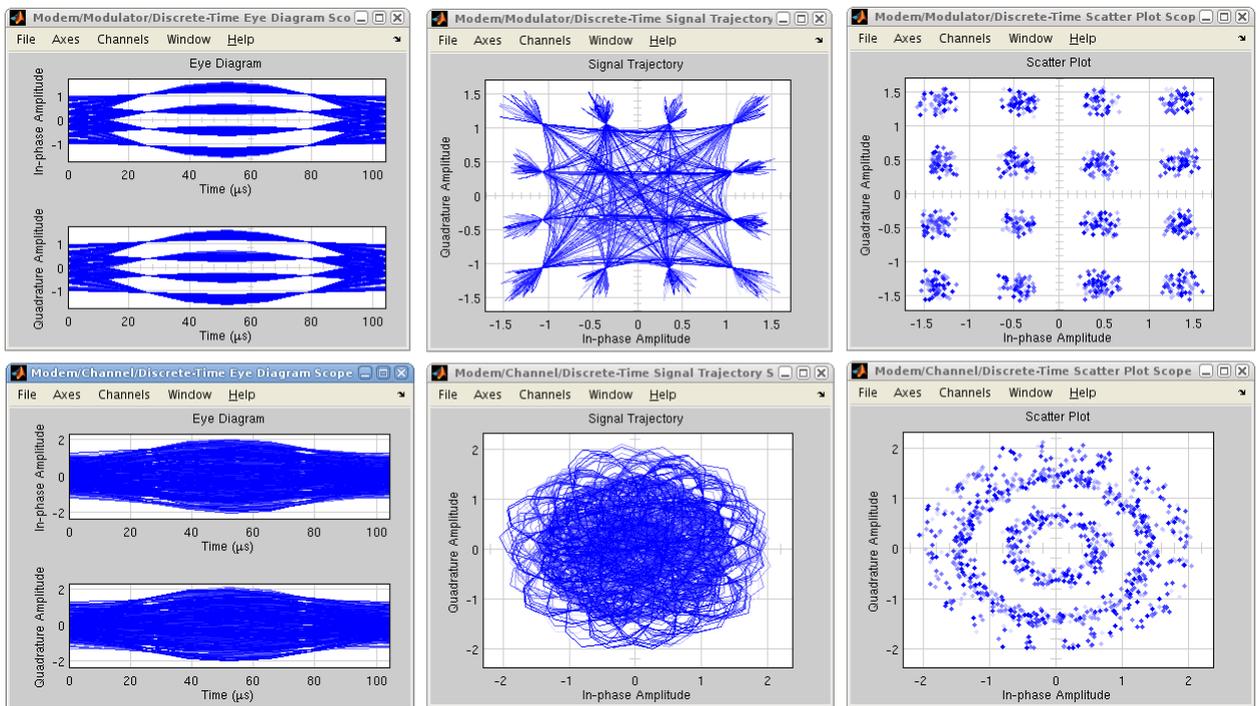


Рисунок 2.10 – Влияние частотного рассогласования

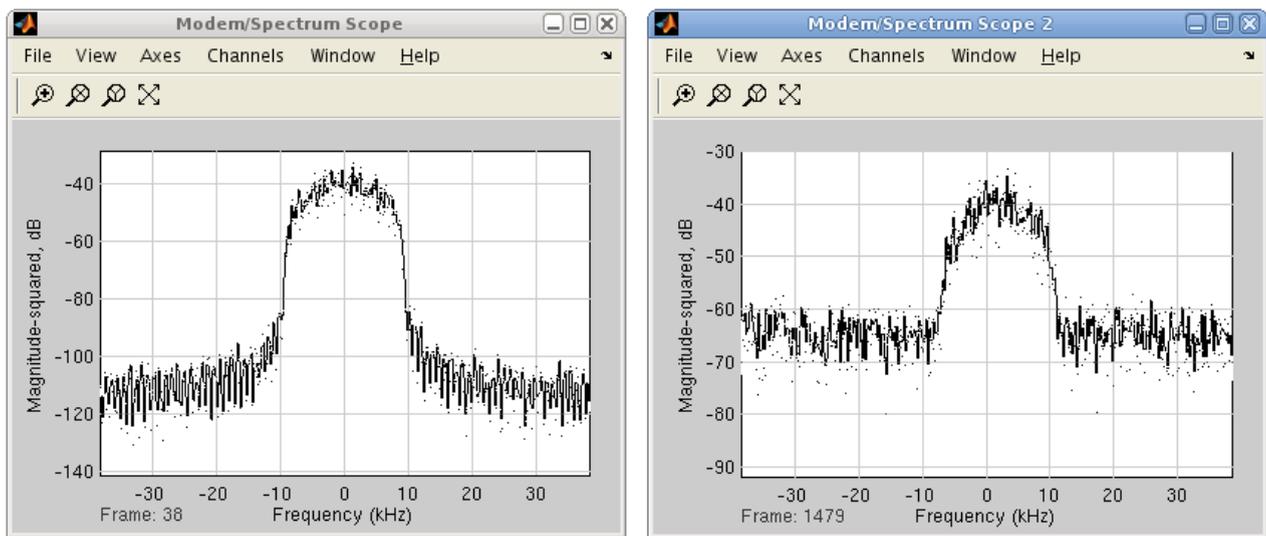


Рисунок 2.11 – Воздействие на сигнал АБГШ и смещение спектра

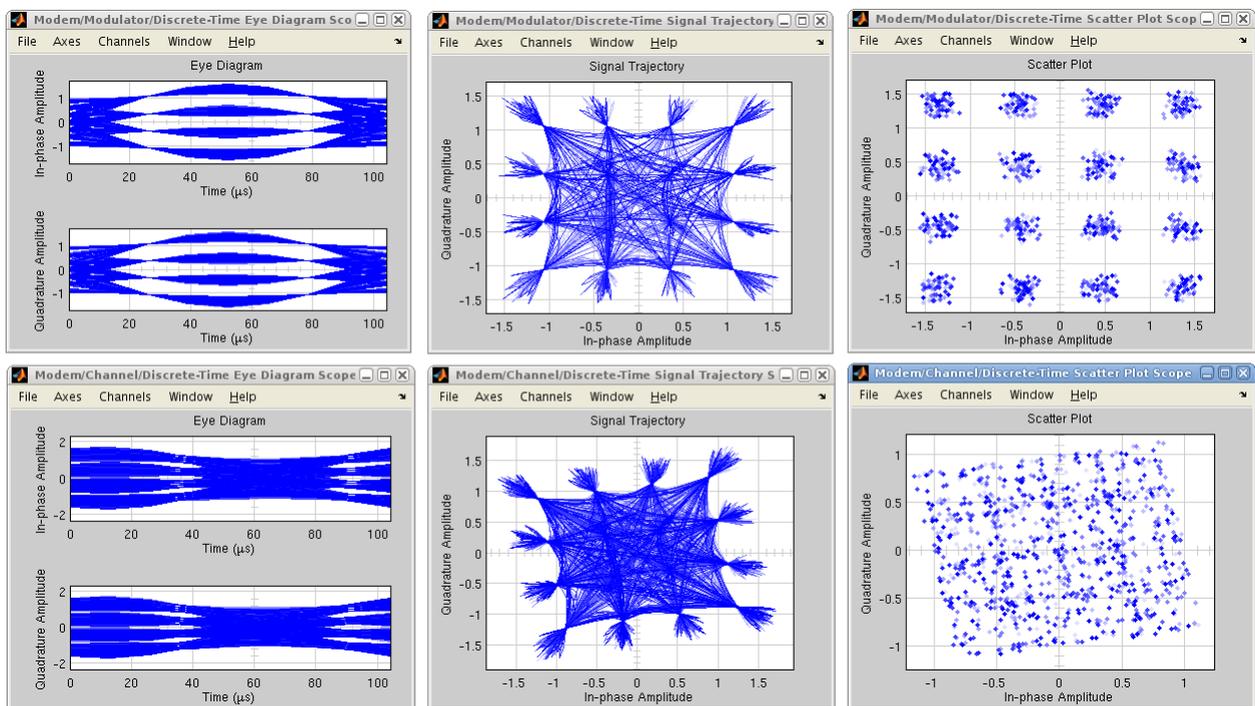


Рисунок 2.12 – Дробная задержка

Порядок выполнения работы:

1) Согласно приведенным выше рисункам и описанию, создайте модель канала связи в Simulink, подключите ее к передатчику и убедитесь в ее работоспособности.

2) Установите нулевое частотное и фазовое рассогласование. Задайте нулевую дробную задержку в канале связи. Проведите моделирование при отношениях сигнал/шум 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 дБ. Оцените значение ОСШ,

при котором различение точек в созвездии становится невозможным. Проведите дополнительно 6 измерений возле этого значения. Сохраните для отчета все графики, полученные в ходе моделирования.

3) Установите ОСШ в канале равным 100 дБ. Задайте нулевую дробную задержку. Проведите моделирование при фазовом рассогласовании 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 270° и 360° . Проведите моделирование при частотном рассогласовании, равном 10 Гц, 100 Гц, 1 кГц, 3 кГц. Сохраните для отчета все графики, полученные в ходе моделирования.

