

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»

Кафедра радиотехники

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению цикла лабораторных работ по дисциплине

**"Технологии беспроводного доступа в  
телекоммуникационных системах"**

для студентов направления 11.03.01 "Радиотехника" (профиль  
"Радиотехнические средства передачи, приема и обработки  
сигналов") и дисциплине

**«Технологии телекоммуникационных систем»**

для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные  
системы и комплексы»

очной и заочной форм обучения

Воронеж 2017

Составитель ст. преп. В.В. Жилин  
УДК 621.39

Методические указания к выполнению цикла лабораторных работ по дисциплине "Технологии беспроводного доступа в телекоммуникационных системах" для студентов направления 11.03.01 "Радиотехника" (профиль "Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов") и дисциплине «Технологии телекоммуникационных систем» для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной и заочной форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» сост. В.В. Жилин. – Воронеж, 2017. – 50 с.

Методические указания охватывают весь цикл лабораторных работ изучения дисциплины и включают 5 лабораторных работ общей трудоемкостью 24 часа. Изложен общий порядок выполнения лабораторных работ, указаны цель и требуемые программно-аппаратные средства, представлены краткие теоретические сведения, определены задания.

Методические указания представлены в электронном виде и содержатся в файле Методичка ТБДТС.pdf

Ил. 44. Библиогр.: 2 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доц. В.П. Литвиненко

Ответственный за выпуск зав. кафедрой канд. техн. наук, проф. Б.В. Матвеев

Издается по решению учебно-методического совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический  
университет», 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Передача информации в цифровой форме позволяет уйти от аппаратных погрешностей элементов, создавать блоки цифровой обработки сигналов с абсолютно идентичными параметрами. Принципиально новые методы цифровой обработки сигналов позволяют обеспечить регенерацию передаваемой информации, искаженной помехами в канале связи, снизить вероятность ошибки до сколь угодно малого значения. Архитектура цифровой системы связи может полностью определяться на программном уровне и изменяться в процессе работы устройства для более эффективного использования спектрального и энергетического ресурса канала связи при постоянно изменяющихся условиях распространения сигнала в канале.

Современные системы связи работают в условиях жесткого дефицита частотного ресурса, организация доступа абонентов к услугам сети связи требует ограничения спектра сигнала от каждого абонентского передатчика для исключения взаимного влияния сигналов. В условиях постоянно возрастающих требований к цифровым системам связи по скорости передачи данных возникает необходимость в максимально возможном ограничении спектра сигнала передатчика и повышению его спектральной эффективности. Ограничение спектра сигнала происходит при помощи формирующего фильтра.

В лабораторном цикле исследуется устойчивость КАМ-сигналов различного порядка к воздействию искажения сигнала при прохождении по радиоканалу. Лабораторные исследования выполняются в среде блочного имитационного моделирования Simulink MATLAB.

## **1. Порядок выполнения лабораторных работ цикла**

Лабораторные работы выполняются студентами индивидуально, каждому студенту отводится персональный компьютер с установленными программными средствами. В распоряжении студента так же сетевой диск, доступ к интернету. Методические указания расположены на сетевом диске в электронном виде. Работы выполняются по вариантам.

Общий порядок выполнения лабораторных работ следующий:

- студенты заблаговременно самостоятельно до начала лабораторного занятия знакомятся с теоретическим и методическим материалом по теме предстоящей лабораторной работы;
- после краткой проверки преподавателем знаний студентов по теме лабораторной работы преподаватель объясняет цели, методы и порядок выполнения лабораторной работы;
- по разрешению преподавателя студенты приступают к выполнению работы в соответствии с заданием в настоящих методических указаниях;
- в ходе выполнения лабораторной работы студент может получить индивидуальные консультации, преподаватель при этом контролирует ход выполнения работы каждым студентом;
- результаты расчетов, моделирования и иных позиций лабораторного исследования фиксируются в виде копии экрана компьютера (при этом для идентификации авторства на экране должна присутствовать фамилия исполнителя (например, в названии файла проекта));
- по окончании выполнения работы студент представляет преподавателю результаты (черновики) выполнения лабораторной работы; лабораторная работа считается выполненной, если

получены верные результаты по каждому из лабораторных заданий;

- студент, выполнив работу, должен привести лабораторное место в исходное состояние: удалить свои файлы, убрать бумаги, выключить компьютер или иное лабораторное оборудование и т.д.
- к следующему занятию каждый студент представляет отчет в электронном виде и защищает результаты работы;
- на этом лабораторная работа считается законченной; каждая последующая работа выполняется по этой же схеме.

Результаты лабораторной работы оформляются в виде отчета (общим объемом 10-18 страниц формата А4), содержащего следующие позиции:

- титульный лист (вуз, факультет, дисциплина, номер и название лабораторной работы, группа, Ф.И.О. студента, преподавателя, год, город);
- цель лабораторной работы;
- результаты выполнения работы - в соответствии с заданием;
- выводы по результатам исследования;
- заключение (в соответствии с целью работы).

В случае пропуска занятия по уважительной причине студент может выполнить работу с другой студенческой группой.

## 2. Краткий теоретический материал

Цифровая модуляция (или манипуляция) - это процесс преобразование последовательности кодовых символов в последовательность элементов сигнала.

Квадратурная амплитудная модуляция (QAM, КАМ) - разновидность амплитудной модуляции сигнала. Представляет собой сумму двух несущих колебаний одной частоты, фазы которых отличаются на  $90^\circ$ . Каждое колебание промодулировано по амплитуде. На выходе получаем следующую формулу:

$$S(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t), \quad (1)$$

где  $I(t)$  и  $Q(t)$  - модулирующие сигналы,  $f_0$  - несущая частота.

Отличие квадратурной амплитудной манипуляции от обычной квадратурной манипуляции (её называют комплексная амплитудная модуляция) заключается в том, что изменяется как фаза, так и амплитуда сигнала. Это позволяет увеличить количество информации, передаваемой одним состоянием сигнала. В англоязычной литературе такой тип манипуляции часто называют QAM, обозначение QASK применяется редко.

На рис. 2.1 приведена упрощенная структурная схема формирователя КАМ-сигнала.

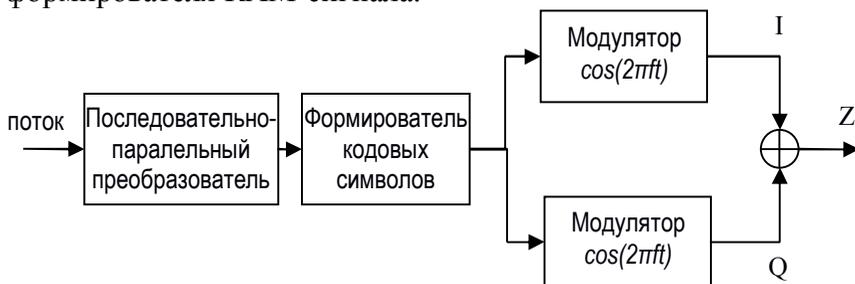
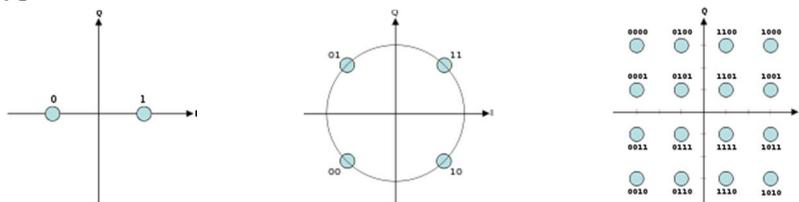


Рис. 2.1 - Структурная схема формирователя КАМ-сигнала

Рассмотрим подробнее формирование сигнального созвездия для различных видов манипуляций. Сигнальное созвездие - представление манипулированных радиосигналов в виде двухмерной точечной диаграммы на комплексной плоскости, точками на которой являются все возможные

символы (рис. 2.2). Сигнальные созвездия, полученные в результате измерения радиосигнала, могут использоваться для определения типа манипуляции, рода интерференции и уровня искажений.



Двоичная фазовая манипуляция (BPSK, фазовая манипуляция 2-ФМ)      Квадратурная созвездие для 16-КАМ      Сигнальное созвездие для 16-КАМ

Рис. 2.2 - Примеры созвездий для различных видов манипуляций

При представлении передаваемого символа в виде комплексного числа и при модуляции косинусного и синусного сигналов несущей частоты, соответственно действительной и мнимой частями, символ можно передать двумя несущими с одной частотой. Такие несущие называются квадратурными. Когерентный детектор способен демодулировать обе несущие независимо. Принцип использования двух независимо модулируемых несущих лежит в основе квадратурной модуляции. Символы, представленные в виде комплексных чисел, можно отразить в виде точек на комплексной плоскости. Действительная и мнимая оси называют *in phase* (синфазной) или I-осью и *quadrature* (квадратурной) или Q-осью. Пользуясь геометрической трактовкой, каждый сигнал КАМ можно изобразить вектором в сигнальном пространстве. Причем, концы векторов в нем отображаются в виде сигнальных точек, координаты которых определяются значениями комплексных чисел. Точки на диаграмме называют сигнальными точками (или точками созвездия). Они представляют множество модулирующих символов, то есть модулирующий алфавит.

Рассмотрим детектирование, основанное на методе

максимального правдоподобия. Сигнал при прохождении по каналу связи подвергается искажению: из-за аддитивного белого Гауссовского шума, замирания, многолучевого распространения, затухания, помех и несовершенства радиоаппаратуры и т.п. При приёме радиосигнала в демодуляторе происходит оценка принятого символа: выбирается наилучшее приближение к переданному сигналу, т.е. ближайшую точку сигнального созвездия. Если искажения сигнала достаточно сильны, то может быть выбрана точка, отличная от переданной, и демодулятор выдаст неверный результат. Таким образом, расстояние между двумя ближайшими точками созвездия определяет помехоустойчивость манипуляции.

В целях анализа принятых сигналов сигнальное созвездие позволяет упростить обнаружение некоторых видов искажения сигнала. Например:

- Гауссовский шум представляется как размытые точки созвездия.
- Некогерентная одночастотная интерференция выглядит как круги вместо точки созвездия.
- Фазовые искажения видны как сигнальные точки, распределённые по кругу.
- Затухание сигнала приводит к тому, что точки, находящиеся по углам, оказываются ближе к центру, чем должны быть.

Рассмотрим формирование КАМ-сигнала. Предположим, что количество сигналов  $Q$  равно  $2^m$ , где  $m$  показывает число бит, переносимых одним сигналом. Пусть для начала  $m = 2k$ ,  $k$  - натуральное. Тогда  $\sqrt{q} = 2^k$ . Тогда сигналу с номером  $i$  можно поставить в соответствие два числа  $i_1$  и  $i_2$ , причем  $i_1, i_2 = 0, 1, \dots, \sqrt{q} - 1$  по следующему правилу:  $i = i_1\sqrt{q} + i_2$ . Пусть

$$s_{i_1} = A\left(1 - \frac{2i_1}{\sqrt{q} - 1}\right) \quad (2)$$

$$s_{i_2} = A \left( 1 - \frac{2i_2}{\sqrt{q} - 1} \right) \quad (3)$$

Тогда величины  $s_{i_1}$  и  $s_{i_2}$  будут равномерно расположены в интервале  $[-A, A]$ . Минимальное расстояние

$$\Delta = \frac{2A}{\sqrt{q} - 1}$$

составит

В общем случае, для системы, поддерживающей  $n$  амплитудных уровней для каждого потока двоичных символов, можно образовать  $n^2$  различных комбинаций нуля и единицы. Широкое распространение получила КАМ уровней 16, 32, 64, 128 и 256. Алгоритм квадратурной амплитудной модуляции, по сути, является разновидностью алгоритма гармонической амплитудной модуляции и поэтому обладает следующими важными свойствами:

- ширина спектра КАМ модулированного колебания не превышает ширину спектра модулирующего сигнала;
- положение спектра КАМ модулированного колебания в частотной области определяется номиналом частоты несущего колебания.

При квадратурной амплитудной модуляции достигается большое расстояние между соседними точками в плоскости IQ. Точки распределяются более равномерно, что способствует снижению ошибок приема. При передаче большего количества бит на символ, уровни энергии остаются теми же, а точки на диаграмме - ближе друг к другу, и передача становится менее устойчивой к шуму. Это приводит к более высокой вероятности ошибки, чем для более низких уровней КАМ. Таким образом, существует баланс между получением высоких скоростей передачи данных и поддержания приемлемой скорости битовых ошибок для системы радиосвязи.

Рассмотрим работу квадратурного модулятора на примере схемы формирования сигналов четырехфазной ФМ (4-ФМ) из потока двухбитовых символов (рис. 2.3).

