

Федеральное агентство по образованию

---

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»

---

## ЦИФРОВАЯ СВЯЗЬ

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
2009

УДК 621.391

Цифровая связь: Методические указания к выполнению лабораторных работ / Сост.: О. В. Малинкина, А. Б. Натальин, А. Б. Сергиенко. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 44 с.

Представлены описания семи компьютерных лабораторных работ, выполняемых при изучении курса «Цифровая связь». Работы выполняются в среде моделирования MATLAB/Simulink с использованием специализированных наборов блоков Communications Blockset и Signal Processing Blockset. Описание процесса выполнения работ соответствует версиям MATLAB 7.0 (Release 14) и выше.

Предназначены для студентов факультета радиотехники и телекоммуникаций, обучающихся по программе подготовки магистров по направлению 552500 «Радиотехника».

Утверждено  
редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний

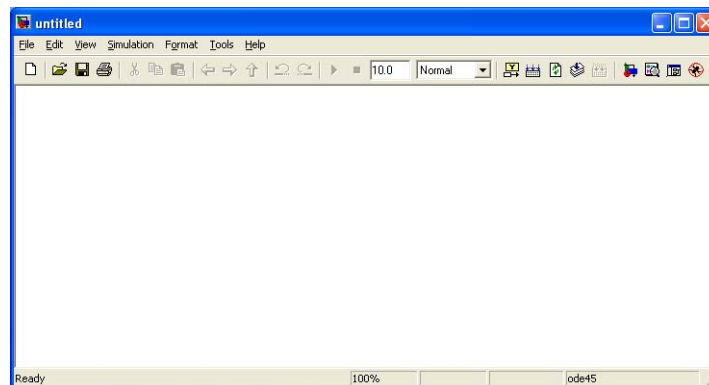
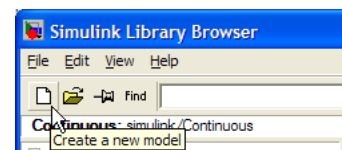
© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009

# 1. ЗНАКОМСТВО С SIMULINK. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ И ОЦЕНКИ ИХ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

## 1.1. Задание и указания к выполнению работы

### 1. Запуск Simulink и создание пустой модели.

- Запустите программу MATLAB, щелкнув по ее значку.
- Щелкните в панели инструментов по кнопке Simulink либо введите в командной строке MATLAB команду **simulink**. Откроется окно библиотеки Simulink (Simulink Library Browser).
- Щелкните в окне Simulink Library Browser по кнопке Create a new model. Появится пустое окно новой модели (рисунок).



### 2. Построение модели простейшей системы связи.

- Любая система связи начинается с источника информации, а заканчивается ее получателем. В качестве источника удобно использовать псевдослучайный некоррелированный битовый поток (блок Communications Blockset ➤ Comm Sources ➤ Random Data Sources ➤ Bernoulli Binary Generator). Целью моделирования системы связи в большинстве случаев является оценка ее помехоустойчивости, т. е. измерение вероятности ошибки. В связи с этим получателем будет являться блок, предназначенный для такого измерения — Communications Blockset ➤ Comm Sinks ➤ Error Rate Calculation. Разместите указанные блоки в составе модели, перетаскивая их с помощью мыши.
- Для визуальной демонстрации результатов измерения вероятности битовой ошибки (Bit Error Rate — BER) необходимо сделать так, чтобы они выводились в виде выходного сигнала блока Error Rate Calculation. Для этого необходимо настроить параметры блока. Откройте окно параметров и выберите для параметра Output Data вариант Port.

### Замечание

Окно параметров блока открывается двойным щелчком на изображении блока.

- После закрытия окна параметров у блока появится выходной сигнал. Поместите в модель блок числового дисплея (Simulink > Sinks > Display) и подсоедините его к выходу блока Error Rate Calculation. При работе модели блок Display будет выводить столбец из трех чисел, поэтому заранее увеличьте его вертикальный размер с помощью мыши.

### Замечание

Связи между блоками протягиваются мышью; кроме того, если нужно подключить единственный выход одного блока к единственному входу другого, можно выделить блок-источник и затем щелкнуть по блоку-приемнику, удерживая клавишу Ctrl.

- Для передачи цифрового сигнала по каналу связи его необходимо преобразовать в сигнал аналоговый, т. е. выполнить операцию цифровой модуляции. В данной работе рассматривается простейший способ низкочастотной двоичной передачи, когда «0» и «1» передаются в виде импульсов одинаковой формы, различающихся лишь полярностью. Для формирования импульсов, задающих полярность, битовые значения 0/1 необходимо преобразовать в биполярные значения +1/–1 (что чему будет соответствовать, не имеет значения). Реализуйте такое преобразование, используя блоки библиотек Simulink > Math Operations и Simulink > Sources.
- При приеме такого сигнала решение принимается по знаку полученного значения. Можно реализовать принятие решения, сравнивая принятый сигнал с нулевым порогом при помощи блока Simulink > Logic and Bit Operations > Relational Operator. Выходной сигнал этого блока имеет логический тип, который придется преобразовать к числовому с помощью блока Simulink > Signal Attributes > Data Type Conversion.

### Замечание

Тип сравнения в блоке Relational Operator необходимо выбрать исходя из заданного ранее соответствия между битами 0/1 и уровнями сигнала +1/–1.

- Настало время первый раз соединить все в единое целое: битовый генератор — преобразователь в двуполярный сигнал — сравнение с порогом. Блок Error Rate Calculation имеет 2 входа: Tx (передатчик) и Rx (приемник). На первый из них нужно подать исходную информацию (с выхода генератора битового потока), на второй — принятые данные.
- Теперь можно запустить модель, щелкнув в ее панели инструментов по кнопке Start Simulation. Дисплей должен показать нулевые значения в двух первых строках (вероятность ошибки и число ошибок) и 11 в третьей строке (число обработанных бит).



- Рассматриваемая система не содержит аналоговых блоков, поэтому целесообразно использовать режим моделирования с дискретным временем. Кроме того, нужно, чтобы модель работала без остановки. Для выполнения указанных настроек откройте окно параметров моделирования командой меню **Simulation** ➤ **Configuration Parameters** или клавишами **Ctrl+E** и задайте для параметра **Stop time** значение **inf**, а для параметров **Type** и **Solver** в разделе **Solver options** выберите **Fixed-step** и **discrete (no continuous states)** соответственно.

#### **Замечание**

Время окончания работы модели также можно задавать непосредственно в ее панели инструментов — в поле **Simulation stop time**.

- Закройте окно параметров моделирования и снова запустите модель. Она будет работать не останавливаясь, демонстрируя нулевое число ошибок. Остановите работу модели щелчком по кнопке **Stop simulation**.

### **3. Добавление формирующего и приемного фильтров.**

- Сейчас в модели используется один отсчет сигнала на каждый передаваемый бит. Для использования при передаче информации импульсов заданной формы необходимо сначала увеличить частоту дискретизации сигнала, а потом пропустить «редко» следующие импульсы через формирующий фильтр с заданной импульсной характеристикой (ИХ). Повысить частоту дискретизации можно с помощью блока **Signal Processing Blockset** ➤ **Signal Operations** ➤ **Upsample**. Поместите этот блок в модель после формирователя двуполярного сигнала и задайте повышение частоты дискретизации в 8 раз. Дискретный фильтр можно реализовать с помощью блока **Simulink** ➤ **Discrete** ➤ **Discrete Filter**. Поместите этот блок в модель после блока **Upsample** и реализуйте *манчестерское кодирование*, задав ИХ вида  $\{1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, -1\}$ .

#### **Замечание**

Параметр **Numerator** блока фильтра задает коэффициенты полинома *числителя* функции передачи. Эти коэффициенты должны быть заданы в виде *вектора* в формате MATLAB, т. е. перечислены в квадратных скобках через пробелы или запятые: **[1 1 1 1 -1 -1 -1 -1]**.

Параметр **Denominator** задает коэффициенты полинома *знаменателя* функции передачи. Введите здесь число **1**, так как в данном случае необходим нерекурсивный фильтр.

Параметр **Sample time** задает период дискретизации сигнала. Чтобы использовать тот период, с которым уже дискретизирован входной сигнал, введите здесь значение **-1**.

- При приеме сигнала необходима согласованная фильтрация с последующим понижением частоты дискретизации. Поместите в модель еще один дискретный фильтр (сразу после формирующего фильтра) и задайте для него зеркально-перевернутую ИХ вида  $\{-1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1\}$ . Для по-

нижения частоты дискретизации из выходного сигнала приемного фильтра необходимо выбрать отдельные отсчеты с помощью блока **Signal Processing Blockset** ➤ **Signal Operations** ➤ **Downsample**. Задайте в параметрах этого блока понижение частоты в 8 раз.

- Запустите модель и убедитесь в том, что она работает неправильно (вероятность ошибки составляет около 50 %). Дело в том, что после введения передающего и формирующего фильтров необходимо учесть 2 момента:
  - ◆ отсчеты после согласованного фильтра должны браться в строго определенные моменты времени (необходима временная синхронизация);
  - ◆ процедуры фильтрации вносят задержку, которую необходимо учесть при сравнении переданного и принятого сигналов.
- Для контроля формы сигналов и подбора моментов взятия отсчетов подключите 2 осциллографа (блоки **Simulink** ➤ **Sinks** ➤ **Scope**) к выходам приемного фильтра и блока понижения частоты дискретизации. Запустите модель. Вы увидите, что максимальный размах сигналов до и после понижения частоты дискретизации не совпадает. Это означает, что отсчеты берутся не в те моменты, когда сигнал на выходе согласованного фильтра достигает своего максимума. Скорректируйте моменты взятия отсчетов, регулируя параметр **Sample offset** блока **Downsample**.

#### **Замечание**

Для открытия окна осциллографа сделайте двойной щелчок на блоке **Scope**; для автоподбора масштаба изображения щелкните в окне осциллографа правой кнопкой мыши и выберите в контекстном меню команду **Autoscale**; для анализа осциллограмм приостановите работу модели кнопкой **Pause simulation**.

#### **Внимание!**

При подборе моментов взятия отсчетов необходимо обратить внимание на то, что сигнал после понижения частоты дискретизации должен принимать *только большие по модулю* значения. Дело в том, что при использовании манчестерского кодирования возможна ложная (со сдвигом на половину символа) синхронизация, размах сигнала при этом такой же, как при правильной синхронизации, но, кроме больших по модулю, сигнал принимает также значения, близкие к нулю.

- Компенсация задержки, вносимой в сигнал при его обработке, производится непосредственно в блоке **Error Rate Calculation** (параметр **Receive delay**). Проанализируйте появляющиеся в модели задержки и подберите такое значение этого параметра, чтобы модель работала без ошибок.
- 4. Добавление шума и просмотр спектра сигнала.**
- Для просмотра спектра формируемого сигнала подключите после формирующего фильтра блок **Signal Processing Blockset** ➤ **Signal Processing**

Sinks ➤ Spectrum Scope. В параметрах этого блока установите флажок Buffer input. Запустите модель и наблюдайте спектр сигнала.

#### Замечание

Окно графика Spectrum Scope открывается автоматически при запуске модели. Автомасштабирование графика выполняется так же, как для осциллографа.

Чтобы уменьшить дисперсию спектральной оценки, увеличьте параметр Number of spectral averages блока Spectrum Scope, например до 10.

- Добавление аддитивного белого гауссовского шума производится с помощью блока Communications Blockset ➤ Channels ➤ AWGN Channel. Поместите этот блок в модель между формирующим и приемным фильтрами.

#### Замечание

Параметры блока AWGN Channel имеют следующий смысл: Input signal power — мощность (т. е. средний квадрат модуля) входного сигнала, Symbol period — длительность передачи одного символа. В данном случае ИХ формирующего фильтра задана так, что средний квадрат сигнала равен единице; длительность передачи символа определяется периодом дискретизации, заданным в источнике данных Bernoulli Binary Generator (по умолчанию он равен единице). Таким образом, требуемые значения этих двух параметров в данном случае совпадают со значениями, принятыми по умолчанию.

- Снимите зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум (С/Ш) на символ ( $E_s/N_0$ ), изменяя отношение  $E_s/N_0$  в диапазоне от  $-3$  до  $+7$  дБ с шагом в 1 дБ. Для каждого случая необходимо дождаться появления не менее 100 ошибок. Данные записываются в таблицу следующего вида ( $P_{\text{ош}}$  — оценка вероятности ошибки,  $N_{\text{ош}}$  — число произошедших ошибок,  $N_{\text{бит}}$  — число обработанных символов; последний столбец  $\sigma_P$  — среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки вероятности ошибки — заполняется при подготовке отчета):

$E_s/N_0$ , дБ	$P_{\text{ош}}$	$N_{\text{ош}}$	$N_{\text{бит}}$	$\sigma_P$

#### Замечание

Можно включить автоматическое завершение моделирования при достижении заданного числа ошибок, установив в блоке Error Rate Calculation флажок Stop simulation и задав для параметра Target number of errors значение 100. При этом можно также ограничить общее число обрабатываемых символов, введя в поле Maximum number of symbols значение  $1e6$  ( $10^6$ ).