4) Установите ОСШ в канале равным 100 дБ. Задайте нулевое частотное и фазовое рассогласование. Проведите моделирование при дробной задержке, равной 0.1, 0.5, 1, 2, 3. Сохраните для отчета все графики, полученные в ходе моделирования.

5) По результатам выполнения моделирования составьте отчет, который должен содержать: цели и задачи работы, вид модели в Simulink, графики, полученные при выполнении пунктов 2, 3 и 4, выводы по результатам моделирования.

Список тем для подготовки к защите:

- 1) Общие вопросы моделирования канала связи.
- 2) Затухание сигнала в канале связи.
- 3) Воздействие АБГШ на сигнал.
- 4) Частотный и фазовый сдвиг сигнала.
- 5) Задержка в канале связи (дискретная, дробная, аналоговая).
- 6) Многолучевое распространение сигнала.

Лабораторная работа №3. Моделирование приемной части цифровой системы связи

Цель работы: изучение основ работы приемников цифровых систем связи.

Задачи работы: описание теоретических моделей процессов, происходящих в приемниках цифровых систем связи; моделирование системы связи в Simulink.

Для моделирования приемной части системы связи необходимо использовать следующие блоки Simulink:

Error Rate Calculator – блок подсчета количества ошибок при приеме информации;

Display – блок отображения информации (сигналов);

To Workspace – блок вывода данных в среду MATLAB;

Gain – усилитель сигнала;

Raised Cosine Receive Filter – приемный фильтр с характеристикой при-

поднятого косинуса;

Downsample – блок понижения частоты дискретизации;

Add – блок суммирования/вычитания сигналов;

Constant – источник неизменяемого сигнала (константа);

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

Product – блок перемножения/деления сигналов;

Minimum – блок поиска минимального значения вектора/матрицы сигналов;

n-D Lookup Table – блок n -размерной таблицы соответствий (таблицы истинности);

Scope – осциллограф;

Discrete-Time Eye Diagram Scope – блок отображения глазковой диаграммы сигнала;

Discrete-Time Signal Trajectory Scope – блок отображения траектории вектора комплексной огибающей сигнала на плоскости;

Discrete-Time Scatter Plot Scope – блок отображения диаграммы рассеяния сигнала;

Subsystem – подсистема, позволяющая оформить часть модели в виде отдельного блока;

Spectrum Scope – анализатор спектра сигнала.

На рисунке 2.13 показан вид законченной модели системы цифровой связи в Simulink.

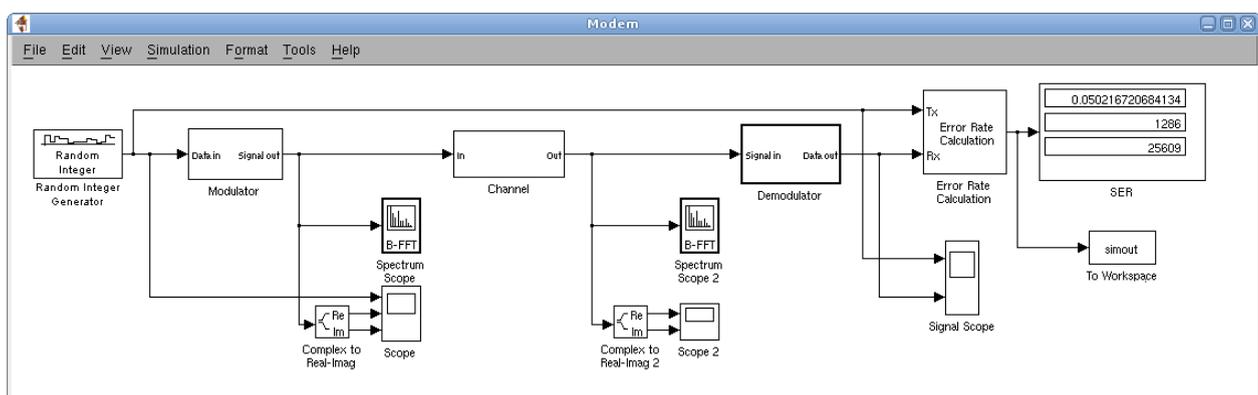


Рисунок 2.13 – Законченная модель системы цифровой связи

Блок приемной части модели системы связи показан на рисунке 2.14. Коэффициент усиления *Gain* выбирается обратным коэффициенту усиления в передатчике. Согласованная фильтрация сигнала выполняется при помощи фильтра с характеристикой корень из приподнятого косинуса (*Raised Cosine Receiver Filter*) со следующими настройками: тип фильтра (*Filter Type*) – корень из приподнятого косинуса (*Square Root*); количество входных отсчетов на один символ (*Input samples per symbol (N)*) – 8; групповая задержка, определяющая длину ИХ фильтра, (*Group Delay*) – 5 символов; коэффициент

скругления (*Rolloff Factor*) – 0.8; коэффициент понижения частоты дискретизации (*Output Mode*) – *None*; характер обработки сигнала (*Input Processing*) – *sample based*. Перед понижением частоты дискретизации блоком *Downsample* сигнал выводится на блок отображения глазковой диаграммы и блок отображения траектории вектора комплексной огибающей сигнала.

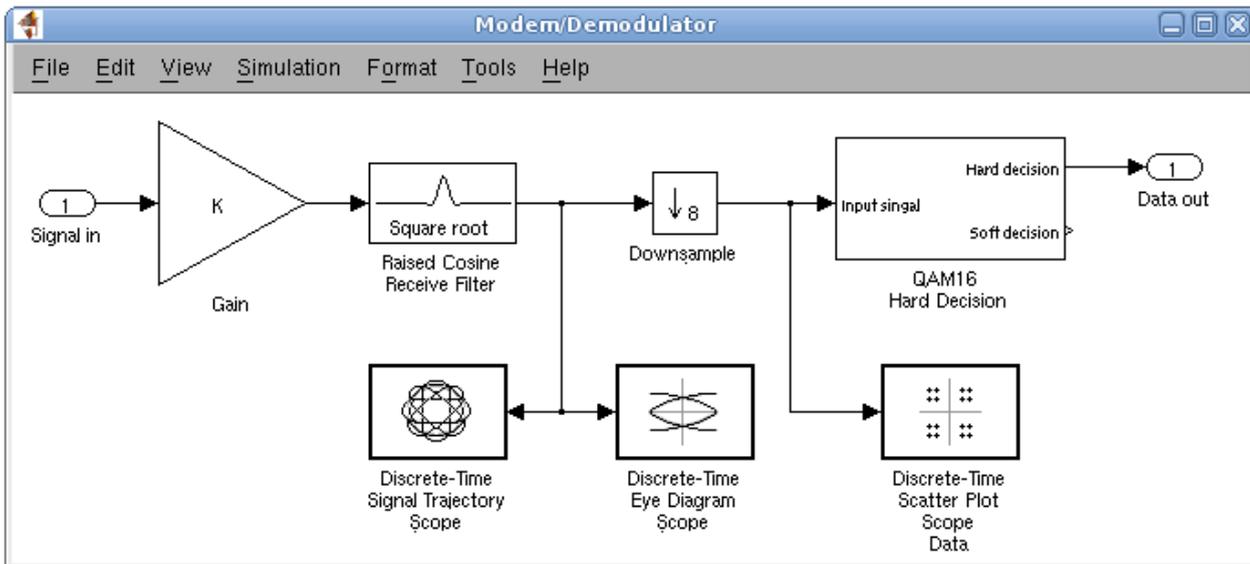


Рисунок 2.14 – Согласованная фильтрация и децимация сигнала

Демодуляция сигнала осуществляется на основе подсчета метрик (рис. 1.37) и выполняется в виде универсального демодулятора (рис. 2.15). Матрица (вектор) созвездия задается при помощи константы (*Constellation* на рис. 2.15). Поиск минимального значения метрики осуществляется при помощи блока *Minimum*.

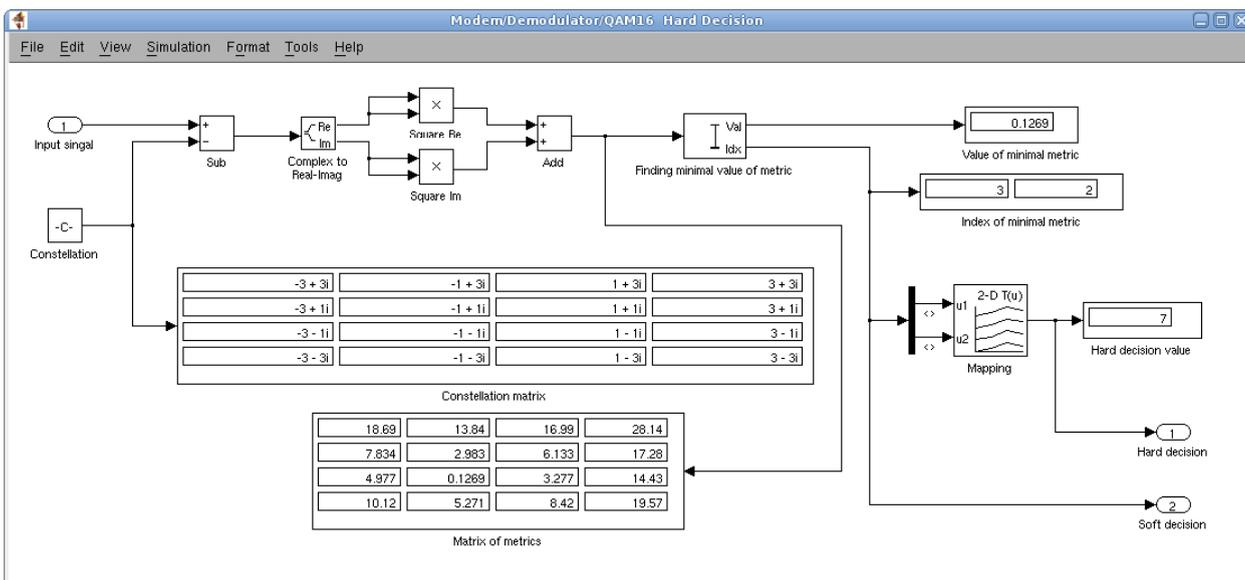


Рисунок 2.15 – Демодулятор сигнала

Соответствие между индексом минимальной метрики и символом задается в блоке *n-D Lookup Table* (рис. 2.16).

