

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 17.09.2024 23:33:53

Уникальный идентификатор:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ОГ Локтионова

« 17 » 09 2024 г.



## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Методические указания  
по выполнению лабораторных работ  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Курск 2024

УДК 621.391

Составители: И.Г. Бабанин, Е.Ю. Бабанина

Рецензент

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
заведующий кафедрой *В.Г. Андронов*

**Имитационное моделирование цифровой системы связи :**  
методические указания по выполнению лабораторных работ / Юго-  
Зап. гос. ун-т; сост.: И.Г. Бабанин, Е.Ю. Бабанина.– Курск, 2024. –  
32 с.

Методические указания по выполнению лабораторных работ содержат краткие теоретические сведения о используемых блоках, принципиальные структурные схемы, варианты заданий для выполнения лабораторных работ, порядок их выполнения, а также требования к оформлению отчетов.

Методические указания полностью соответствуют учебному плану по направлению подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, а также рабочей программе дисциплины.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *9.08.24*. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,68. Тираж 100 экз. Заказ *599* Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

# 1 Лабораторная работа №1 «Моделирование передающей части цифровой системы связи»

## 1.1 Цель работы

Изучение принципов формирования сигнала в системах цифровой связи.

## 1.2 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 1.1. Вариант выбирается согласно последней цифре зачетной книжки или назначается преподавателем.

Таблица 1.1 – Исходные данные

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 1.1. Modulator – подсистема формирователя сигнала цифрового передатчика (рисунок 1.2).

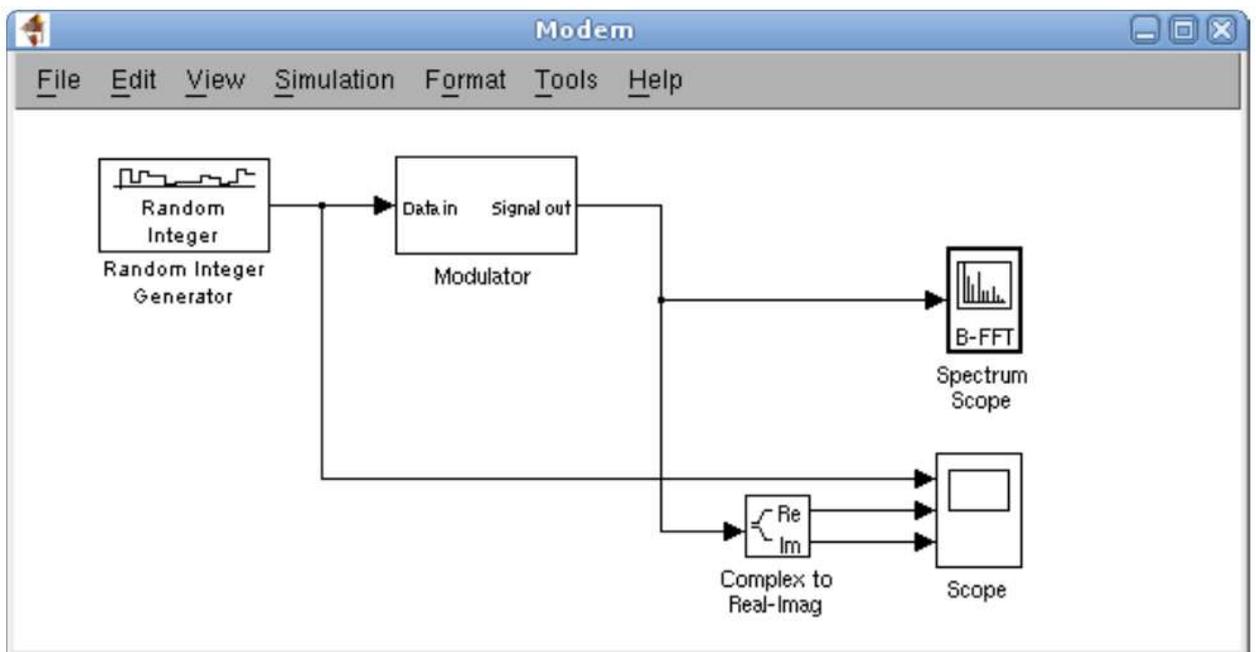


Рисунок 1.1 – Общий вид модели передающей системы

В настройках генератора случайных чисел необходимо задать позиционность созвездия (M-ary number) согласно варианту и частоту дискретизации (SampleTime) 1/9600, что соответствует символьной скорости передачи данных 9600 бод. 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 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 TableData 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.

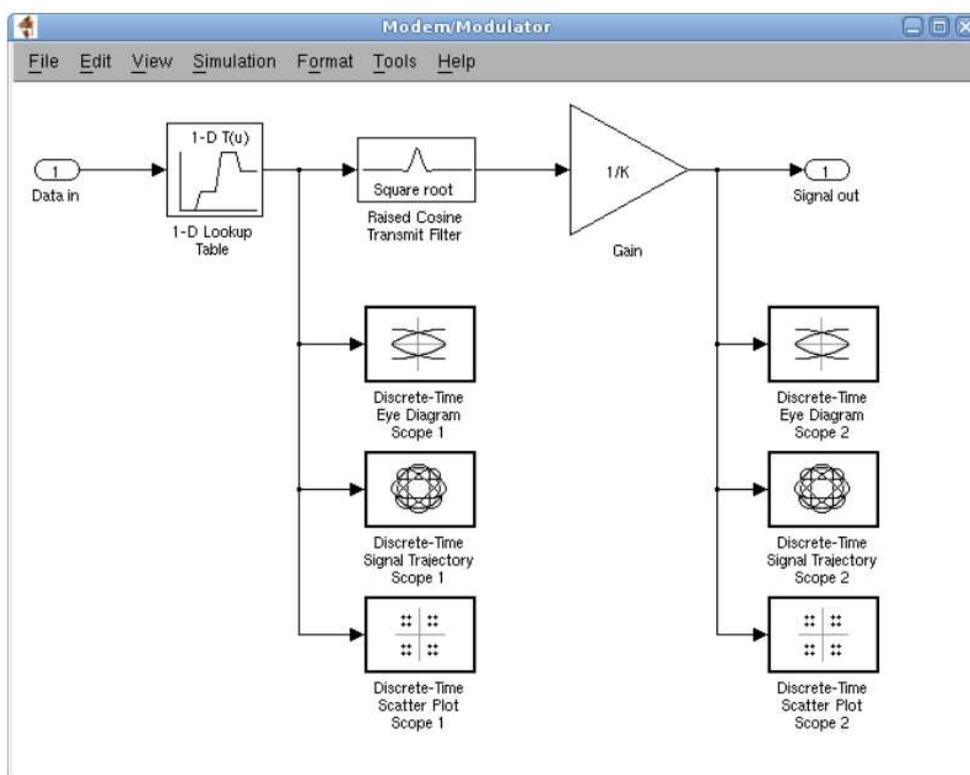


Рисунок 1.2 – Формирователь сигнала

Ограничение спектра сигнала выполняется при помощи формирующего фильтра с характеристикой корень из приподнятого

косинуса (рисунок 3) со следующими настройками: тип фильтра (FilterType) – корень из приподнятого косинуса (SquareRoot); групповая задержка, определяющая длину ИХ фильтра, (GroupDelay) – 5 символов; коэффициент скругления (Rolloff

Factor) – 0.8; коэффициент повышения частоты дискретизации (Upsamplingfactor) – 8; характер обработки сигнала (InputProcessing) – samplebased.

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 (рисунок 1.3).

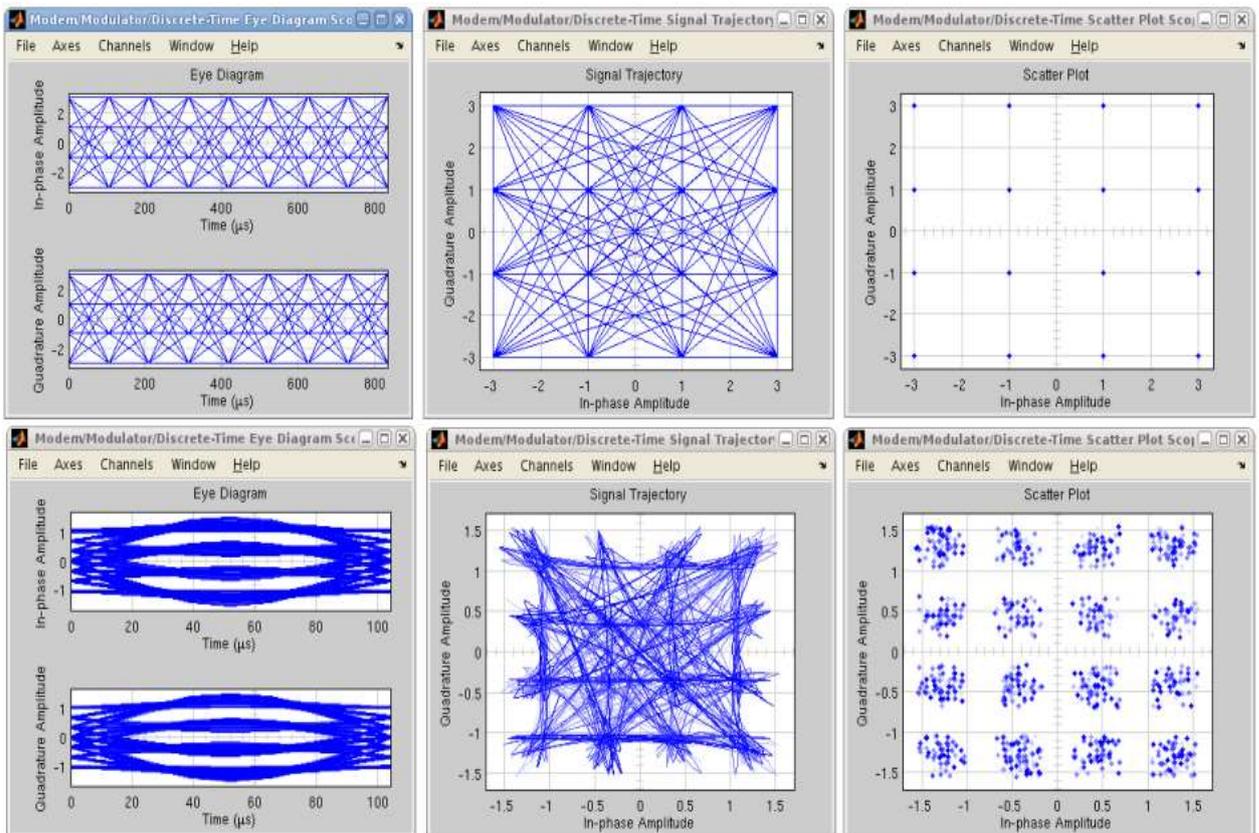


Рисунок 1.3 – Блоки отображения информации о сигналах

На рисунке 1.4 показан пример работы анализатора спектра. При помощи трехканального осциллографа имеется возможность сопоставить сигнал данных и компоненты сигнала комплексной огибающей (рисунок 1.5).