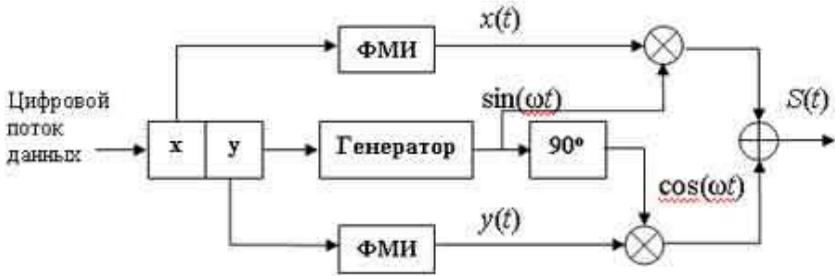


Рис. 2.3 - Схема квадратурного модулятора

Исходная последовательность двоичных символов длительностью  $T$  при помощи регистра сдвига разделяется на нечетные  $y$  и четные  $x$  импульсы, которые поступают на входы формирователей манипулирующих импульсов (ФМИ) соответственно квадратурного ( $\cos\omega t$ ) и синфазного ( $\sin\omega t$ ) каналов. На выходах ФМИ образуются последовательности биполярных импульсов  $x(t)$  и  $y(t)$  с амплитудой  $\pm Um$  и длительностью  $2T$ , которые поступают на входы канальных перемножителей, где они независимо друг от друга модулируют по амплитуде два одинаковых несущих колебания, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$ , т.е. находящихся в квадратуре. В результате, на их выходах формируются двухфазные ( $0, \pi$ ) ФМ колебания. После суммирования они образуют сигнал 4-ФМ или квадратурный ФМ-сигнал. Структура модулятора более высокого порядка не отличается от рассмотренной выше 4-ФМ.

Акцентируем внимание на отличиях модуляций  $n$ -ФМ и  $n$ -КАМ. Из теории сигналов известно, что при равном числе точек в сигнальном созвездии спектр сигналов КАМ идентичен спектру сигналов ФМ. Однако помехоустойчивость сигналов ФМ и КАМ различна. При одинаковом числе точек сигналы системы КАМ имеют лучшую помехозащищенность, поскольку расстояние между сигнальными точками при ФМ меньше расстояния между сигнальными точками при КАМ. На рис. 2.4 представлены сигнальные созвездия 16-КАМ и 16-ФМ при одинаковой нормированной мощности сигнала.

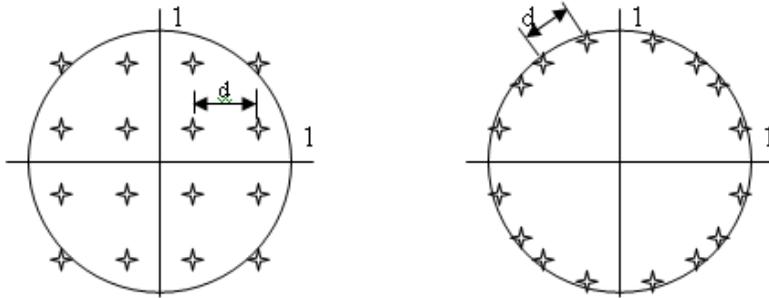


Рис. 2.4 - Сигнальные созвездия 16-КАМ и 16-ФМ

Расстояние  $d$  между соседними точками сигнального созвездия в системе КАМ с  $L$  уровнями модуляции определяется выражением:  $d = \sqrt{2} / (L - 1)$ . Аналогично при ФМ:  $d = 2 \sin(\pi / M)$ , где  $M$  – число фаз. Так, например, при  $M=16$  ( $L=4$ )  $d_{\text{кам}}=0,471$  и  $d_{\text{фм}}=0,390$ .

Отметим, что с увеличением порядка модуляции возрастает скорость передачи информации, то есть сигнал может нести больше бит информации на символ. Увеличение скорости передачи данных при увеличении порядка модуляции происходит в ущерб помехоустойчивости. Схемы модуляции более высокого порядка значительно меньше устойчивы к шумам и помехам. Учитывая это, многие системы радиосвязи используют динамические методы адаптивной модуляции, заключающиеся в том, что анализируются каналные условия и выбирается схема модуляции с самой высокой скоростью передачи для данного состояния канала. Воздействие помех приводит к возникновению неконтролируемых изменений амплитуды и фазы сигнала. При увеличении числа точек созвездия расстояние между ними уменьшается и, следовательно, возрастает вероятность ошибок при распознавании символа. Предельный уровень допустимых амплитудных и фазовых искажений КАМ сигнала представляет собой круг диаметром  $d$ .

### 3. Лабораторная работа № 1. Формирование комплексного сигнала

Цель работы: сформировать комплексный сигнал в среде имитационного моделирования Simulink MATLAB (ознакомительная работа).

#### 3.1 Лабораторное исследование

Создайте новую модель (*File – New – Model*), используйте свою фамилию для указания имени модели. Необходимые элементы модели перетаскиваются из библиотеки в проект.

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 при необходимости можно освежить - приведены в отдельном файле на сетевом диске.

Создайте новый проект и поместите на лист следующие блоки: *Gaussian Noise Generator*, *Digital Filter Design*, *Spectrum Scope* (рис. 3.1).

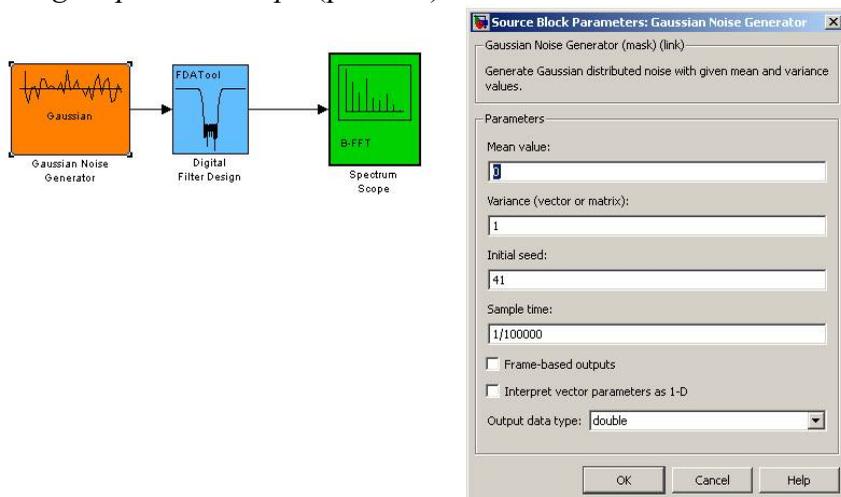


Рис. 3.1 – Моделирование цифрового фильтра  
Установите частоту дискретизации генератора шума

100 кГц - в настройках *Sample time* значение 1/100000 (рис. 3.1).

Установите настройки блока цифровой фильтрации сигнала в соответствии с рисунком 3.2.

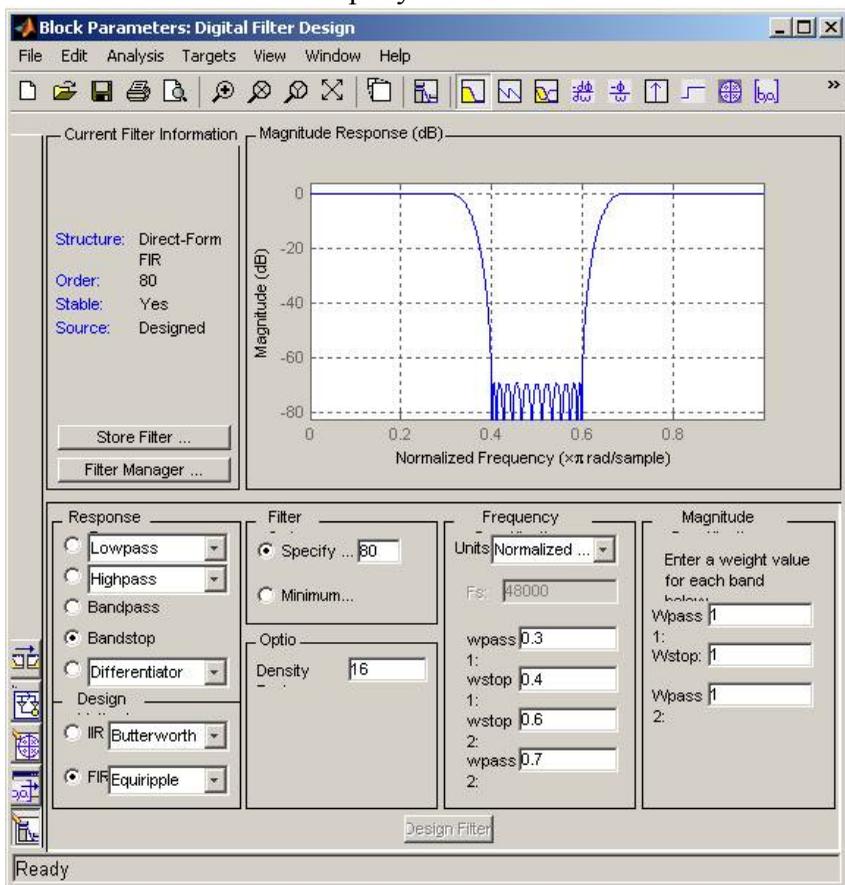


Рис. 3.2 – Настройки блока цифровой фильтрации сигнала

Для примера выбран режекторный (*Band stop*) 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.

На рисунке 3.3 показаны настройки блока анализатора спектра.

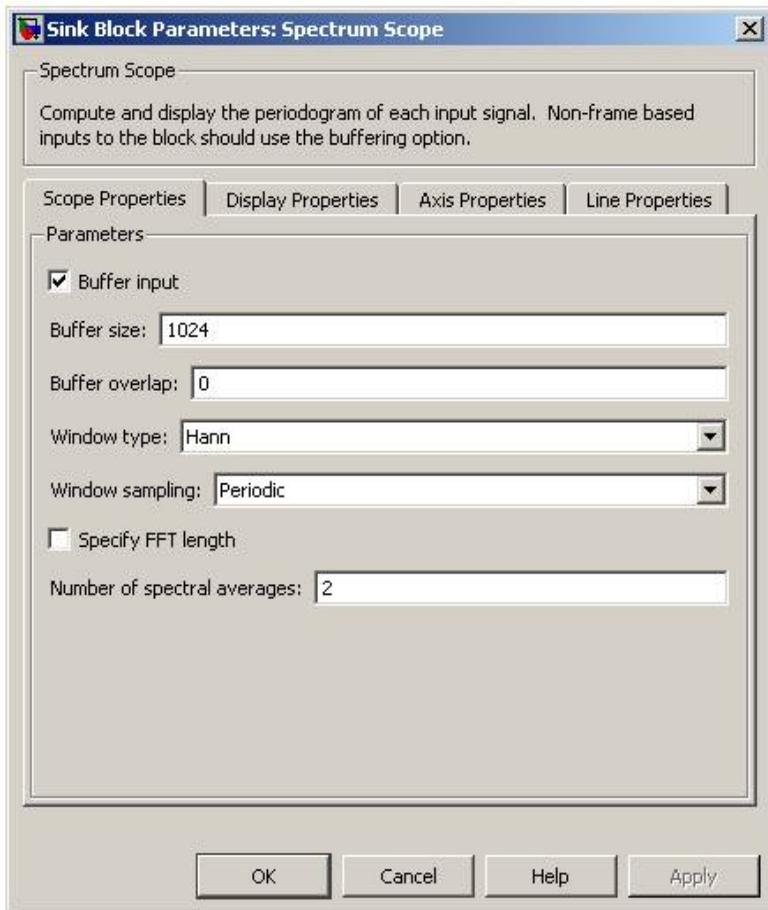


Рис. 3.3 – Настройки блока анализатора спектра

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. 3.4). Как видно на рисунке, спектр повторяет амплитудно-частотную характеристику фильтра.

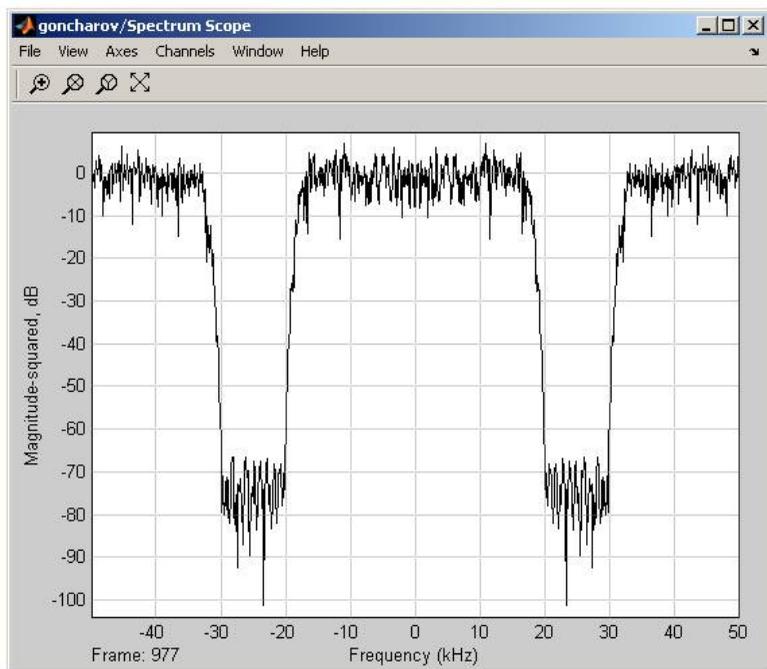


Рис. 3.4 – Отфильтрованный спектр генератора белого шума

Дополните модель согласно рисунку 3.5. Для визуального выделения блоков присутствует возможность изменения их цвета, для этого нужно нажать правой кнопкой мыши по блоку и выбрать цвет (*Back ground Color*).