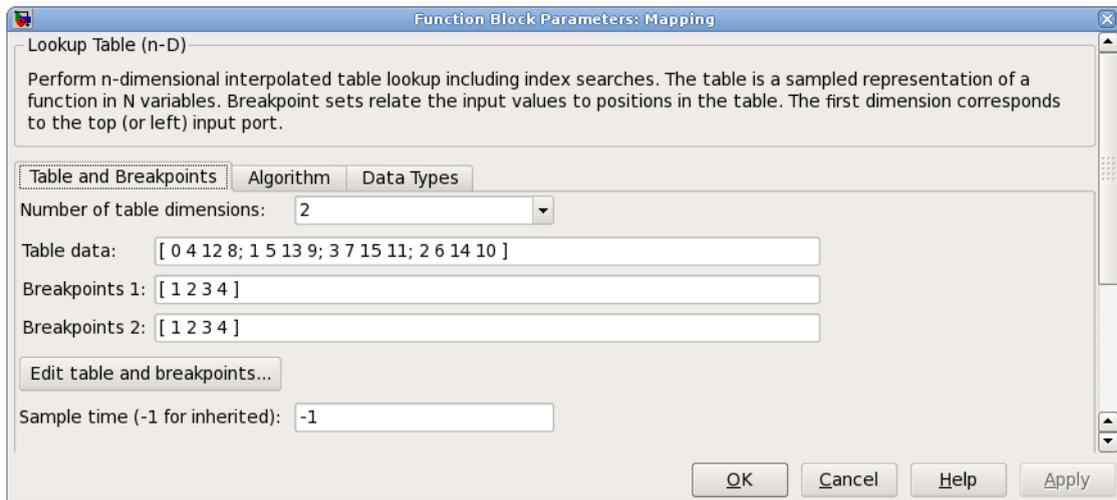


Рисунок 2.16 – Определение соответствий между индексами матрицы созвездия и символами (для QAM16)

На рисунке 2.17 показаны диаграммы принимаемого сигнала с выхода согласованного фильтра при отсутствии шумов, без частотного и фазового рассогласования и без задержки в канале связи. Из рисунков хорошо видно, что на принимаемое созвездие практически не оказывает влияние межсимвольная интерференция.

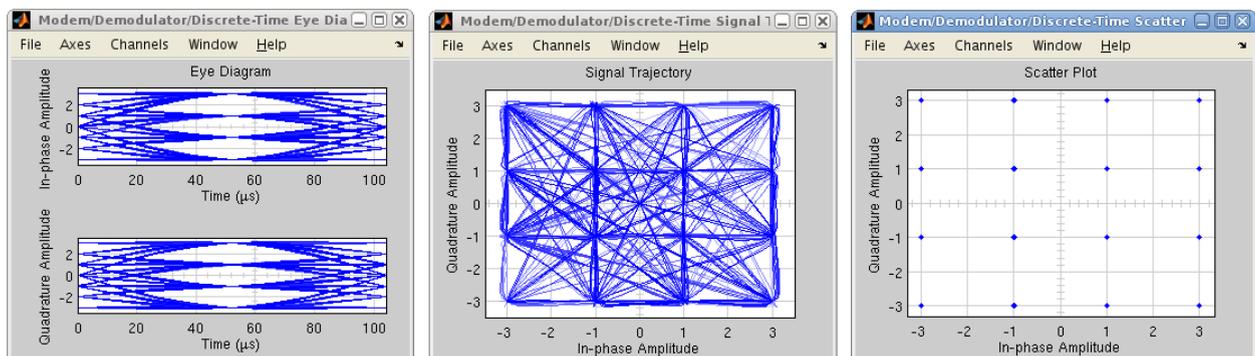


Рисунок 2.17 – Согласованный прием сигнала

Добавление к сигналу АБГШ приводит к размытию точек в созвездии и повышению вероятности ошибки при приеме сигнала (рис. 2.18).

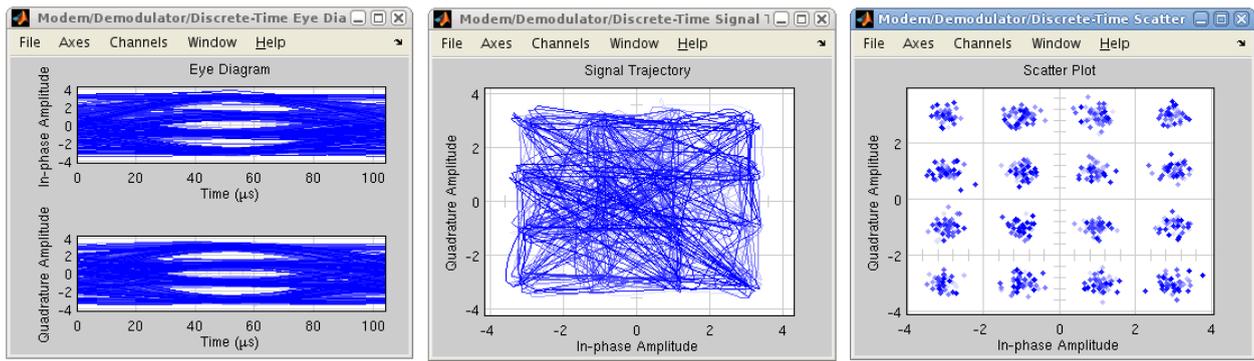


Рисунок 2.18 – Воздействие АБГШ на принимаемый сигнал

Частотное рассогласование приводит к вращению сигнального созвездия, что показано на рисунке 2.19. Фазовое рассогласование приводит к повороту сигнального созвездия (рис. 2.20). Рассинхронизация приемника по символьной частоте приводит к размытию созвездия (рис. 2.21).