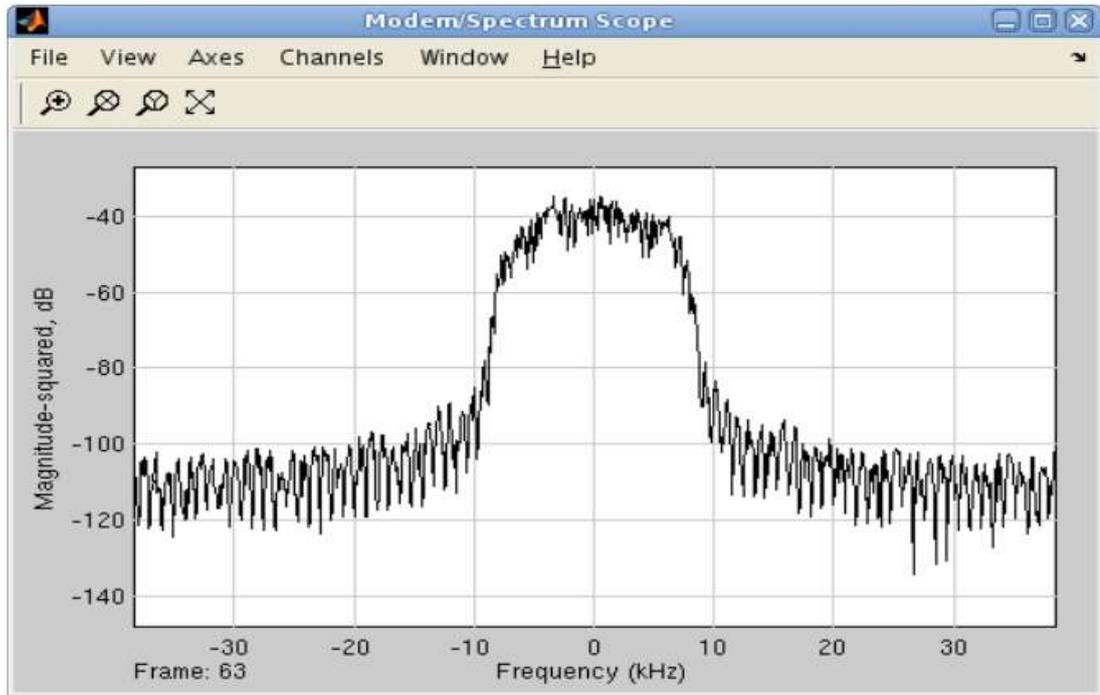


Рисунок 1.4 – Спектр формируемого сигнала

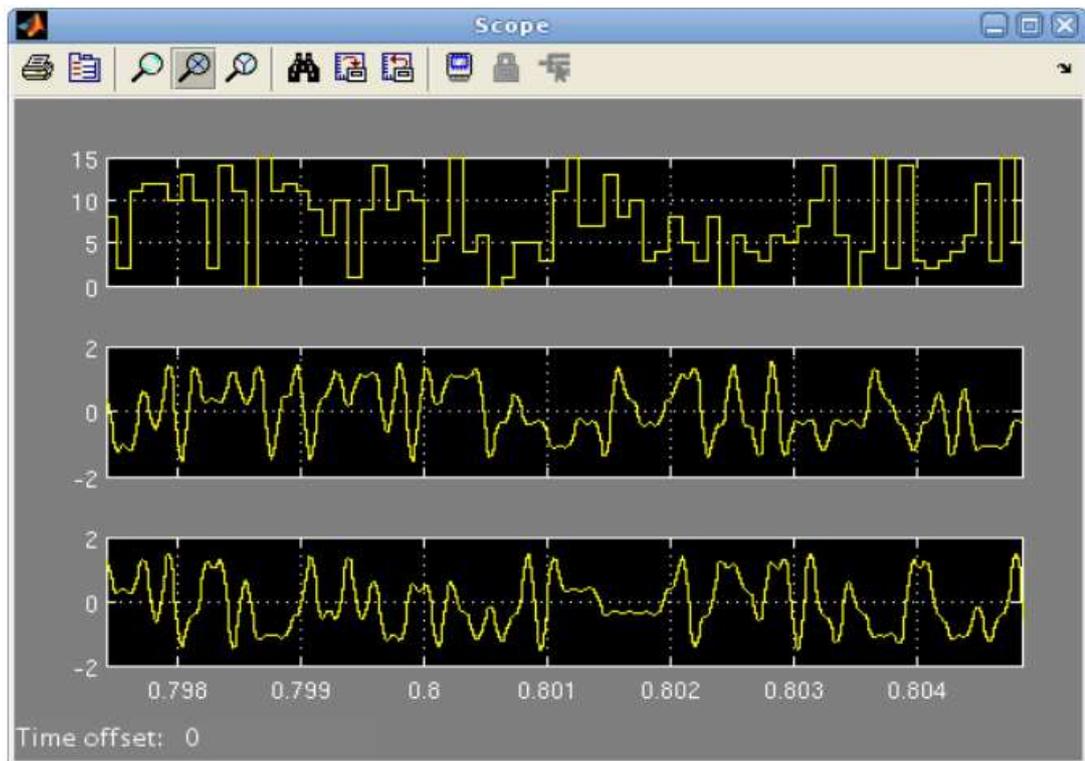


Рисунок 1.5 – Осциллограммы шины данных и комплексной огибающей сформированного сигнала

### 1.3 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.

### 1.4 Контрольные вопросы

- 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.

## **2 Лабораторная работа №2 «Моделирование канала связи»**

### **2.1 Цель работы**

Исследование явлений, возникающих в канале связи системы передачи цифровой информации.

### **2.2 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 (рисунок 2.1).

Модель канала связи показана на рисунке 2.2, она включает в себя блок добавления к сигналу АБГШ, блок частотного и фазового сдвига и блок дробной задержки, которая задается константой.

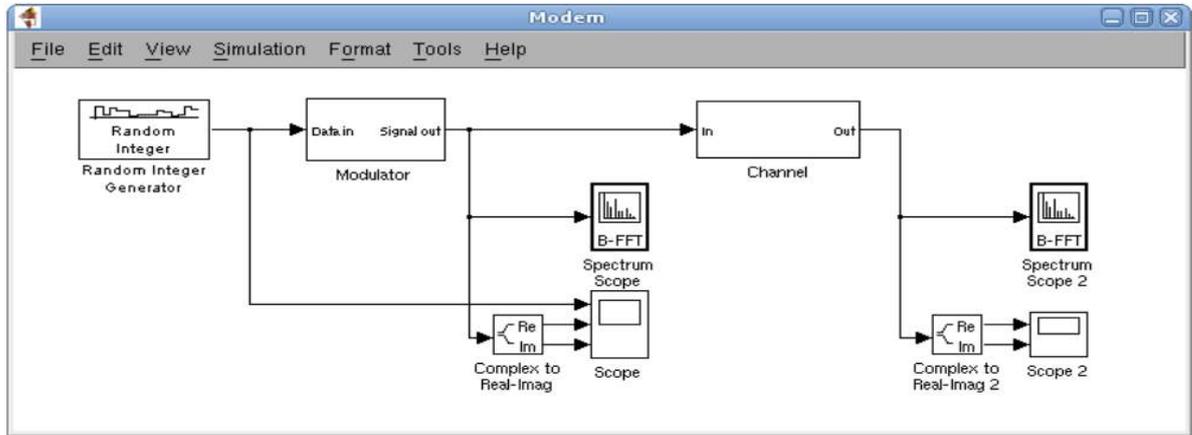


Рисунок 2.1 – Цифровой передатчик и канал системы связи

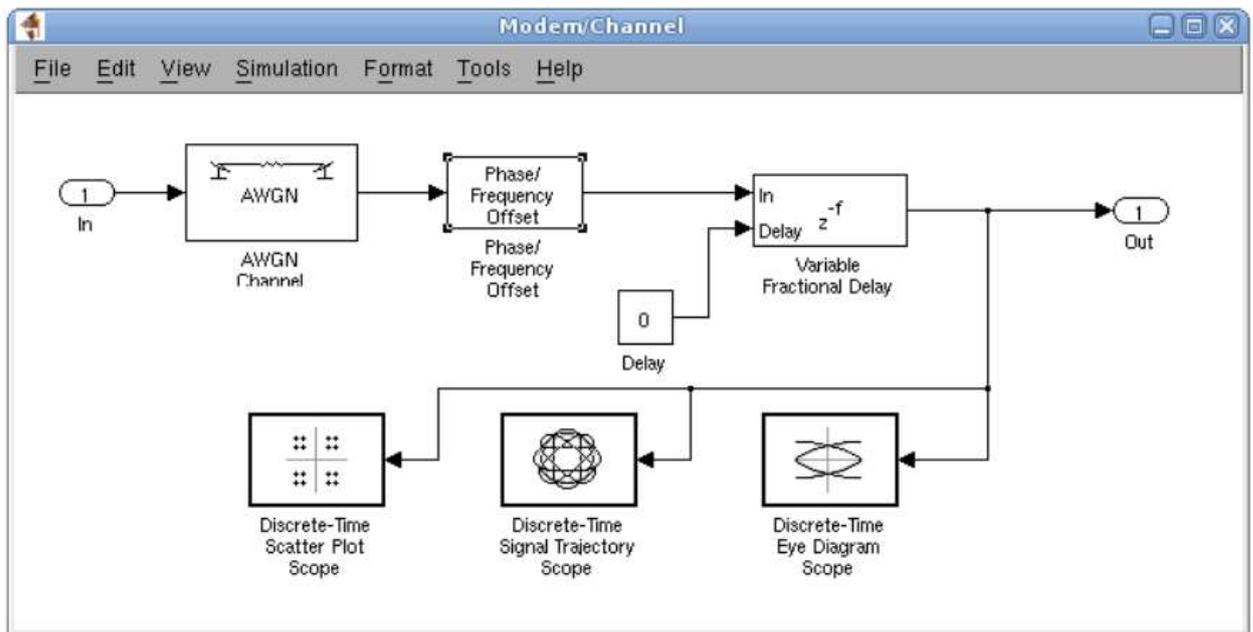


Рисунок 2.2 – Модель канала связи

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 2.3 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 канале связи приводит к еще большему размытию точек созвездия. На рисунке 2.4 показано влияние частотного рассогласования на сигнал, в результате которого созвездие начинает вращаться. Также частотный сдвиг сигнала можно наблюдать на анализаторе спектра (рисунок 2.5). Дробная задержка в канале связи, как и фазовое рассогласование, приводят к повороту сигнального созвездия (рисунок 2.6). В силу отсутствия петли слежения за символьной частотой демодуляция сигнала становится невозможной.