Процесс формирования комплексного сигнала заключается в генерировании двух гармонических колебаний одной частоты со сдвигом фазы на  $90^\circ$ . Для этого используются блоки *Sine Wave*, настроенные соответствующим образом (рис. 3.6).

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 3.7 показаны осциллограммы сигналов модели, на рисунке 3.8 изображен смещенный спектр сигнала.

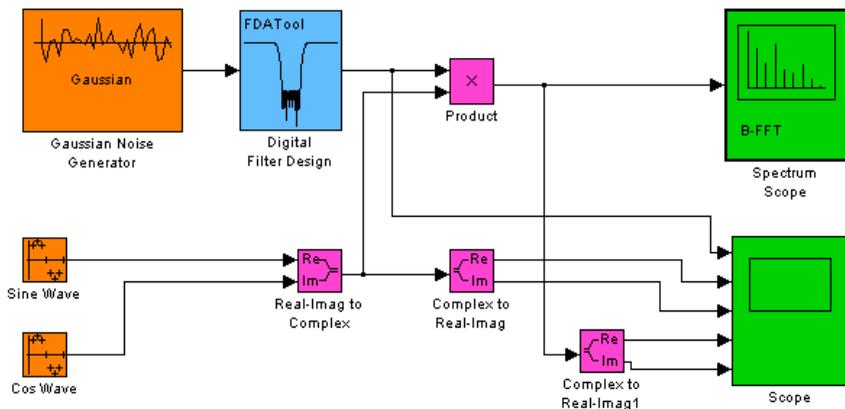


Рис. 3.5 – Формирование комплексного сигнала и смещение спектра

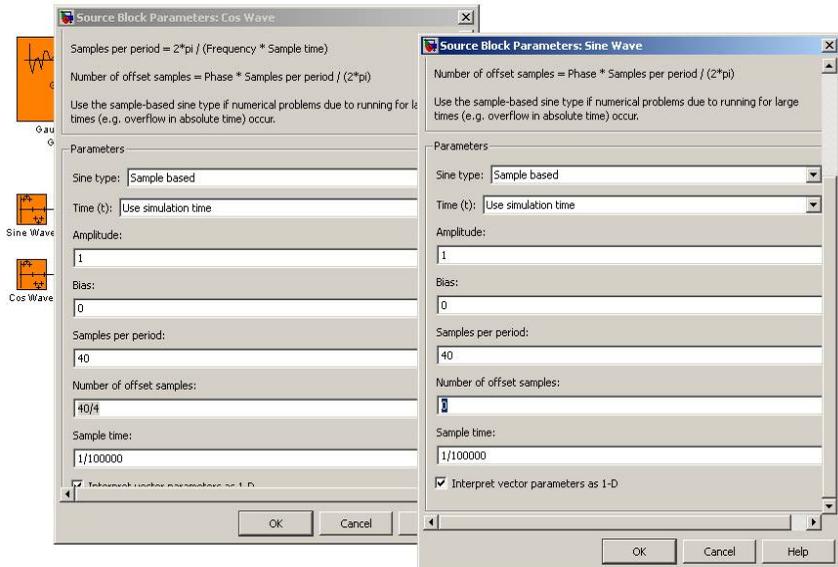


Рис. 3.6 – Настройки сигналов генератора комплексного сигнала

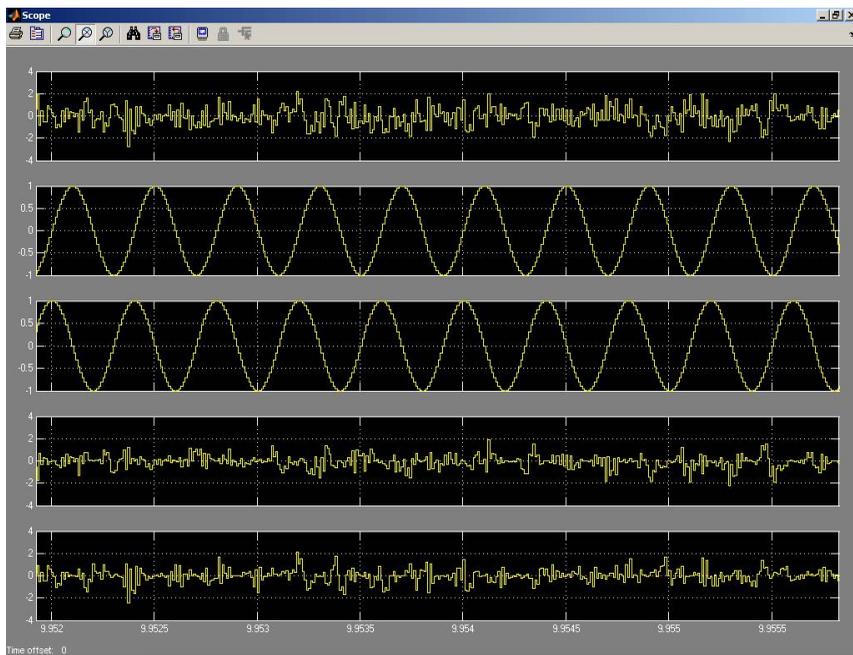


Рис. 3.7 – Осциллограммы сигналов модели

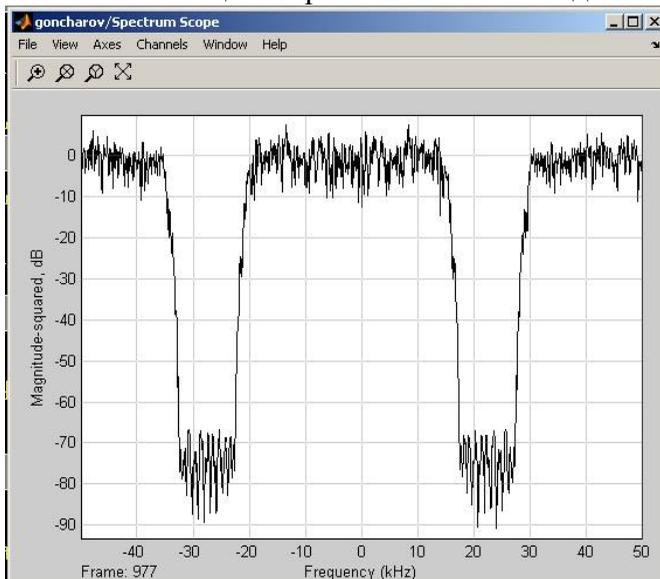


Рис. 3.8 – Смещенный спектр сигнала

Отчет должен содержать исследуемую схему,

выполненную в среде имитационного моделирования Simulink MATLAB, параметры составляющих ее устройств, характеристики входных и выходных сигналов (в виде осциллограмм и пр.). В выводах отразить причину сдвига спектра сигнала.

### **3.2 Вопросы для защиты лабораторного исследования**

Все ответы на вопросы должны быть подтверждены материалом отчета, либо (при необходимости) демонстрацией работы исследуемой схемы.

1. Каково назначение блока Gaussian Noise Generator, его основные параметры?
2. На что влияет параметр «частота дискретизации» используемого генератора шума?
3. Каково назначение блока Digital Filter Design, его основные параметры.
4. Каково назначение блока Spectrum Scope, его основные параметры.
5. Какими параметрами определяется выбранный режекторный фильтр? Их смысл.
6. Как выбрать оптимальный масштаб графика в анализаторе спектра?
7. Как (посредством какого блока и из каких источников) формируется комплексный сигнал в исследуемой схеме?
8. Каково назначение блока Complex to Real-Imag в исследуемой схеме?
9. Вследствие каких действий с исходным сигналом произошел сдвиг спектра сигнала?
10. Какие сигналы отражены на осциллограмме сигналов модели? Чем полезна осциллограмма?

## 4. Лабораторная работа № 2. Модель прямо-передатчика КАМ-сигналов

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.

### 4.1 Общие сведения по выполнению работы

Исходные данные для работы приведены в таблице .  
Варианты назначаются преподавателем, каждое задание выполняется для трех вариантов, что необходимо для сравнения распознаваемости сигналов.

Исходные данные (варианты)

| Вариант | Вид манипуляции | Позиционность созвездия | Кратность созвездия |
|---------|-----------------|-------------------------|---------------------|
| 0       | 2-ФМ            | 2                       | 1                   |
| 1       | 4-ФМ            | 4                       | 2                   |
| 2       | 8-ФМ            | 8                       | 3                   |
| 3       | 16-ФМ           | 16                      | 4                   |
| 4       | 32-ФМ           | 32                      | 5                   |
| 5       | 16-КАМ          | 16                      | 4                   |
| 6       | 32-КАМ          | 32                      | 5                   |
| 7       | 64-КАМ          | 64                      | 6                   |
| 8       | 128-КАМ         | 128                     | 7                   |
| 9       | 256-КАМ         | 256                     | 8                   |

Для выполнения задания потребуются 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 подсистемы формирователя сигнала цифрового передатчика (*Modulator*), показанную на рисунке 4.1.

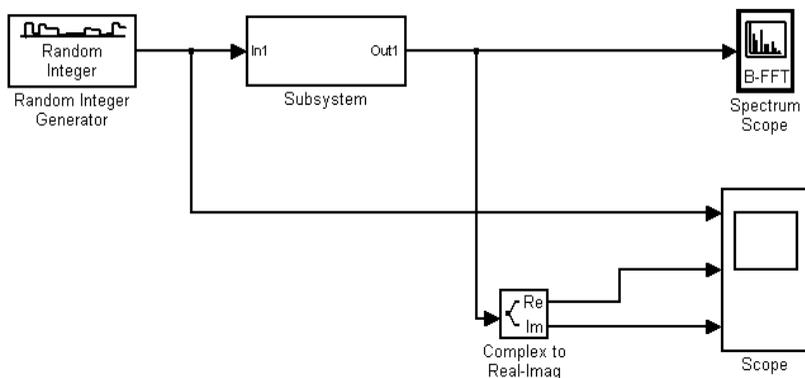


Рис. 4.1 – Общий вид модели передающей системы

В настройках генератора случайных чисел необходимо задать позиционность созвездия (*M-ary number*) согласно варианту и частоту дискретизации (*Sample Time*) 1/9600, что соответствует символической скорости передачи данных 9600 б/с.

Все последующие окна с настройками блоков (рис. 4.2-4.8) представлены для сигнала 16-QAM.

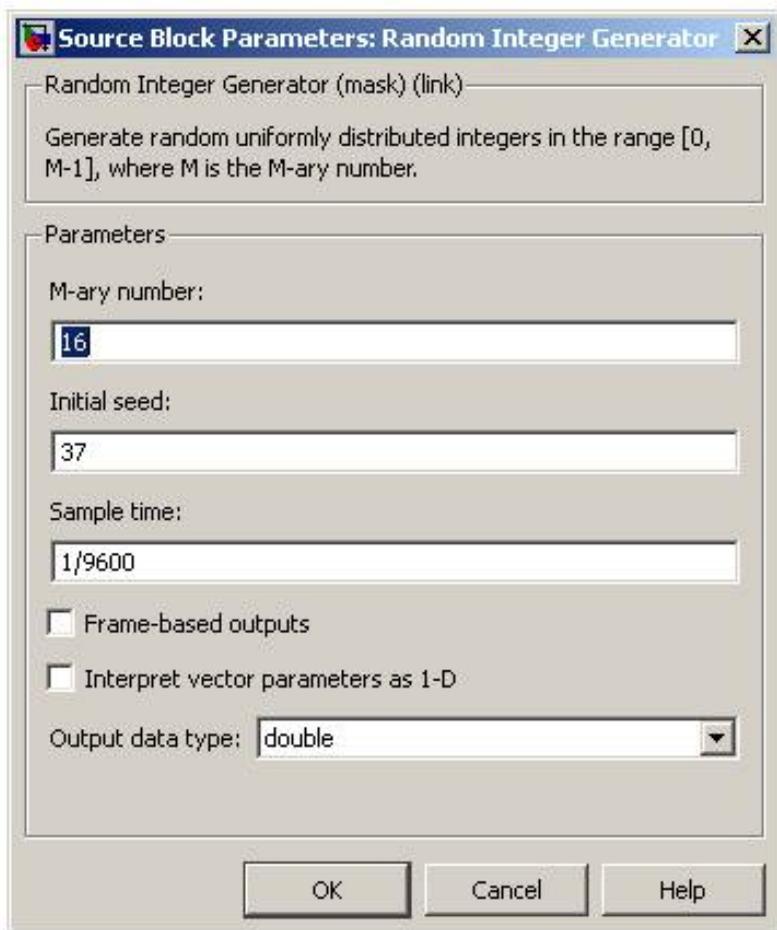


Рис. 4.2 – Настройки генератора случайных чисел

В настройках анализатора спектра (*Spectrum Scope*) необходимо выставить размер окна БПФ 1024 и включить буферизацию входного сигнала с размером буфера 1024 отсчета (рис. 4.3). Входными сигналами осциллографа являются сигнал данных и составляющие выходного комплексного сигнала передатчика, которые выделяются при помощи блока *Complex to Real-Imag*.