### 5. Анализ влияния мультипликативного скремблирования на вероятность ошибки.

- Поместите в модель блоки скремблера и дескремблера из библиотеки Communications Blockset ➤ Sequence Operations. Задайте для них двоичные вычисления (Calculations base = 2), полином (Scramble polynomial) [1 0 0 0 1 0 0 1] и нулевое начальное состояние (Initial states).
- Повторно снимите кривую помехоустойчивости в том же диапазоне отношений С/Ш, что и ранее. Далее получите еще несколько точек зависимости, увеличивая отношение С/Ш с шагом в 1 дБ вплоть до значения, при котором будет сложно дожидаться появления 100 ошибок (примерно 9 дБ).

#### Замечание

Для ускорения длительного процесса моделирования можно закрыть все графические окна модели (осциллографы и Spectrum Scope).

### 6. Подготовка материалов для отчета.

- Отредактируйте расположение блоков в окне модели, чтобы сделать ее более наглядной. Сохраните модель, присвоив ей осмысленное имя (**Внимание: русские буквы использовать нельзя!**).
- Создайте документ Microsoft Word и перенесите в него следующие изображения (выделив нужное окно и нажав клавиши Alt+Print Screen для копирования изображения окна в буфер обмена):
  - ♦ изображение схемы созданной модели;

#### Замечание

Помимо копирования растрового образа окна модели указанным выше образом можно скопировать модель в векторном виде с помощью команды меню окна модели Edit ➤ Copy model to clipboard.

- ♦ графики сигналов до и после согласованного фильтра (копируются при отсутствии шума, для чего в блоке AWGN можно задать бесконечное (**inf**) отношение С/Ш);
- ♦ график спектра сигнала (также снимается без шума).

## 1.2. Содержание отчета

1. Схема созданной модели с краткими комментариями о назначении ее блоков.

2. График использованной формы посылки и ее корреляционной функции (КФ; график должен быть получен расчетным путем); примеры графиков сигнала в модели до и после приемного согласованного фильтра.

3. Рассчитанный исходя из формы КФ график энергетического спектра используемого сигнала (по вертикали использовать логарифмический масштаб — в децибелах относительно некоторого произвольно выбранного значения) и полученный экспериментально график спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала.



4. Таблицы помехоустойчивости, полученные при отсутствии и наличии скремблирования сигнала. В таблицах должен быть заполнен последний столбец (СКО оценки битовой ошибки). СКО рассчитывается по следующей формуле:  $\sigma_P = \sqrt{P(1-P)/N_{\text{бит}}}$ , где  $N_{\text{бит}}$  — число обработанных бит;  $P$  — вероятность ошибки (вместо истинного значения использовать полученную в результате моделирования оценку).

5. Вывод формулы, связывающей вероятности ошибок на входе и выходе использованного дескремблера, в предположении о том, что ошибки на входе происходят независимо друг от друга с вероятностью  $p$ .

6. Таблицы и графики кривых помехоустойчивости, полученные при отсутствии и наличии скремблирования сигнала (по горизонтали — отношение  $E_s/N_0$  в децибелах, по вертикали — вероятность ошибки в логарифмическом масштабе). Помимо собственно графиков полученных оценок, указать «коридор разброса» ( $\pm$ СКО вокруг полученных значений).

7. Совместно с «экспериментальными» графиками построить теоретические зависимости, которые в данном случае определяются следующим образом:

$$P_{\text{ош}} = 1 - \Phi\left(\sqrt{2\frac{E_s}{N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{2\frac{E_s}{N_0}}\right), \quad (1.1)$$

где  $\Phi$  и  $Q$  — соответственно гауссовский интеграл вероятности и его дополнение до единицы:

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt, \quad Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt = 1 - \Phi(x).$$

**Примечание.** Связь  $Q$ -функции с функцией  $\text{erf}$  выражается следующим образом:

$$Q(x) = \left(1 - \text{erf}\left(x/\sqrt{2}\right)\right)/2, \quad \text{erf}(x) = 1 - 2Q(x\sqrt{2}).$$

Для построения теоретической зависимости в случае использования дескремблера следует, кроме того, использовать формулу, выведенную в п. 5.

8. Выводы.

### 1.3. Контрольные вопросы

1. Пусть моменты взятия отсчетов после согласованного фильтра сместились относительно идеальных значений. Опишите причины, которые в этой ситуации приведут к росту вероятности ошибки.

2. Предположим, что после согласованного фильтра в приемнике отсчеты берутся в неправильные моменты со сдвигом на  $T/2$ . Какие значения может принимать полезный сигнал на выходе фильтра в данном случае?

3. К каким эффектам приведет смещение порога сравнения от нулевого значения?

4. Пусть вероятности нуля и единицы в источнике данных неодинаковы. Как это повлияет на спектр сигнала при отсутствии и при наличии скремблера?

5. Объясните, почему «фазу» взятия отсчетов в блоке Downsample пришлось установить равной именно 7.

6. Пусть при реализации согласованного фильтра в приемнике допущена ошибка и его ИХ задана в виде  $\{-1, -1, -1, \underline{1}, 1, 1, 1, 1\}$  (у одного отсчета перепутан знак). К каким энергетическим потерям (в децибелах) это приведет? (То есть на сколько децибел придется увеличить мощность сигнала для сохранения прежней вероятности ошибки?)

7. Для бинарной передачи данных используется импульс следующего вида: 4 временных такта длительностью  $T/2$ , амплитуда на этих тактах  $+U, +U, -U, +U$ ; общая длина импульса  $2T$ . Длительность импульса в 2 раза больше тактового интервала, т. е. импульсы накладываются друг на друга. Удастся ли после согласованной фильтрации такого сигнала извлечь из него переданную информацию? Ответ обосновать.

8. Пусть вместо манчестерского сигнала для передачи данных используется сигнал следующего вида: символьный интервал  $T$  разделен на 4 фрагмента длительностью  $T/4$  каждый; уровень сигнала на этих четырех субтактах равен последовательно  $+U, -U, +U, -U$ . Как это повлияет на помехоустойчивость и спектральную эффективность системы?

9. Пусть длительности положительного и отрицательного импульсов в манчестерском коде не равны друг другу (положительный импульс имеет длительность  $T/2 + \tau$ , отрицательный  $T/2 - \tau$ ). К каким последствиям для помехоустойчивости и спектральных свойств сигнала это приведет?

10. Пусть для передачи двоичных сигналов используется импульс длительностью  $\tau < T$ , заполняющий символьный интервал не целиком. Какими достоинствами и недостатками обладает такой вариант по сравнению с прямоугольным импульсом, занимающим полный символьный интервал  $T$ ?

11. Какие предположения о свойствах информационного сигнала и шумов используются при оценке вероятности ошибки данным методом (методом моделирования с подсчетом числа ошибок, возникающих при работе модели)?

12. Почему остановка работы модели по достижении заданного числа ошибок является разумным способом организации моделирования?

13. Строго говоря, при использовании достижения заданного числа ошибок в качестве критерия остановки моделирования оценка BER получается *смещенной*. Объясните (качественно) причину этого смещения.

14. Чему равен *относительный* среднеквадратический разброс оценок BER при использовании 100 ошибок в качестве критерия остановки моделирования, если оцениваемая вероятность ошибки *мала*?

15. Во сколько раз (примерно) увеличится *относительный* разброс оценок, если число ошибок, при котором останавливается моделирование, вместо 100 взять равным 10?

16. При оценке *малой* вероятности ошибки наблюдалось  $N_{\text{ош}} = 400$  ошибок. Чему равна *относительная* среднеквадратическая погрешность оценки?

17. От чего зависит вид формулы, связывающей вероятность битовых ошибок до и после дескремблера?

## 2. ЛИНЕЙНАЯ ЦИФРОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ

### 2.1. Задание и указания к выполнению работы

#### 1. Исследование влияния формы созвездия (вида модуляции) на помехоустойчивость системы связи.

- Запустите программу MATLAB, откройте окно библиотеки Simulink (Simulink Library Browser) и щелкните в этом окне по кнопке Create a new model, чтобы создать пустое окно для новой модели.
- Постройте модель несложной системы связи с амплитудной манипуляцией, используя для этого следующие блоки:
  - ♦ **источник данных** — блок генерации битового потока (Communications Blockset ➤ Comm Sources ➤ Random Data Sources ➤ Bernoulli Binary Generator);
  - ♦ **преобразователь последовательного кода в параллельный** — блок буфера (Signal Processing Blockset ➤ Signal Management ➤ Buffers ➤ Buffer);
  - ♦ **модулятор** — блок моделирования комплексной огибающей сигнала с амплитудной манипуляцией (Communications Blockset ➤ Modulation ➤ Digital Baseband Modulation ➤ AM ➤ M-PAM Modulator Baseband);
  - ♦ **канал связи** — блок моделирования канала с АБГШ (Communications Blockset ➤ Channels ➤ AWGN Channel);
  - ♦ **демодулятор** — блок демодуляции комплексной огибающей сигнала с амплитудной манипуляцией (Communications Blockset ➤ Modulation ➤ Digital Baseband Modulation ➤ AM ➤ M-PAM Demodulator Baseband);
  - ♦ **преобразователь параллельного кода в последовательный** — блок дебуферизации (Signal Processing Blockset ➤ Signal Management ➤ Buffers ➤ Unbuffer);
  - ♦ **приемник данных** — блок оценки вероятности битовой ошибки (Communications Blockset ➤ Comm Sinks ➤ Error Rate Calculation);
  - ♦ **индикатор вероятности ошибки** — блок числового дисплея (Simulink ➤ Sinks ➤ Display).

Кроме того, для просмотра формы сигнального созвездия добавьте в модель блок визуализации *диаграммы рассеяния* (Communications Block-set ➤ Comm Sinks ➤ Discrete-Time Scatter Plot Scope) и подключите его к точке, в которой получается зашумленный сигнал (выход блока AWGN Channel).

### Замечание

Используйте следующие настройки блоков (для не указанных далее параметров оставьте значения по умолчанию):

- Буфер:
  - ◆ размер буфера (Output buffer size (per channel)) — **4** (так как используются 4-битовые символы).
- Модулятор:
  - ◆ число точек в созвездии (M-ary number) — **16** ( $2^4$ );
  - ◆ тип входных данных (Input type) — **Bit** (так как на вход поступают именно *биты*, а не многобитовые целые числа);
  - ◆ тип раскладки битовых комбинаций по точкам созвездия (Constellation ordering) — **Gray** (код Грея);
  - ◆ нормировка масштаба созвездия (Normalization method) — **Average power** (по заданной средней мощности).
- АБГШ-канал:
  - ◆ длительность символов сигнала (Symbol period) — **4** (так как символы формируются из 4-битовых комбинаций).
- Демодулятор: все настройки задаются такими же, как для модулятора.
- Блок оценки вероятности ошибки:
  - ◆ задержка приема (Receive delay) должна быть равна удвоенному числу бит в символе, т. е. **8**;
  - ◆ направление вывода результатов (Output data) — **Port** (в выходной порт);
  - ◆ режим автоматической остановки моделирования (флажок Stop simulation) — **включить**.
- Визуализатор диаграммы рассеяния:
  - ◆ число отображаемых точек (Points displayed) — **400**;
  - ◆ интервал обновления (New points per display) — **100**.
- Общие параметры процесса моделирования:
  - ◆ тип решателя (Solver options) — дискретный с фиксированным шагом (Type: Fixed-step, Solver: discrete (no continuous states));
  - ◆ время окончания работы (Stop time) — **inf** (бесконечность).
- Установите в блоке AWGN Channel бесконечное значение отношения С/Ш ( $E_s/N_0$ ), запустите модель и убедитесь в том, что ошибки передачи отсутствуют.

- Снимите зависимость вероятности битовой ошибки от отношения  $E_s/N_0$ , изменяя последнее в диапазоне 17...27 дБ. Результаты занесите в следующую таблицу.

$E_s/N_0$ , дБ	$P_{\text{ош}}$

### Замечание

Чтобы в процессе моделирования наблюдать созвездие сигнала целиком, используйте в окне визуализатора функцию автомасштабирования (команда Autoscale в контекстном меню окна).

- Замените модулятор и демодулятор на аналогичные блоки для *фазовой* манипуляции (Communications Blockset > Modulation > Digital Baseband Modulation > PM > M-PSK (De)Modulator Baseband). Задайте для этих блоков такие же настройки, как в случае амплитудной манипуляции.
- Снимите зависимость вероятности битовой ошибки от отношения  $E_s/N_0$ , изменяя последнее в диапазоне 12...22 дБ. Результаты занесите в такую же таблицу, как ранее для случая амплитудной манипуляции.
- Замените модулятор и демодулятор на аналогичные блоки для *квадратурной* модуляции с квадратным созвездием (Communications Blockset > Modulation > Digital Baseband Modulation > AM > Rectangular QAM (De)Modulator Baseband). Задайте для этих блоков такие же настройки, как в предыдущих случаях.
- Снимите зависимость вероятности битовой ошибки от отношения  $E_s/N_0$ , изменяя последнее в диапазоне 8...18 дБ. Результаты занесите в такую же таблицу, как и ранее.