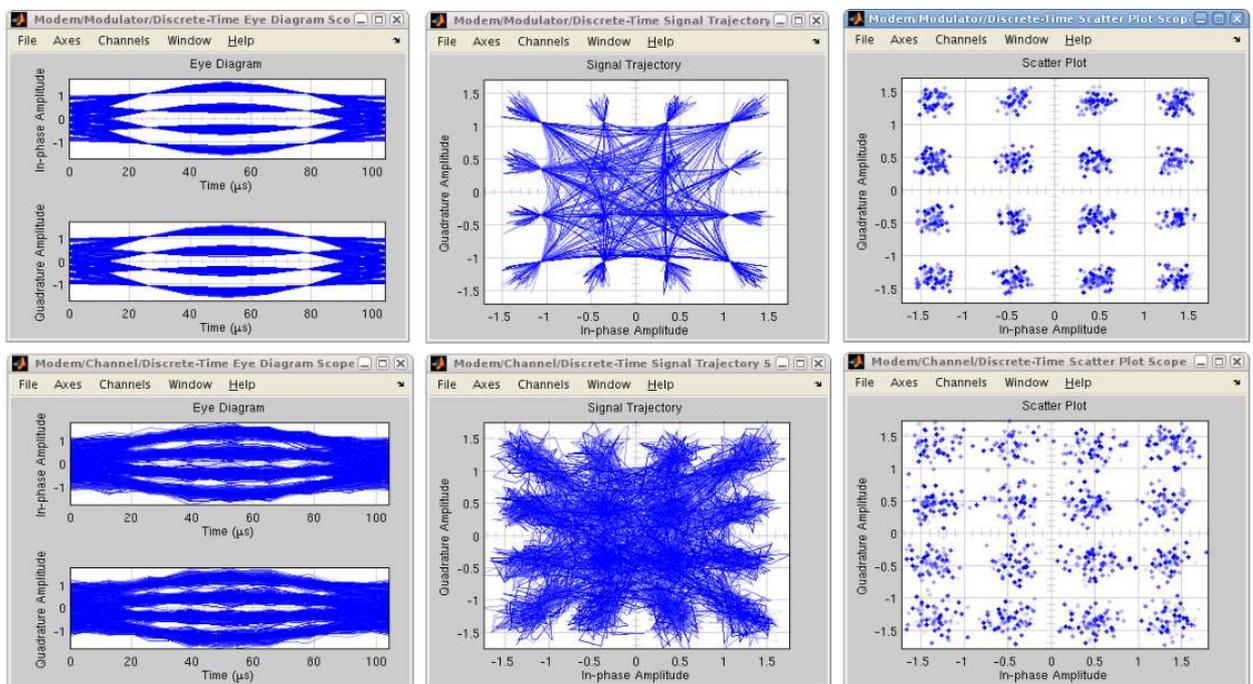


Рисунок 2.3 – Влияние воздействия на сигнал АБГШ

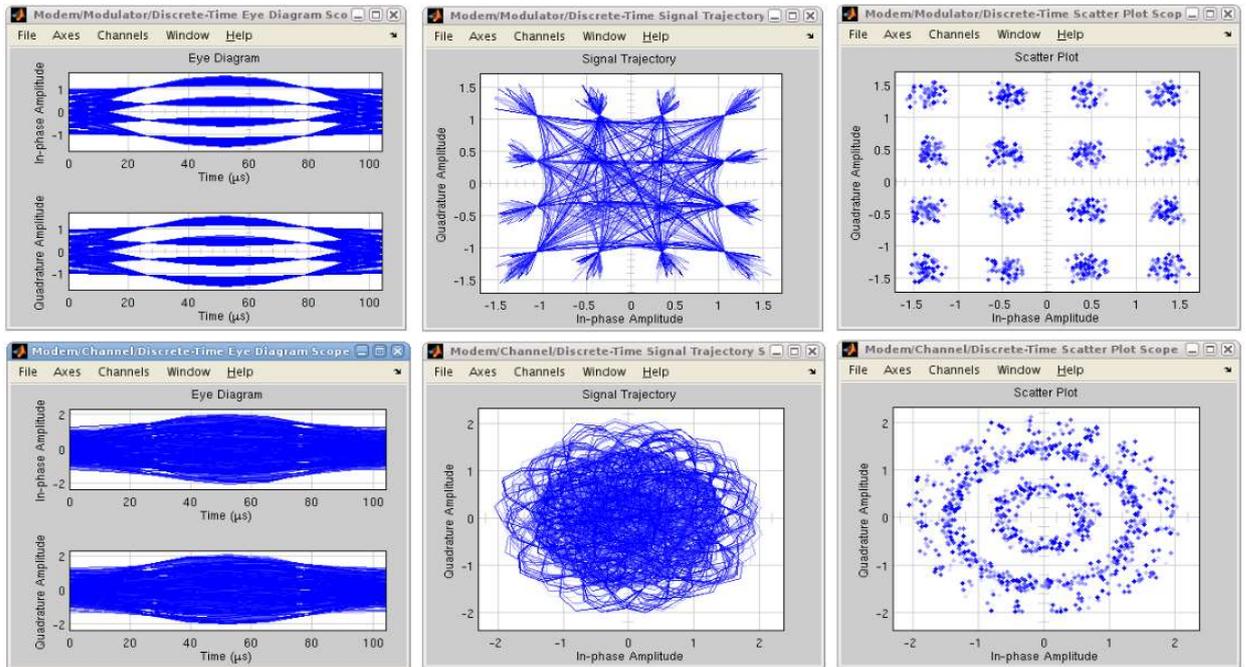


Рисунок 2.4 – Влияние частотного рассогласования

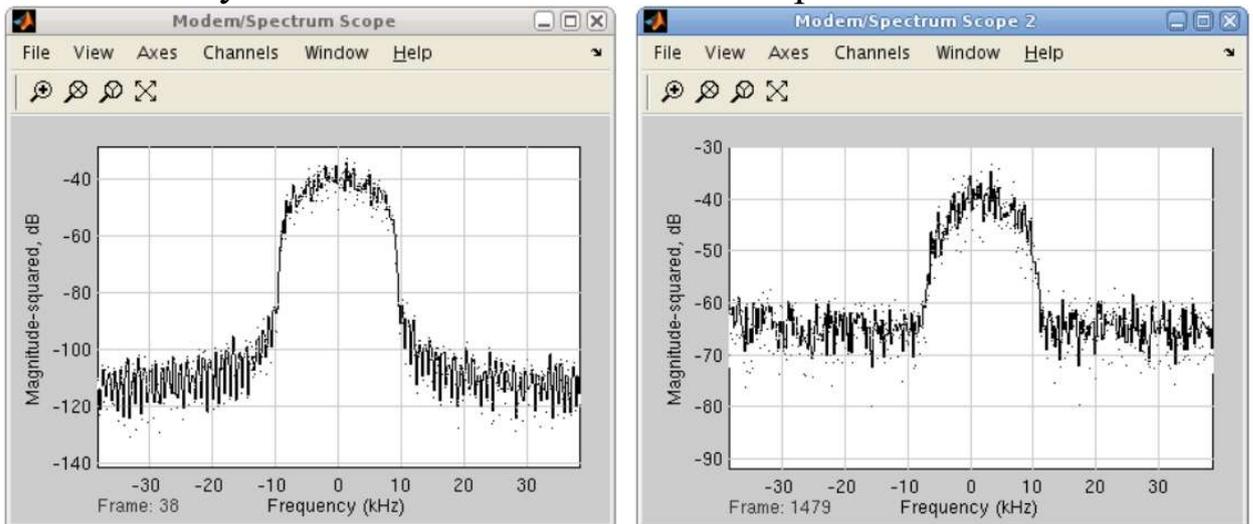


Рисунок 2.5 – Воздействие на сигнал АБГШ и смещение спектра

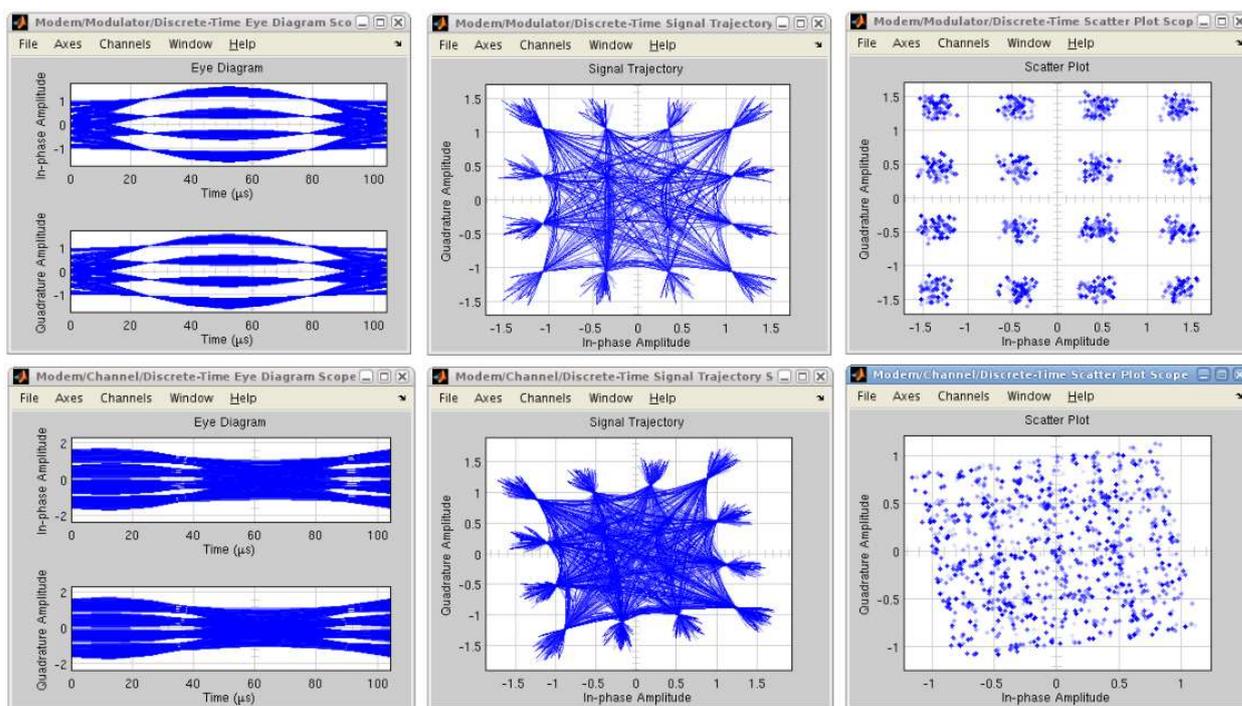


Рисунок 2.6 – Дробная задержка

### 2.3 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  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  и  $360^\circ$ . 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.