На рисунке 4.4 показана модель формирователя сигнала.

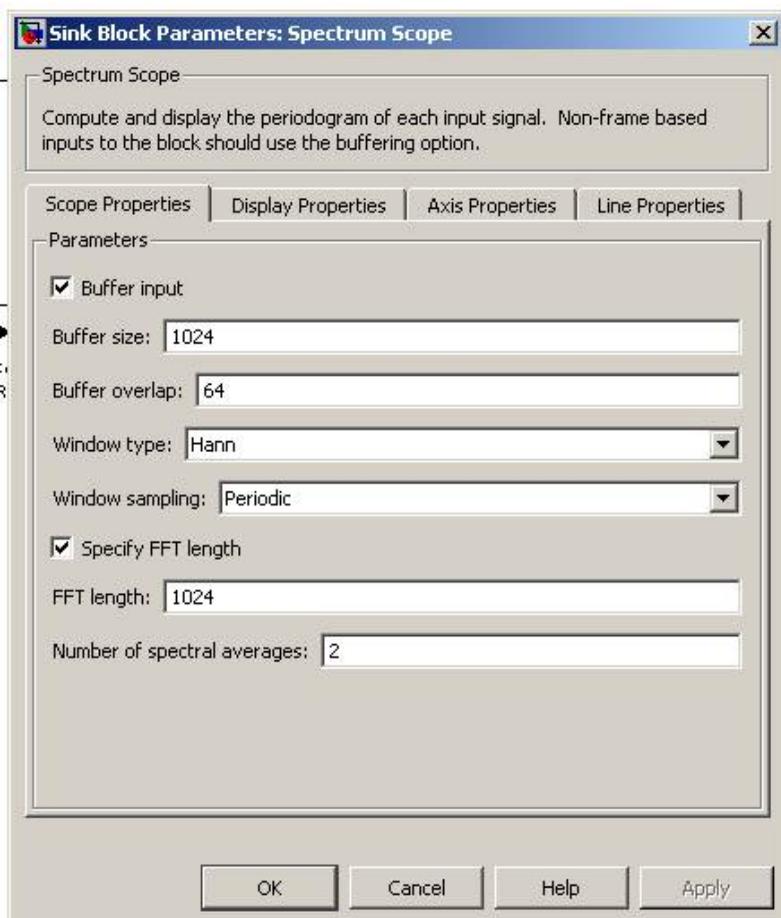


Рис. 4.3 – Настройки анализатора спектра

В настройках таблицы истинности (*1-D Look up Table*) необходимо указать соответствие между вектором входных символов и точками сигнального созвездия (рис. 4.5). В строке *Breakpoints* укажите вектор входных символов согласно позиционности созвездия, например, для 16-QAM: [ 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 16-QAM 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].

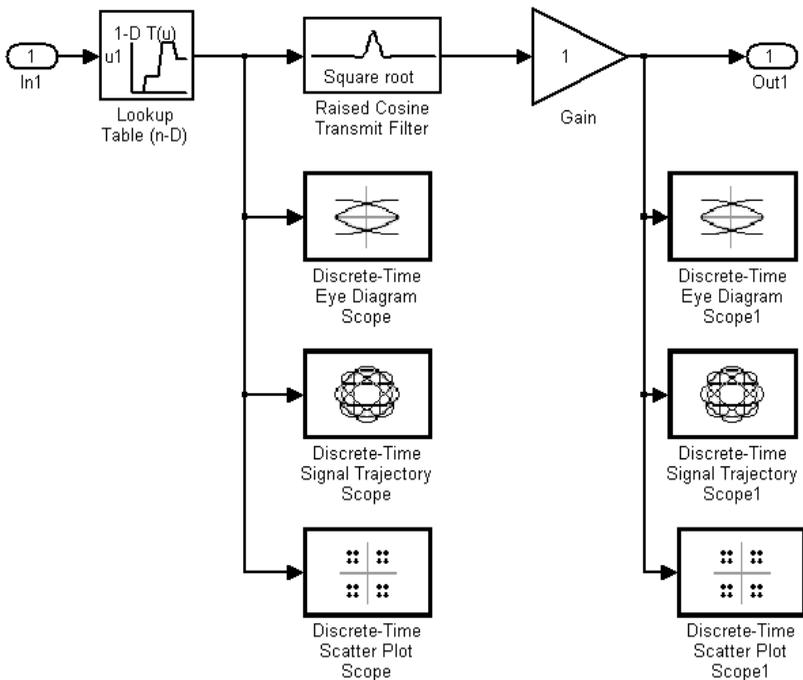


Рис. 4.4 – Формирователь сигнала

Сигнально созвездие строится согласно формулам 1-3. Для манипуляций высокого порядка необходимо использовать методы автоматической генерации векторов в MATLAB: точки созвездия вычисляются с помощью встроенных функций  $\text{pskmod}(x,M)$  и  $\text{qammod}(x,M)$  (рис. 4.6 и 4.7 соответственно).

Ограничение спектра сигнала выполняется при помощи формирующего фильтра с характеристикой корень из приподнятого косинуса (рис. 4.4) со следующими настройками (рис. 4.8):

- тип фильтра (*Filter Type*) – корень из приподнятого косинуса (*Square Root*);

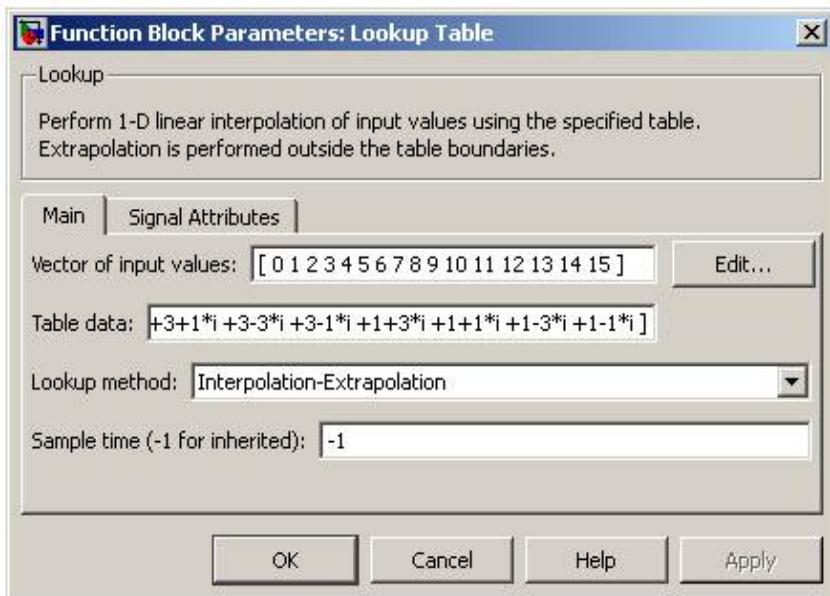


Рис. 4.5 – Настройки таблицы истинности

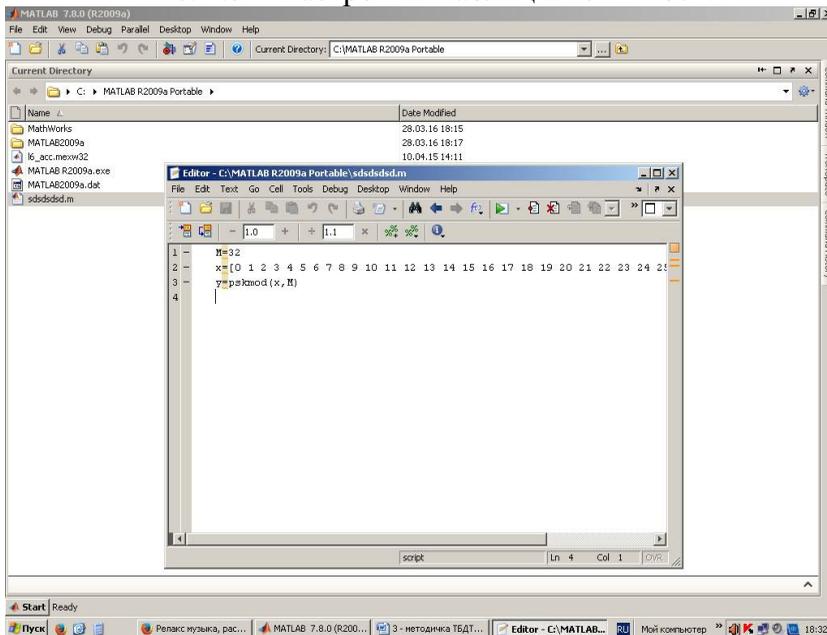


Рис. 4.6 – Генерация векторов для n-ФМ

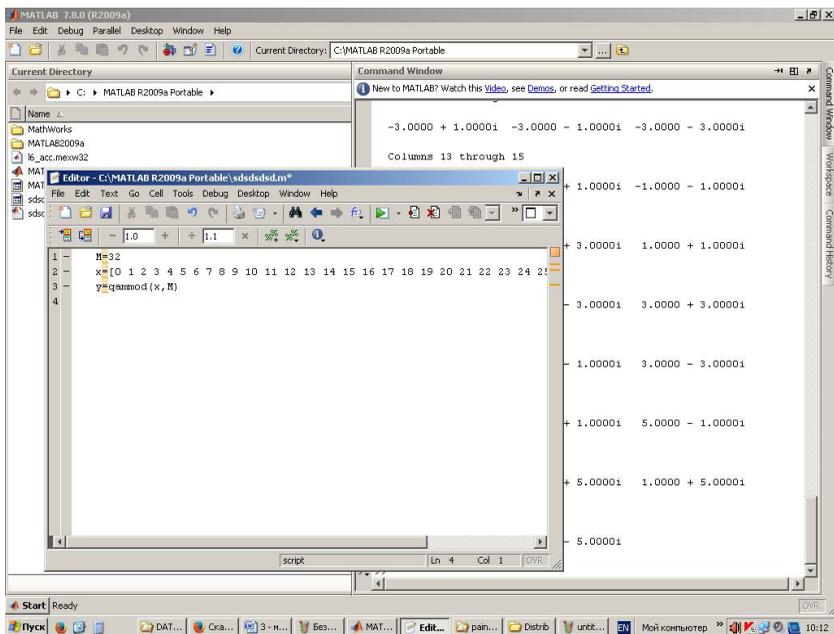


Рис. 4.7 – Генерация векторов для n-KAM

- групповая задержка, определяющая длину импульсной характеристики фильтра, (*Group Delay*) – 5 символов;
- коэффициент скругления (*Roll off Factor*) – 0.8;
- коэффициент повышения частоты дискретизации (*Up sampling factor*) – 8.

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

$$K = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |s_i|^2}, \quad (4)$$

где  $N$  – позиционность созвездия,  
 $s_i$  – точки созвездия (комплексные числа).

