

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиотехнических систем (РТС)

Утверждаю:
Зав. каф. РТС, проф., д.т.н.
_____ Мелихов С.В.
_____ 2016 г.



Кологривов В.А., Михайленко С.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ FSK-МОДУЛЯЦИИ
ОТ СООТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ

Учебно-методическое пособие по лабораторной работе
для студентов направления
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
по дисциплине
«Сети и системы мобильной связи»

Разработчики:
Доц. каф РТС Кологривов В.А. _____
Студент гр. 1В2 Михайленко С.А. _____

Томск 2016

Кологривов В. А., Михайленко С.А.

«Исследование помехоустойчивости FSK-модуляции от соотношения сигнал/шум»: Учебно-методическое пособие по лабораторной работе для студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплине «Сети и системы мобильной связи». – Томск: ТУСУР. Научно-образовательный портал, 2016. – 30 с.

Учебно-методическое пособие содержит описание функциональной модели для исследования цифровой частотной манипуляции, выполненной в среде функционального моделирования *Simulink*, системы для инженерных и научных расчетов *MatLab*.

В пособии приведены краткие теоретические сведения о цифровой частотной манипуляции, краткая характеристика пакета *Simulink* системы *MatLab*, описание виртуального лабораторного макета и используемых блоков библиотеки *Simulink*.

АННОТАЦИЯ

Лабораторная работа «Исследование помехоустойчивости FSK-модуляции от соотношения сигнал/шум» посвящена экспериментальному исследованию частотной манипуляции с использованием пакета функционального моделирования *Simulink*, системы для инженерных и научных расчетов *MatLab*.

Работа «Модельное исследование цифровой частотной манипуляции» относится к циклу лабораторных работ, входящему в дисциплины по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

В описании сформулирована цель лабораторной работы, приведены краткие теоретические сведения о частотной модуляции, краткая характеристика пакета *Simulink* системы *MatLab*, описание виртуального лабораторного макета и используемых блоков библиотеки *Simulink*, а также требования к экспериментальному исследованию и контрольные вопросы, ответы на которые необходимы для успешной защиты лабораторной работы.

Частотную модуляцию в цифровом случае называют частотной манипуляцией. Слово манипуляция показывает конечное количество состояний (в нашем случае число частот).

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы. Краткие сведения из теории	5
2. Краткое описание пакета Simulink	8
2.1. Общая характеристика пакета Simulink	8
2.2. Запуск и работа с пакетом Simulink	8
3. Описание лабораторного макета	11
4. Описание используемых блоков библиотеки Simulink	16
5. Экспериментальное задание	28
6. Контрольные вопросы	29
Список использованных источников	30

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Цель работы: Изучить принцип работы модулятора и демодулятора при частотной модуляции.

Теоретическая часть

Рассмотрим **FSK** модуляцию. **FSK** модуляция является наиболее распространенным видом цифровой модуляции радиочастотных сигналов и нашла широкое применение в связи и телефонии. Схема модулятора в общем виде приведена на рисунке 1.1 [1].

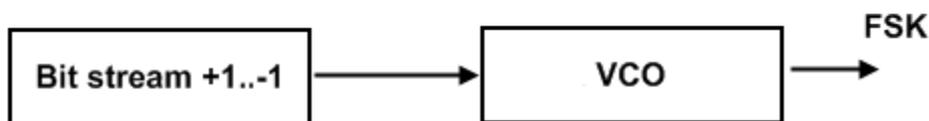


Рисунок 1.1 – Схема модулятора в общем виде

Прямоугольный битовый поток преобразованный к уровням поступает на модулятор (**VCO**- генератор управляемый напряжением), где уровню соответствует одна частота, уровню другая. Таким образом на выходе модулятора получаем классическую **FSK**-модуляцию. Разнос частот задается в модуляторе и может быть любым, но не меньше чем (BaudRate - скорость манипуляции), при меньшем разноре корректно демодулировать такой сигнал невозможно. Генератор в модуляторе и битовый поток в целом никак не связаны и не синхронизированы. Спектр такого сигнала содержит множество гармоник за счет прямоугольности импульсов модуляции и резкого переключения генератора в модуляторе в "неподходящие" моменты времени. Основная энергия сосредоточена вокруг частот манипуляции и занимает полосу равную , что дает минимально возможный спектр такого

сигнала при разносе равном . Гармоники за пределами этого спектра могут быть эффективно подавлены без ущерба для успешной демодуляции, что и делается на практике.

Спектр вокруг частот манипуляции при разносе равном B_T точно укладывается в пространство между частотами без перекрытия. Если частоты сближать дальше, то будет перекрытие спектров "чужих" посылок и сильные взаимные помехи.

Основной идеей уменьшения разноса частот при той же скорости манипуляции, и как следствие повышения эффективности самой **FSK**, является уменьшение(сужение) области основной энергии вокруг частот манипуляции. Эта идея реализуется через предварительную фильтрацию битового потока перед подачей на модулятор [1].

Методы демодуляции **FSK** сигналов можно условно разделить на три группы [2]:

1. Корреляционные демодуляторы.
2. На основе непараметрических алгоритмов.
3. С использованием селективных фильтров.

К корреляционным методам относятся когерентный и некогерентный детекторы. К недостаткам можно отнести необходимость знания начальной фазы сигнала на каждом обрабатываемом участке. Практическая реализация требует алгоритмически сложного устройства определения фазы сигнала.