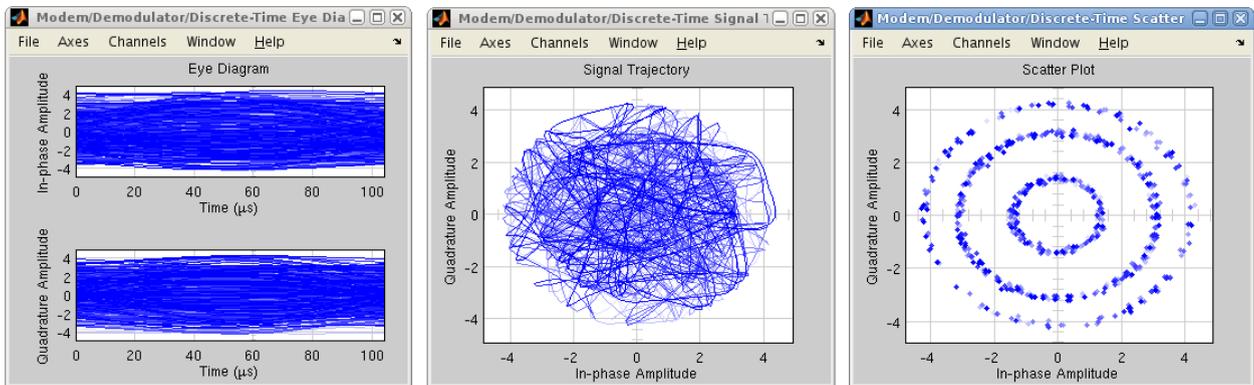


Рисунок 2.19 – Результат частотного рассогласования при приеме

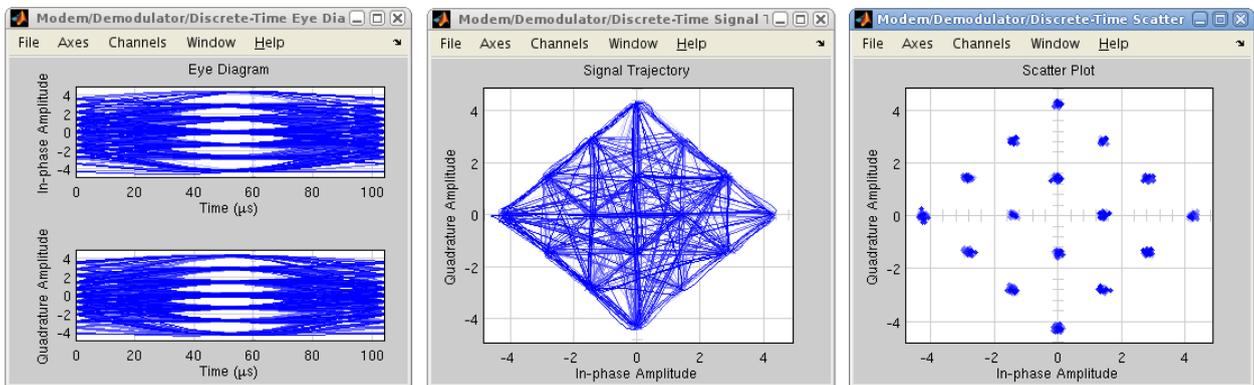


Рисунок 2.20 – Результат фазового рассогласования при приеме

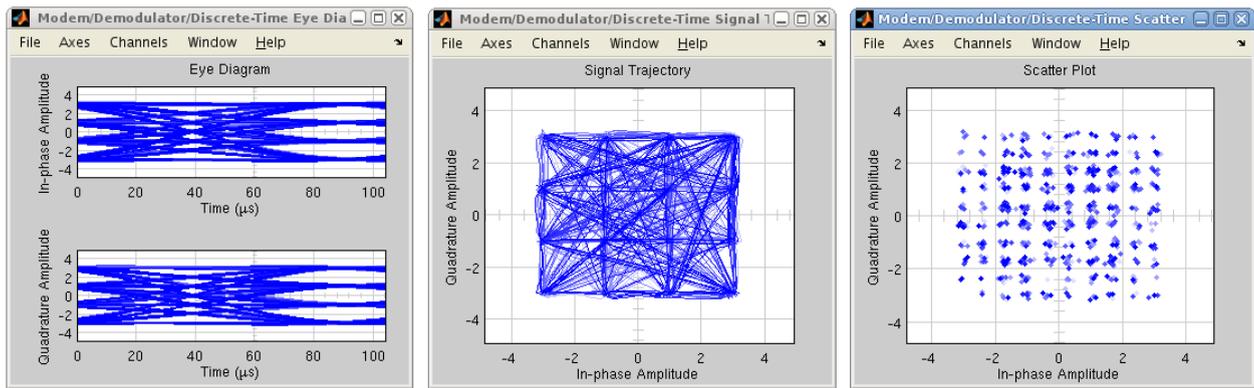


Рисунок 2.21 – Результат рассогласования по символевой частоте при приеме

На рисунке 2.22 показаны осциллограммы передаваемого и принимаемого сигналов. Не трудно подсчитать, что общая задержка в системе связи равна 10 периодам следования импульсов данных. Данную задержку нужно учесть в блоке подсчета количества ошибок передачи информации (*Error Rate Calculator – Receive Delay*).

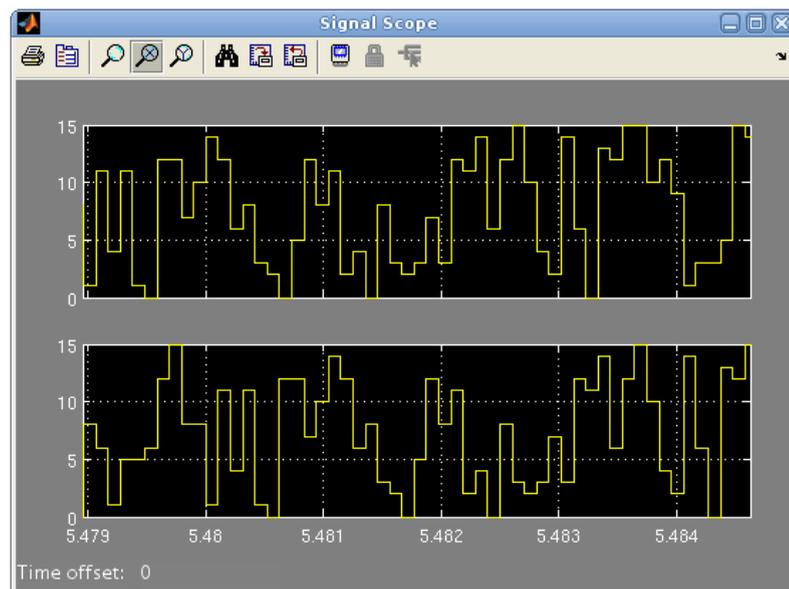


Рисунок 2.22 – Сопоставление передаваемого и принимаемого сигналов

Порядок выполнения работы:

- 1) Согласно приведенным выше рисункам и описанию, создайте модель законченной системы связи в Simulink, убедитесь в ее работоспособности.
- 2) Установите нулевое частотное и фазовое рассогласование. Задайте нулевую дробную задержку в канале связи. Установите ОСШ равным 0 дБ, оцените статистическую вероятность появления ошибки при помощи блока *Error Rate Calculator*. Увеличивайте ОСШ с шагом 5 дБ до достижения значе-

ния вероятности символьной ошибки не более 10^{-5} . Проведите ряд дополнительных измерений (не менее 5 точек) в области низких вероятностей символьной ошибки ($10^{-2} \dots 10^{-5}$). Данные занесите в таблицу и постройте график. Сохраните для отчета все графики, полученные в ходе моделирования.

3) Проведите моделирование согласно пункту 2 при фазовом рассогласовании 5° , 10° , 85° , 175° . Данные занесите в таблицу и постройте график зависимости символьной ошибки от фазового рассогласования. При необходимости скорректируйте диапазон углов фазового рассогласования для конкретного вида манипуляции.

4) Проведите моделирование согласно пункту 2 при дробной задержке в канале связи 0.1, 0.5, 1, 3.9. Данные занесите в таблицу и постройте график зависимости символьной ошибки от дробной задержки в канале связи. При необходимости скорректируйте диапазон задержек для конкретного вида манипуляции.

5) По результатам выполнения моделирования составьте отчет, который должен содержать: цели и задачи работы, вид модели в Simulink, таблицы и графики, полученные при выполнении пунктов 2, 3 и 4, выводы по результатам моделирования.

Список тем для подготовки к защите:

- 1) Общие вопросы построения приемных систем цифровой связи.
- 2) Архитектура первого поколения цифровых приемников.
- 3) Архитектура второго поколения цифровых приемников.
- 4) Архитектура третьего поколения цифровых приемников.
- 5) Согласованная фильтрация сигнала.
- 6) Демодуляция сигнала. Расчет метрик. Мягкое решение. Жесткое решение.

Лабораторная работа №4. Моделирование системы восстановления несущего колебания

Цель работы: исследование систем синхронизации приемных устройств цифровой связи.

Задачи работы: описание теоретических моделей процессов, происходящих в блоках синхронизации цифровых систем связи; моделирование системы цифровой связи с блоком восстановления несущего колебания в Simulink.

Для моделирования блока восстановления несущего колебания системы связи необходимо использовать следующие блоки Simulink:

Delay – блок дискретной задержки сигнала;

Sign – блок, выдающий +1 для положительного сигнала и -1 для отрицательного.

Math Function – блок математической обработки сигнала (модуль, логарифм).

рифм, экспонента и т. д.);

Gain – усилитель сигнала;

Add – блок суммирования/вычитания сигналов;

Constant – источник неизменяемого сигнала (константа);

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

Product – блок перемножения/деления сигналов;

Scope – осциллограф;

Subsystem – подсистема, позволяющая оформить часть модели в виде отдельного блока.

На рисунке 2.23 показан вид модели системы цифровой связи в Simulink с петлей восстановления несущего колебания (петля Костаса).

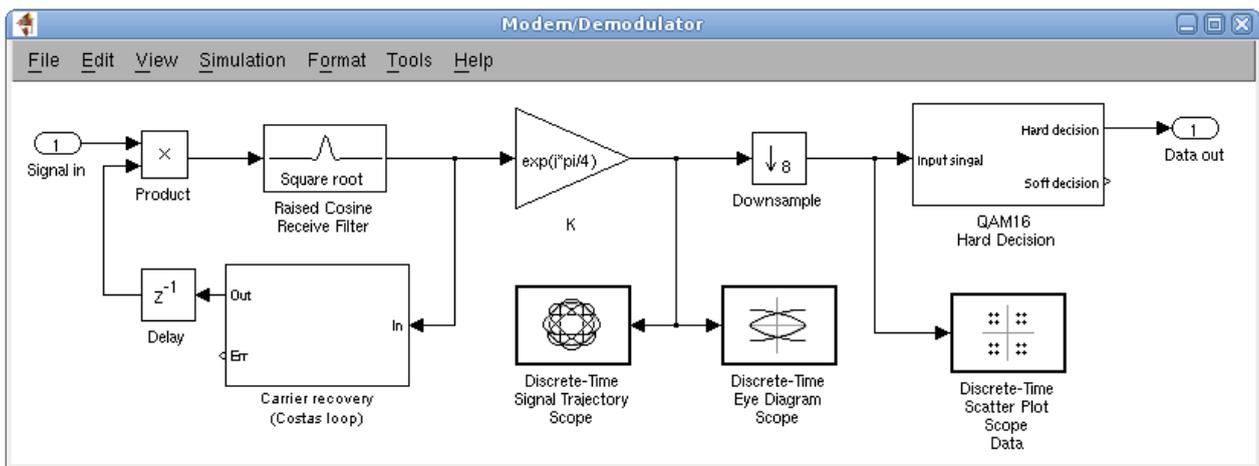


Рисунок 2.23 – Приемная часть системы связи с блоком синхронизации по несущему колебанию

Петля Костаса (рис. 2.24) состоит из детектора Костаса (2.25), фильтра низких частот обратной связи (ФНЧ ОС) и генератора, управляемого кодом (*Numeric Controlled Oscillator*).