### 2. Исследование влияния способа раскладки битовых комбинаций по точкам созвездия на помехоустойчивость системы связи.

- Измените в блоках модулятора и демодулятора способ раскладки битовых комбинаций по точкам созвездия, выбрав для параметра Constellation ordering вариант Binary.
- Снимите зависимость вероятности битовой ошибки от отношения  $E_s/N_0$ , изменяя последнее в том же диапазоне 8...18 дБ. Результаты занесите в такую же таблицу, как и ранее.

### 3. Исследование влияния числа точек в созвездии на помехоустойчивость системы связи.

- Восстановите использование кода Грея для способа раскладки битовых комбинаций по точкам созвездия, выбрав для параметра Constellation ordering модулятора и демодулятора вариант Gray.
- Снимите зависимость вероятности битовой ошибки от отношения  $E_s/N_0$  для разного числа точек созвездия КАМ-модуляции: 4 точки (0...10 дБ) и 64 точки (12...22 дБ). Результаты заносите в таблицы такой же формы, как

и ранее. Для изменения числа точек созвездия необходимо настраивать следующие параметры модели:

- ♦ **буфер:** размер буфера должен соответствовать числу бит, содержащихся в одном символе, т. е. для 4-точечного созвездия быть равным  $\log_2 4 = 2$ , а для 64-точечного —  $\log_2 64 = 6$ ;
- ♦ **модулятор и демодулятор:** необходимо задать нужное число точек в созвездии (M-ary number);
- ♦ **АБГШ-канал:** длительность символов сигнала (Symbol period) должна быть равна числу бит, содержащихся в одном символе, т. е. совпадать с размером буфера (см. выше);
- ♦ **блок оценки вероятности ошибки:** задержка приема (Receive delay) должна быть равна удвоенному числу бит в символе.

#### **4. Исследование процедуры формирования спектра сигнала.**

- Аналогично тому, как это делалось в работе 1, добавьте в модель формирующий и приемный фильтры. Для этого после блока модулятора повышится частота дискретизации (блок Signal Processing Blockset ➤ Signal Operations ➤ Upsample, задайте повышение в 16 раз), после чего ставится блок дискретного фильтра (для работы с комплексным сигналом используйте блок фильтра Signal Processing Blockset ➤ Filtering ➤ Filter designs ➤ Digital filter). Задайте нерекурсивный фильтр (Transfer function type: FIR) и сначала реализуйте прямоугольную ИХ, введя в строку Numerator coefficients выражение `ones(1, 16)` (в MATLAB оно возвращает вектор из 16 единиц). После АБГШ-канала (но до точки подключения визуализатора диаграммы рассеяния) поставьте точно такой же фильтр, но с уменьшенными в 16 раз значениями ИХ (`ones(1, 16)/16`), а потом понизьте частоту дискретизации в 16 раз с помощью блока Signal Processing Blockset ➤ Signal Operations ➤ Downsample. Сдвиг моментов выборки в этом блоке (Sample offset) должен быть равен 15. Наконец, необходимо учесть в блоке оценки вероятности ошибки дополнительную задержку на 2 символа, вносимую процедурами фильтрации, изменив значение параметра Receive delay с 12 на 24.
- Для просмотра спектра формируемого сигнала подключите после формирующего фильтра блок Signal Processing Blockset ➤ Signal Processing Sinks ➤ Spectrum Scope. В параметрах этого блока установите флажок Buffer input. Чтобы уменьшить дисперсию спектральной оценки, увеличьте параметр Number of spectral averages блока Spectrum Scope, например, до 10.
- Запустите модель и убедитесь, что она работает с той же вероятностью ошибки, которая была измерена для данного отношения С/Ш до установки фильтров. Скопируйте изображение окна анализатора спектра в буфер обмена, создайте документ Word и поместите туда график.

- Замените прямоугольный фильтр на sqrt-вариант фильтра с косинусоидальным сглаживанием АЧХ. Для этого параметр **Numerator coefficients** блока формирующего фильтра должен иметь вид **rcosine(1, 16, 'sqrt')\*4**, а аналогичный параметр в приемном фильтре — **rcosine(1, 16, 'sqrt')/4** (множитель/делитель, равные 4, используются здесь для того, чтобы при передаче сохранить среднюю мощность сигнала в процессе фильтрации, а при приеме установить необходимый масштаб сигнала).
- Кроме того, необходимо задать нулевое значение для параметра **Sample offset** блока понижения частоты дискретизации и увеличить задержку (**Receive delay**) в блоке оценки вероятности ошибки, сделав ее равной **60** (это необходимо, поскольку используемые фильтры обладают длиной ИХ и поэтому вносят в сигнал большую задержку).
- Запустите модель и убедитесь, что она работает с почти такой же (немного большей) вероятностью ошибки, которая была измерена для данного отношения С/Ш до установки фильтров. Скопируйте изображение окна анализатора спектра в созданный документ Word.
- Перейдите в основное окно MATLAB и получите графики ИХ использованного фильтра и ее корреляционной функции. Для этого используйте следующие команды:
  - ♦ график ИХ фильтра:  
`impz(rcosine(1, 16, 'sqrt'))`
  - ♦ график КФ ИХ фильтра:  
`impz(xcorr(rcosine(1, 16, 'sqrt')))`
 Оба графика скопируйте в созданный документ Word, используя команду меню **Edit ➤ Copy figure** в окне графика.
- В завершение работы отредактируйте расположение блоков в окне модели, чтобы сделать ее более наглядной. Сохраните модель, присвоив ей осмысленное имя, и перенесите изображение модели в созданный документ Word, используя команду меню **Edit ➤ Copy model to clipboard** в окне модели.

## 2.2. Содержание отчета

1. Схема созданной модели с краткими комментариями о назначении ее блоков.
2. Изображения сигнальных созвездий (в произвольном масштабе) с подписанным соответствием битовых комбинаций точкам созвездия (последовательность бит не имеет значения): АМ-16 (код Грея), ФМ-16 (код Грея), КАМ-16 (код Грея), КАМ-16 («последовательное» размещение чисел), КАМ-4 (код Грея) (*созвездие КАМ-64 приводить не нужно*).

### Замечание

«Последовательное» размещение точек означает, что точки созвездия последовательно нумеруются (например, по строкам) числами от 0 до  $M-1$ , представленными в двоичном коде: **0000**, **0001**, **0010** и т. д.

3. Графики кривых помехоустойчивости (во всех случаях по горизонтали откладывается отношение  $E_b/N_0$  в децибелах, по вертикали — вероятность битовой ошибки в логарифмическом масштабе. Обратите внимание на то, что в процессе работы задавалось отношение *С/Ш на символ*, а не на бит, поэтому для построения графиков эти значения необходимо пересчитать по формуле  $E_b/N_{0[\text{дБ}]} = E_s/N_{0[\text{дБ}]} - 10 \lg m$ , где  $m$  — число бит на символ для соответствующего вида модуляции). Графики строятся следующими группами:

- совместно построенные кривые помехоустойчивости для разных видов модуляции при 16-точечных созвездиях: АМ-16, ФМ-16, КАМ-16;
- совместно построенные кривые помехоустойчивости для разных видов битовой раскладки КАМ-16: с кодом Грея и при «последовательном» размещении чисел;
- совместно построенные кривые помехоустойчивости для КАМ с разным числом точек в созвездии: КАМ-4, КАМ-16 (дублируется график, измеренный в п. 1 работы) и КАМ-64.

4. Вместе с экспериментальными графиками в предыдущем пункте должны быть построены асимптотические зависимости, предполагающие, что перепутываться могут только соседние точки. Вероятность символьной ошибки при этом оценивается по формуле

$$P_{\text{sym}} \approx \frac{2n_{\min}}{M} P_{d_{\min}} = \frac{2n_{\min}}{M} Q \left( \sqrt{\frac{d_{\min}^2}{2\sigma_a^2} \frac{E_s}{N_0}} \right),$$

где  $d_{\min}$  — минимальное расстояние между точками созвездия;  $\sigma_a^2$  — средний квадрат модуля точек созвездия;  $M$  — число точек созвездия;  $n_{\min}$  — число минимальных расстояний в созвездии. Соотношение между вероятностями символьной и битовой ошибок считать следующим:

- для кода Грея:  $P_b = P_{\text{sym}}/m$ ;
- для «последовательной» раскладки:  $P_b = P_{\text{sym}} n_{\text{ср}}/m$ , где  $n_{\text{ср}}$  — среднее число несовпадающих бит в парах ближайших точек созвездия. Это значение необходимо рассчитать самостоятельно, пользуясь изображением созвездия, построенным при подготовке отчета в п. 2.

5. Графики СПМ сигнала при использовании прямоугольных посылок и при использовании формирующего фильтра с косинусоидальным сглаживанием АЧХ.

6. Графики ИХ фильтра с косинусоидальным сглаживанием АЧХ и ее КФ.

7. Выводы.



### 2.3. Контрольные вопросы

1. Пусть созвездие КАМ-8 содержит следующие точки:  $1 + j$ ,  $1 - j$ ,  $-1 + j$ ,  $-1 - j$ ,  $3 + j$ ,  $-1 + 3j$ ,  $-1 - 3j$ ,  $1 - 3j$  («шестеренка»). Изобразите на этой комплексной плоскости границы областей принятия решений, соответствующих каждой из восьми точек созвездия.
2. Придумайте 3-битовый код Грея для созвездия КАМ-8 из вопроса 1 («шестеренка»).
3. При моделировании системы связи с сигналом КАМ-16 использована частота дискретизации  $f_d$ , в 4 раза превышающая символьную скорость. Шум является дискретным белым шумом, его СПМ равномерна во всем рабочем диапазоне частот моделируемой дискретной системы (от  $-f_d/2$  до  $+f_d/2$ ). Отношение С/Ш по мощности равно 10 дБ. Чему равно отношение  $E_b/N_0$ ?
4. Модуляция ФМ-2, при моделировании использовано 16 отсчетов на символ, шум является белым во всей полосе частот моделируемой дискретной системы ( $-f_d/2 \dots +f_d/2$ ). Отношение С/Ш по мощности составляет -2 дБ. Чему равно отношение  $E_b/N_0$ ?
5. Придумайте *самую неудачную* раскладку битовых комбинаций по точкам созвездия ФМ-8. Во сколько раз вероятность битовой ошибки будет при этом больше, чем при использовании кода Грея?
6. Придумайте *самую неудачную* раскладку битовых комбинаций по точкам созвездия АМ-8. Во сколько раз вероятность битовой ошибки будет при этом больше, чем при использовании кода Грея?
7. Какие (как положительные, так и отрицательные) эффекты проявляются при изменении коэффициента сглаживания raised-cosine-фильтра?
8. При реализации приемника системы связи с модуляцией КАМ-16 (код Грея) коэффициент усиления сигнала оказался в 4 раза (по уровню) меньше, чем нужно. К какому значению будет стремиться вероятность битовой ошибки в этом случае при  $E_b/N_0 \rightarrow \infty$ ?
9. Объясните, почему КАМ-сигнал с квадратным созвездием можно трактовать как совокупность двух независимых АМ-сигналов. Обязательно ли при этом должен использоваться код Грея?
10. Опишите возможную процедуру *точного* расчета вероятности *символьной* ошибки для КАМ с квадратным созвездием.
11. Как при большом отношении С/Ш соотносятся друг с другом вероятности битовой ошибки для КАМ-16 при использовании кода Грея и при последовательном размещении символов (показать количественно)?
12. В приемнике сигнала ФМ-4 произошла ошибка по фазе на  $90^\circ$ . К чему будет стремиться вероятность битовой ошибки при  $E_b/N_0 \rightarrow \infty$ ?
13. Почему с увеличением числа точек КАМ ухудшается помехоустойчивость приема? Для чего тогда используют созвездия с большим числом точек?