## **2.5 Контрольные вопросы**

- 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.

## **3 Лабораторная работа №3 «Моделирование приёмной части цифровой системы связи»**

### **3.1 Цель работы**

Изучение основ работы приемников цифровых систем связи.

### **3.2 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 приподнятого 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 3.1 показан вид законченной модели системы цифровой связи в Simulink.

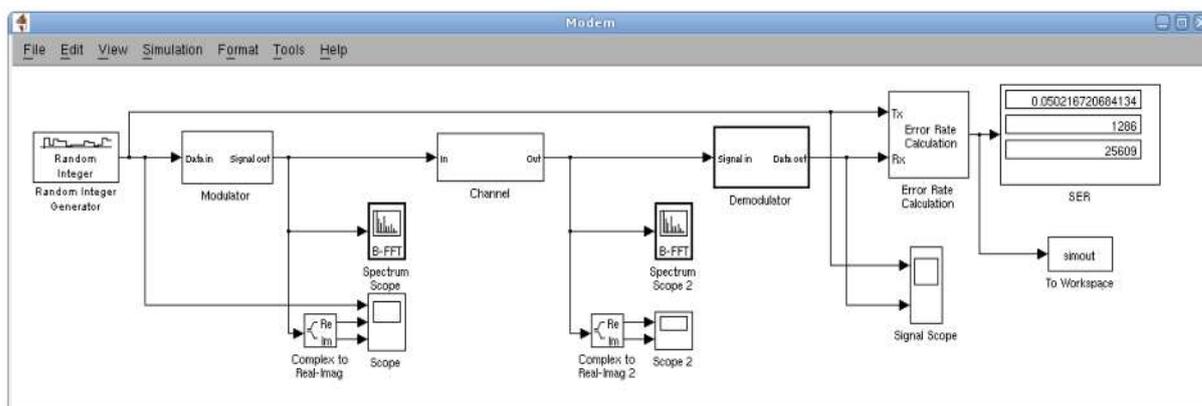


Рисунок 3.1 – Законченная модель системы цифровой связи

Блок приемной части модели системы связи показан на рисунке 3.2.

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.

Демодуляция сигнала осуществляется на основе подсчета метрик и выполняется в виде универсального демодулятора (рисунок 3.3). Матрица (вектор) созвездия задается при помощи константы (Constellation на рисунке 3.3). Поиск минимального значения метрики осуществляется при помощи блока Minimum.

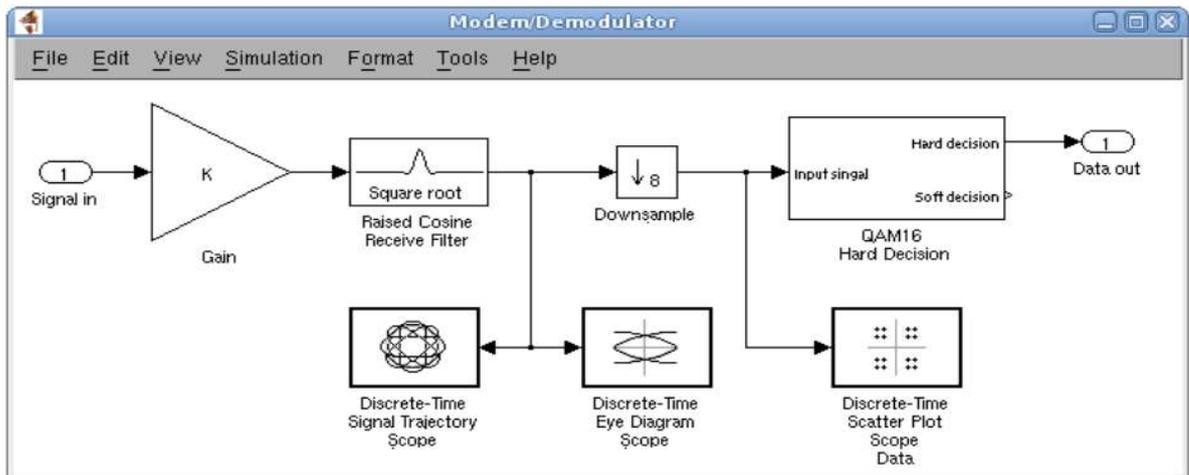


Рисунок 3.2 – Согласованная фильтрация и децимация сигнала

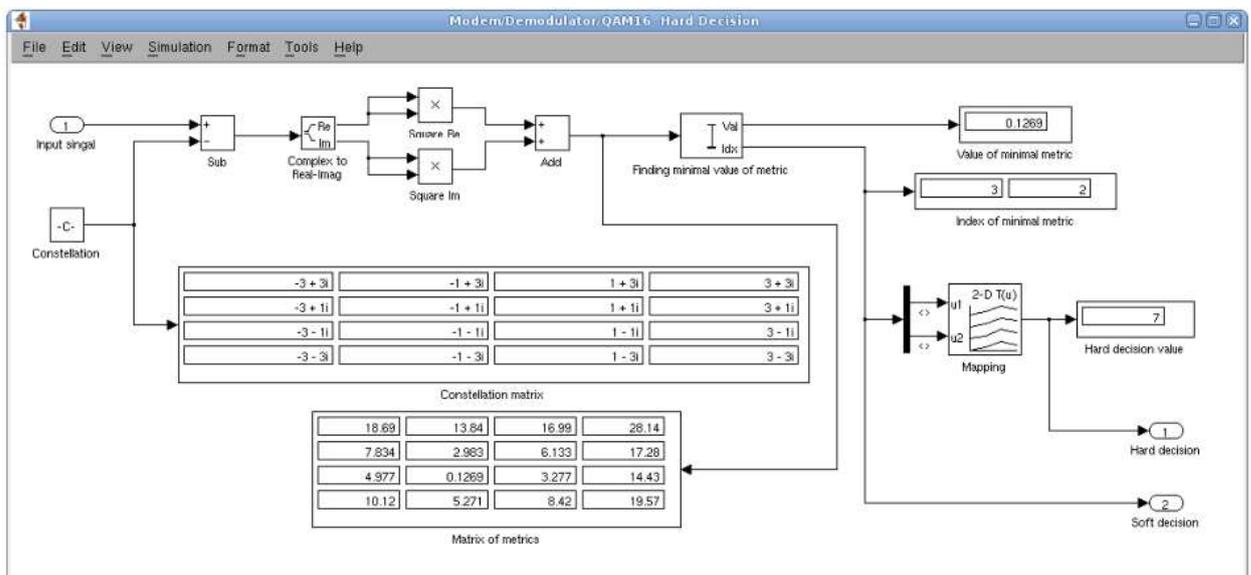


Рисунок 3.3 – Демодулятор сигнала

Соответствие между индексом минимальной метрики и символом задается в блоке n-D Lookup Table (рисунок 3.4).

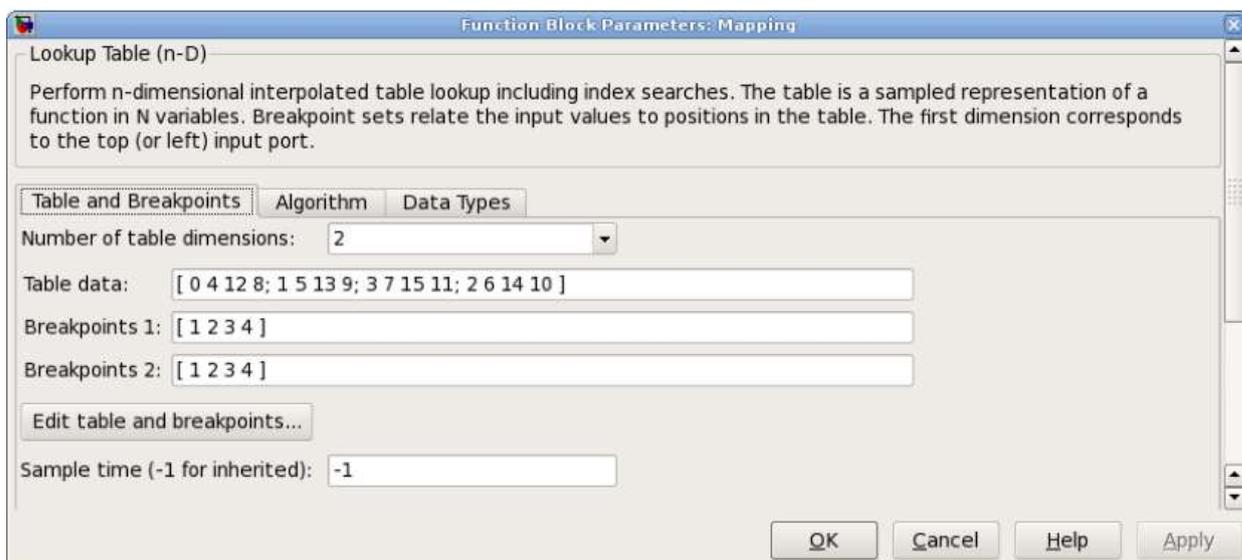


Рисунок 3.4 – Определение соответствий между индексами матрицы созвездия и символами (для QAM16)

На рисунке 3.5 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.