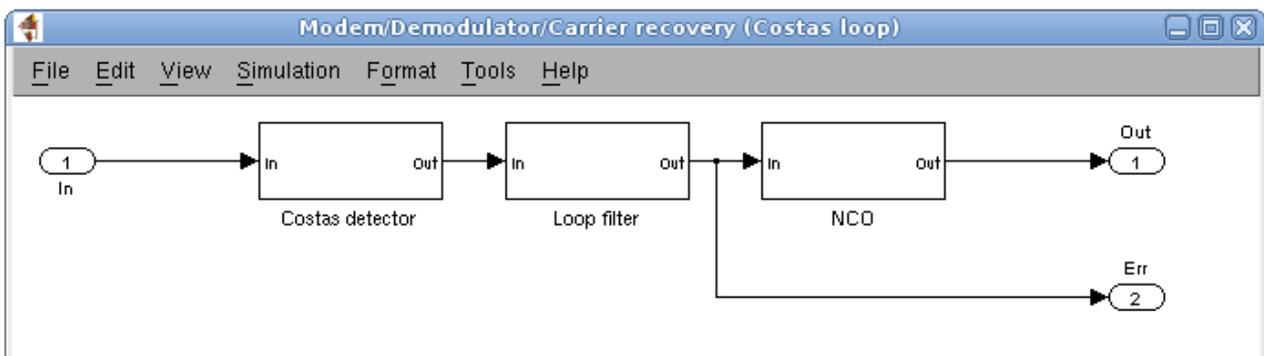


Рисунок 2.24 – Петля Костаса

На рисунке 2.65 показан вид модели фильтра обратной связи. При помощи блоков усиления задаются коэффициент пропорциональной части и ко-

эффицент интегральной части звена регулирования. Модель интегратора показана на рисунке 2.27. На рисунке 2.28 показана модель генератора комплексного сигнала, управляемого сигналом с фильтра обратной связи.

На рисунке 2.29 показан пример работы петли синхронизации. Сверху приведены синфазная и квадратурная составляющие входного сигнала, затем составляющие скорректированного сигнала и составляющие сигнала коррекции. На нижнем графике приведен сигнал ошибки с выхода фильтра обратной связи.