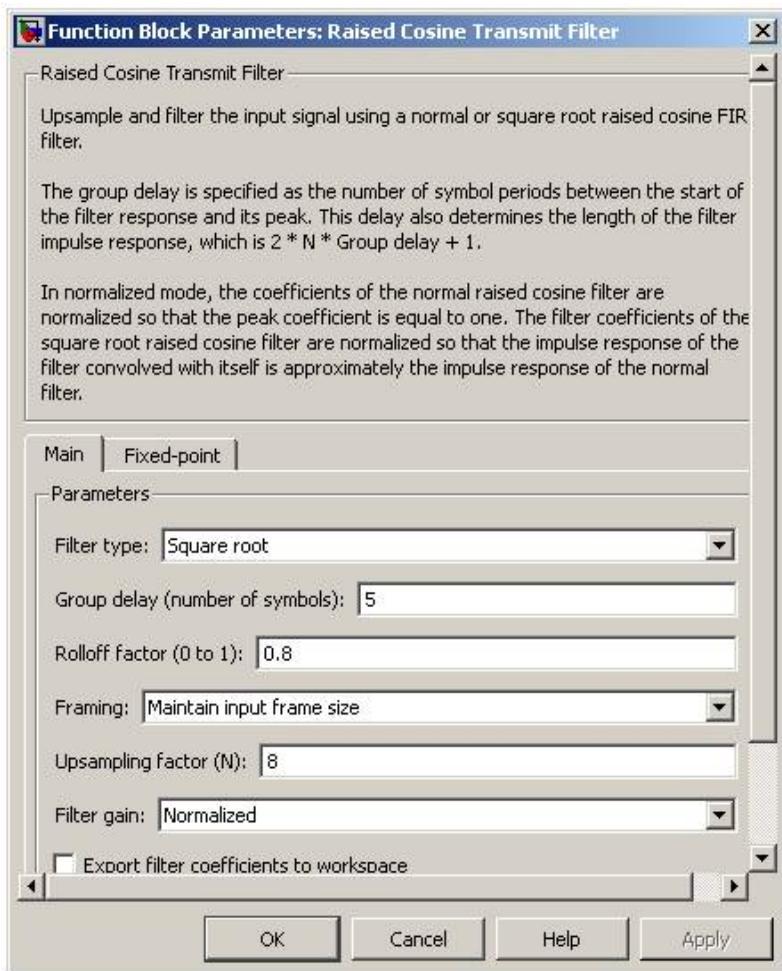


Рис. 4.8 – Настройки формирующего фильтра с характеристикой корень из приподнятого косинуса

Для исследования процессов формирования сигнала необходимо использовать блоки отображения глазковых диаграмм, блоки отображения траектории вектора комплексной огибающей и блоки отображения диаграммы рассеяния (рис. 4.9).

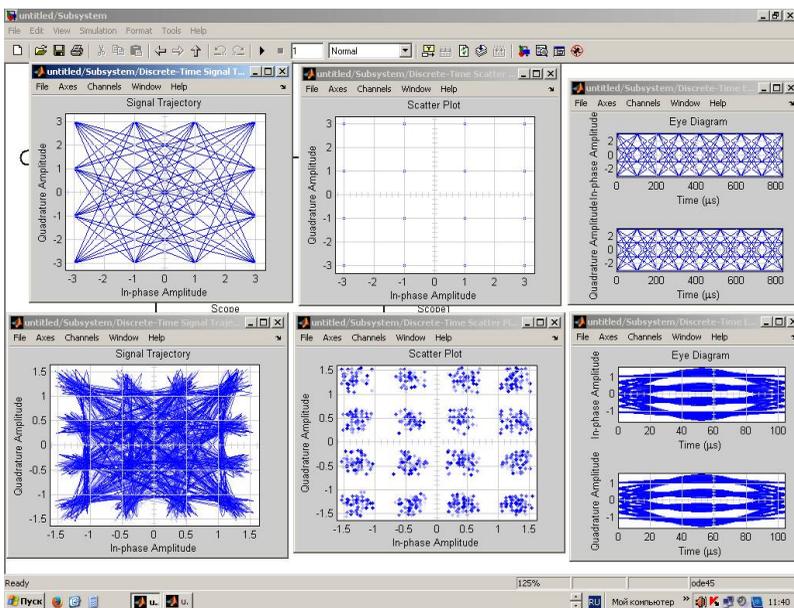


Рис. 4.9 – Блоки отображения информации о сигналах

Глазковая диаграмма представляет собой “осциллограмму” аналогового демодулированного сигнала, построенную при длительности, равной одному символному такту, и бесконечном “времени послесвечения экрана”. В точках оптимальной дискретизации линии на такой диаграмме образуют узкие пучки, свободное пространство между которыми по форме напоминает раскрытый глаз. При прохождении сигнала через канал связи, обладающий частотной дисперсией, то есть вносящий разную групповую задержку на разных частотах, символы оказываются “размазанными” во времени и “наползают” друг на друга. Эту ситуацию и отражают диаграммы рассеяния. Минимизировать межсимвольную интерференцию удастся, используя адаптивные фильтры, параметры которых автоматически подстраиваются под характеристики обрабатываемого сигнала.

На рисунке 4.10 показан пример работы анализатора спектра.

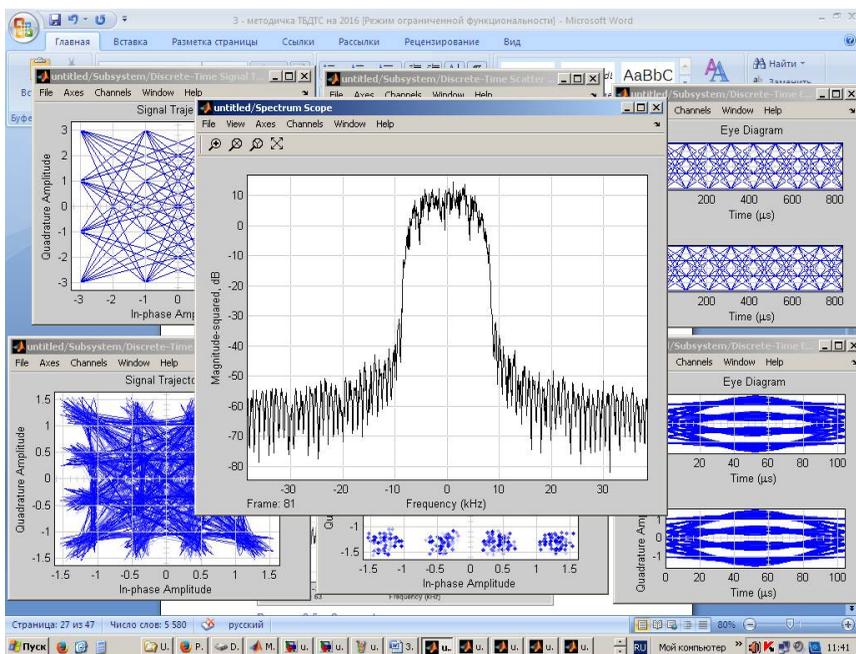


Рис. 4.10 – Спектр формируемого сигнала

При помощи трехканального осциллографа имеется возможность сопоставить сигнал данных и компоненты сигнала комплексной огибающей (рис. 4.11).

#### 4.2 Лабораторное исследование

1. Согласно приведенным выше рисункам, создайте модель передатчика в Simulink, убедитесь в ее работоспособности на примере созвездия 16-QAM.
2. Подготовьте точки созвездия, соответствующие входным символам, для созвездий по вариантам. Отрадите их в виде таблицы.

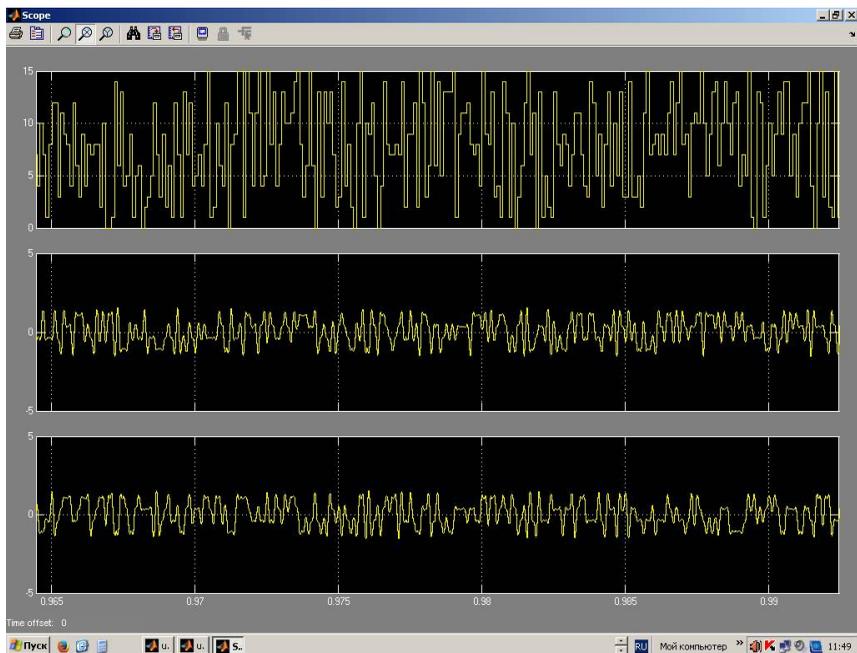


Рис. 4.11 – Осциллограммы данных и комплексной огибающей

3. Установите коэффициент скругления формирующего фильтра равным 0 и запустите модель. Результаты моделирования (графики) расположите парами таким образом, чтобы под каждым графиком входного сигнала располагался соответствующий график выходного сигнала. Для наглядности изменений сигнала вследствие прохождения через формирующие фильтры следует также сохранять масштаб по осям в пределах пары графиков. Сохраните для отчета все графики, полученные в ходе моделирования. Произведите оценку (отразите в выводах по текущему пункту):
  - ширины спектра сигнала,
  - крутизны скатов,
  - уровня первого бокового лепестка.
 Занесите эти данные в таблицу.

4. 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.
5. Выполните моделирование при коэффициентах скругления фильтра 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 и 1. Выявите (отразите в выводах) как влияет коэффициент скругления на распознаваемость сигнала, в том числе - при каком коэффициенте скругления сигнал распознаваем.
6. Выполните пункты 3,4 и 5 для двух других значений модуляции (согласно варианту).

Отчет должен содержать исследуемую схему передатчика (модель в Simulink), параметры составляющих ее устройств, диаграммы входных (неизмененных) и выходных сигналов (в виде осциллограмм и пр.). В общих выводах по лабораторному исследованию отразить:

- зависимость уровня боковых лепестков, крутизны скатов и ширины спектра от коэффициента скругления;
- влияние скругления на распознаваемость сигнала для каждого вида (исследованного) модуляции,
- зависимость коэффициента скругления, соответствующего распознаванию сигнала от уровня модуляции;
- зависимость отношения максимального значения амплитуды квадратурных составляющих для внешних точек сигнального созвездия к минимальному для различного уровня модуляции.

#### **4.3 Вопросы для защиты лабораторного исследования**

1. Какие блоки отображения информации о сигналах предоставляет среда имитационного моделирования Simulink MATLAB. Их назначение.
2. Назначение глазковой диаграммы сигнала. Критерии распознавания.

3. Назначение траектории вектора комплексной огибающей сигнала на плоскости.
4. Назначение диаграммы рассеяния сигнала. Критерии распознавания.
5. Что (какие параметры) понимается под скруглением спектра?
6. Как (по каким критериям) сигнал можно считать распознаваемым?
7. Что характеризует отношение максимального значения амплитуды сигнала к минимальному? Как сказывается на стоимости устройства?
8. Как сказывается на значении боковых лепестков, крутизны скатов и ширины спектра коэффициент скругления?
9. Каково влияние скругления на распознаваемость сигнала для каждого вида (исследованного) модуляции?
10. Какова зависимость коэффициента скругления (соответствующего распознаванию сигнала) от уровня модуляции?
11. Какова зависимость отношения максимального значения амплитуды квадратурных составляющих (для внешних точек сигнального созвездия) к минимальному для различного уровня модуляции?

## 5. Лабораторная работа № 3. Влияние параметров канала на распознаваемость КАМ-сигнала

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.

### 5.1 Общие сведения по выполнению работы

Для выполнения лабораторного исследования потребуются следующие блоки:

- *AWGN Channel* – канал с АБГШ (адаптивный белый Гауссовский шум);
- *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. 5.1).

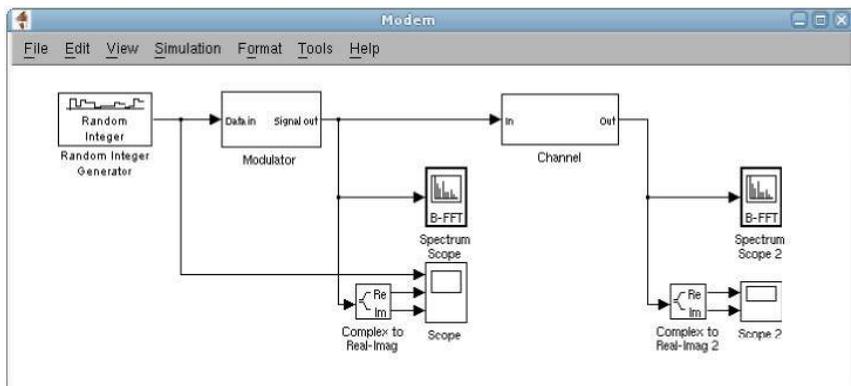


Рис. 5.1 – Передатчик и канал системы связи

Модель канала связи показана на рисунке 5.2, она включает в себя блок добавления к сигналу АБГШ, блок частотного и фазового сдвига и блок дробной задержки, которая задается константой.