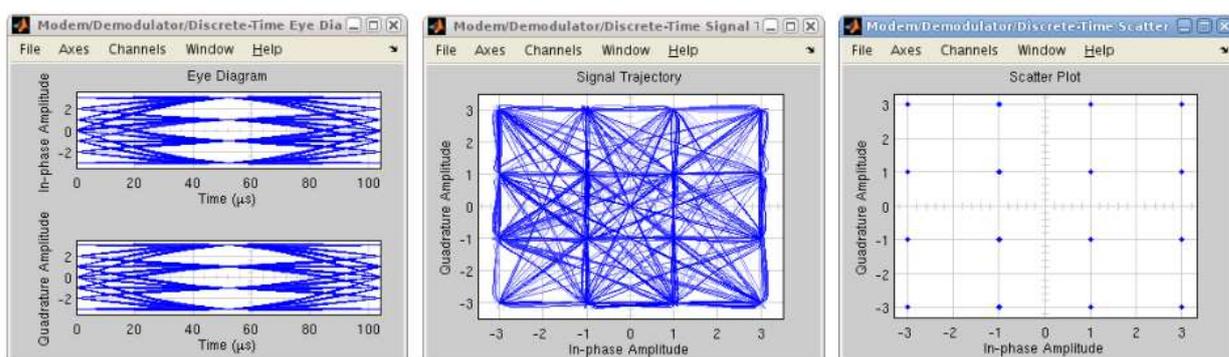


Рисунок 3.5 – Согласованный приём сигнала

Добавление к сигналу АБГШ приводит к размытию точек в созвездии и повышению вероятности ошибки при приеме сигнала (рисунок 3.6).

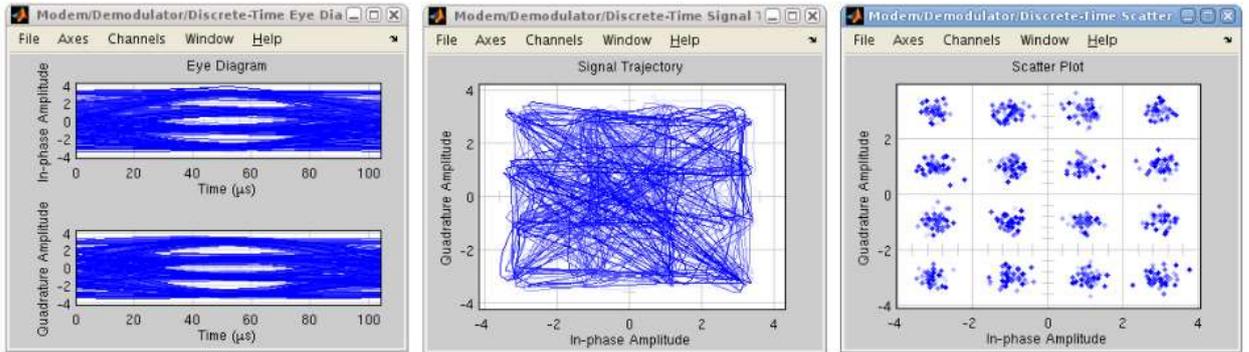


Рисунок 3.6 – Воздействие АБГШ на принимаемый сигнал

Частотное рассогласование приводит к вращению сигнального созвездия, что показано на рисунке 3.7. Фазовое рассогласование приводит к повороту сигнального созвездия (рисунок 3.8). Рассинхронизация приемника по символьной частоте приводит к размытию созвездия (рисунок 3.9).

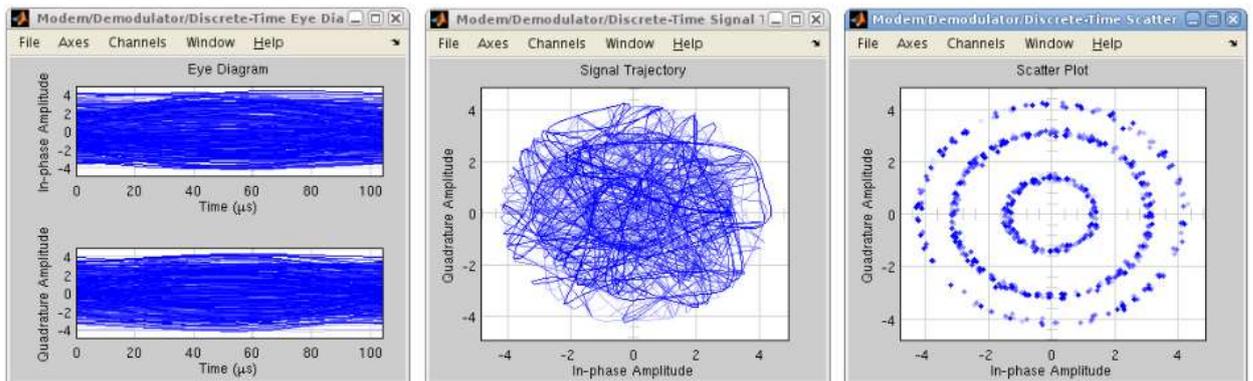


Рисунок 3.7 – Результат частотного рассогласования при приеме

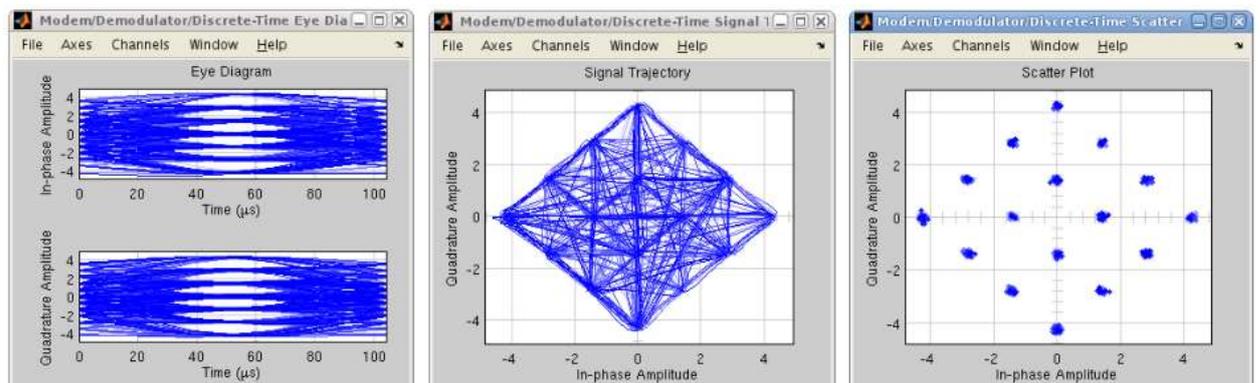


Рисунок 3.8 – Результат фазового рассогласования при приеме

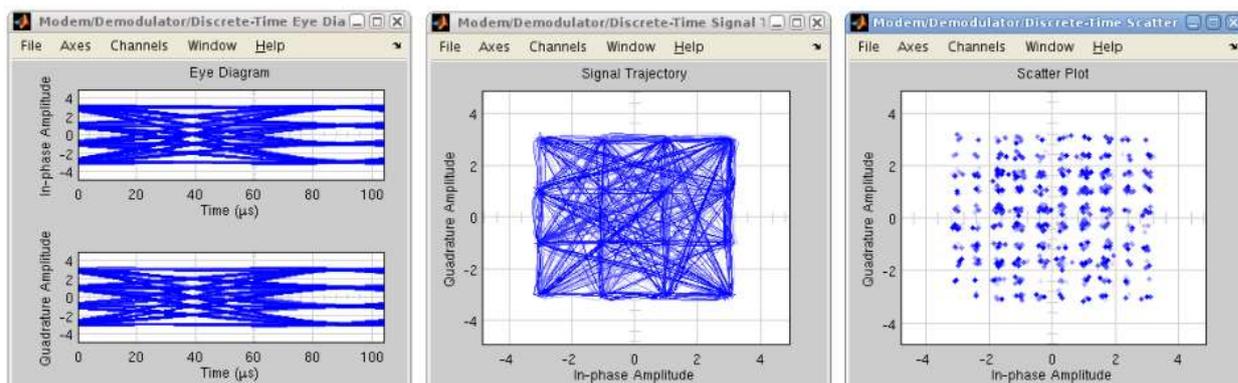


Рисунок 3.9 – Результат рассогласования по символьной частоте при приеме

На рисунке 3.10 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).

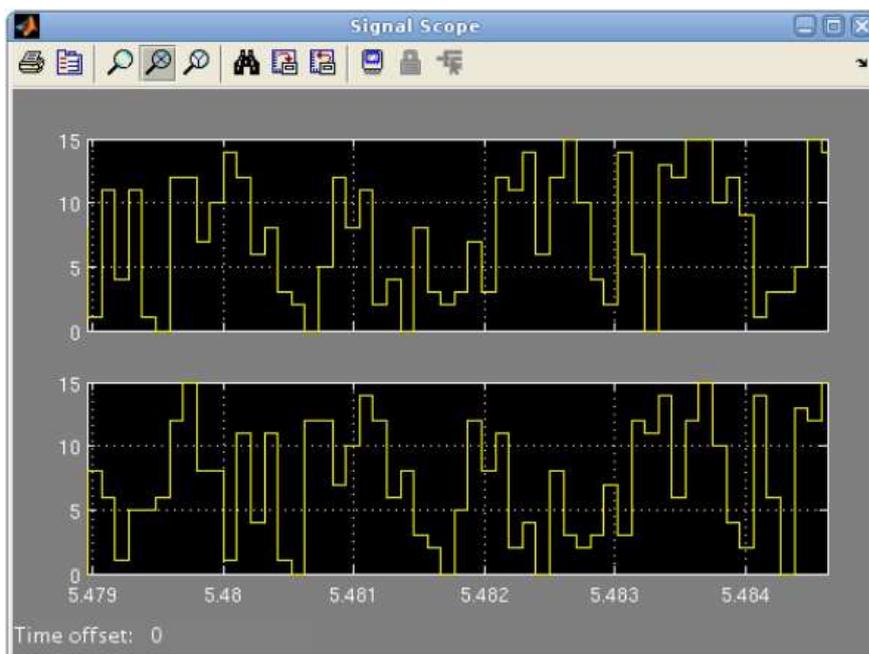


Рисунок 3.10 – Сопоставление передаваемого и принимаемого сигналов

### 3.3 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 значения 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  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $85^\circ$ ,  $175^\circ$ . 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.

### 3.4 Контрольные вопросы

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.

## **4 Лабораторная работа №4 «Моделирование системы восстановления несущего колебания»**

### **4.1 Цель работы**

Цель работы: исследование систем синхронизации приемных устройств цифровой связи.