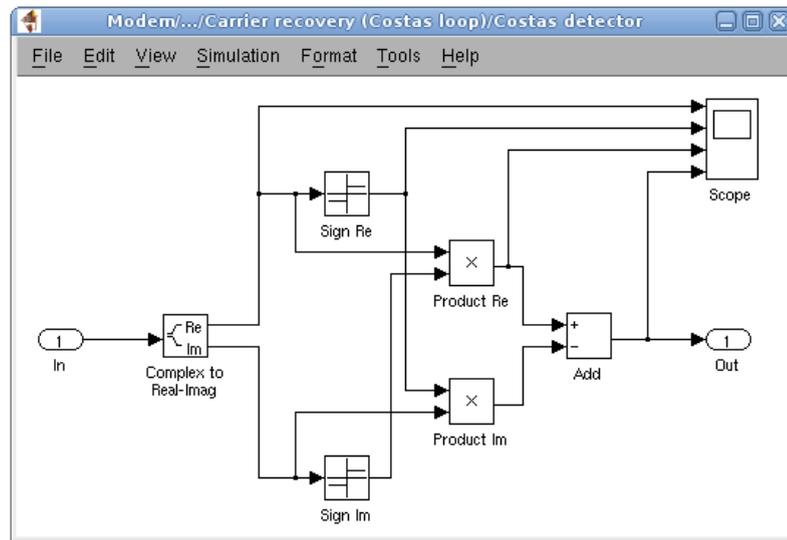


Рисунок 2.25 – Детектор Костаса

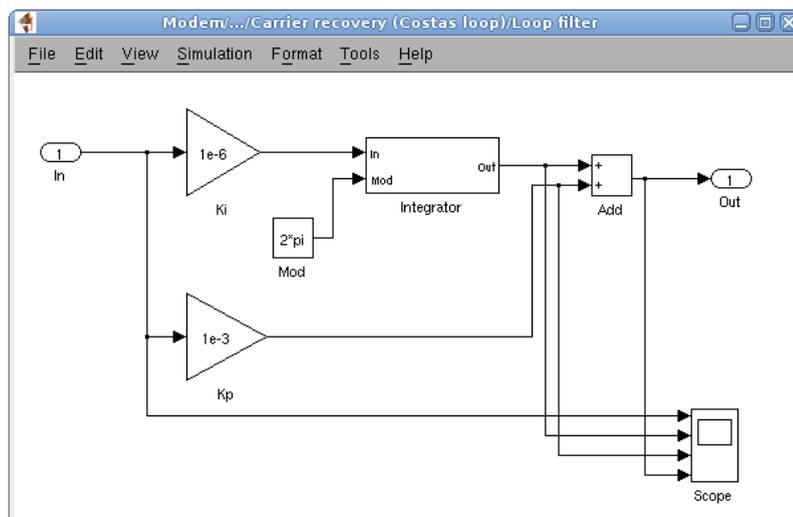


Рисунок 2.26 – Фильтр петли обратной связи

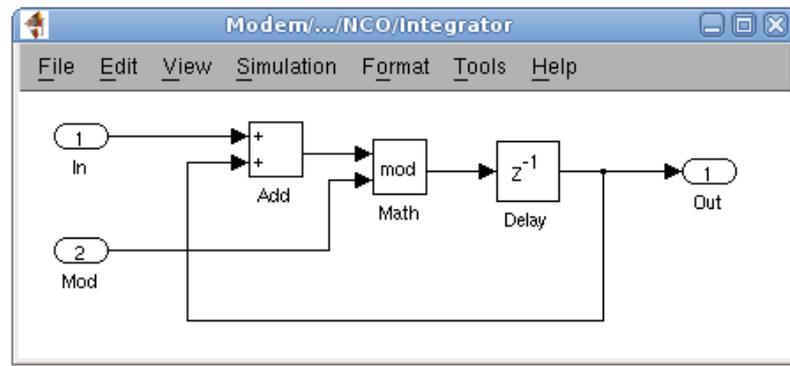


Рисунок 2.27 – Модель интегратора

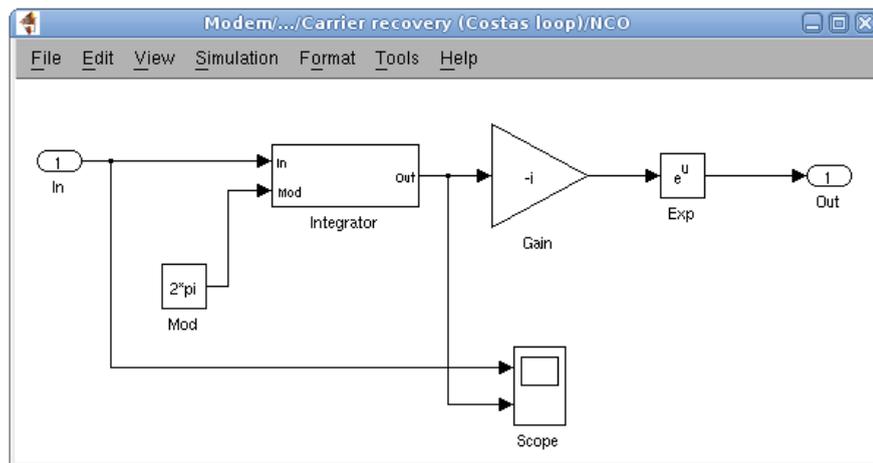


Рисунок 2.28 – Генератор комплексного сигнала, управляемый кодом

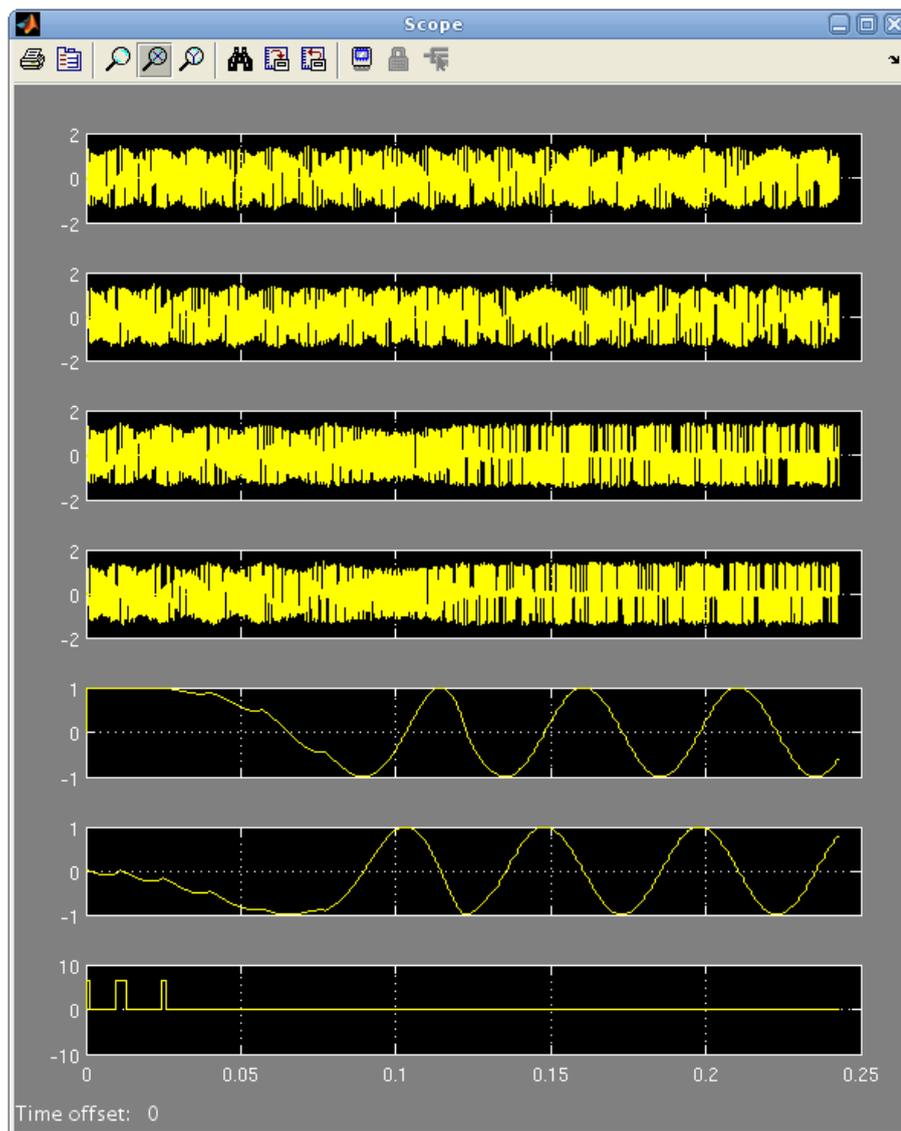


Рисунок 2.29 – Коррекция частотного рассогласования

Порядок выполнения работы:

1) Согласно приведенным выше рисункам и описанию, создайте модель системы связи в Simulink с блоком восстановления несущего колебания, убедитесь в ее работоспособности.

2) Установите нулевую дробную задержку в канале связи и задайте ОСШ равным 100 дБ. При нулевом фазовом и частотном рассогласовании убедитесь в работоспособности модели. Задайте фазовое рассогласование 40° и наблюдайте на блоке отображения сигнального созвездия процесс автоматического регулирования. Устанавливая различное фазовое рассогласование, создайте все возможные случаи ложной синхронизации системы связи. Сохраните для отчета все графики, полученные в ходе моделирования.

3) При нулевом фазовом рассогласовании задайте частотный сдвиг сигнала 10 Гц, наблюдайте переходной процесс системы регулирования. Устанавливая различные значения частотного рассогласования, найдите максимальное значение, при котором система автоподстройки частоты работоспо-

собна.

4) Оцените влияние изменения коэффициента пропорциональной части системы автоматического регулирования на длительность переходного процесса и максимальное значение частотного рассогласования (согласно пункту 3). Найдите и зафиксируйте оптимальное значение коэффициента пропорциональной части для максимального частотного рассогласования и для наиболее быстрой работы петли регулирования при частотном рассогласовании 10 Гц.

5) Оцените влияние изменения коэффициента интегральной части системы автоматического регулирования согласно пункту 4.

6) По результатам выполнения моделирования составьте отчет, который должен содержать: цели и задачи работы, вид модели в Simulink, таблицы и графики, полученные при выполнении пунктов 2, 3, 4 и 5, выводы по результатам моделирования.

Список тем для подготовки к защите:

- 1) Системы восстановления несущего колебания.
- 2) Петля с возведением сигнала в квадрат (петля Пистолькорса). Синфазно-квадратурная петля (петля Костаса).
- 3) Петля символьной синхронизации.
- 4) Фазовая неоднозначность при приеме сигналов с подавленным несущим колебанием. Способы решения фазовой неоднозначности.
- 5) Системы автоматического регулирования уровня усиления сигнала.

Лабораторная работа №5. Моделирование петли символьной синхронизации

Цель работы: исследование систем символьной синхронизации приемных устройств цифровой связи.

Задачи работы: описание теоретических моделей процессов, происходящих в блоках символьной синхронизации цифровых систем связи; моделирование системы цифровой связи с блоком восстановления несущего колебания и блоком символьной синхронизации в Simulink.

Для моделирования системы синхронизации приемного устройства по символьной частоте необходимо дополнить модель приемника петлей символьной синхронизации (петля Гарднера). На рисунке 2.30 показана модель приемного устройства с петлей символьной синхронизации (*Timing phase recovery (Gardner detector)*).

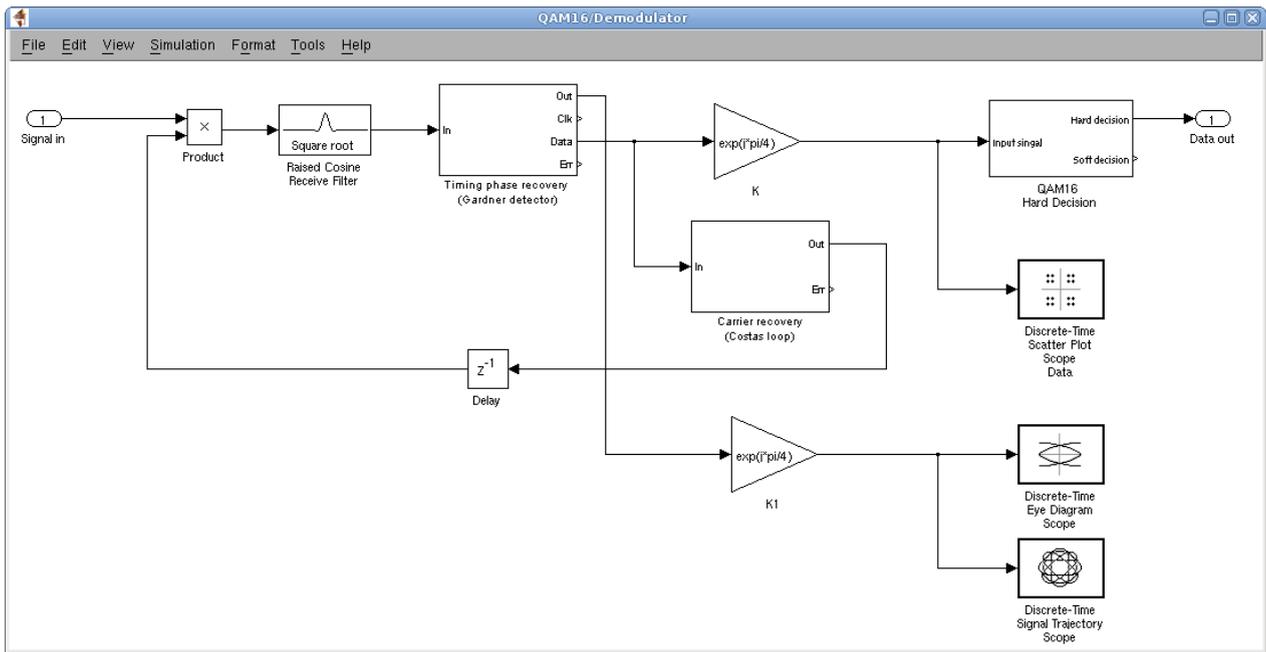


Рисунок 2.30 – Модель приемного устройства с петлей символьной синхронизации

На рисунке 2.31 показана модель петли синхронизации, состоящая из фильтра-интерполятора (фильтр Фарроу, рис. 2.32), детектора Гарднера (рис. 2.33), фильтра петли обратной связи (рис. 2.34) и генератора, управляемого кодом (рис. 2.35).