Демодуляция непараметрическими методами заключается в использовании какого-либо метода непараметрической оценки текущей частоты сигнала, например, с использованием статистик нуль-пересечений. Эти методы значительно проще в реализации и требуют на порядки меньший

объем вычислений, однако имеют более низкую устойчивость к помехам аддитивного характера.

Общий вид схемы демодуляции на основе селективных фильтров, предназначенной для модуляции с использованием двух частот, приведен на рисунке 1.2.

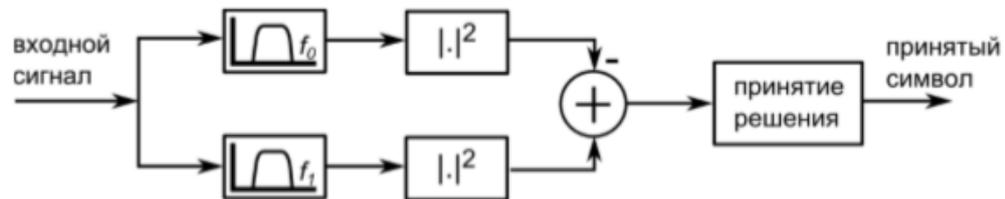


Рисунок 1.2 – Схема демодулятора на основе селективных фильтров в общем виде

В данной схеме выполняется параллельная обработка отсчетов двумя линейными фильтрами с частотными характеристиками, синтезированными для получения максимального отклика на частоте передачи соответствующего символа. Цифровая реализация данной схемы демодулятора основана на операции дискретной свертки отсчетов сигнала с импульсной характеристикой фильтра. Метод синтеза характеристики фильтров определяется условиями приема и соотношением частоты дискретизации и частоты передачи информации. Так, наилучшим с точки зрения помехоустойчивости является использование в демодуляторе согласованных фильтров [2].

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПАКЕТА SIMULINK

2.1 Общая характеристика пакета Simulink

Пакет **Simulink** распространяется в составе математического пакета **MatLab**. Пакет основан на графическом интерфейсе и является типичным средством визуально-ориентированного программирования. Пакет **Simulink** обладает обширной библиотекой готовых блоков с модифицируемыми параметрами для построения моделей рассматриваемых систем и наглядными средствами визуализации результатов моделирования [3, 4, 5].

2.2 Запуск и работа с пакетом Simulink

Для запуска системы **Simulink** необходимо выполнить запуск системы **MatLab**. После открытия командного окна системы **MatLab** нужно запустить систему **Simulink**. Существует три способа запуска системы **Simulink**:

- нажать кнопку  (**Simulink**) на панели инструментов системы **MatLab**;
- в строке командного окна **MatLab** напечатать **Simulink** и нажать клавишу **Enter**;
- выполнить опцию **Open** в меню **File** и открыть файл модели (**mdl**-файл).

При применении двух первых способов открывается окно обозревателя библиотеки блоков (**Simulink Library Browser**). Если нам не требуется добавление новых блоков, а нужно лишь открыть уже готовую модель и провести моделирование, то следует воспользоваться третьим способом.