### 3. ПРИЕМ СИГНАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ МЕЖСИМВОЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

#### 3.1. Задание и указания к выполнению работы

##### *1. Исследование помехоустойчивости системы связи при наличии слабой межсимвольной интерференции (МСИ) без ее компенсации.*

- Запустите программу MATLAB, откройте окно библиотеки Simulink, создайте окно для новой модели и постройте модель системы связи с бинарной фазовой манипуляцией и АБГШ-каналом (блоки Bernoulli Binary Generator, BPSK Modulator/Demodulator, AWGN Channel, Error Rate Calculation, Display). Как обычно, задайте дискретный режим моделирования с фиксированным шагом и установите бесконечную продолжительность работы. Добейтесь правильной работы модели.
- Введите в модель межсимвольную интерференцию, добавив перед АБГШ-каналом блок дискретного фильтра (так как сигнал в данном случае является комплексным, необходимо использовать блок фильтра Signal Processing Blockset > Filtering > Filter designs > Digital filter). Задайте рекурсивный фильтр (Transfer function type: FIR) и ИХ канала связи, вызывающую слабую МСИ, создав в главном окне MATLAB переменную  $\mathbf{h} = [0.1 \ 1 \ 0.1]$  и указав ее идентификатор  $\mathbf{h}$  в поле Numerator coefficients блока фильтра. Добейтесь отсутствия ошибок при большом отношении С/Ш, задав правильную задержку в блоке оценки вероятности ошибки.
- Установите в блоке АБГШ-канала отношение  $E_s/N_0 = 10$  дБ и снимите зависимость вероятности помехоустойчивости от уровня боковых отсчетов ИХ канала связи, меняя их значение с шагом 0.1 от 0.1 до 0.5 (меняйте значение переменной  $\mathbf{h}$  в главном окне MATLAB; правый и левый боковые отсчеты должны изменяться синхронно). При этом следует иметь в виду, что для правильного задания отношения С/Ш необходимо учесть увеличение средней мощности сигнала из-за боковых отсчетов ИХ. Значение средней мощности необходимо задавать в блоке АБГШ-канала. Средняя мощность сигнала в данном случае равна сумме квадратов отсчетов ИХ канала: для случая  $[0.1 \ 1 \ 0.1]$  это 1.02 и т. д. Чтобы мощность вычислялась автоматически, введите в поле Input signal power блока АБГШ-канала выражение  $\text{sum}(\mathbf{h}.^2)$ .
- Для значений боковых отсчетов, равных 0.4 и 0.5, снимите зависимости вероятности ошибки от отношения С/Ш, изменяемого в диапазоне 0...20 дБ с шагом 2 дБ.

## **2. Исследование помехоустойчивости системы связи при компенсации МСИ с помощью линейного эквалайзера, спроектированного без учета уровня шума.**

- Сделайте текущим каталогом системы MATLAB (текущий каталог изменяется с помощью поля в панели инструментов главного окна MATLAB) каталог группы на сервере дисплейного класса (конкретный путь должен указать преподаватель). Это необходимо для того, чтобы стали доступны файлы функций для расчета эквалайзеров.
- Задайте ИХ канального фильтра  $\mathbf{h} = [1 \ 2 \ 1]$ .
- Разместите в модели второй блок нерекурсивного дискретного фильтра, поставив его после АБГШ-канала. В поле ИХ этого фильтра (он будет играть роль линейного эквалайзера) введите следующую строку для вызова расчетной функции:

**eq\_linear(h, inf, 32, 16)**

Здесь  $\mathbf{h}$  — идентификатор переменной, хранящей ИХ канала связи;  $\mathbf{inf}$  — отношение С/Ш (в децибелах), для которого проектируется эквалайзер (в данном случае бесконечность, т. е. отсутствие шума); **32** — длина фильтра-эквалайзера; **16** — задержка, вносимая при обработке сигнала.

- Задав большое отношение С/Ш, добейтесь правильной работы модели (задержка в блоке оценки вероятности ошибки должна соответствовать задержке, задаваемой при расчете эквалайзера).
- Снимите зависимость вероятности ошибки от отношения С/Ш в диапазоне 30...40 дБ. В данном эксперименте отношение С/Ш изменяется только в блоке АБГШ-канала, а эквалайзер остается рассчитанным на бесконечное отношение С/Ш.
- Повторите аналогичное измерение для каналов вида  $\mathbf{h} = [1 \ 2 \ 3 \ 2 \ 1]$  (32...42 дБ) и  $\mathbf{h} = [-3 \ 4 \ 2]$  (–1...+9 дБ).

## **3. Исследование помехоустойчивости системы связи при компенсации МСИ с помощью линейного эквалайзера, спроектированного с учетом уровня шума.**

- Для тех же трех каналов измерьте зависимость вероятности ошибки от отношения С/Ш в ситуации, когда эквалайзер рассчитывается *с учетом* уровня шума. Для этого при изменении отношения С/Ш необходимо синхронно менять соответствующий (второй по счету) параметр в строке вызова функции расчета эквалайзера. Создайте в главном окне MATLAB еще одну переменную — для хранения отношения  $E_s/N_0$  (в децибелах):  $\mathbf{q} = 10$  и укажите ее идентификатор  $\mathbf{q}$  в поле Es/No блока АБГШ-канала и в строке вызова функции расчета эквалайзера: **eq\_linear(h, q, 32, 16)**. Диапазоны изменения отношения С/Ш следующие:

- ♦ для канала  $[1 \ 2 \ 1]$  — 10...30 дБ (шаг 2 дБ);
- ♦ для канала  $[1 \ 2 \ 3 \ 2 \ 1]$  — 20...40 дБ (шаг 2 дБ);
- ♦ для канала  $[-3 \ 4 \ 2]$  — (–1)...(+9) дБ (шаг 1 дБ).

#### **4. Исследование помехоустойчивости системы связи при компенсации МСИ с помощью эквалайзера с идеальной обратной связью по решению (ОСР).**

- В блоке фильтра-эквалайзера измените строку расчета коэффициентов следующим образом (это расчет нерекурсивной ветви эквалайзера с ОСР):

**eq\_dfe\_ff(h, q, 17, 16)**

Назначение параметров функции такое же, как в случае расчета линейного эквалайзера.

- Добавьте в модель еще один нерекурсивный фильтр, подайте на его вход чистый модулированный сигнал (сигнал после блока BPSK-модулятора) с задержкой, на единицу превышающей задержку, заданную при расчете фильтра (в данном случае это значение равно  $16 + 1 = 17$ ; для задержки можно использовать блок Simulink ➤ Discrete ➤ Integer Delay), а выход подключите к сумматору, поставленному между выходом нерекурсивной части фильтра и BPSK-демодулятором. Этот фильтр будет играть роль фильтра ОСР. В поле его коэффициентов введите следующую строку (это расчет рекурсивной ветви эквалайзера с ОСР):

**eq\_dfe\_fb(h, q, 17, 16)**

Назначение параметров функции такое же, как в случае расчета линейного эквалайзера.

- Для тех же трех каналов измерьте зависимость вероятности ошибки от отношения С/Ш при использовании эквалайзера с идеальной ОСР. Диапазоны изменения отношения С/Ш следующие:

- ◆ для канала [1 2 1] — 2...12 дБ (шаг 1 дБ);
- ◆ для канала [1 2 3 2 1] — 6...16 дБ (шаг 1 дБ);
- ◆ для канала [-3 4 2] — (-2)...(+8) дБ (шаг 1 дБ).

#### **5. Исследование помехоустойчивости системы связи при компенсации МСИ с помощью эквалайзера с реальной ОСР.**

- Реальная ОСР отличается от идеальной тем, что в цепь обратной связи вводятся не истинные символы сигнала, а их оценки, полученные в процессе демодуляции. Для реализации реальной ОСР разместите в модели еще один блок BPSK-модулятора и подайте на его вход сигнал с выхода блока BPSK-демодулятора. Тем самым будут получены оценки переданных символов. Выход этого нового демодулятора необходимо подключить к входу блока задержки, на который ранее подавались исходные («идеальные») символы. Значение задержки необходимо уменьшить до единицы, так как остальная часть задержки будет введена в сигнал при его обработке эквалайзером.
  - Для тех же трех каналов измерьте зависимость вероятности ошибки от отношения С/Ш при использовании эквалайзера с *реальной* ОСР. Диапазоны изменения отношения С/Ш следующие:
- ◆ для канала [1 2 1] — 4...14 дБ (шаг 1 дБ);

- ◆ для канала [1 2 3 2 1] — 8...18 дБ (шаг 1 дБ);
- ◆ для канала [-3 4 2] — (-1)...(+9) дБ (шаг 1 дБ).
- В завершение работы отредактируйте расположение блоков в окне модели, чтобы сделать ее более наглядной. Сохраните модель, присвоив ей осмысленное имя, и перенесите изображение модели в созданный документ Word, используя команду меню Edit ➤ Copy model to clipboard в окне модели.

### 3.2. Содержание отчета

1. Схема созданной модели с краткими комментариями о назначении ее блоков.
2. Зависимость вероятности ошибки от уровня боковых отсчетов по п. 1.
3. Зависимости вероятности ошибки от отношения С/Ш для двух вариантов значения боковых отсчетов в п. 1.
4. Изображения импульсных и амплитудно-частотных характеристик трех каналов, исследованных в пп. 2–5. Частотный диапазон на графиках АЧХ должен соответствовать одному периоду частотной характеристики.
5. Графики помехоустойчивости, полученные в пп. 2–5. Графики следует группировать следующим образом: в общих координатных осях изображаются все графики, соответствующие одному и тому же каналу связи:
  - вероятность ошибки при использовании линейного эквалайзера, рассчитанного без учета шума;
  - вероятность ошибки при использовании линейного эквалайзера, рассчитанного с учетом уровня шума;
  - вероятность ошибки при использовании эквалайзера с идеальной ОСР;
  - вероятность ошибки при использовании эквалайзера с реальной ОСР.
6. Вместе с каждым набором экспериментальных графиков в п. 5 должна быть построена теоретическая зависимость, соответствующая приему сигнала с бинарной фазовой манипуляцией при отсутствии межсимвольной интерференции (см. формулу (1.1) в работе 1).
7. Выводы.

### 3.3. Контрольные вопросы

1. Объясните принципиальное различие в форме графиков BER, наблюдаемых в п. 1 при уровне боковых отсчетов 0.4 и 0.5.
2. Как будет вести себя график зависимости BER от отношения С/Ш, полученный в п. 1 (без выравнивания канала), при уровне боковых отсчетов ИХ, равном 0.45?
3. Как будет выглядеть график помехоустойчивости, если в п. 1 рассмотреть канал связи с ИХ вида [0.6 1 0.6]? (К чему будет стремиться  $P_b$  при  $E_b/N_0 \rightarrow \infty$ ?)
4. Почему эквалайзер должен рассчитываться для конкретного отношения С/Ш?

5. Как будет вести себя (по отношению к другим кривым) график для линейного эквалайзера, рассчитанного без учета уровня шума, при возрастании отношения С/Ш? Почему?

6. Почему эквалайзер, рассчитанный без учета уровня шума, показывает плохие результаты при низком отношении С/Ш?

7. Почему для канала  $[-3, 4, 2]$  введение ОСР практически не влияет на результаты выравнивания?

8. Почему канал  $[1\ 2\ 3\ 2\ 1]$  выравнивается хуже, чем  $[1\ 2\ 1]$ ?

9. Изменится ли вид кривых, если вместо ФМ-2 будет использована модуляция ФМ-4?

10. Почему вместо обычного рекурсивного фильтра для выравнивания канала используют ОСР?

11. Опишите (качественно) смысл ОСР. Как рассчитать коэффициенты для ветви ОСР, если коэффициенты прямой ветви фильтра известны?

12. Почему использование реальной ОСР дает ухудшение результатов по сравнению с идеальной ОСР?

13. В системе с помехоустойчивым кодированием после декодера получаются более надежные оценки переданных символов, чем непосредственно после демодулятора. Можно ли использовать это для того, чтобы улучшить качество работы эквалайзера с ОСР? (т. е. приблизиться к идеальной ОСР)?

14. На какой из рассмотренных вариантов будут похожи результаты выравнивания с помощью эквалайзеров, если взять канал со следующей ИХ (ответ обосновать):

а)  $[-3, 1, 2]$ ;      б)  $[-3, 4, -1]$ ;      в)  $[1, -2, 1]$ ?

## 4. ЗАМИРАНИЯ И РАЗНЕСЕННЫЙ ПРИЕМ

### 4.1. Задание и указания к выполнению работы

#### *1. Исследование помехоустойчивости системы связи с бинарной частотной манипуляцией (ЧМ-2) в АБГШ-канале.*

- Запустите программу MATLAB, откройте окно библиотеки Simulink, создайте окно для новой модели и постройте модель системы связи с бинарной частотной манипуляцией и АБГШ-каналом (блоки Bernoulli Binary Generator, MFSK Modulator/Demodulator, AWGN Channel, Error Rate Calculation, Display). Как обычно, задайте дискретный режим моделирования с фиксированным шагом и установите бесконечную продолжительность работы. Добейтесь правильной работы модели.

#### **Замечание**

В данной работе важны соотношения между различными временными параметрами моделей. В частности, рекомендуется выбрать символьную скорость равной 1000 символов/с. Для этого необходимо установить обратное значение ( $10^{-3}$ ) в следующих местах:

- в качестве интервала дискретизации (Sample time) в блоке источника битового потока;
  - в качестве длительности символа (Symbol period) в блоке АБГШ-канала.
- Далее будет использоваться блок рэлеевского канала, который обрабатывает сигнал только порциями (фреймами), поэтому в блоке источника битового потока необходимо установить флажок **Frame-Based Outputs** и задать длину фрейма (Samples per frame) равной **1000**.
- В блоках модулятора/демодулятора необходимо настроить следующие параметры (для остальных оставить значения по умолчанию):
- кратность (число позиций) модуляции (M-ary number) — **2**;
  - расстояние между частотами манипуляции (Frequency separation) — **2000** Гц;
  - число отсчетов на символ (Samples per symbol) — не менее **16**.

### Замечание

Используемый здесь блок демодулятора реализует *некогерентный* прием, что позволит впоследствии моделировать канал с замираниями, не используя какие-либо средства частотной и фазовой синхронизации.