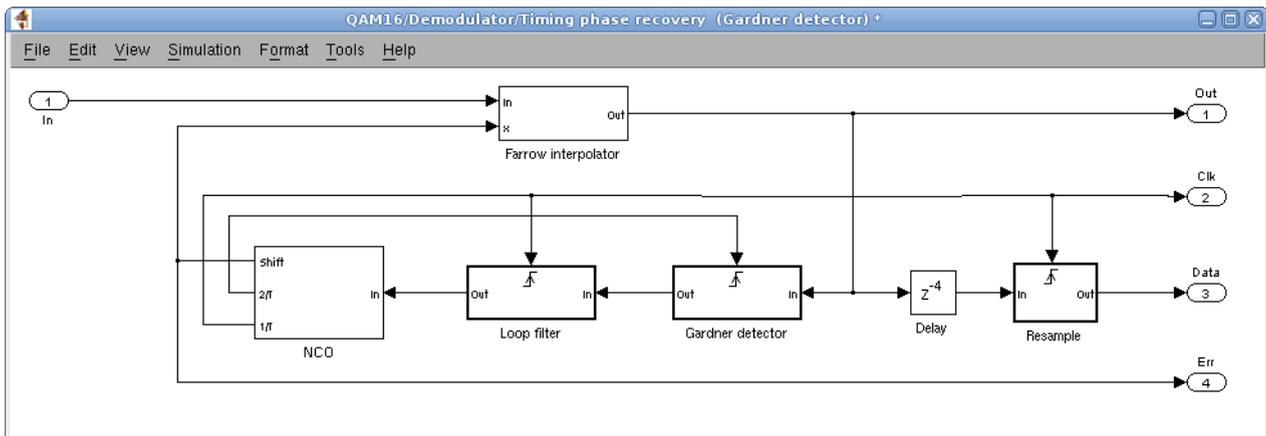


Рисунок 2.31 – Петля символьной синхронизации

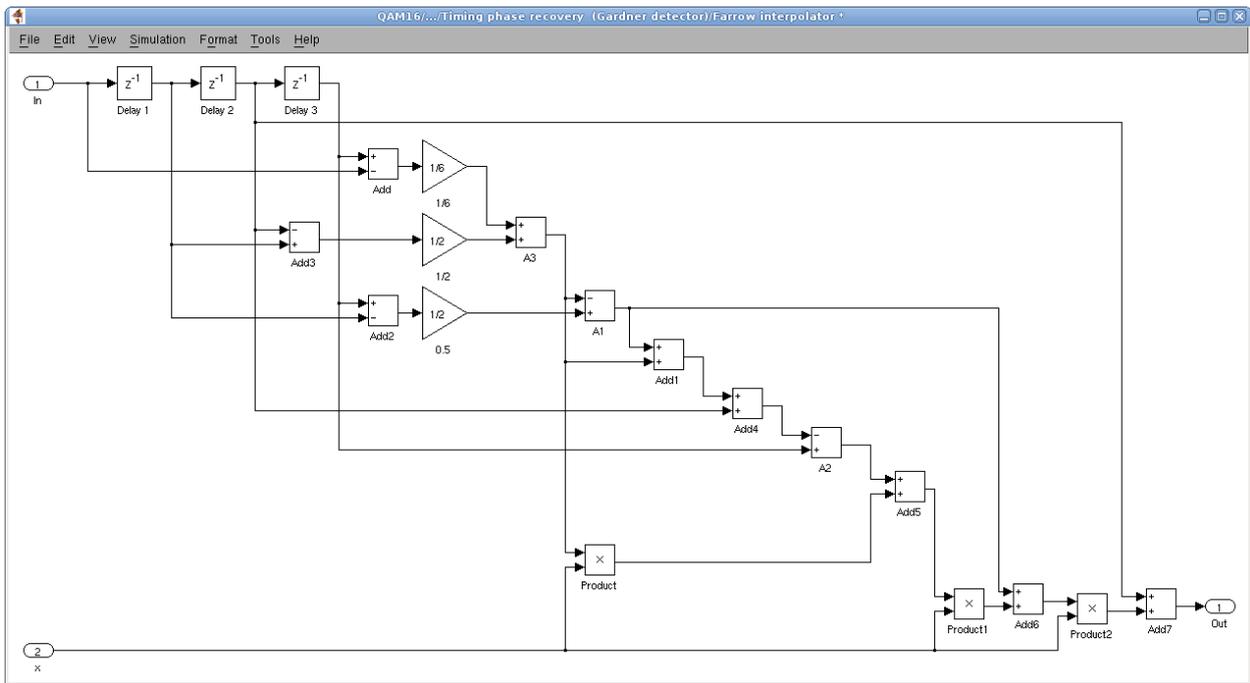


Рисунок 2.32 – Фильтр-интерполятор (структура Фарроу)

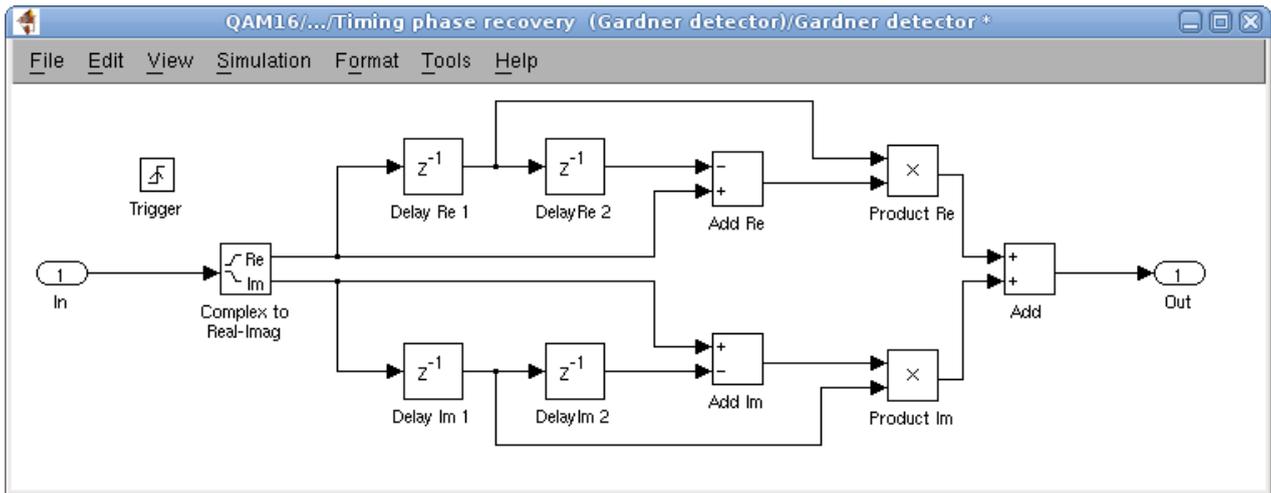


Рисунок 2.33 – Детектор Гарднера

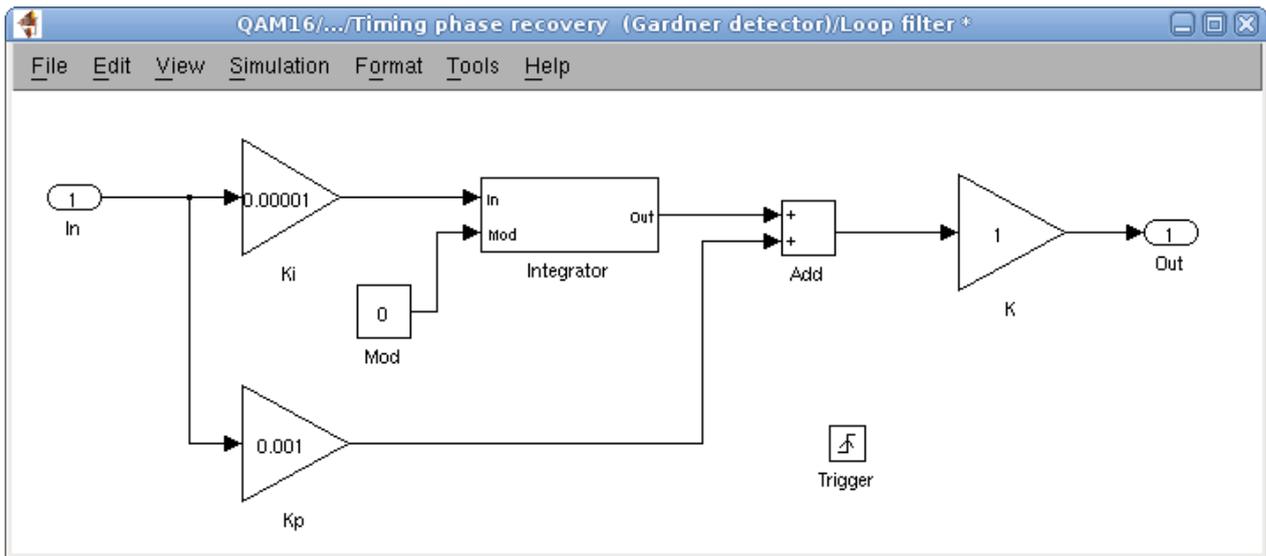


Рисунок 2.34 – Фильтр петли обратной связи

Параметры фильтра петли обратной связи (коэффициенты пропорционального и интегрального звеньев) подбираются экспериментально, по виду графика переходного процесса системы автоматического регулирования.