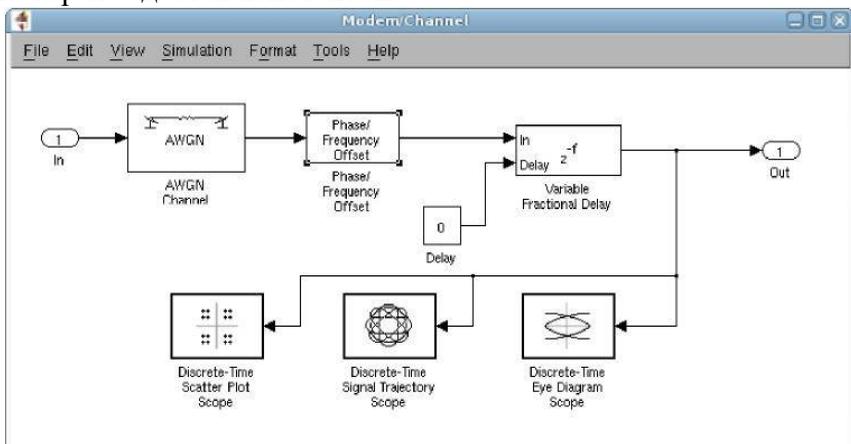


Рис. 5.2 – Модель канала связи

В настройках блока *AWGN Channel* выберите режим (*Mode*) *SNR* и задайте отношение сигнал/шум 13 дБ. Установите нулевой фазовый (*Phase off set*) и частотный сдвиг (*Frequency off set*) 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 5.3 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.

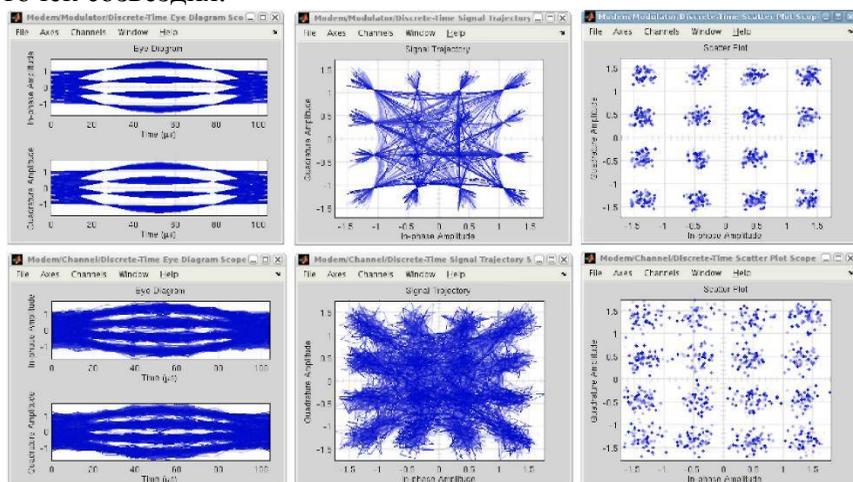


Рис. 5.3 – Влияние воздействия на сигнал АБГШ

На рисунке 5.4 показано влияние частотного рассогласования на сигнал, в результате которого созвездие начинает вращаться. Также частотный сдвиг сигнала можно наблюдать на анализаторе спектра (рис. 5.5).

Дробная задержка в канале связи, как и фазовое рассогласование, приводят к повороту сигнального созвездия (рис. 5.6). В силу отсутствия петли слежения за символьной частотой демодуляция сигнала становится невозможной.

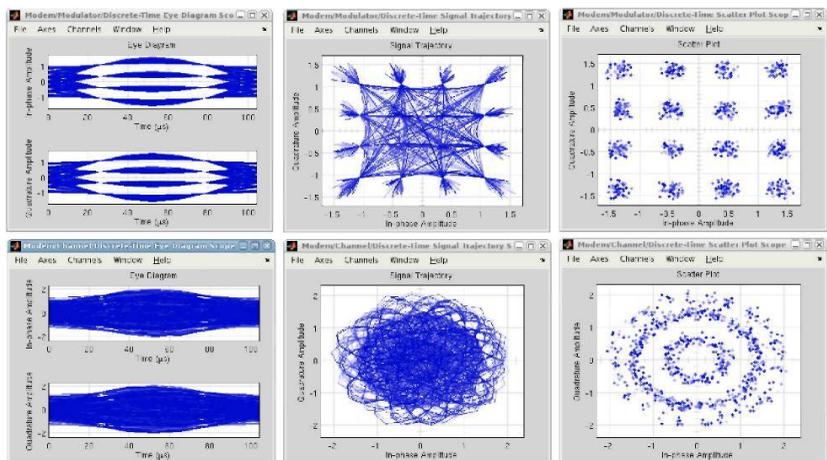


Рис. 5.4 – Влияние частотного рассогласования

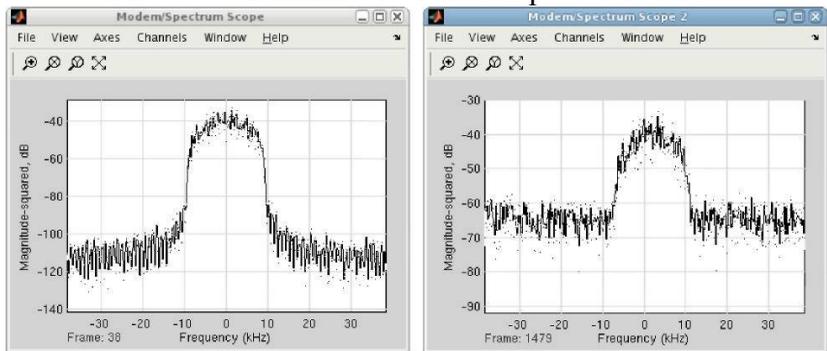


Рис. 5.5 – Смещение спектра

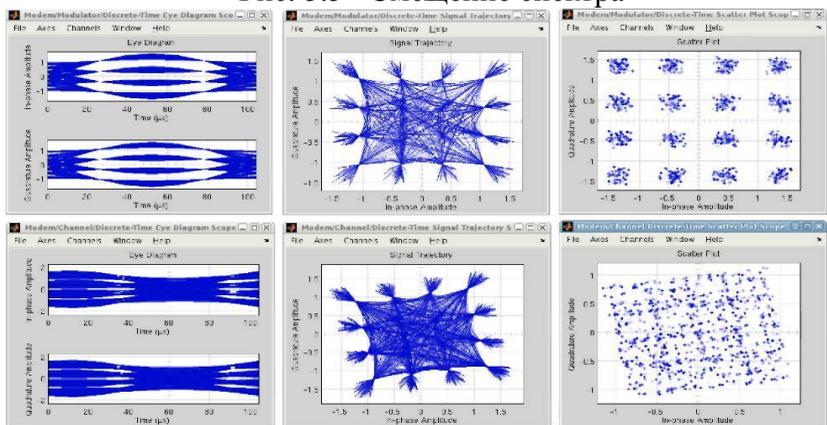


Рис. 5.6 – Дробная задержка

## **5.2 Лабораторное исследование**

1. Согласно приведенным выше рисункам и описанию, создайте модель канала связи в Simulink, подключите ее к передатчику и убедитесь в ее работоспособности (на примере 16-QAM модуляции).
2. Установите отношение сигнал/шум в канале равным 100 дБ. Установите нулевое частотное и фазовое рассогласование. Задайте нулевую дробную задержку в канале связи. Сохраняйте для отчета все графики, полученные в ходе моделирования.
3. Проведите моделирование при значениях сигнал/шум от 0 дБ до 60 дБ с шагом 10 дБ. Оцените значение сигнал/шум, при котором различение точек в созвездии становится невозможным. Проведите дополнительно 6 измерений вблизи этого значения. Отрадите в выводах минимальное значение отношения сигнал/шум, при котором сигнал распознаваем.
4. Проведите моделирование при фазовом рассогласовании  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  и  $360^\circ$ . Отрадите в выводах минимальное значение фазового рассогласования, при котором сигнал распознаваем.
5. Проведите моделирование при частотном рассогласовании, равном 10 Гц, 100 Гц, 1 кГц, 5 кГц. Отрадите в выводах минимальное значение частотного рассогласования, при котором сигнал распознаваем.
6. Проведите моделирование при дробной задержке, равной 0.1, 0.5, 1, 2, 5. Отрадите в выводах минимальное значение дробной задержки, при которой сигнал распознаваем.

Отчет должен содержать исследуемую схему передатчика (модель в Simulink), параметры составляющих ее устройств, диаграммы, полученные при выполнении пунктов 3-6, выводы по результатам моделирования.

## **5.3 Вопросы для защиты лабораторного исследования**

Все ответы на вопросы должны быть подтверждены либо отчетом, либо (при необходимости) демонстрацией работы исследуемой схемы.

1. Опишите модель канала связи (роль блоков).
2. Назначение глазковой диаграммы сигнала. Критерии распознания.
3. Назначение диаграммы рассеяния сигнала. Критерии распознания.
4. Каково назначение блока Complex to Real-Imag в исследуемой схеме?
5. Каково влияние шума на сигнальное созвездие? При каком значении сигнал/шум сигнал распознаваем (согласно отчета)?
6. Как влияет уровень модуляции на распознаваемость сигнала (при неизменном уровне шума)? Каким параметром определяется уровень модуляции при распознаваемости сигнала? Сравните распознаваемость сигнала одного уровня модуляции, но разного вида (ФМ и КАМ).
7. Каким образом определяется распознаваемость сигнала при фазовом рассогласовании? При каком значении фазового рассогласования сигнал распознаваем (при отсутствии обратной связи)?
8. Каким образом определяется распознаваемость сигнала при частотном рассогласовании? При каком значении частотного рассогласования сигнал распознаваем (при отсутствии обратной связи)? Посредством какой диаграммы регистрируется значение частотного рассогласования?
9. Каким образом определяется распознаваемость сигнала при дробной задержке? При каком значении дробной задержке сигнал распознаваем (при отсутствии обратной связи)?
10. Чем объясняется размытость точек созвездия даже при отсутствии шума в канале связи?

## **6. Лабораторная работа № 4. Роль системы синхронизации несущей при приеме КАМ-сигналов**

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 несущей частоты в Simulink.

### **6.1 Общие сведения по выполнению работы**

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.
- MathFunction – блок математической обработки сигнала (модуль, логарифм, экспонента и т. д.);
- Gain – усилитель сигнала;
- Add – блок суммирования/вычитания сигналов;
- Constant – источник неизменяемого сигнала (константа);
- ComplextoReal-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 6.1 показан вид модели системы цифровой связи в Simulink с петлей восстановления несущего колебания (петля Костаса).

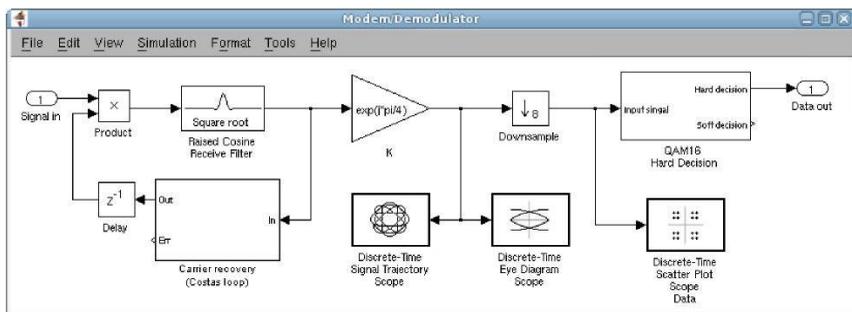


Рис. 6.1 – Приемная часть системы связи с блоком синхронизации по несущему колебанию

Петля Костаса (рис. 6.2) состоит из детектора Костаса (6.3), фильтра низких частот обратной связи (ФНЧ ОС, рис. 6.4) и генератора, управляемого кодом (*Numeric Controlled Oscillator*).

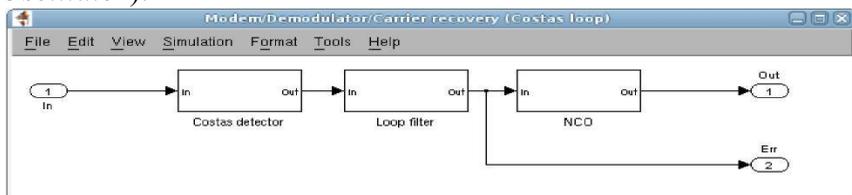


Рис. 6.2 – Петля Костаса

На рисунке 4.4 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 6.5. На рисунке 6.6 показана модель генератора комплексного сигнала, управляемого сигналом с фильтра обратной связи.

На рисунке 6.7 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.