- Снимите кривую помехоустойчивости в АБГШ-канале (диапазон изменения отношения  $E_b/N_0$  — от 0 до 12 дБ с шагом 2 дБ).
- 2. Исследование помехоустойчивости системы связи с ЧМ-2 в рэлеевском канале связи.**
- Добавьте между блоками модулятора и АБГШ-канала блок рэлеевского канала (Communications Blockset ➤ Channels ➤ Multipath Rayleigh Fading Channel).

### Замечание

Для рэлеевского канала необходимо задать один луч с нулевой задержкой (Delay = 0) и средним коэффициентом передачи 0 дБ (Gain = 0).

- Снимите кривую помехоустойчивости в рэлеевском канале (диапазон изменения отношения  $E_b/N_0$  — от 0 до 30 дБ с шагом 5 дБ).
- 3. Визуальное наблюдение характеристик рэлеевского канала связи.**
- Подключите к точке, расположенной между выходом рэлеевского канала и входом АБГШ-канала, блок вычисления абсолютного значения (Abs), затем блок Signal Processing Blockset ➤ Signal Management ➤ Buffers ➤ Unbuffer (он превращает фреймы в отдельные отсчеты) и после него — блок осциллографа.

### Замечание

В блоке осциллографа необходимо произвести следующие настройки:

- Щелкнуть по кнопке **Parameters** в панели инструментов окна осциллографа и задать в появившемся окне диапазон временной оси (Time range) равным **0,1** с.

- Щелкнуть правой кнопкой мыши в окне осциллографа, выбрать в контекстном меню команду **Axes properties** и задать в появившемся окне диапазон для вертикальной оси от **0** до **5**.
- Реализуйте измерение средней мощности сигнала. Для этого после выхода блока **Abs** возведите сигнал в квадрат (простейший способ — блок **Math Function** с выбранной функцией **magnitude^2**), а далее последовательно подключите блоки усреднения (**Signal Processing Blockset** ➤ **Statistics** ➤ **Mean**, в параметрах блока необходимо установить флажок **Running mean**) и числового дисплея.
- Подключите к выходу блока возведения в квадрат, добавленного в предыдущем пункте, блок вычисления гистограммы (**Signal Processing Blockset** ➤ **Statistics** ➤ **Histogram**).

#### Замечание

В блоке вычисления гистограммы необходимо произвести следующие настройки:

- Минимальное и максимальное значения уровня анализируемого сигнала — **0** и **5** соответственно.
- Число интервалов разбиения (**bins**) — не менее 50.
- Установить нормировку результатов, т. е. выдачу оценок *вероятности*, а не числа попаданий в интервалы (флажок **Normalize**).
- Установить режим накопления, означающий, что гистограмма рассчитывается по всем входным данным — от начала работы модели до текущего момента (флажок **Running Histogram**).
- Отказаться от порта сброса, *сняв* флажок **Reset port**.
- Блок **Histogram** только рассчитывает данные для гистограммы. Для ее отображения подключите к выходу блока **Histogram** блок визуализации векторов **Signal Processing Blockset** ➤ **Signal Processing Sinks** ➤ **Vector Scope**.

#### Замечание

Для разумности отображаемой картинки в блоке **Vector Scope** необходимо произвести следующие настройки:

- В разделе **Scope properties** в списке **Input domain** выбрать вариант **User-defined** (так как график гистограммы не является ни временной, ни частотной зависимостью).
- В разделе **Axis properties** *снять* флажок **Inherit sample increment from input** (так как параметры дискретизации входного сигнала в данном случае не имеют никакого отношения к оцифровке горизонтальной оси).
- В том же разделе ввести в поле **Increment per sample in input** значение, равное ширине отдельных интервалов гистограммы (т. е. отношению общей ширины анализируемого диапазона уровней к заданному в параметрах гистограммы числу интервалов).



- Подписи горизонтальной и вертикальной осей (X-axis title, Y-axis title) можно задать по желанию (например, **X** и **P (X)** соответственно).

- Запустите модель и сделайте так, чтобы она проработала не менее 2000 тактов (установите большое отношение С/Ш или отключите автоматическую остановку в блоке оценки BER). Наблюдайте за изменениями модуля сигнала на выходе канала с замираниями, за гистограммой и средней мощностью сигнала. Остановив работу модели, сохраните рисунок с графиком изменения уровня сигнала во времени, рисунок с графиком гистограммы, а также запишите значение оценки средней мощности сигнала.

#### ***4. Исследование помехоустойчивости системы при наличии двух каналов приема с выбором максимально сильного сигнала.***

- Добавьте в модель еще один блок рэлеевского канала, подключите его вход к выходу модулятора и задайте такие же настройки, как у первого блока, за исключением начального состояния генератора случайных чисел (Initial seed). Для последнего параметра необходимо ввести простое число (достаточно двузначного) или строку вызова функции **randseed** (без параметров). В противном случае замирания в двух каналах будут идентичны, а для правильности работы модели они должны быть некоррелированы.
- Добавьте после второго рэлеевского канала второй блок АБГШ-канала. Настройки также идентичны первой ветви приема, за исключением Initial seed.
- Реализуйте выбор более мощного из выходных сигналов двух каналов. Для этого необходимо сформировать разность абсолютных значений модулей сигналов после рэлеевских каналов, но до АБГШ-каналов и использовать полученный сигнал для управления переключателем (Simulink ➤ Signal Routing ➤ Switch). На входы переключателя должны поступать сигналы с выходов АБГШ-каналов. Критерий переключения — сравнение управляющего сигнала с нулевым порогом. Демодулятор подключите к выходу переключателя.
- Для демонстрации уровня сигнала в выбранной ветви и оценки статистических характеристик необходимо подключить к выходам двух блоков Abs блок выбора максимума (Simulink ➤ Math operations ➤ MinMax, требуемая операция и число входов указываются в параметрах блока) и с его выхода подать сигнал на «подвешенные в воздухе» после переделки схемы осциллограф (с блоком Unbuffer на входе) и систему измерения гистограммы и средней мощности. Примерный вид схемы получившейся модели показан на рис. 4.1.
- Аналогично п. 3 (необходимо обработать не менее 2000 символов) получите рисунок с гистограммой и запишите среднее значение мощности.
- Снимите кривую помехоустойчивости для данного случая (диапазон изменения отношения  $E_b/N_0$  — от 0 до 20 дБ с шагом 2 дБ, менять этот пара-

метр необходимо *синхронно* в двух блоках АБГШ-канала либо сослаться там на идентификатор переменной и менять ее значение в командном окне MATLAB).

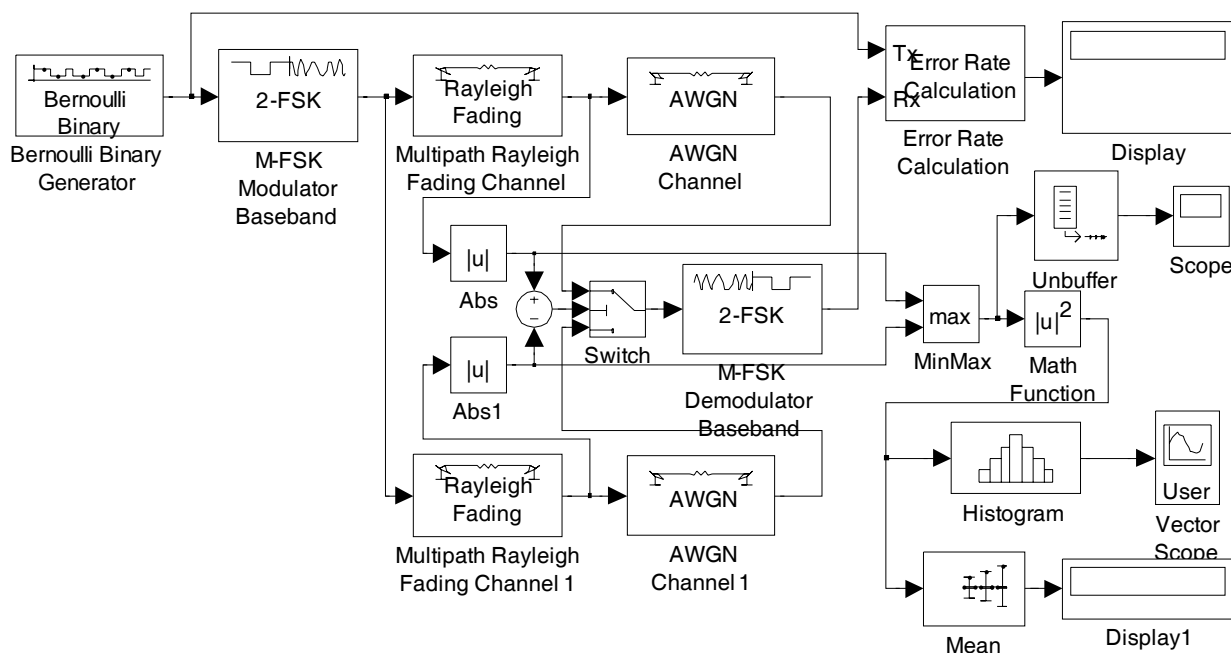


Рис. 4.1

#### Замечание

Для ускорения моделирования следует закрывать графические окна либо сохранить версию модели без «лишних» блоков — осциллографа и блоков, связанных с получением гистограммы и оценкой средней мощности. **НЕ ЗАБЫТЬ** при этом предварительно сохранить (под другим именем) полную версию модели! Эту полную версию можно сразу же скопировать в документ Word для использования в отчете.

#### 5. Исследование помехоустойчивости системы при наличии двух каналов приема с оптимальным сложением сигналов.

- Модифицируйте модель (усеченную версию, полученную в конце п. 4), реализовав оптимальное сложение двух лучей приема. Для этого необходимо измерять комплексные коэффициенты передачи каналов. Реализуем такое измерение, разделив выходной сигнал каждого блока рэлеевского канала на входной сигнал (это правомерно, так как при наличии только одного луча рэлеевский канал является безынерционным блоком) с помощью блока **Product** с соответствующими настройками (в поле **Number of inputs** вводится строка «\*/»).
- Полученные коэффициенты необходимо подвергнуть комплексному сопряжению (блок **Simulink** ➤ **Math operations** ➤ **Math Function**, в качестве функции выбрать **conj**).
- Сопряженные коэффициенты необходимо умножить на выходные сигналы АБГШ-каналов, а результаты перемножения суммировать, реализовав тем

самым оптимальное сложение ветвей приема. Примерный вид схемы получившейся модели показан на рис. 4.2.

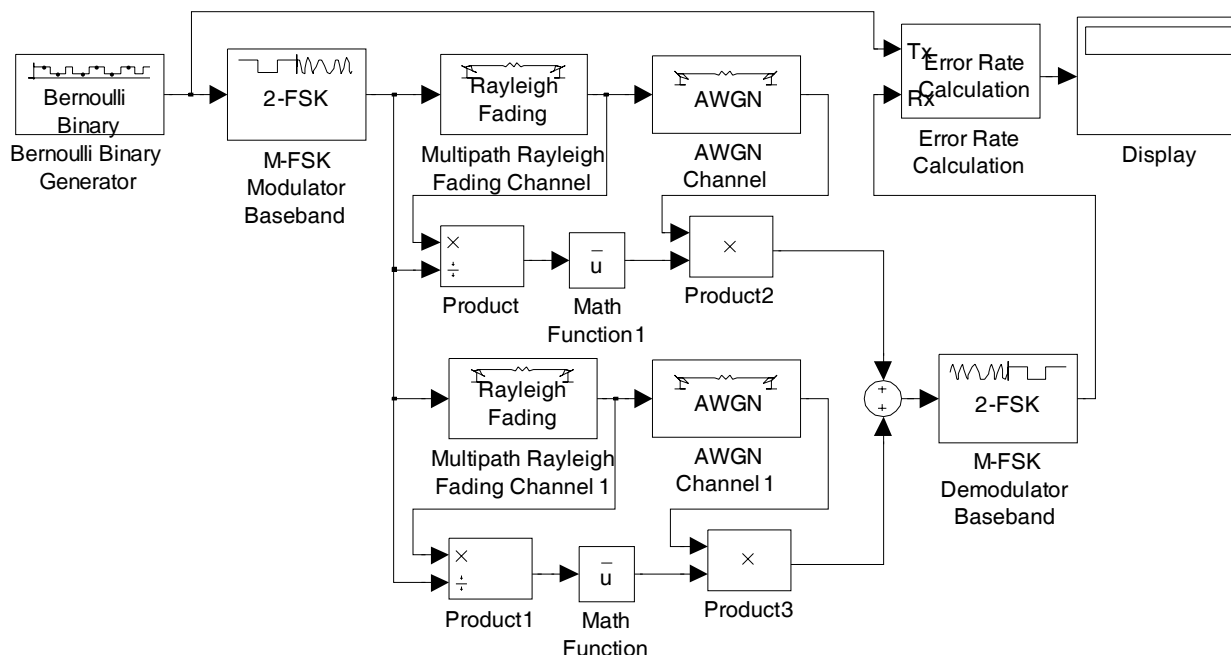


Рис. 4.2

- Снимите кривую помехоустойчивости для данного случая (диапазон изменения отношения  $E_b/N_0$  — от 0 до 14 дБ с шагом 2 дБ, менять этот параметр необходимо *синхронно* в двух блоках АБГШ-канала либо сослаться там на идентификатор переменной и менять ее значение в командном окне MATLAB).
- В завершение работы отредактируйте расположение блоков в окне модели, чтобы сделать ее более наглядной. Сохраните модель, присвоив ей осмысленное имя, и перенесите изображение модели в созданный документ Word, используя команду меню **Edit** ➤ **Copy model to clipboard** в окне модели. То же сделать с сохраненной ранее версией модели, содержащей блоки выбора максимально мощного луча, получения гистограммы и оценки средней мощности сигнала.