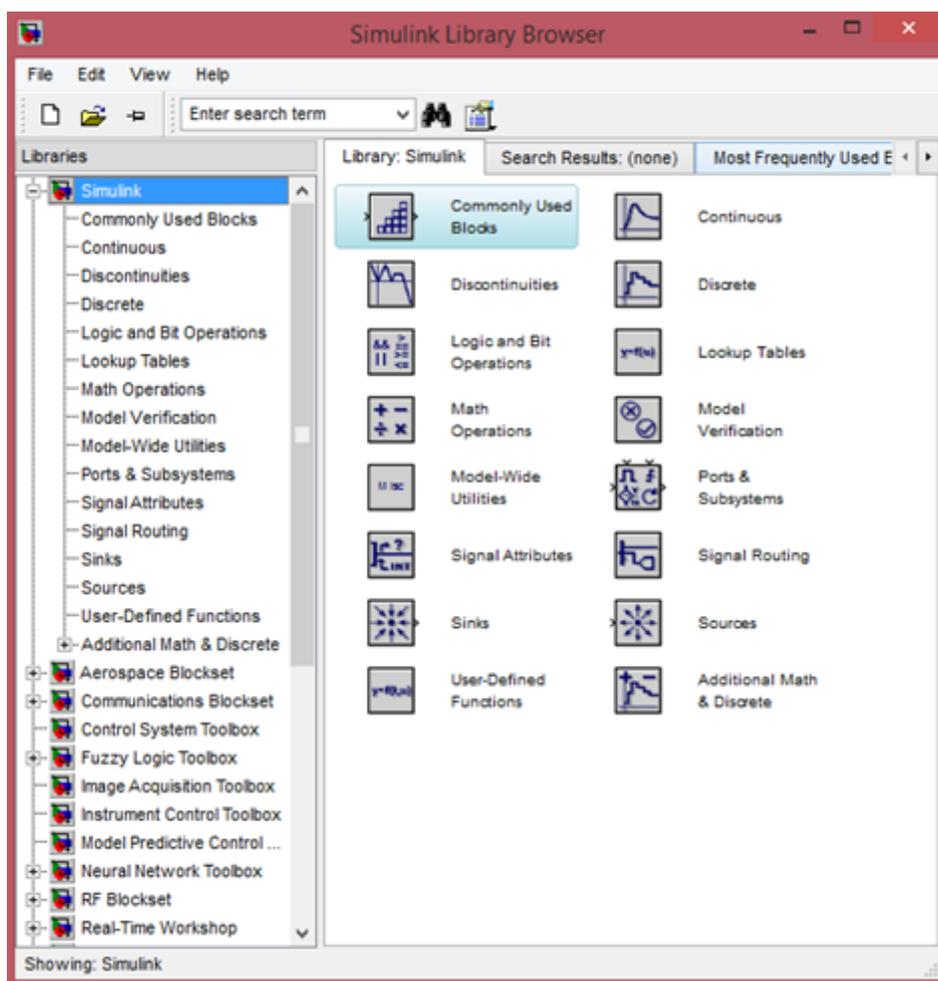


Рисунок 2.1. – Библиотека блоков **Simulink Library Browser**

На рисунке 2.1 выведена библиотека системы **Simulink** и показаны ее разделы. Основная библиотека системы содержит следующие разделы:

- **Continuous** – блоки аналоговых элементов;
- **Discontinuous** – блоки нелинейных элементов;
- **Discrete** – блоки дискретных элементов;
- **Look-Up Tables** – блоки таблиц;
- **Math Operations** – блоки элементов, определяющие математические операции;
- **Model Verification** – блоки проверки свойств сигнала;
- **Model-Wide Utilities** – раздел дополнительных утилит;
- **Port&Subsystems** – порты и подсистемы;

- **Signal Attributes** – блоки задания свойств сигналов;
- **Signal Routing** – блоки маршрутизации сигналов;
- **Sinks** – блоки приема и отображения сигналов;
- **Sources** – блоки источников сигнала;
- **User-Defined Function** – функции, определяемые пользователем.

Правила работы со списком разделов библиотеки: пиктограмма свернутого узла содержит символ «+», а пиктограмма развернутого – символ «-».

Для того чтобы развернуть или свернуть узел, достаточно щелкнуть на его пиктограмме левой клавишей мыши (*ЛКМ*).

При работе элементы разделов библиотек "**перетаскивают**" в рабочую область удержанием *ЛКМ* на соответствующих изображениях. Для соединения элементов достаточно указать курсором мыши на начало соединения и затем при нажатии левой кнопки мыши протянуть соединение в его конец.

При двойном щелчке *ЛКМ* на выделенном блоке всплывает меню, в котором задаются параметры блоков.

Работа **Simulink** происходит на фоне открытого окна системы **MatLab**, закрытие которого приведёт к выходу из **Simulink** [3, 4, 5].

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Вариант реализации функциональной модели двухканального модема при BFSK модуляции приведен на рисунке 3.1.

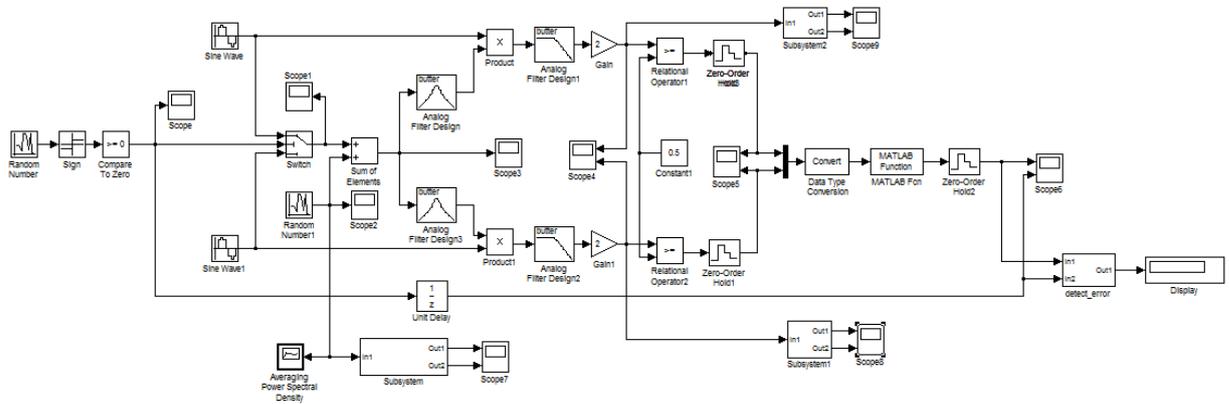


Рисунок 3.1 – Функциональная модель двухканального модема при BFSK модуляции

С помощью блоков **Random Number**, **Sign**, **Compare To Zero** формируется и подается входной поток данных. С выхода схемы формирования входной импульсной последовательности сигнал поступает на модулятор, который состоит из блоков **Sine Wave** и **Switch**. Входной поток данных поступает на управляющий вход двухпортового переключателя (**Switch**), который манипулирует генераторами несущих частот **Sine Wave**. Для формирования **FSK**-сигнала более высокой размерности целесообразно использовать генератор управляемый напряжением **VCO**.