### **4.2 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, 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 4.1 показан вид модели системы цифровой связи в Simulink с петлей восстановления несущего колебания (петля Костаса).

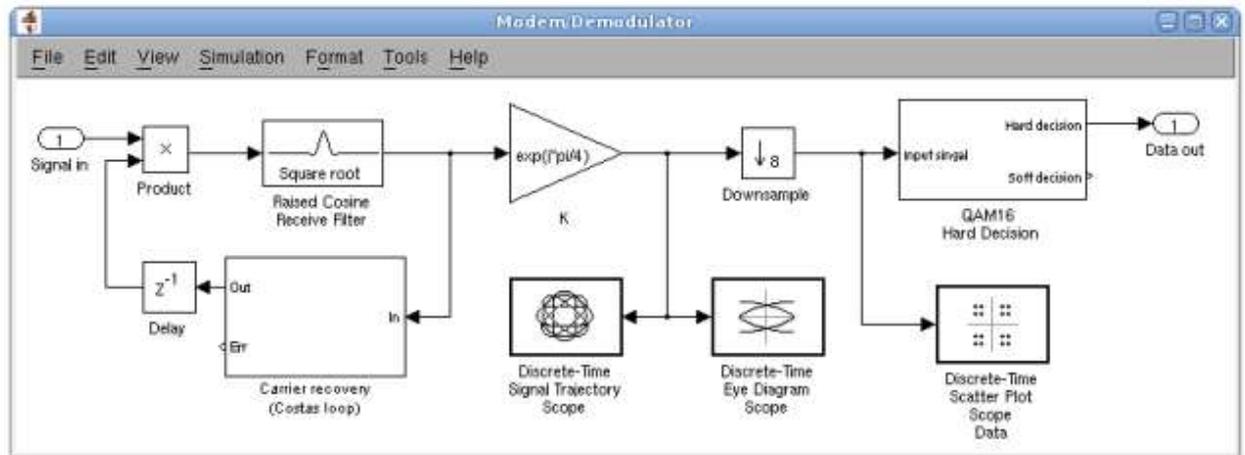


Рисунок 4.1 – Приемная часть системы связи с блоком синхронизации по несущему колебанию

Петля Костаса (рисунок 4.2) состоит из детектора Костаса (рисунок 3), фильтра низких частот обратной связи (ФНЧ ОС) и генератора, управляемого кодом (Numeric Controlled Oscillator).

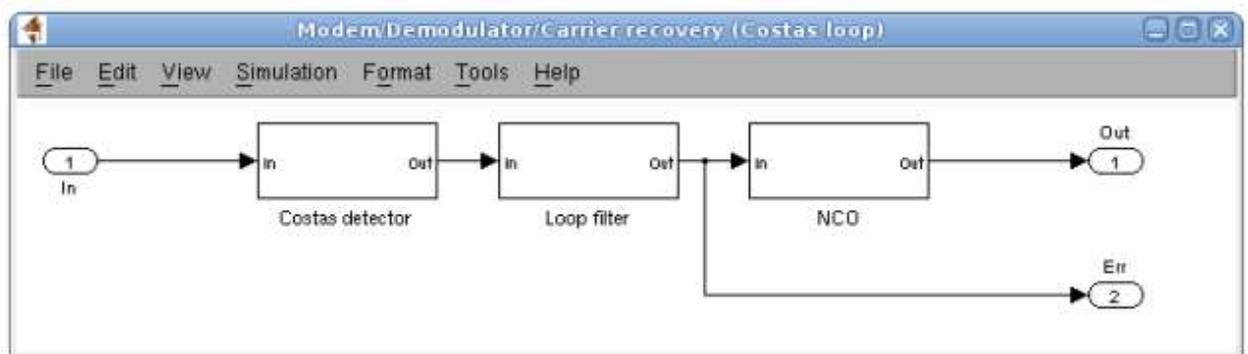


Рисунок 4.2 – Петля Костаса

На рисунке 4.3 показан вид модели фильтра обратной связи. При помощи блоков усиления задаются коэффициент пропорциональной части и коэффициент интегральной части звена регулирования.

Модель интегратора показана на рисунке 4.4. На рисунке 4.5 показана модель генератора комплексного сигнала, управляемого сигналом с фильтра обратной связи. На рисунке 4.6 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.