## 4.2. Содержание отчета

1. Схемы двух созданных моделей с краткими комментариями о назначении их блоков.

2. Совместно построенные графики помехоустойчивости системы с некогерентной ЧМ-2 (для каждого случая необходимо на том же графике построить и теоретическую кривую по приведенным далее формулам):

- для случая АБГШ-канала. Теоретическая зависимость рассчитывается по формуле

$$P_b = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right);$$

- для случая рэлеевского канала

$$P_b = \frac{1}{2 + (E_b/N_0)};$$

- для случая двух рэлеевских ветвей приема с выбором максимально мощного сигнала

$$P_b = \frac{4}{8 + 6(E_b/N_0) + (E_b/N_0)^2};$$

- для случая оптимального сложения двух рэлеевских ветвей приема

$$P_b = \frac{2}{4 + 4(E_b/N_0) + (E_b/N_0)^2}.$$

3. Значение средней мощности сигнала и гистограмма ее статистического распределения для рэлеевского канала. Привести также график теоретической плотности вероятности мощности, построенный по формуле

$$w_p(p) = \frac{1}{p_0} \exp\left(-\frac{p}{p_0}\right), \quad p \geq 0$$

(в рассматриваемом случае средняя мощность  $p_0 = 1$ ).

4. Значение средней мощности сигнала и гистограмма ее статистического распределения для случая выбора максимально мощного из двух независимых лучей. Привести также график теоретической плотности вероятности мощности для данного случая, построенный по формуле

$$w_p(p) = \frac{2}{p_0} \left(1 - \exp\left(-\frac{p}{p_0}\right)\right) \exp\left(-\frac{p}{p_0}\right), \quad p \geq 0.$$

### **Внимание!**

Для возможности сопоставления экспериментальных гистограмм и теоретических графиков плотности вероятности последние должны быть построены в *линейном* масштабе по обеим осям и в диапазоне по оси абсцисс, совпадающем с диапазоном, заданным при формировании гистограмм (0...5).

### 5. Выводы.

### 4.3. Контрольные вопросы

1. Объясните (качественно) причину столь большого ухудшения помехоустойчивости в рэлеевском канале по сравнению с АБГШ.

2. Имеет ли значение последовательность включения блоков «Рэлеевский канал — АБГШ-канал»?

3. При приеме сигнала используется пространственное разнесение. Чем определяется минимальное расстояние между приемными антеннами, при котором замирания сигналов от разных антенн можно считать статистически независимыми?

4. Объясните (качественно), почему при разнесенном приеме желательна статистическая независимость замираний в разных ветвях разнесения.

5. Объясните, каким образом (за счет чего) в созданных моделях производится усреднение вероятности ошибки по реализациям рэлеевского канала.

6. Почему гистограмма статистического распределения средней мощности совпадает с теоретической плотностью вероятности только по форме, но не по значениям?

7. Опишите, как нужно было бы модифицировать созданные модели, чтобы они могли работать с модуляцией КАМ?

8. Пусть в двух блоках рэлеевского канала заданы разные средние мощности сигнала. Нужно ли что-либо (и если нужно, что именно) менять в структуре рассматриваемых приемников, чтобы они работали правильно?

9. Какие изменения необходимо внести в схему, реализующую выбор максимально мощного луча, чтобы она могла работать с модуляцией ФМ-2? Предложите способ реализации необходимых изменений.

10. Какие из моделей, рассмотренных в данной работе, сохраняют работоспособность, если в них заменить модулятор/демодулятор ЧМ-2 на модулятор/демодулятор ФМ-2 (BPSK):

- случай АБГШ-канала;
- рэлеевский канал, один луч;
- рэлеевский канал, выбор максимально мощного луча;
- рэлеевский канал, оптимальное сложение лучей.

Ответ обосновать.

11. Экспериментальный график BER для случая выбора максимально мощного луча заметно отличается от теоретического, тогда как во всех остальных случаях совпадение результатов очень хорошее. Сформулируйте возможную причину указанного расхождения.

12. В программе работы не предлагалось измерять гистограмму и среднюю мощность для случая оптимального сложения лучей. Чем это объясняется?

13. Как необходимо дополнить созданную модель, чтобы при оптимальном сложении лучей наблюдать гистограмму выходного отношения С/Ш?

14. В некотором диапазоне отношений  $E_b/N_0$  график BER для оптимального сложения лучей проходит ниже, чем график, соответствующий АБГШ-каналу. Как это можно объяснить?

15. Опишите изменения, которые необходимо произвести в модели с оптимальным сложением лучей, чтобы реализовать сложение с равными весами (Equal Gain Combining, EGC).

## **5. РАСШИРЕНИЕ СПЕКТРА**

### **5.1. Задание и указания к выполнению работы**

#### **1. Влияние узкополосной помехи на систему без расширения спектра.**

- Постройте модель системы связи с модуляцией ФМ-2 и АБГШ-каналом, прямоугольной формой посылки с 13 отсчетами на символ. Модель стро-

ится аналогично тому, как это делалось в работе 2, с использованием блоков Upsample, Downsample и Digital filter из состава Signal Processing Blockset (при желании можно воспользоваться в качестве заготовки сохраненной моделью, созданной в процессе выполнения работы 2).

- Добейтесь работоспособности модели. Особое внимание уделите правильной установке задержек в блоках Downsample и Error Rate Calculation. Для проверки правильности настроек можно использовать следующий критерий: при отношении  $E_b/N_0 = 0$  дБ вероятность ошибки должна составлять примерно 0.08.
- Установите такое отношение С/Ш, чтобы вероятность ошибки была равна примерно  $10^{-3}$ .
- Добавьте до или после блока АБГШ-канала гармоническую помеху (комплексную экспоненту, блок Sine wave из библиотеки Signal Processing Blockset ➤ Signal Processing Sources). Частота помехи — произвольная из диапазона 0.2...0.4 (чтобы помеха попадала в главный лепесток спектра полезного сигнала).

#### **Замечание**

В блоке Sine wave необходимо задать следующие параметры (для не указанных далее параметров оставьте значения по умолчанию):

- Output Complexity: Complex, так как в данном случае необходимо комплексное гармоническое колебание;
- Sample time: 1/13, так как длительность символа в битовом источнике по умолчанию составляет 1, а после модулятора частота дискретизации повышается в 13 раз.

- Для выбранного ранее отношения С/Ш снять зависимость BER от уровня помехи. Уровень помехи изменять от нуля до значения, при котором BER достигнет значения около 0.2. Число значений уровня помехи — около 10.

#### **2. Помехоустойчивость системы с прямым расширением спектра в АБГШ-канале.**

- Сделайте уровень помехи нулевым.
- Реализуйте систему с прямым расширением спектра (используйте 13-элементный код Баркера «+ + + + + - - + + - + - +»). Для этого лишь необходимо соответствующим образом изменить ИХ формирующего и приемного фильтров.
- Для наблюдения выходного сигнала согласованного фильтра подключите цепочку блоков «вычисление вещественной части (или модуля) — осциллограф» к точке модели между согласованным фильтром и блоком понижения частоты дискретизации.
- Снимите зависимость BER от отношения С/Ш. Верхняя граница отношения С/Ш — такая, чтобы BER падал до уровня около  $10^{-4}$ , шаг по отношению С/Ш — 1 дБ, число точек — около 10. Для контроля правильности ра-

боты системы можно использовать следующий критерий: при отношении  $E_b/N_0 = 0$  дБ вероятность ошибки должна составлять примерно 0.08.

### **3. Влияние узкополосной помехи на систему с расширением спектра.**

- Включите помеху и для того же отношения С/Ш, что и в случае системы без расширения спектра, снимите зависимость BER от уровня помехи. Как и в п. 1, уровень помехи изменяйте от нуля до значения, при котором BER достигнет значения около 0.2. Число значений уровня помехи — около 10.

### **4. Работа системы с расширением спектра в многолучевом канале связи.**

- Установите нулевой уровень помехи.
- Реализуйте трехлучевой канал с фиксированными параметрами. Три луча реализуются перед блоком АБГШ-канала с использованием блоков Signal Processing Blockset ➤ Signal Operations ➤ Delay и Simulink ➤ Math ➤ Gain. Один луч при этом должен остаться незадержанным и имеющим единичный коэффициент передачи. Задержки и коэффициенты передачи двух дополнительных ветвей выбирать произвольно, исходя из следующих принципов:
  - ◆ задержки должны лежать в диапазоне 1...12 отсчетов;
  - ◆ модули коэффициентов передачи ветвей должны лежать в диапазоне 0...1;
  - ◆ фаза коэффициентов передачи ветвей произвольная.

#### **Замечание**

Удобно задавать коэффициенты передачи в экспоненциальном формате, например:  $0.67 * \exp(0.38i)$ .

- Запишите в протокол выбранные параметры канала — задержки и комплексные коэффициенты передачи лучей.
- Снимите кривую помехоустойчивости, используя те же значения отношения С/Ш, что и в п. 2; убедитесь в том, что в системе с расширением спектра наличие дополнительных лучей распространения сигнала почти не влияет на качество приема.

### **5. RAKE-приемник.**

- Организуйте на приемной стороне оптимальное сложение лучей. Для этого после согласованного фильтра реализуйте 3 ветви с такими задержками, чтобы синхронизировать по времени 3 имеющихся луча. Коэффициенты передачи ветвей должны быть комплексно-сопряженными по отношению к коэффициентам передачи соответствующих лучей многолучевого канала. Выходные сигналы ветвей суммируются, суммарный сигнал подается на блок понижения частоты дискретизации.
- Установите бесконечное отношение С/Ш и правильно настройте фазу выборки отсчетов в блоке понижения частоты дискретизации и задержку в блоке оценки вероятности ошибки. Добейтесь работы модели без ошибок.
- Наблюдайте (с помощью имеющегося в модели блока осциллографа) сигнал после сложения ветвей RAKE-приемника.

- Снимите кривую помехоустойчивости, используя те же значения отношения С/Ш, что и в пп. 2, 4 (можно пропустить одно или несколько самых больших отношений С/Ш, если для них вероятность ошибки окажется меньше чем  $10^{-4}$  и ее оценка потребует слишком длительного времени). Убедитесь в том, что при оптимальном использовании мощности всех лучей вероятность ошибки оказывается меньшей, чем при приеме по одному лучу.
- В завершение работы отредактируйте расположение блоков в окне модели, чтобы сделать ее более наглядной. Сохраните модель, присвоив ей осмысленное имя, и перенесите изображение модели в созданный документ Word, используя команду меню Edit ➤ Copy model to clipboard в окне модели.

## 5.2. Содержание отчета

1. Схема созданной модели с краткими комментариями о назначении ее блоков.
2. Совместно построенные графики зависимости BER от уровня помехи для систем без расширения и с расширением спектра (по данным, полученным в пп. 1, 3). По соотношению между графиками оценить, во сколько раз ослабляется влияние узкополосной помехи в системе с расширением спектра (т. е. во сколько раз различаются уровни помехи, необходимые для одного и того же повышения вероятности ошибки в двух смоделированных системах).
3. График BER по данным из п. 2, построенный совместно с теоретической кривой для ФМ-2 (см. формулу (1.1) в работе 1).
4. Совместно построенные графики BER для многолучевого канала, полученные при использовании одного луча (п. 4) и при оптимальном сложении лучей (п. 5). Здесь же необходимо рассчитать отношение (в децибелах) мощностей сигнала в реализованном трехлучевом канале и в однолучевом канале с единичным коэффициентом передачи.
5. Выводы.

## 5.3. Контрольные вопросы

1. Приведите графики сигналов в ключевых точках приемника, которые иллюстрировали бы механизм подавления узкополосной помехи в системе с расширением спектра.
2. На систему без расширения спектра действует гармоническая помеха с частотой 0.5. Будет ли зависеть помехоустойчивость системы от начальной фазы помехи?
3. На систему с расширением спектра, рассмотренную в данной работе, действует гармоническая помеха с частотой, равной 6.5. Как это скажется на помехоустойчивости системы?
4. Узкополосная помеха представляет собой сигнал с ФМ-2 на той же несущей частоте и с той же начальной фазой, что и полезный сигнал, но без



расширения спектра. Поясните механизм подавления такого сигнала в приемнике.