С выхода модулятора сигнал поступает на модель канала передачи (**Sum**, **Random Number**), где к радиосигналу добавляются шумы канала распространения. Далее в приемнике разветвляясь, сигнал вместе с шумами поступает на входы полосовых канальных фильтров (блоки **Analog Filter Design**) предназначенных для фильтрации сопутствующих помех канала и сигналов соседних каналов. После чего сигнал поступает на входы демодуляторов (**Product**, **Sine Wave** и **Product1**, **Sine Wave1**).

Демодуляторы реализованы двумя умножителями (**Product** и **Product1**), на первые входы которых подается принятый сигнал, а на вторые входы умножителей поступают сигналы с опорных генераторов несущих частот изменяющиеся по законам $\cos(\omega_c t)$ и $\sin(\omega_c t)$. С выходов умножителей сигналы поступают на фильтры низких частот (блоки **Analog Filter Design1** и **Analog Filter Design2**), которые отфильтровывают высокочастотные составляющие сигналов умножителей, и далее усиливаются блоками **Gain** и **Gain1**.

После усиления сигналы поступают на схему принятия решения (**Relational Operator, Constant, MatLab Function**). Блок **Relational Operator** сравнивает текущие значения входных сигналов с пороговым значением сигнала и определяет с выхода какого канала идет сигнал, а с какого помеха. Далее сигнал поступает на вход блока **Zero-Order Hold**, для фиксации моментов выборки. После чего сигнал идет на мультиплексор. Мультиплексор объединяет входные сигналы приемных каналов в вектор.

С выхода мультиплексора сигнал поступает на вход блока **MatLab Function** (входит в схему принятия решения). Функция считывает состояние вектора с мультиплексора и соотносит текущее состояние с передаваемым символом (битом). Программный код функции **frequency_bit** приведен на рисунке 3.2.

```

function b=frequency_bit(x);
% Преобразование частоты
% (номера частотного генератора) в бит
% x- кодовый двоичный вектор
% b- бит выходной последовательности

switch num2str(x);
    case '10';
        b=[1];
    case '01';
        b=[0];
    otherwise
        b=[0];
end;

```

Рисунок 3.2 - Программный код функции **frequency_bit**

Таким образом, функция **frequency_bit** по состоянию вектора каналов восстанавливает принимаемый (переданный) символ или . Далее с помощью блока **Zero-Order Hold2** происходит регенерация формы принятого сигнала, т.е. мы берем сигнал в определенный момент времени и удерживаем его до конца интервала, получая тем самым, прямоугольную форму сигнала.

Полученный сигнал и, задержанный во времени исходный сигнал, поступают на вход подсистемы детектора ошибок для подсчета числа ошибок.

Для обеспечения контроля помехоустойчивости реализован составной блок (**SubSystem**) детектора ошибок, который подсчитывает и отображает на блоке (**Display**) количество битовых ошибок (несовпадений импульсов). Функциональная схема детектора ошибок представлена на рисунке 3.3.

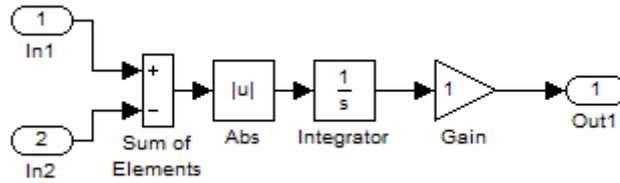


Рисунок 3.3 – Подсистема детектора ошибок

На вход 1 поступает полученный сигнал, а на вход 2 поступает, задержанный во времени, исходный сигнал. Далее вычисляется разность текущих значений входных сигналов и абсолютное значение разности сигналов. Число ошибок высчитывается как интеграл модуля разности исходной и принятой битовых последовательностей (блок - - **Integrator**). Далее используется блок **Gain** для коррекции значения ошибок при использовании бит разной длительности и полярности. Сигнал с выхода детектора ошибок для отображения подается на **Display**.

Для проведения исследований зависимости помехоустойчивости, например, вероятности битовой ошибки от соотношения сигнал/шум или используется подсистема измерителя мощности регулярных или псевдослучайных как вещественных, так и комплексных сигналов, приведенная на рисунке 3.4.

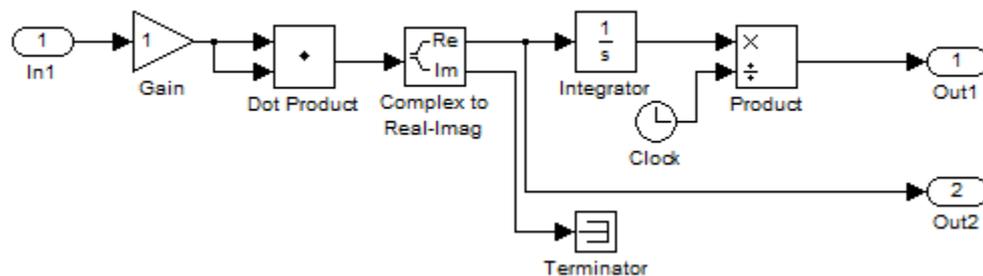


Рисунок 3.4 – Подсистема измерителя мощности

На вход подсистемы измерителя мощности поступает шум с генератора **Random Number1**, после чего он усиливается и подается на блок **Dot Product**, где происходит сложение перемноженных векторов с их комплексным значением. Далее из полученного комплексного числа выделяется мнимая и действительная части. Далее с одного выхода шум идет на интегратор и на выход подсистемы, а со второго выхода на концевой приемник, где происходит заглушка сигнала. В интеграторе интегрируется входной сигнал и поступает на блок **Product**. В данном блоке сигнал перемножается с источником времени и поступает на выход подсистемы.

4. ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ БЛОКОВ БИБЛИОТЕКИ SIMULINK

Ниже описаны основные блоки базовых разделов библиотеки **Simulink** [4], используемые в функциональной схеме двухканального модема при BFSK модуляции.



Random Number – источник случайного сигнала с нормальным распределением. *Назначение:* формирование случайного сигнала с нормальным распределением уровня сигнала. *Параметры блока:* **Mean** – среднее значение сигнала; **Variance** – дисперсия; **Initial seed** – начальное значение генератора случайного сигнала; **Sample time** – такт дискретности.



Sign – блок определения знака сигнала. *Назначение:* определяет знак входного сигнала, при этом, если x - входной сигнал, то сигнал на выходе определяется выражением

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} -1 & \text{при } x < 0, \\ 0 & \text{при } x = 0, \\ 1 & \text{при } x > 0. \end{cases}$$

Параметры блока: флажок - **Enable zero crossing detection** позволяет фиксировать прохождение сигнала через нулевой уровень.



Switch

Switch – блок двухпортового переключателя. *Назначение:* переключение входных сигналов по сигналу управления. *Параметры блока:* **Criteria for passing first input** – условие прохождения сигнала с первого входа, значение выбирается из списка: **$u2 \geq \text{Threshold}$** – сигнал управления больше или равен пороговому значению; **$u2 > \text{Threshold}$** – сигнал управления больше порогового значения; **$u2 \neq \text{Threshold}$** – сигнал управления не равен пороговому значению. **Threshold** – порог; флажок **Show additional parameters** – показать дополнительные параметры.



Scope

Scope – блок осциллографа. *Назначение:* построение графиков исследуемых сигналов как функций времени. Открытие окна осциллографа производится двойным щелчком ЛКМ на пиктограмме блока. Настройка окна осциллографа выполняется с помощью панелей инструментов, позволяющих: осуществить печать содержимого окна осциллографа; установить *параметры*, в частности, **Number of axes** - число входов осциллографа, **Time range** – отображаемый временной интервал и другие; изменить масштабы графиков; установить и сохранить настройки; перевести в плавающий режим и так далее.



Sine Wave

Sine Wave – блок источника синусоидального сигнала. *Назначение:* формирование синусоидального сигнала с заданной частотой, амплитудой, фазой и смещением. Для формирования выходного сигнала блоком могут использоваться два алгоритма. Вид алгоритма определяется параметром **Sine Type** – способ формирования сигнала реализуется двумя

алгоритмами: **Time-based** – по текущему времени (для аналоговых систем) или по значению сигнала на предыдущем шаге и величине такта дискретности (для дискретных систем); **Sample-based** – по величине такта дискретности и количеству расчетных шагов на один период синусоидального сигнала. Вид окна задания параметров меняется в зависимости от выбранного способа формирования синусоидального сигнала.

*Параметры блока в режиме **Time-based**:* **Amplitude** – амплитуда; **Bias** – постоянная составляющего сигнала (смещение); **Frequency (rads/sec)** – частота (рад/с); **Phase (rads)** – начальная фаза (рад); **Sample time** – такт дискретности. Параметр может принимать следующие значения: **0** (по умолчанию) – используется при моделировании непрерывных систем; **> 0** (положительное значение) – задается при моделировании дискретных систем; **-1** (минус один) – такт дискретности устанавливается таким же, как и в предшествующем блоке. Флажок **Interpreted vector parameters as 1 - D** – интерпретировать вектор как массив скаляров. Для очень больших значений времени точность вычисления значений сигнала падает.

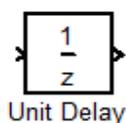
*Параметры блока в режиме **Sample-based**:* **Amplitude** – амплитуда; **Bias** – постоянная составляющего сигнала (смещение); **Samples per period** – количество тактов на один период синусоидального сигнала:

;

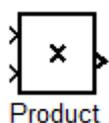
.

Number of offset samples – начальная фаза сигнала, задается количеством тактов дискретности $l = \varphi \cdot p / (2 \cdot \pi)$. **Sample time** – такт дискретности. Флажок **Interpret vector parameters as 1 - D** – интерпретировать вектор как одномерный. В данном режиме ошибка округления не накапливается,

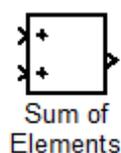
поскольку **Simulink** начинает отсчет номера текущего шага с нуля для каждого периода.



Unit delay – блок единичной дискретной задержки. *Назначение:* выполняет задержку дискретного сигнала на заданный такт дискретности. *Параметры блока:* **Initial conditions** – начальное значение выходного сигнала; **Sample time** – такт дискретности (при задании значения параметра равного **-1** такт дискретности наследуется от предшествующего блока).

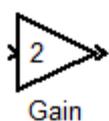


Product – блок умножения и деления. *Назначение:* вычисление произведения текущих значений сигналов. *Параметры блока:* **Number of inputs** – количество входов, может задаваться как число или как список знаков. В списке знаков можно использовать знаки: * - умножить и / - разделить. **Multiplication** – способ выполнения операции, может принимать значения из списка: **Element-wise** – поэлементный; **Matrix** – матричный. Флажок **Show additional parameters** – показать дополнительные параметры. При выставленном флажке отображается окно списка **Output data type mode**, в нашем случае флажок не используется.