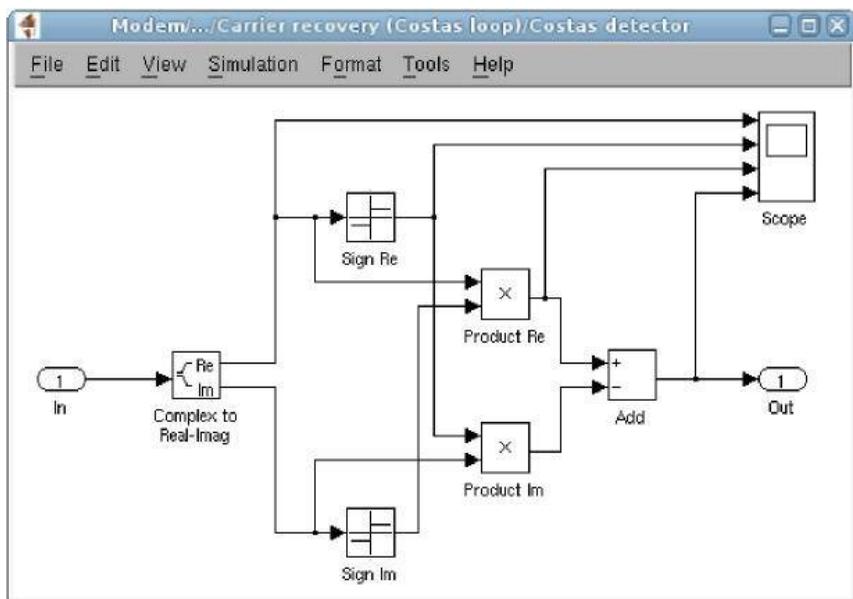


Рис. 6.3 – Детектор Костаса

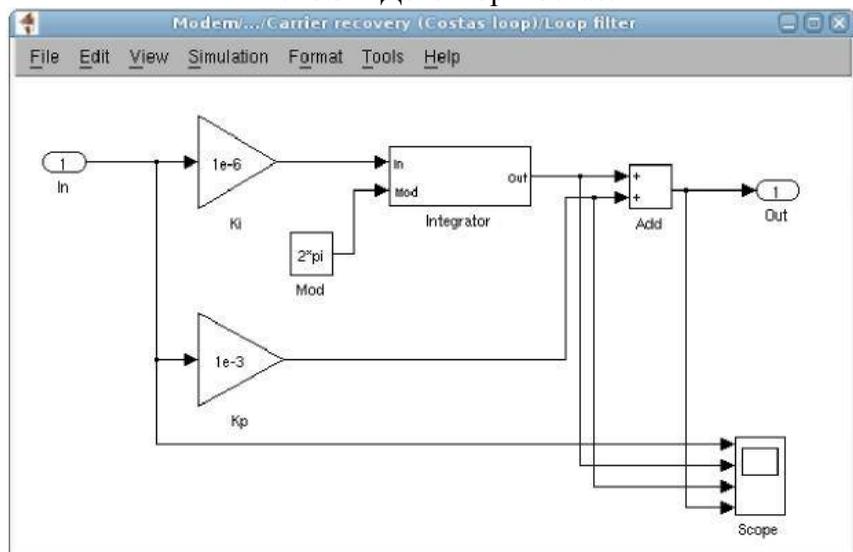


Рис. 6.4 – Фильтр петли обратной связи

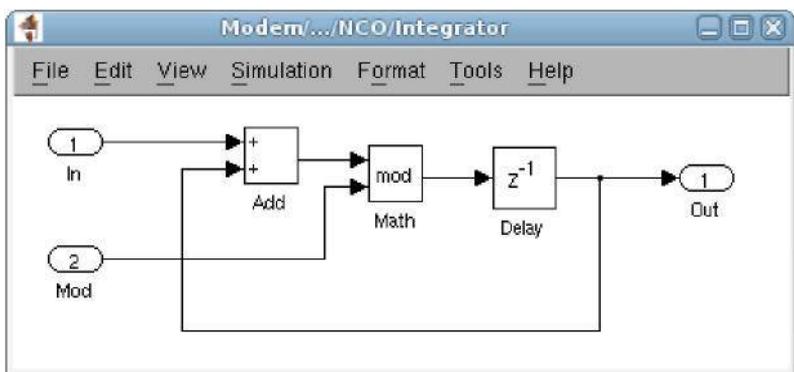


Рис. 6.5 – Модель интегратора

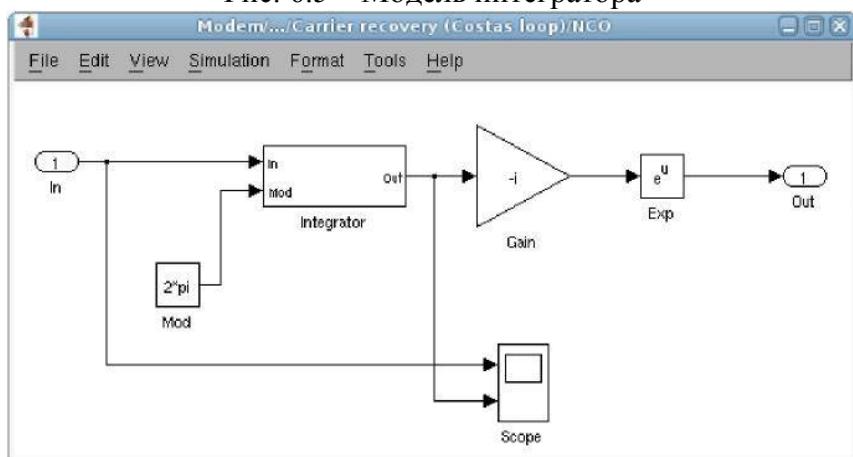


Рис. 6.6 – Генератор комплексного сигнала, управляемый КОДОМ

## 6.2 Лабораторное исследование

1. Согласно приведенным выше рисункам и описанию, создайте модель системы связи в Simulink с блоком восстановления несущего колебания. Убедитесь в ее работоспособности (на примере 16-КАМ модуляции).
2. Установите отношение сигнал/шум в канале равным 100 дБ. Установите нулевое частотное и фазовое рассогласование. Задайте нулевую дробную задержку в канале связи. Сохраняйте для отчета все графики, полученные в ходе моделирования.

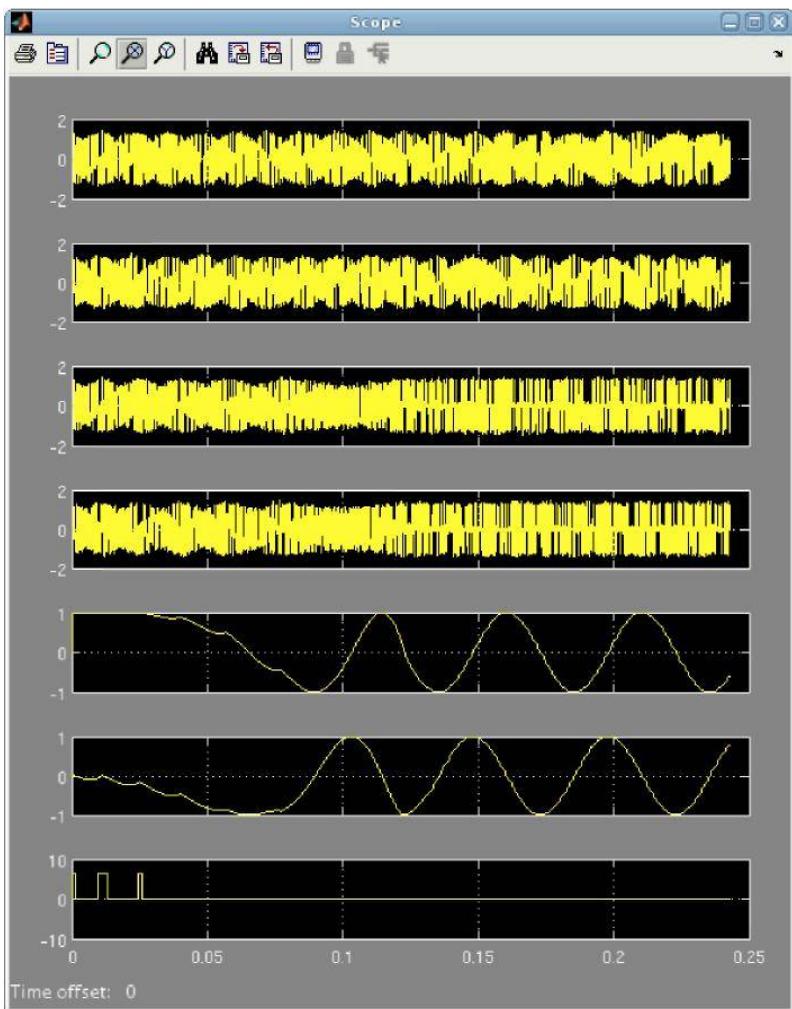


Рис. 6.7 – Коррекция частотного рассогласования

3. 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 связи.
4. 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.

5. Оцените влияние изменения коэффициента пропорциональной части системы автоматического регулирования на длительность переходного процесса и максимальное значение частотного рассогласования (согласно пункту 4). Найдите и зафиксируйте оптимальное значение коэффициента пропорциональной части для максимального частотного рассогласования и для наиболее быстрой работы петли регулирования при частотном рассогласовании 10 Гц.
6. Оцените влияние изменения коэффициента интегральной части системы автоматического регулирования согласно пункту 5.

Отчет должен содержать исследуемую схему передатчика (модель в Simulink), параметры составляющих ее устройств, диаграммы, полученные при выполнении пунктов 3-6, выводы по результатам моделирования.

### **6.3 Вопросы для защиты лабораторного исследования**

Все ответы на вопросы должны быть подтверждены либо отчетом, либо (при необходимости) демонстрацией работы исследуемой схемы.

1. Опишите приемная часть системы связи с блоком синхронизации по несущему колебанию (назначение блоков).
2. Каковы назначение и свойства детектора Костаса?
3. Каковы назначение и свойства фильтра петли обратной связи?
4. Каковы назначение и свойства генератора комплексного сигнала, управляемый кодом?
5. Какова причина установки нулевой дробной задержки в канале связи и отношения сигнал/шум равным 100 дБ (1-й пункт задания)? К каким эффектам приведет изменение этих параметров?
6. Покажите цепь автоматического регулирования

- фазового рассогласования в схеме. При каком значении фазового рассогласования проведены исследования (покажите окно параметра)?
7. Посредством каких диаграмм наблюдался процесс синхронизации при фазовом рассогласовании? Каковы критерии установления синхронизации? При каком значении фазового рассогласования сигнал становится не распознаваем (при наличии цепи обратной связи)?
  8. Покажите цепь автоматического регулирования частотного рассогласования в схеме. При каком значении частотного рассогласования проведены исследования (покажите окно параметра)?
  9. Посредством каких диаграмм наблюдался процесс синхронизации при частотном рассогласовании? Каковы критерии установления синхронизации? При каком значении частотного рассогласования сигнал становится не распознаваем (при наличии цепи обратной связи)?
  10. Каков смысл коэффициента пропорциональной части? Каково его оптимальное значение в исследуемой схеме (покажите окно параметра)?
  11. Каков смысл коэффициента интегральной части? Каково его оптимальное значение в исследуемой схеме (покажите окно параметра)?
  12. Как влияет значение коэффициента пропорциональной части на скорость работы петли регулирования при частотном рассогласовании 10 Гц? Подтвердите моделированием.

## 7. Лабораторная работа № 5. Символьная синхронизация при приеме КАМ-сигналов

Цель работы: исследование систем символьной синхронизации приемных устройств. 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.

### 7.1 Общие сведения по выполнению работы

Для моделирования системы синхронизации приемного устройства по символьной частоте необходимо дополнить модель приемника петлей символьной синхронизации (петля Гарднера). На рисунке 7.1 показана модель приемного устройства с петлей символьной синхронизации (*Timing phase recovery (Gardner detector)*).

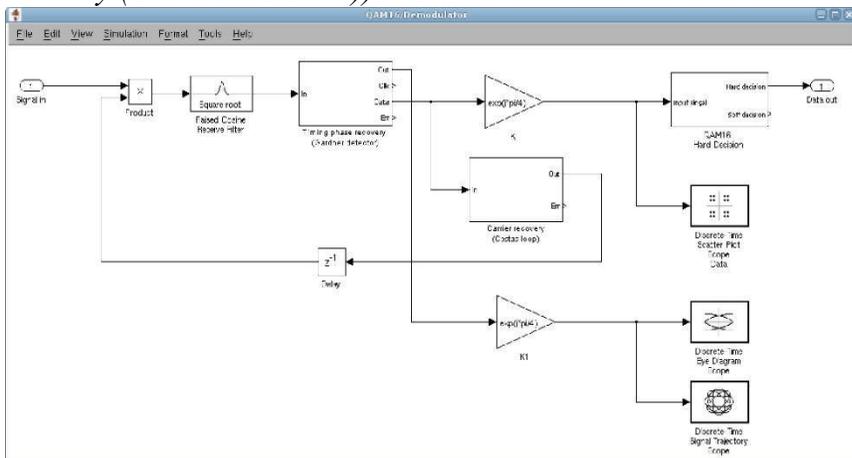


Рис. 7.1 – Модель приемного устройства с петлей символьной синхронизации

На рисунке 7.2 показана модель петли синхронизации, состоящая из фильтра-интерполятора (фильтр Фарроу, рис. 7.3), детектора Гарднера (рис. 7.4), фильтра петли обратной связи (рис. 7.5) и генератора, управляемого кодом (рис. 7.6).