5. Передаваемый сигнал (последовательность знаков) имеет вид

– + + + + – + – – – + – – – – + – + + +

(фрагмент не синхронизирован по времени с началом/концом символов). Определите (с точностью до знака) расширяющую последовательность (ее длительность равна длительности бита) (модуляция ФМ-2) и некоторое количество информационных бит.

6. Почему расширение спектра не сказывается на помехоустойчивости системы в АБГШ-канале?

7. При приеме по одному лучу многолучевого канала помехоустойчивость может оказаться *точно* или *почти* такой же, как в АБГШ-канале. От чего это зависит?

8. Канал связи состоит из двух лучей с задержками 0 и 6 отсчетов. Помехоустойчивость приема по одному лучу будет в этом случае *точно такая же* или *почти такая же*, как в однолучевом канале?

9. В чем заключаются достоинства и недостатки RAKE-приемника?

10. Объясните, каким образом рассчитывается задержка передаваемых бит в блоке вычисления вероятности ошибки при использовании RAKE-приемника.

11. Объясните, как определяется «фаза» взятия отсчетов в блоке Down-sample при использовании RAKE-приемника.

12. Почему не удастся использовать RAKE-приемник в системе без расширения спектра?

13. Зависит ли вероятность ошибки, получаемая в данной модели RAKE-приемника, от выбранных *модулей* комплексных коэффициентов передачи лучей?

14. Сможет ли RAKE-приемник обеспечить хорошую помехоустойчивость, если диапазон задержек между лучами больше, чем длительность символа?

15. Параметры трехлучевого канала таковы:

а)  $\tau_1 = 0$ ,  $A_1 = 1$ ;  $\tau_2 = 5$  отсчетов,  $A_2 = 0.9$ ;  $\tau_3 = 18$  отсчетов,  $A_3 = 0.8$ .

б)  $\tau_1 = 0$ ,  $A_1 = 1$ ;  $\tau_2 = 10$  отсчетов,  $A_2 = 0.9$ ;  $\tau_3 = 20$  отсчетов,  $A_3 = 0.8$ .

Хорошая или плохая помехоустойчивость получится при использовании RAKE-приемника?

## 6. ФАЗОВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ

### 6.1. Задание и указания к выполнению работы

#### 1. Влияние постоянной фазовой ошибки на работу системы связи с ФМ-2.

- Постройте модель системы связи с модуляцией ФМ-2 и АБГШ-каналом (используется один отсчет на символ). При желании можно воспользоваться

ся в качестве заготовки какой-либо из сохраненных моделей, созданных в процессе выполнения предыдущих лабораторных работ. Добейтесь работоспособности модели.

- Введите в модель постоянную ошибку по фазе. Для этого после блока АБГШ-канала необходимо умножить сигнал на комплексную экспоненту с единичной амплитудой и фазой, задаваемой с помощью блока **Constant** из библиотеки **Simulink** ➤ **Sources**. Для формирования указанной комплексной экспоненты используйте блок **Magnitude-Angle to Complex** из библиотеки **Simulink** ➤ **Math Operations** (в той же библиотеке находится блок перемножения сигналов **Product**).
- Получите зависимость вероятности битовой ошибки от отношения  $E_b/N_0$  для значений фазовой ошибки 0.1; 0.5 и 1.0 рад. Верхняя граница отношения С/Ш выбирается так, чтобы значение BER падало примерно до  $10^{-4}$ . Диапазон анализируемых значений С/Ш — 10 дБ, шаг по отношению С/Ш — 1 дБ.

## **2. Влияние гауссовской фазовой ошибки на работу системы связи с ФМ-2.**

- Замените источник фазовой ошибки в виде константы на гауссовский шум (блок **Communications Blockset** ➤ **Comm Sources** ➤ **Noise Generators** ➤ **Gaussian Noise Generator**).
- Получите зависимость вероятности битовой ошибки от отношения  $E_b/N_0$  для значений дисперсии фазовой ошибки (параметр **Variance** источника шума), равных 0.01; 0.25 и 1.0 рад<sup>2</sup> (СКО фазовой ошибки при этом равно значениям постоянной фазовой ошибки, проанализированным в п. 1). Диапазон анализируемых значений С/Ш для дисперсии 0.01 рад<sup>2</sup> — 0...8 дБ, для 0.25 и 1.0 рад<sup>2</sup> — 0...15 дБ. Во всех случаях шаг по отношению С/Ш — 1 дБ.

## **3. Исследование замкнутой системы фазовой синхронизации с обратной связью по решению (ОСР).**

- Для получения оценки переданного символа подключите после блока демодулятора еще один блок BPSK-модулятора. В результате на его выходе будет получена оценка переданного символа (+1 или -1).
- Для формирования сигнала ошибки в петле обратной связи перемножьте входной сигнал демодулятора и оценку символа, полученную на выходе только что добавленного блока модулятора, а от результата перемножения возьмите мнимую часть.
- В качестве петлевого фильтра используйте блок **Digital Filter** из состава **Signal Processing Blockset**. В качестве вектора коэффициентов знаменателя (**Denominator**) необходимо задать **[1 -1]** (это соответствует реализации дискретного интегратора), а в качестве коэффициентов числителя (**Numerator**) указать скаляр **-a**, где **a** — константа, лежащая в диапазоне от нуля до единицы. Перед фильтром (или после него) необходимо поста-

вить блок задержки на один такт (Simulink ➤ Discrete ➤ Unit Delay) — это необходимо для работы петли ФАПЧ.

- Выходной сигнал фильтра необходимо преобразовать в фазу комплексной экспоненты с единичной амплитудой (с помощью уже упоминавшегося блока **Magnitude-Angle to Complex**) и использовать полученный результат для коррекции фазы принимаемого сигнала (т. е. после введения в сигнал фазовой ошибки умножить его на полученную комплексную экспоненту). Таким образом петля оказывается замкнутой.
- Для контроля работы петли после фильтра подключите блоки визуализации (осциллограф) и измерения среднеквадратического значения (**Signal Processing Blockset ➤ Statistics ➤ RMS**). В блоке **RMS** задайте усреднение по времени, установив флажок **Running RMS**. К выходу блока **RMS** подключите числовой дисплей.
- Верните константу в качестве источника фазовой ошибки и задайте значение фазового сдвига 1 рад. Установите время окончания моделирования равным 100 единицам. Отключите шум, задав **inf** в качестве отношения С/Ш. Примерный вид полученной модели показан на рис. 6.1.

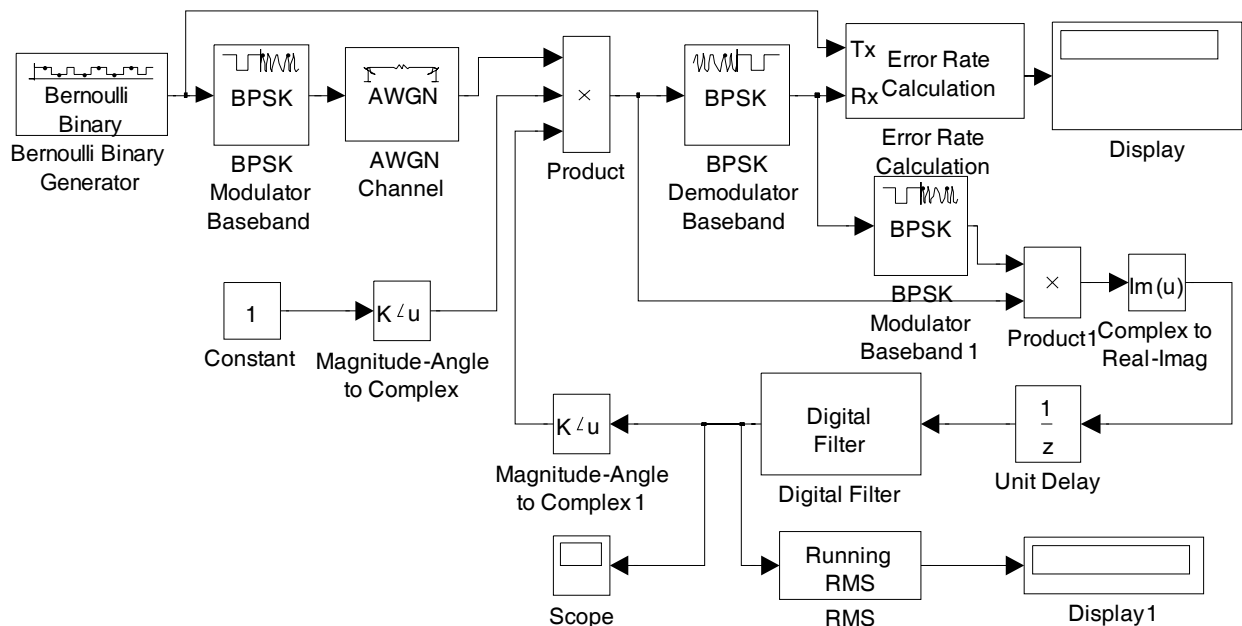


Рис. 6.1

- Запустите модель и наблюдайте на осциллографе вид переходного процесса. При правильной работе модели кривая должна экспоненциально стремиться к значению  $-1$ . Подберите значение параметра **a** в блоке фильтра так, чтобы длительность переходного процесса (определяемая визуально) составляла примерно 100 единиц (символьных интервалов).
- Установите нулевую фазовую ошибку (для исключения переходного процесса в системе), верните бесконечное время моделирования и снимите кривую помехоустойчивости системы с фазовой синхронизацией с ОСР. Кроме вероятности ошибки, для каждого отношения С/Ш запишите также

полученную после остановки моделирования оценку среднеквадратического значения величины фазовой ошибки системы автоподстройки. Значения отношения С/Ш выбираются так же, как в предыдущих пунктах.

- Сохраните модель.

#### 4. Исследование замкнутой системы фазовой синхронизации без использования сведений о передаваемых символах.

- Сохраните модель под новым именем.
- В данном случае сигнал ошибки для работы петли автоподстройки вычисляется как произведение вещественной и мнимой частей принимаемого сигнала. Реализовать данную операцию можно с помощью блоков **Complex to Real-Imag** и **Product** (оба из библиотеки **Simulink** ➤ **Math Operations**). Других изменений в модели производить не нужно. Примерный вид полученной модели показан на рис. 6.2.

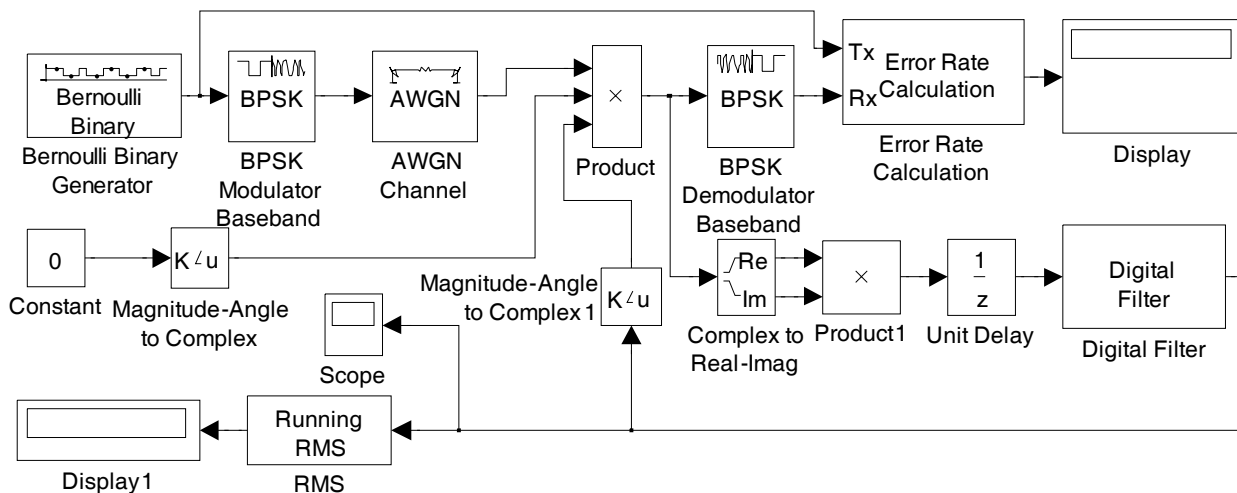


Рис. 6.2

- Установите значение постоянного фазового сдвига 1 рад. Установите время окончания моделирования равным 100 единицам. Отключите шум, задав **inf** в качестве отношения С/Ш.
- Запустите модель и наблюдайте на осциллографе вид переходного процесса. При правильной работе модели кривая должна экспоненциально стремиться к значению  $-1$ . Подберите значение параметра **a** в блоке фильтра так, чтобы длительность переходного процесса (определяемая визуально) составляла примерно 100 единиц (символьных интервалов).
- Установите нулевую фазовую ошибку (для исключения переходного процесса в системе), верните бесконечное время моделирования и снимите кривую помехоустойчивости системы с фазовой синхронизацией без ОСР. Кроме вероятности ошибки, для каждого отношения С/Ш запишите также полученную после остановки моделирования оценку среднеквадратического значения величины фазовой ошибки системы автоподстройки. Значения отношения С/Ш выбираются так же, как в предыдущих пунктах.