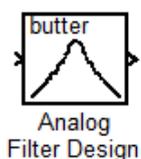
Sum – блок сумматора. *Назначение:* вычисление алгебраической суммы текущих значений входных сигналов. *Параметры блока:* **Icon shape** – форма блока, выбирается из списка: **round** – круг; **rectangular** – прямоугольник. **List of sign** – список знаков из набора: + - плюс; - - минус, | - делитель. Флажок **Show additional parameters** – показать дополнительные параметры, при выставленном флажке отображаются окна

списка **Output data type mode**, в нашем случае не используется. Количество входов и соответствующие им операции определяются списком знаков **List of sign**. При этом метки входов обозначаются соответствующими знаками. В списке **List of sign** можно также указать число входов, при этом все входы будут суммирующими.



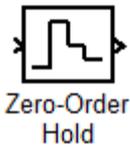
Gain – блок усилителя. *Назначение:* выполняет умножение входного сигнала на постоянный коэффициент; *Параметры блока:* **Gain** – коэффициент усиления. **Multiplication** – способ выполнения операции, значение параметра выбирается из списка: **Element-wise $K*u$** – поэлементный; **Matrix $K*u$** – матричный, коэффициент усиления является левосторонним оператором; **Matrix $u*K$** – матричный, коэффициент усиления является правосторонним оператором; **Matrix $K*u$ (u -вектор)** – векторный, коэффициент усиления является левосторонним оператором. Флажок **Show additional parameters** – показать дополнительные параметры, при выставленном флажке отображаются окна списков **Parameter data type mode**, **Output data type mode**. **Saturate on integer** – подавлять переполнение целого. При установленном флажке ограничение сигналов целого типа выполняется корректно.

Блоки **Gain** и **Matrix Gain** по сути есть один и тот же блок, но с разными начальными установками параметра **Multiplication**.

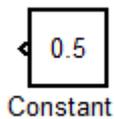


Analog Filter Design – блок аналогового фильтра заданного метода проектирования и типа из подраздела **Filter Design**. *Назначение:* аналоговая фильтрация низкочастотных составляющих спектра входного сигнала. *Параметры блока:* **Design method** – метод проектирования,

выбирается из списка: **Butterworth** – фильтр Баттерворта; **Chebyshev I** – фильтр Чебышева 1-го рода; **Chebyshev II** – фильтр Чебышева 2-го рода; **Elliptic** – фильтр эллиптический; **Bessel** – фильтр Бесселя. **Filter type** – тип фильтра, выбирается из списка: **Lowpass** – нижних частот; **Highpass** – верхних частот; **Bandpass** – полосно-пропускающий; **Bandstop** – полосно-заграждающий. Далее для каждого метода проектирования и типа фильтра выдается свой список параметров. Так для фильтра Баттерворта типа нижних частот параметрами являются: **Filter order** – порядок фильтра; **Passband edge frequency (rads/sec)** – нижняя граничная частота (радиан в секунду). Для других методик проектирования и типов фильтров определяемые параметры очевидны.

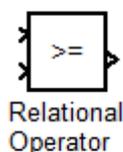


Zero-Order Hold – экстраполятор нулевого порядка. *Назначение:* экстраполяция входного сигнала на интервале дискретизации. Блок фиксирует значение входного сигнала в начале интервала дискретизации и поддерживает на выходе это значение до окончания интервала дискретизации. Затем выходной сигнал изменяется скачком до величины входного сигнала на следующем шаге дискретизации. *Параметры блока:* **Sample time** – такт дискретности. Блок экстраполятора нулевого порядка может использоваться также для согласования работы дискретных блоков, имеющих разные такты дискретности.



Constant – блок источника постоянного сигнала. *Назначение:* задает постоянный по уровню сигнал. *Параметры блока:* **Constant value** – постоянная величина. **Interpret vector parameters as 1-D** – интерпретировать вектор как массив скаляров. **Show additional parameters** – показать дополнительные параметры. При выставленном флажке появится окно

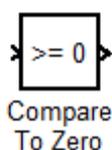
списка Output data type mode. **Output data type mode** – выбор типы выходных данных. **Output data type** – тип выходных данных. **Output Scaling Mode** – способ масштабирования выходного сигнала. **Output scaling value** – величина масштаба.



Relational Operator – блок выполнения операций отношения.

Назначение: блок сравнивает текущие значения входных сигналов.

Параметры блока: Relational Operator- тип операции отношения, выбирается из списка. **Show additional parameters** – показать дополнительные параметры. **Require all inputs to have same data type**- все входы должны иметь одинаковый тип данных. **Output data type mode** – выбор типы выходных данных. **Output data type** – тип выходных данных. **Enable zero crossing detection**-фиксировать прохождение сигнала через нулевой уровень.



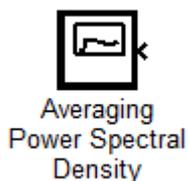
Compare To Zero – блок сравнения с нулем. *Назначение:*

сравнить с нулем заданный сигнал. *Параметры блока:* **Operation** – операции сравнения. Выбираются из списка. **Output data type mode** – выбор типы выходных данных.