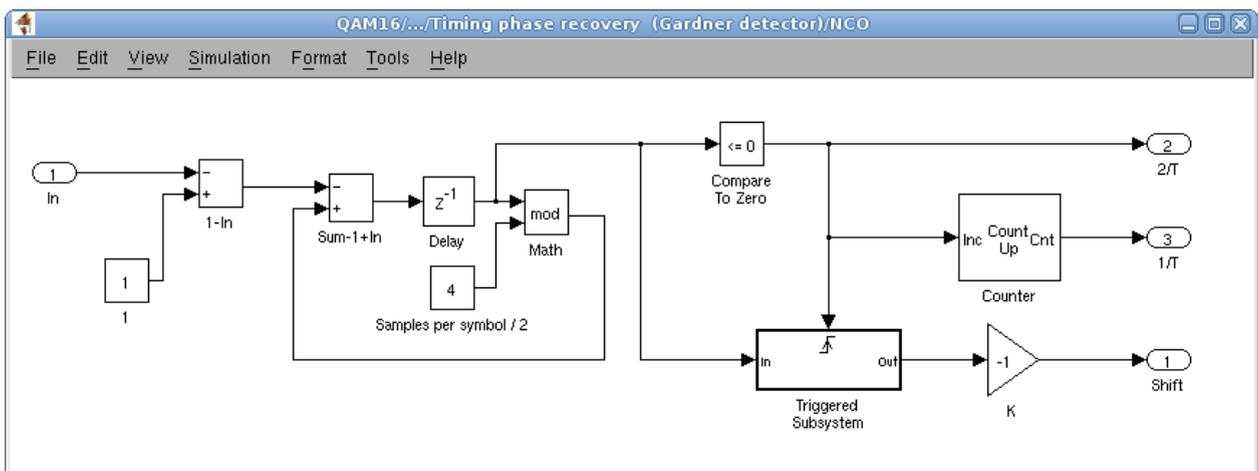


Рисунок 2.35 – Генератор, управляемый кодом

Генератор, управляемый кодом, выполнен на основе структуры *Modulo-1*, предложенной Гарднером. В структуре генератора присутствует блок *Triggered Subsystem* (рис. 2.36), позволяющий производить передискретизацию сигнала.

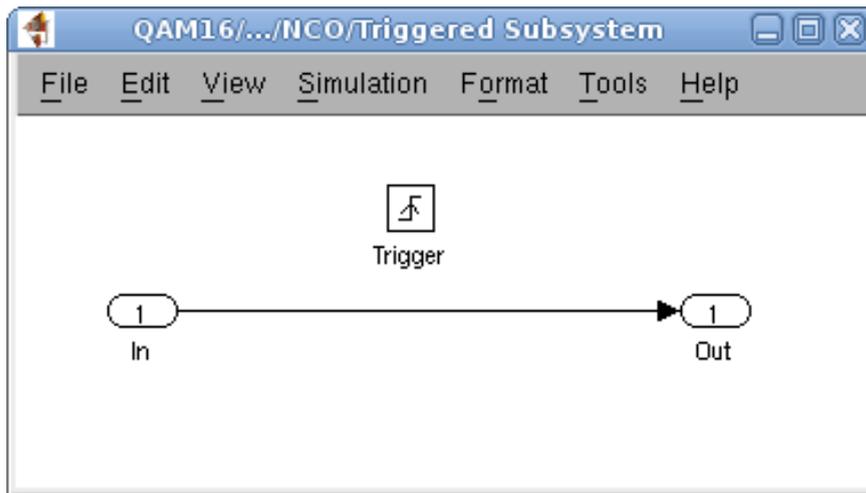
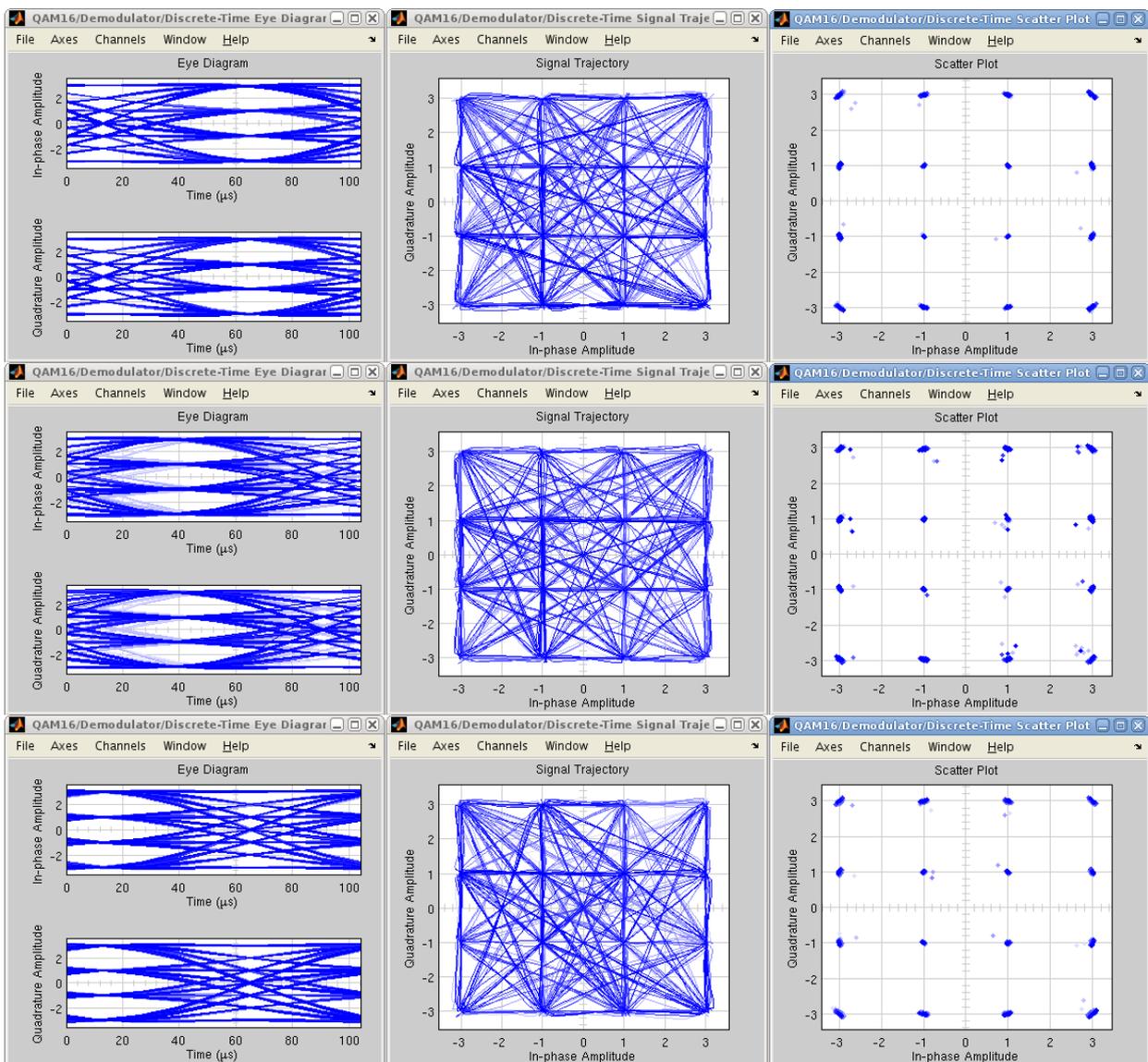


Рисунок 2.36 – Блок передискретизации сигнала

На рисунках 2.37–2.39 показаны диаграммы сигналов приемника системы связи при различных значениях дробной задержки в канале связи.



Рисунки 2.37–2.39 – Вид принимаемого созвездия при различных значениях дробной задержки в канале связи

Порядок выполнения работы:

1) Согласно приведенным выше рисункам и описанию, создайте модель системы связи в Simulink с блоком синхронизации по символьной частоте.

2) Установите нулевую дробную задержку в канале связи и задайте ОСШ равным 100 дБ. При нулевом фазовом и частотном рассогласовании убедитесь в работоспособности модели. Задавая различное частотное и фазовое рассогласование, убедитесь в работоспособности петли восстановления несущего колебания. Задавая различное значение дробной задержки в канале связи, убедитесь в правильной работе петли синхронизации по символьной частоте.

3) Создайте генератор медленно изменяющегося синусоидального сигнала с минимальным значением амплитуды 0 и максимальным значением 8. Подайте сигнал генератора на вход блока переменной дробной задержки в канале связи. Наблюдайте на глазковой диаграмме перемещение сигнала и убедитесь в правильной работе петли синхронизации по символьной частоте.

4) Оцените степень влияния петли синхронизации по символьной частоте на вид принимаемого созвездия.

5) Исключите петлю синхронизации по несущей частоте из модели приемника. Изменяйте значения частотного и фазового рассогласования, оцените возможность работы петли синхронизации по символьной частоте при частотном рассогласовании передатчика и приемника.

6) По результатам выполнения моделирования составьте отчет, который должен содержать: цели и задачи работы, вид модели в Simulink, таблицы и графики, полученные при выполнении пунктов 2, 3, 4 и 5, выводы по результатам моделирования.

Список тем для подготовки к защите:

- 1) Системы синхронизации по символьной частоте.
- 2) Детекторы ошибки синхронизации по символьной частоте.
- 3) Схемы построения генератора, управляющего фильтром-интерполятором.
- 4) Фильтры-интерполяторы. Фильтр Фарроу, полифазный фильтр-банк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература по MATLAB Simulink

1) Солонина, А. И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Simulink. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.

Дополнительная литература по MATLAB Simulink

1) Дьяконов, В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 976 с.

2) Солонина, А. И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB / А. И. Солонина, С. М. Арбузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 816 с.