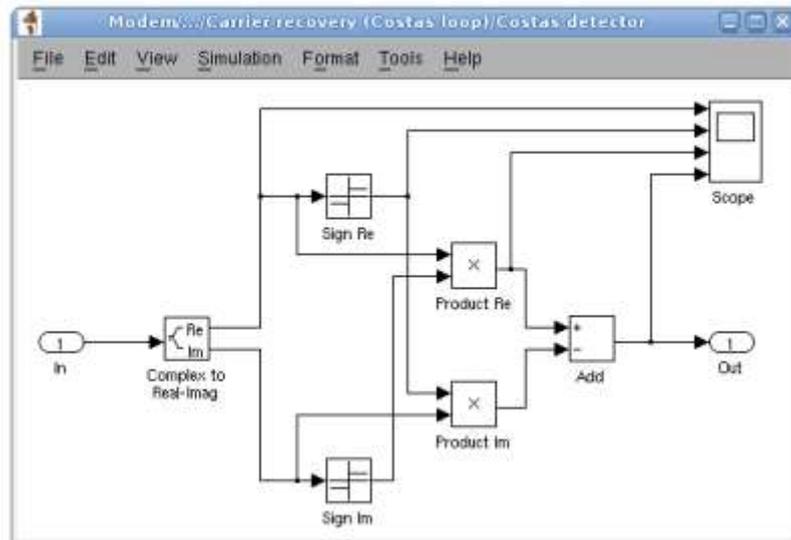


Рисунок 4.3 – Детектор Костаса

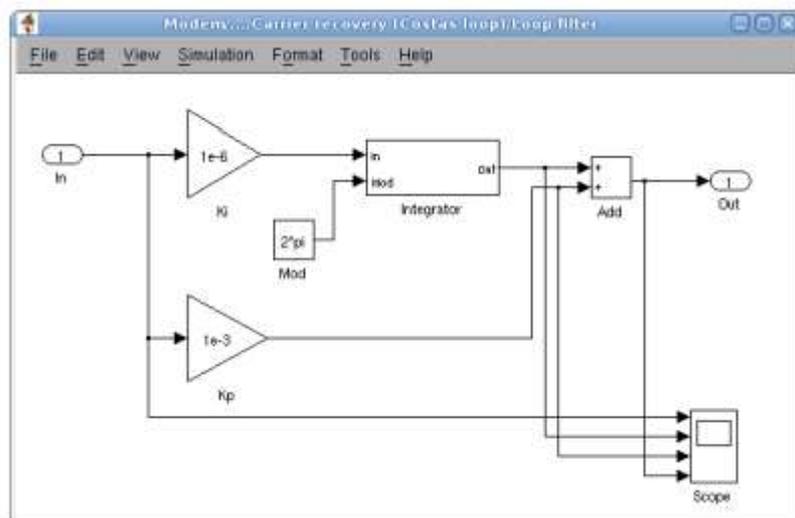


Рисунок 4.4 – Фильтр петли обратной связи

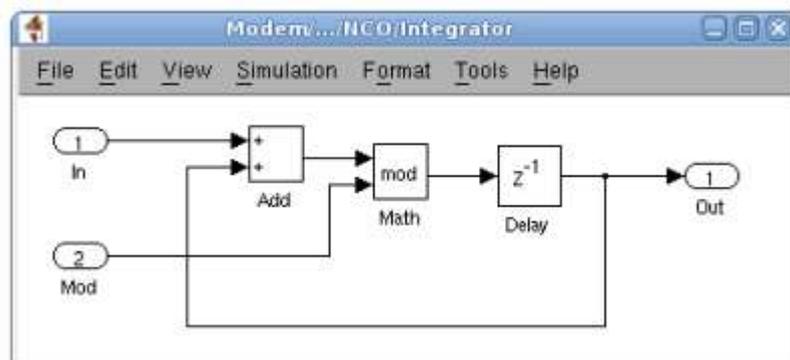


Рисунок 4.5 – Модель интегратора

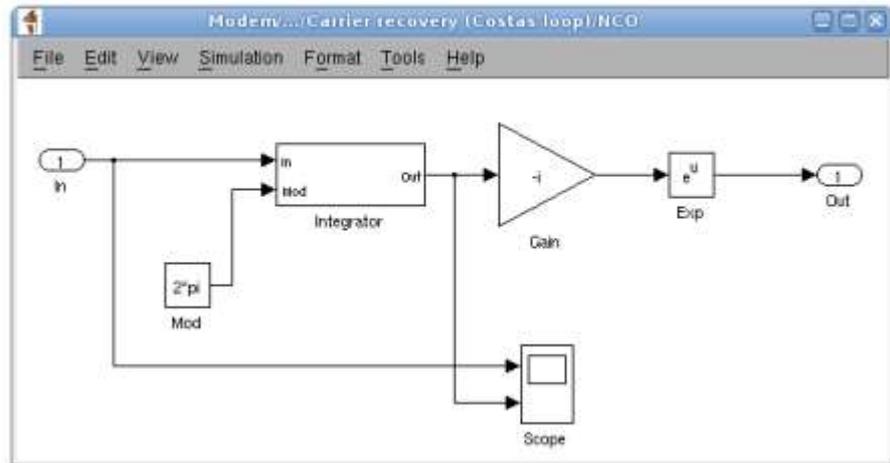


Рисунок 4.6 – Генератор комплексного сигнала, управляемый КОДОМ

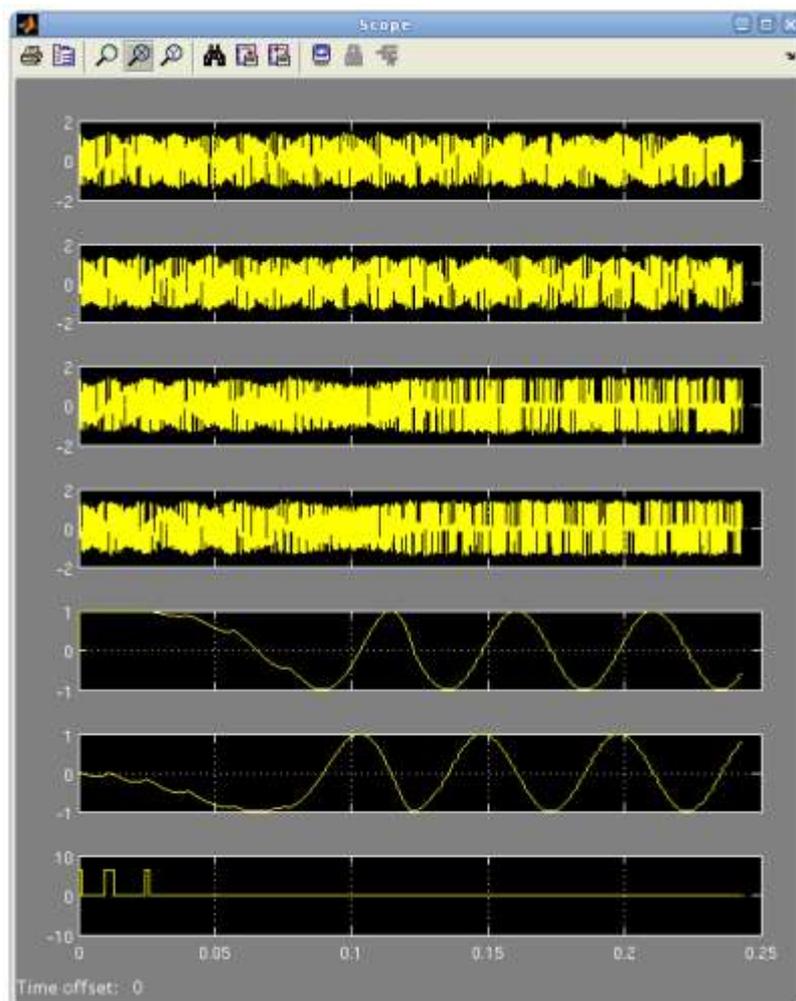


Рисунок 4.7 – Коррекция частотного рассогласования

### 4.3 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  $40^\circ$  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 работоспособна.

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 изменение 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.

### 4.4 Контрольные вопросы

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.

## **5 Лабораторная работа №5 «Моделирование петли символьной синхронизации»**

### **5.1 Цель работы**

Цель работы: исследование систем символьной синхронизации приемных устройств цифровой связи

### **5.2 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 5.1 показана модель приемного устройства с петлей символьной синхронизации (Timing phase recovery (Gardner detector)).

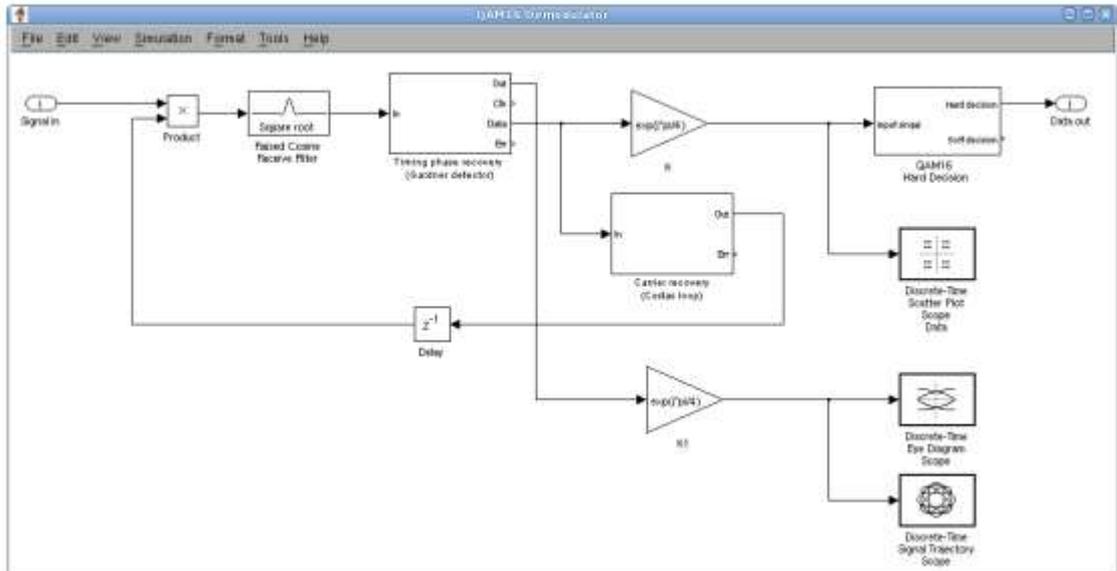


Рисунок 5.1 – Модель приемного устройства с петлей символьной синхронизации

На рисунке 5.2 показана модель петли синхронизации, состоящая из фильтра-интерполятора (фильтр Фарроу, рисунок 5.3), детектора Гарднера (рисунок 5.4), фильтра петли обратной связи (рисунок 5.5) и генератора, управляемого кодом (рисунок 5.6).

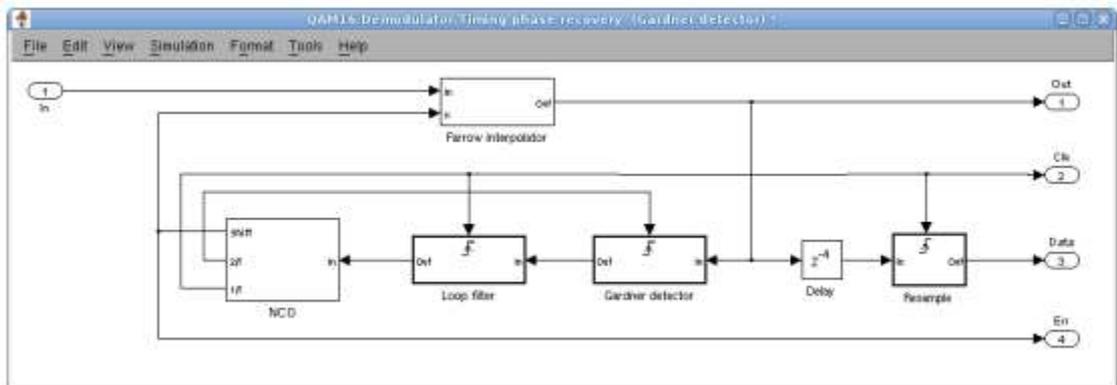


Рисунок 5.2 – Петля символьной синхронизации

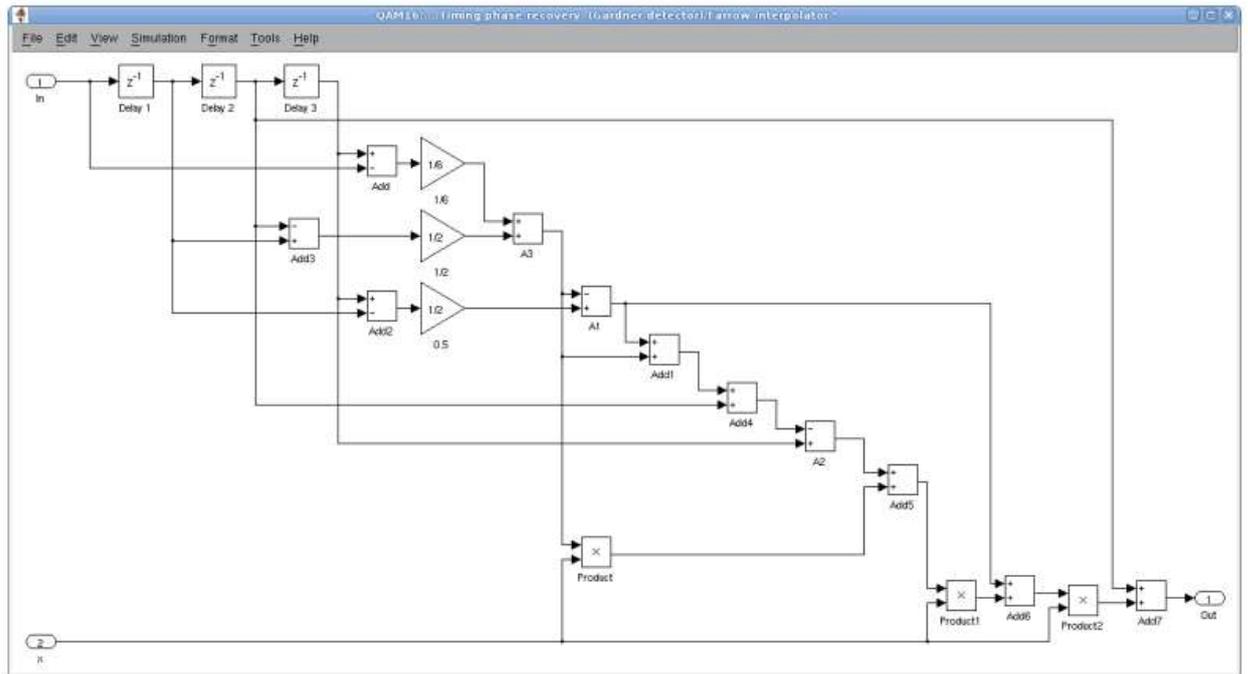


Рисунок 5.3 – Фильтр-интерполятор (структура Фарроу)