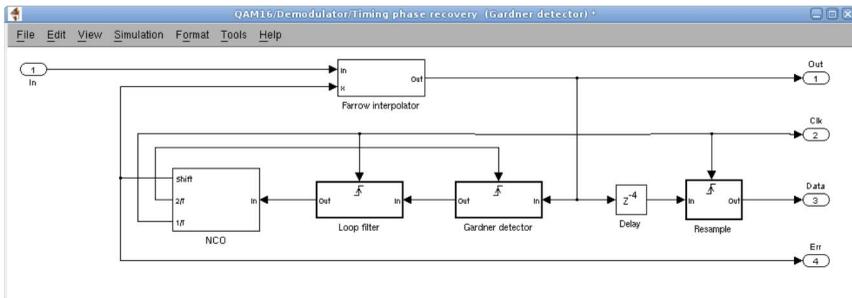


Рис. 7.2 – Петля символьной синхронизации

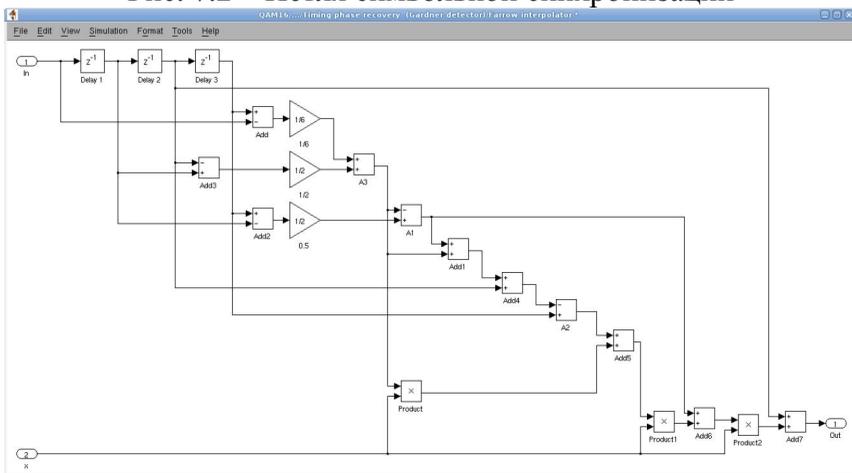


Рис. 7.3 – Фильтр-интерpolator (Фарроу)

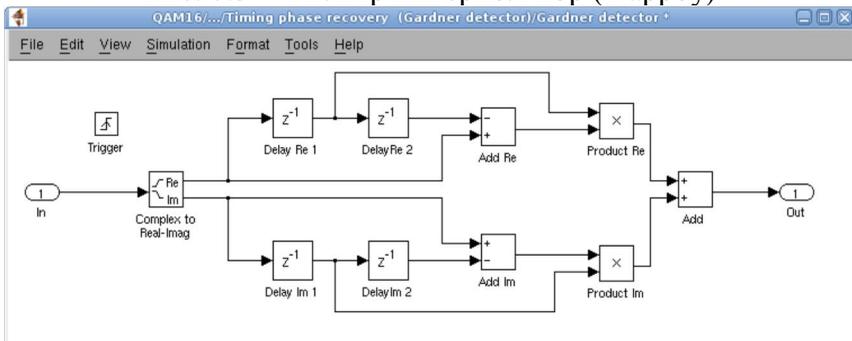


Рис. 7.4 – Детектор Гарднера

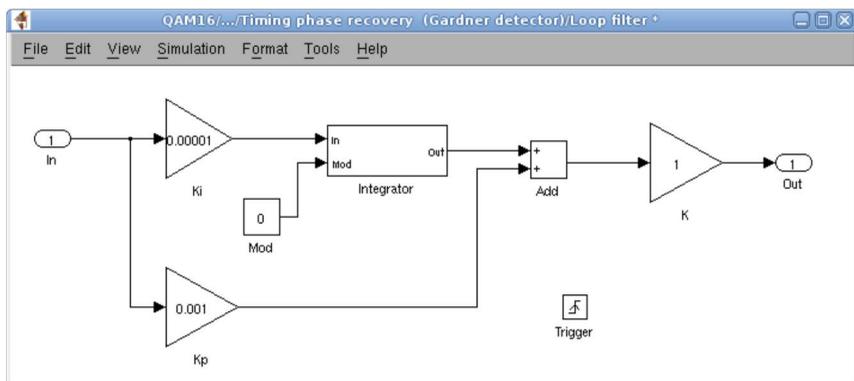


Рис. 7.5 – Фильтр петли обратной связи

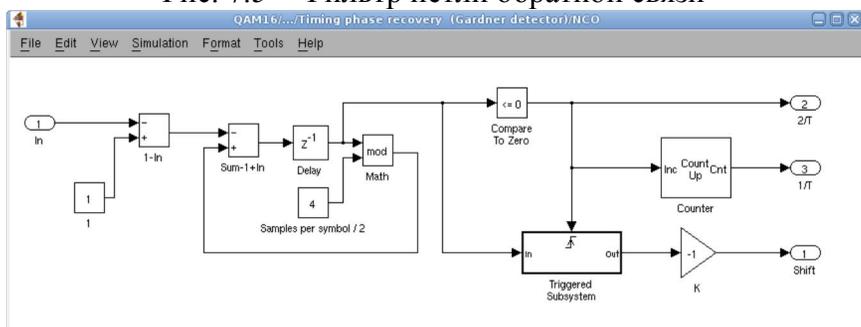


Рис. 7.6 – Генератор, управляемый кодом

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

Генератор, управляемый кодом, выполнен на основе структуры *Modulo-1*, предложенной Гарднером. В структуре генератора присутствует блок *Triggered Subsystem* (рис. 7.7), позволяющий производить передискретизацию сигнала.

На рисунке 7.8 показаны диаграммы сигналов приемника системы связи при различных значениях дробной задержки в канале связи.

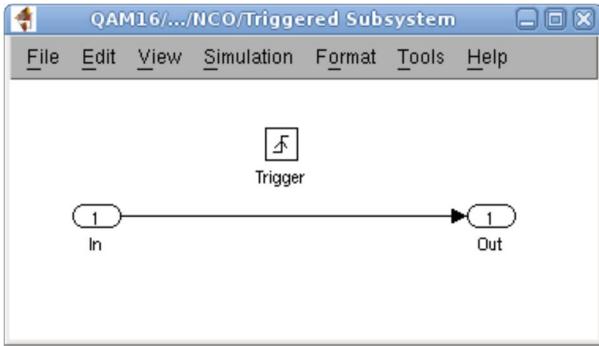
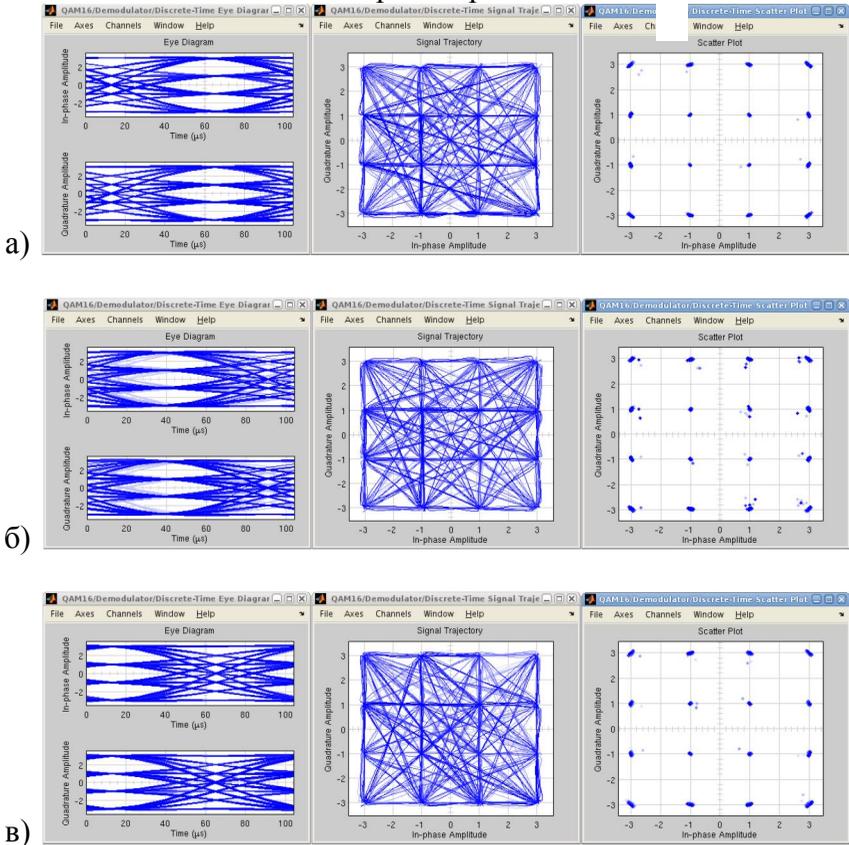


Рис. 7.7 – Блок передискретизации сигнала



Рисунки 7.8 – Вид принимаемого созвездия при различных значениях дробной задержки в канале связи

## 7.2 Лабораторное исследование

1. Согласно приведенным выше рисункам и описанию, создайте модель системы связи в Simulink с блоком синхронизации по символьной частоте. Установите отношение сигнал/шум в канале равным 100 дБ. Установите нулевое частотное и фазовое рассогласование. Задайте нулевую дробную задержку в канале связи. Сохраняйте для отчета все графики, полученные в ходе моделирования.
2. Задавая различное частотное и фазовое рассогласование, убедитесь в работоспособности петли восстановления несущего колебания.
3. Задавая различное значение дробной задержки в канале связи, убедитесь в правильной работе петли синхронизации по символьной частоте.
4. 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.
5. Оцените степень влияния петли синхронизации по символьной частоте на вид принимаемого созвездия.
6. Исключите петлю синхронизации по несущей частоте из модели приемника. Изменяйте значения фазового рассогласования, оцените возможность работы петли синхронизации по символьной частоте при частотном рассогласовании передатчика и приемника.
7. Повторите п.6, меняя значение частотного рассогласования. Оцените возможность работы петли синхронизации по символьной частоте при частотном рассогласовании передатчика и приемника.

Отчет должен содержать исследуемую схему передатчика (модель в Simulink), параметры составляющих ее

устройств, диаграммы, полученные при выполнении пунктов 2-7, выводы по результатам моделирования.

### **7.3 Вопросы для защиты лабораторного исследования**

Все ответы на вопросы должны быть подтверждены либо отчетом, либо (при необходимости) демонстрацией работы исследуемой схемы.

1. Опишите модель приемного устройства с петлей символьной синхронизации (назначение блоков).
2. Назначение петли символьной синхронизации в приемнике.
3. Назначение и свойства фильтра Фарроу.
4. Назначение и свойства детектора Гарднера.
5. Назначение, структура и свойства фильтра петли обратной связи.
6. Назначение, структура и свойства генератора, управляемый кодом.
7. Каково влияние дробной задержки в канале связи на сигнал (при наблюдении по глазковой диаграмме)?
8. Каково влияние петли синхронизации по символьной частоте на вид принимаемого созвездия?
9. Каково влияние фазового рассогласования на работу петли синхронизации по символьной частоте при частотном рассогласовании передатчика и приемника.
10. Каково влияние частотного рассогласования на работу петли синхронизации по символьной частоте при частотном рассогласовании передатчика и приемника.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Солонина, А. И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Simulink. - СПб.: БХВ-Петербург, 2012. - 432 с.
2. Дьяконов, В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 976 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 1  |
| 1. Порядок выполнения лабораторных работ цикла.....   | 2  |
| 2. Краткий теоретический материал.....  | 4  |
| 3. Лабораторная работа №1. Формирование комплексного сигнала .....                          | 10 |
| 4. Лабораторная работа №2. Модель приемо- передатчика КАМ-сигналов .....                    | 17 |
| 5. Лабораторная работа №3. Влияние параметров канала на распознаваемость КАМ-сигнала .....  | 30 |
| 6. Лабораторная работа №4. Роль системы синхронизации несущей при приеме КАМ-сигналов ..... | 36 |
| 7. Лабораторная работа №5. Символьная синхронизация при приеме КАМ-сигналов .....           | 43 |
| Библиографический список.....   | 49 |

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к выполнению цикла лабораторных работ по дисциплине  
"Технологии беспроводного доступа в  
телекоммуникационных системах" для студентов направления  
11.03.01 "Радиотехника" (профиль "Радиотехнические  
средства передачи, приема и обработки сигналов") и  
дисциплине «Технологии телекоммуникационных систем»  
для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные  
системы и комплексы»  
очной и заочной форм обучения

Составитель  
Жилин Владимир Васильевич

В авторской редакции

Компьютерный набор В.В. Жилина

Подписано к изданию 12.04.2017.  
Уч.-изд. л. 3,0.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14