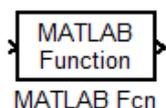


Mux – мультиплексор. *Назначение:* объединяет входные сигналы в вектор. *Параметры блока:* **Number of Inputs**-количество выходов. **Display option**- способ отображения, выбирается из списка: **bar**-вертикальный узкий прямоугольник черного цвета; **signals**- прямоугольник с белым фоном и

отображением меток входных сигналов. **none**-прямоугольник с белым фоном без отображения меток входных сигналов.



Averaging Power Spectral Density-анализатор усредненной спектральной плотности мощности. *Назначение:* отобразить частотную зависимость спектральной плотности мощности. *Параметры блока:* **Length of buffer** длина буфера– **Number of points for fft**-количество точек. **Plot after how many points**- количество точек по которому выводится график. **Sample time**-такт дискретности.

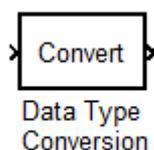


MATLAB Function – блок задания М-функции. *Назначение:* задает выражение в стиле языка программирования MATLAB. *Параметры блока:* MATLAB Function –выражение на языке MATLAB. **Output dimensions** – размерность выходного сигнала. **Output signal type**– тип выходного сигнала. Выбирается из списка: **real**-действительный сигнал; **complex**- комплексный сигнал; **auto**- автоматическое определение типа сигнала. **Collapse 2-D results to 1-D**-преобразование двумерного выходного сигнала в одномерный.



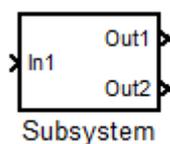
Display – цифровой дисплей. *Назначение:* отображает значение сигнала в виде числа. *Параметры блока:* **Format** –формат отображения данных, может принимать следующие значения: **short** – 5 цифр, включая десятичную точку; **long**- 15 цифр с фиксированной точкой; **short_e** -5 цифр с плавающей точкой; **long_e** -15 цифр с плавающей точкой; **bank**–

банковский формат. **Decimation** – прореживание. **Sample time** – такт дискретности. **Floating display**– изменяющийся режим.



Data Type Conversion –преобразователь типа сигнала.

Назначение: преобразует тип входного сигнала. *Параметры блока:* **Data Type**- тип данных выходного сигнала. **Saturate on integer overflow**- подавлять переполнение целого.



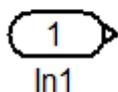
Subsystem – создание подсистем. *Назначение:* Подсистема-

это фрагмент Simulink-модели, оформленный в виде отдельного блока. Использование подсистем при составлении модели преследует следующие цели:

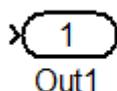
- Уменьшает количество одновременно отображаемых на экране блоков, что облегчает восприятие модели.
- Позволяет создавать и отлаживать отдельные фрагменты модели, что повышает технологичность создания модели.
- Позволяет создавать собственные библиотеки.
- Позволяет синхронизировать параллельно работающие подсистема.
- Позволяет включить в модель собственные справочные средства.
- Позволяет связывать подсистему с М-файлом, обеспечивая запуск этого файла при открытии подсистемы.

Параметры блока: **Show port labels** – показать метки портов. **Treat as atomic unit** – считать подсистему неделимой. **Read/Write Permissions** – разрешить чтение и запись. Допустимы три опции: **ReadWrite**-чтение и запись;

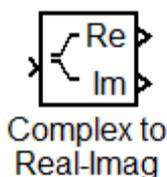
ReadOnly -только чтение; **NoReadOrWrite** ни чтение, ни записи. **Name of error callback function** – имя функции ответного вызова.



Import– входной порт. *Назначение:* Создает входной порт для подсистемы или выполняет считывание сигнала с рабочей области **MatLab** в модель. *Параметры блока:* **Port number**-номер порта. **Port dimensions**-размерность входного сигнала. **Sample time** – такт дискретности. **Show additional parameters**-показать дополнительные параметры. **Data type** – выбор типа выходных данных. **Output data type**-тип выходных данных. **Output Scaling Mode** –способ масштабирования выходного сигнала. **Output scaling value** – величина масштаба. **Sampling mode**-режим.

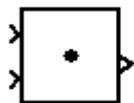


Output – выходной порт. *Назначение:* Создает входной порт для подсистемы или для модели верхнего уровня иерархии. *Параметры блока:* **Port number**-номер порта. **Output when disabled**-вид сигнала на выходе подсистемы, в случае если подсистема выключена. Используется для подсистем, управляемых внешним сигналом. Может принимать следующие значения: **held**- выходной сигнал подсистемы равен последнему рассчитанному значению; **reset**- выходной сигнал подсистемы равен значению, задаваемому параметром initial output. **Initial output**-начальное значение.



Complex to Real-Imag – блок вычисления действительной и (или) мнимой части комплексного числа. *Назначение:* вычисляет действительную

и (или) мнимую часть комплексного числа. *Параметры блока:* **Output-** выходной сигнал. Тип сигнала выбирается из списка: **Real**-действительная часть; **Image** – мнимая часть; **Real& Image**- действительная и мнимая часть.



Dot Product

Dot Product – блок скалярного произведения. *Назначение:* Выполняет вычисление скалярного произведения двух векторов. *Параметры блока:* нет. Блок выполняет вычисление выходного сигнала в соответствии с выражением:

,

где u и v – выходные векторы;

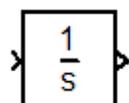
$*$ – операция вычисления комплексно-сопряженного числа;

$+$ - операция вычисления суммы.