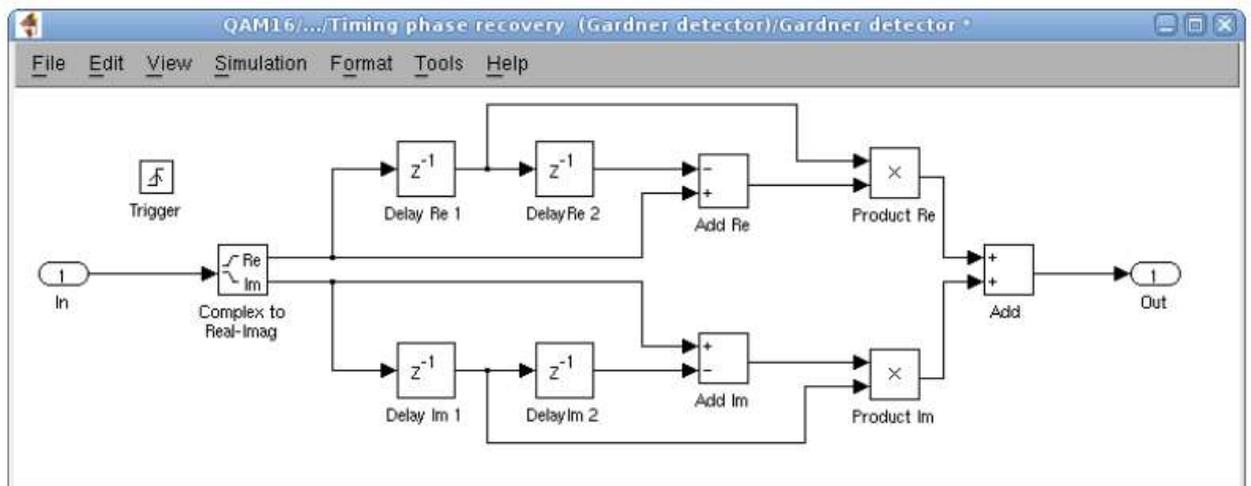


Рисунок 5.4 – Детектор Гарднера

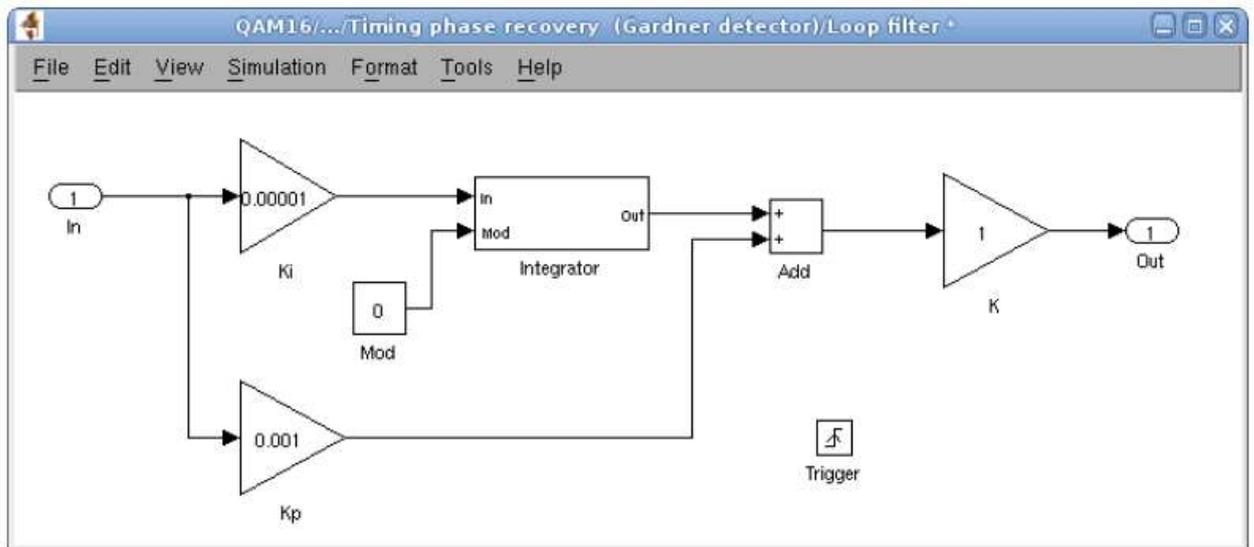


Рисунок 5.5 – Фильтр петли обратной связи

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

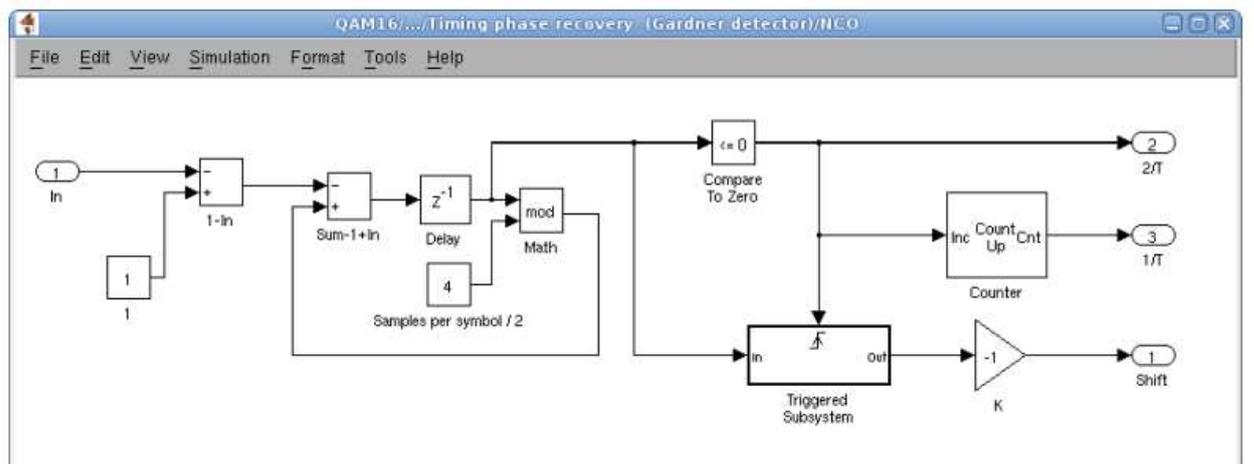


Рисунок 5.6 – Генератор, управляемый кодом

Генератор, управляемый кодом, выполнен на основе структуры, предложенной Гарднером. В структуре генератора присутствует блок `Triggered Subsystem` (рисунок 5.7), позволяющий производить передискретизацию сигнала.

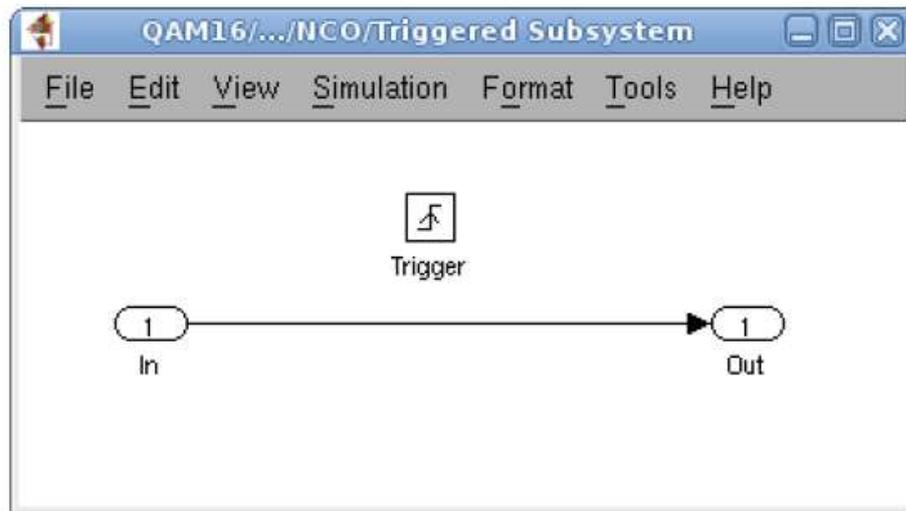


Рисунок 5.7 – Блок передискретизации сигнала

На рисунке 5.8 показаны диаграммы сигналов приемника системы связи при различных значениях дробной задержки в канале связи.

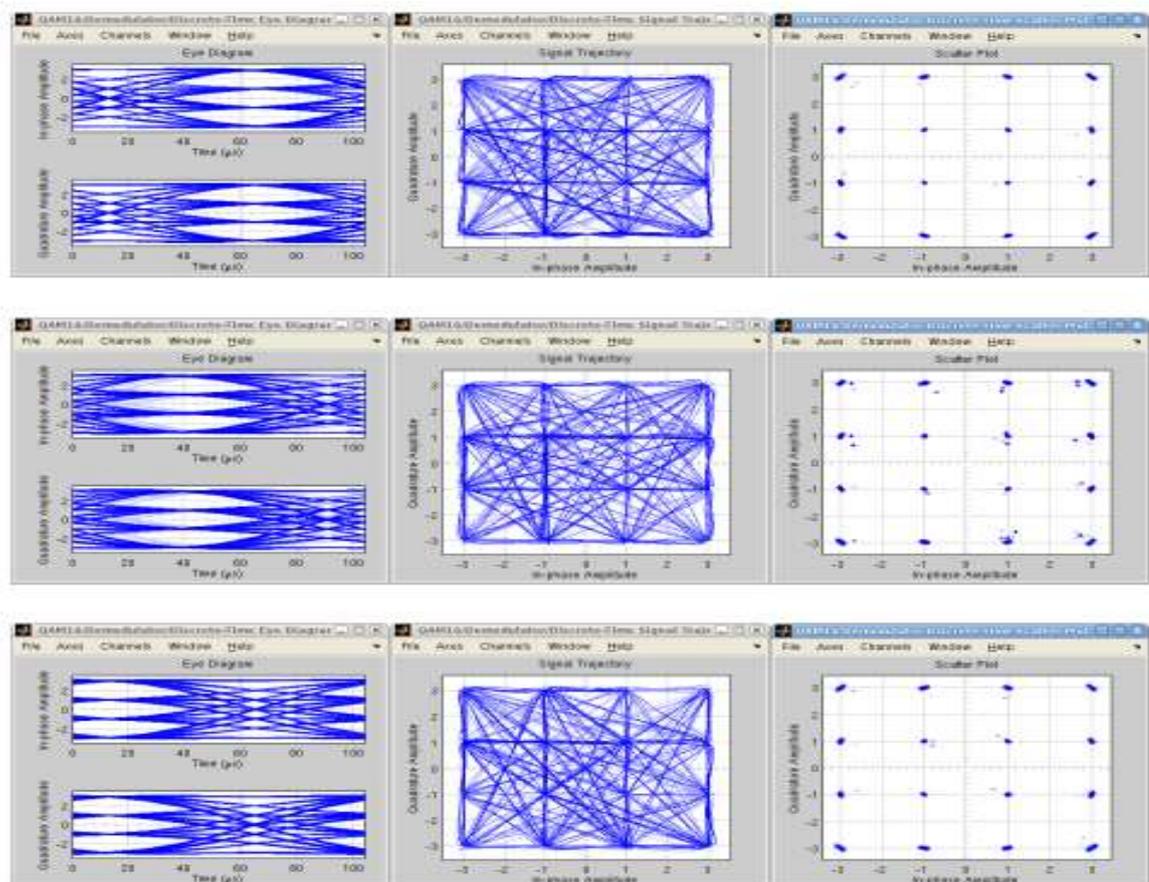


Рисунок 5.8 – Вид принимаемого созвездия при различных значениях дробной задержки в канале связи 64

### 5.3 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.

### 5.4 Контрольные вопросы

- 1) Системы синхронизации по символьной частоте.
- 2) Детекторы ошибки синхронизации по символьной частоте.
- 3) Схема построения генератора, управляющего фильтром-

интерполятором.

4) Фильтры-интерполяторы. Фильтр Фарроу, полифазный фильтр-банк.