Abs

Abs– блок вычисления модуля. *Назначение:* Выполняет вычисление абсолютного значения величины сигнала. *Параметры блока:* **Saturate on integer overflow**-подавлять переполнение целого. **Enable zero crossing detection**-фиксировать прохождение сигнала через нулевой уровень.



Integrator

Integrator – интегратор. *Назначение:* Интегрирование входного сигнала. *Параметры блока:* **External reset**- внешний сброс. Выбирается из списка: **none** - нет (сброс не выполняется); **rising** - нарастающий сигнал (передний фронт сигнала); **falling**-спадающий сигнал (задний фронт сигнала);

either- нарастающий либо спадающий сигнал; **level**-ненулевой сигнал (сброс выполняется, если сигнал на управляющем входе становится не равным нулю). **Initial condition source**- источник начального значения выходного сигнала. Выбирается из списка: **internal**-внутренний; **external**-внешний. **Initial condition**-начальное условие. **Limit output**-ограничение выходного сигнала. **Upper saturation limit**- верхний предел выходного сигнала. **Lower saturation limit**-нижний предел выходного сигнала. **Show saturation port**-показать на пиктограмме порт насыщения. Выходной сигнал данного порта может принимать следующие значения: нуль, если интегратор не находится на ограничении; +1, если выходной сигнал интегратора достиг верхнего предела; -1, если выходной сигнал интегратора достиг нижнего предела. **Show state port** - отобразить/скрыть порт состояния блока. **Absolute tolerance**-абсолютная погрешность. **Enable zero crossing detection**-определять прохождение сигнала через нулевой уровень.



Terminator

Terminator – концевой приемник. *Назначение:* Блок применяется как заглушка для сигнала, поступающего с выхода другого блока. В том случае, когда выход блока оказывается не подключенным ко входу другого блока Simulink выдает предупреждение в командном окне системы **MatLab**. Для исключения таких ситуаций следует использовать блок Terminator. *Параметры блока:* Нет.



Clock

Clock – источник времени. *Назначение:* Формирует сигнал, величина которого на каждом шаге равна текущему времени моделирования. *Параметры блока:* **Display time**-отображение значения времени на пиктограмме блока. **Decimation** – прореживание.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Собрать **Sim**-модель двухканального модема при **BFSK** модуляции, в соответствии с рисунком 3.1.

2. Выставить параметры блоков **Sim**-модели, согласовывая между собой. (Для Random Number: Mean=0, Variance=1, Seed=11, Sample time=1 и для Random Number1 Mean=0, Variance=0,55 (1,55); Seed=0, Sample time = =0,0125)

3. Пронаблюдать и зафиксировать основные осциллограммы, иллюстрирующие работу двухканального модема при **BFSK** модуляции.

4. Изменив значения шума, зафиксировать количество полученных ошибок и рассчитать значение **SNR**.

5. Изменив разнос по частоте, повторить пункт 4.

6. Занести все результаты в таблицу 5.1.

7. Сделать вывод о проделанной работе.

8. Оформить отчет.

Т а б л и ц а 1 – Результаты работы

f		Количество ошибок	SNR
Разнос по частоте 10π ; 12π ФНЧ 2π	0,55		
Разнос по частоте 10π ; 12π	1,55		

ФНЧ $2 \cdot \pi f_i$			
Разнос по частоте $10 \cdot \pi f_i$; $12 \cdot \pi f_i$ ФНЧ $2 \cdot \pi f_i$	0,55		
Разнос по частоте $10 \cdot \pi f_i$; $12 \cdot \pi f_i$ ФНЧ $2 \cdot \pi f_i$	1,55		

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое **BFSK**-модуляция и каков принцип ее работы?
2. Чем частотная модуляция отличается от частотной манипуляции?
3. Объясните работу двухканального модема при **BFSK**-модуляции.
4. При каком значении шума и разное частоты получится лучший результат и почему?
5. На какие группы можно разделить методы демодуляции **FSK**-сигналов? Какой метод является наилучшим с точки зрения помехоустойчивости?
6. Какую функцию в схеме выполняет блок **MatLab Function**?
7. Как изменится осциллограмма на выходе схемы, если убрать блоки **Zero-Order Hold**, стоящие после схемы принятия решения?
8. Объясните принцип работы подсистемы детектора ошибок.
9. Объясните принцип работы подсистемы измерителя мощности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **FSK, GFSK, GMSK, MSK** и некоторые другие режимы. Электронный адрес: <http://www.radioscanner.ru/info/article345/>
2. Марычев, Д.С., Морозов, О.А., Сохортин, М.М. Демодуляция **ЧМн**-сигналов с применением графического процессора. Радиофизика. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2013, № 6 (1), С. 67–73
3. Гультяев, А.К. **MatLab 5.3**. Имитационное моделирование в среде **Windows**: Практическое пособие / А.К. Гультяев. – СПб.: КОРОНА принт, 2001.- 400 с.
4. Черных, И.В. **Simulink**: среда создания инженерных приложений. / Под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.- 496 с.
5. Дьяконов, В.П. **MatLab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6** в математике и моделировании. Сер. Библиотека профессионала / В.П. Дьяконов. - М.: СОЛОН-Пресс, 2005.- 576 с.