- В завершение работы отредактируйте расположение блоков в окне модели, чтобы сделать ее более наглядной. Сохраните модель, присвоив ей осмысленное имя, и перенесите изображение модели в созданный документ Word, используя команду меню **Edit** ➤ **Copy model to clipboard** в окне модели.

## 6.2. Содержание отчета

1. Схемы созданных моделей систем синхронизации с краткими комментариями о назначении их блоков.

2. Совместно построенные графики зависимости BER от отношения С/Ш при разных значениях фиксированной фазовой ошибки. В этих же осях построить соответствующие теоретические графики, рассчитанные по следующей формуле:

$$P_b(\varphi) = Q\left(\cos \varphi \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right).$$

3. Совместно построенные графики зависимости BER от отношения С/Ш при разных значениях дисперсии гауссовской фазовой ошибки. В этих же осях построить соответствующие теоретические графики, рассчитанные методом численного интегрирования по следующей формуле:

$$\overline{P_b(\varphi)} = \int_{-\infty}^{\infty} Q\left(\cos \varphi \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) p_{\varphi}(\varphi) d\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} Q\left(\cos \varphi \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\varphi}} \exp\left(-\frac{\varphi^2}{2\sigma_{\varphi}^2}\right) d\varphi.$$

4. Совместно построенные графики зависимости BER от отношения С/Ш для систем синхронизации с ОСР и без ОСР. В этих же осях построить теоретический график помехоустойчивости системы с ФМ-2 при идеальной синхронизации (см. формулу (1.1) в работе 1).

5. Совместно построенные графики среднеквадратического значения фазовой ошибки от отношения С/Ш для систем синхронизации с ОСР и без ОСР. По вертикальной оси целесообразно использовать логарифмический масштаб.

6. Выводы.

## 6.3. Контрольные вопросы

1. Влияет ли уровень (мощность) принимаемого сигнала на работу рассмотренных систем синхронизации?

2. Объясните, почему знак коэффициента в числителе функции передачи петлевого фильтра должен быть отрицательным.

3. На какие параметры замкнутой системы синхронизации влияет значение коэффициента  $a$  в функции передачи петлевого фильтра?

4. Фазовая ошибка имеет равномерное распределение в диапазоне  $-\pi/2 \dots +\pi/2$ . Чему будет равна вероятность битовой ошибки в системе с ФМ-4 при  $E_b/N_0 \rightarrow \infty$ ?

5. Фазовая ошибка имеет нормальное распределение с СКО  $\sigma_\phi$ . Чему будет равна вероятность *символьной* ошибки в системе с ФМ-4 при  $E_b/N_0 \rightarrow \infty$ ?

6. Фазовая ошибка имеет нормальное распределение с СКО  $\sigma_\phi$ . Чему будет равна вероятность *битовой* ошибки в системе с ФМ-4 (код Грея) при  $E_b/N_0 \rightarrow \infty$ ?

7. Для какого вида модуляции — ФМ-2 или ФМ-4 с кодом Грея — влияние фазовой ошибки на вероятность *битовой* ошибки будет сильнее?

8. Поясните причины ухудшения помехоустойчивости системы с когерентным приемом ЧМ-сигналов при наличии фазового сдвига.

9. При какой плотности вероятности распределения фазовой ошибки помехоустойчивость системы с ФМ-2 будет лучше:

- равномерное распределение в пределах  $\pm 0,5$  рад;
- $\pm 0,5$  рад с вероятностью каждого значения 50 %?

10. В системе связи используется модуляция КАМ-16. При каком значении фиксированного фазового сдвига появятся ошибки даже при  $E_b/N_0 = \infty$ ?

11. Какую из созданных моделей системы синхронизации можно использовать с модуляцией ФМ-8?

12. Какая из двух систем синхронизации будет работоспособна после замены блоков модуляции/демодуляции на КАМ-16?

13. Поясните причины снижения помехоустойчивости при наличии ошибки по времени в системе с ФМ-2.

14. При приеме сигнала с ФМ-2 (прямоугольные посылки) возникла фиксированная ошибка по времени, равная половине длительности символа. К чему стремится BER при  $E_b/N_0 \rightarrow \infty$ ?

15. В системе связи используется модуляция ФМ-2. При каком значении фиксированного временного сдвига вероятность ошибки станет равна 50 % независимо от отношения С/Ш?

## 7. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЕ КОДИРОВАНИЕ

### 7.1. Задание и указания к выполнению работы

#### **1. Помехоустойчивость системы связи со сверточным кодом и ФМ-2 в АБГШ-канале с жестким решением на выходе демодулятора.**

- Постройте модель системы связи с модуляцией ФМ-2 и АБГШ-каналом (используется один отсчет на символ). При желании можно воспользоваться в качестве заготовки какой-либо из сохраненных моделей, созданных в процессе выполнения предыдущих лабораторных работ. Добейтесь работоспособности модели.
- Перед блоком модулятора добавьте блок сверточного кодера (Convolutional Encoder) из библиотеки Communications Blockset ➤ Error Detection and Correction ➤ Convolutional. Сохраните в нем настройки, уста-

новленные по умолчанию: решетка кода (Trellis structure) `poly2trellis(7, [171 133])`, режим работы Continuous.

- После блока демодулятора добавьте блок Viterbi Decoder упомянутой выше библиотеки. Единственное изменение настроек по умолчанию, которое необходимо в нем произвести — задать жесткие решения (Hard decision) для параметра Decision type.
- В настройках блока битового источника установите флажок Frame-based outputs и задайте число отсчетов на фрейм (Samples per frame) равным 1000.
- В блоке оценки вероятности ошибки задайте задержку приема (Receive delay) равной глубине просмотра (Traceback depth), установленной в декодере Витерби, установите флажок Stop simulation и увеличьте максимальное число обрабатываемых символов (Maximum number of symbols) до  $2e7$ . Добейтесь работоспособности модели (при бесконечном отношении С/Ш ошибок быть не должно).
- Снимите зависимость вероятности битовой ошибки от отношения  $E_b/N_0$ , изменяя последнее в диапазоне 4.4...6.6 дБ с шагом 0.2 дБ.

#### **Замечание**

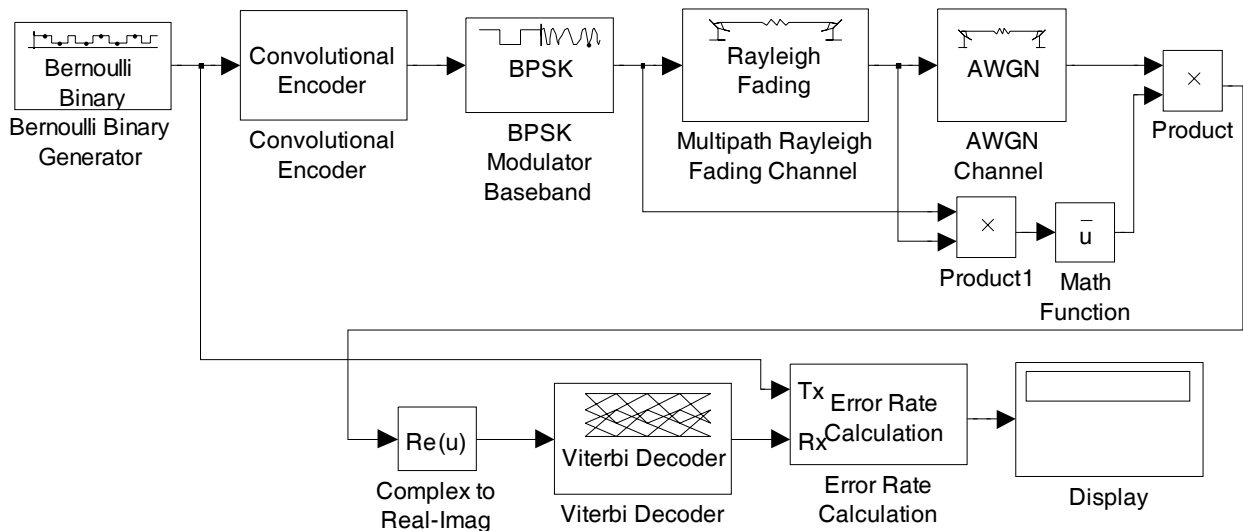
Обратите внимание на то, что под  $E_b$  в данной работе понимается энергия информационного, а не канального бита.

### **2. Помехоустойчивость системы связи в АБГШ-канале с мягкими решениями на выходе демодулятора.**

- Замените в модели блок BPSK Demodulator на блок Complex to Real-Imag и задайте для него подачу на выход только вещественной части входного сигнала (выберите вариант Real для параметра Output).
- В блоке декодера Витерби измените тип входных решений с жестких на мягкие (выберите вариант Unquantized для параметра Decision type). Добейтесь работоспособности модели.
- Снимите зависимость вероятности битовой ошибки от отношения  $E_b/N_0$ , изменяя последнее в диапазоне 2.2...4.4 дБ с шагом 0.2 дБ.

### **3. Помехоустойчивость системы связи в рэлеевском канале без перемежения.**

- Добавьте в модель блоки рэлеевского канала и блоки для оптимального сложения мягких решений (рисунков). В качестве операции (Function), выполняемой блоком Math Function, выберите conj.
- Задайте следующие параметры блока Rayleigh Fading: максимальное доплеровское смещение частоты 1/20, вектор задержек из одного элемента со значением 0, вектор усиления из одного элемента со значением 0 дБ. Добейтесь работоспособности модели.



- Снимите зависимость вероятности битовой ошибки от отношения  $E_b/N_0$ , изменяя последнее в диапазоне 9...19 дБ с шагом 1 дБ.

#### 4. Помехоустойчивость системы связи в рэлеевском канале с перемежением.

- Добавьте после блока Convolutional Encoder сверточный перемежитель (блок Convolutional Interleaver из библиотеки Communications Block-set ➤ Interleaving ➤ Convolutional), а перед блоком Viterbi Decoder — соответствующий деперемежитель (блок Convolutional Deinterleaver из той же библиотеки).
- В блоках перемежителя и деперемежителя установите число строк (Rows of shift registers) равным 36 и шаг (Register length step) равным 2.
- В блоке оценки вероятности ошибки задайте правильную задержку приема с учетом дополнительной задержки, вносимой перемежителем и деперемежителем. Последняя составляет  $N(N-1)M$ , где  $N$  — число строк,  $M$  — шаг. Добейтесь работоспособности модели.

#### Замечание

При расчете задержки следует учесть, что перемежитель и деперемежитель работают с кодированным битовым потоком.

- Снимите зависимость вероятности битовой ошибки от отношения  $E_b/N_0$ , изменяя последнее в диапазоне 4.5...7.5 дБ с шагом 0.3 дБ.

#### 5. Получение дистанционного спектра исследуемого кода.

- Вызвав в главном окне MATLAB функцию **poly2trellis**, получите структуру, описывающую решетку исследуемого кода:

```
t = poly2trellis(7, [171 133]);
```

- По полученной структуре **t** с помощью вызова функции **distspec** получите первые 10 элементов дистанционного спектра:

```
s = distspec(t, 10);
```

- Возвращенная функцией структура **s** будет содержать:

- ♦ свободное расстояние кода  $d_f$  (поле **s.df**);



- ♦ 10-элементный массив **s.event**,  $k$ -й элемент которого показывает число кодовых последовательностей с весом  $d = d_f + k - 1$ , начинающихся и заканчивающихся в нулевом состоянии решетки, не проходя через него по пути;
- ♦ 10-элементный массив **s.weight**,  $k$ -й элемент которого ( $w_k$ ) показывает общее число ненулевых информационных бит в указанных последовательностях.

Массив **s.weight** и свободное расстояние кода (**s.dfree**) будут необходимы при подготовке отчета.

## 7.2. Содержание отчета

1. Схемы созданных моделей системы связи для различных каналов.
2. Графики зависимости вероятности ошибки от отношения  $E_b/N_0$ . Совместно с экспериментальными графиками необходимо построить соответствующие теоретические графики, рассчитанные по формуле

$$P_b \approx \sum_{d=d_f}^{d_f+9} w_d P\left(d, r \frac{E_b}{N_0}\right),$$

где  $d_f$  и  $w_d$  — соответственно свободное расстояние исследуемого кода и его дистанционный спектр (значения элементов полученного массива **weights**, первый элемент массива соответствует значению  $d = d_f$ );  $r$  — скорость кода (в данном случае 1/2);  $P(d, \gamma)$  — вероятность перепутывания путей, находящихся на хэмминговом расстоянии  $d$ , при отношении С/Ш на канальный бит, равном  $\gamma$ . Вероятность перепутывания путей определяется по следующим формулам:

- АБГШ-канал, жесткие решения:

$$P(d, \gamma) = \begin{cases} \sum_{k=(d+1)/2}^d C_d^k p(\gamma)^k (1-p(\gamma))^{d-k}, & d \text{ нечетно,} \\ \sum_{k=d/2+1}^d C_d^k p(\gamma)^k (1-p(\gamma))^{d-k} + \frac{1}{2} C_d^{d/2} (p(\gamma)(1-p(\gamma)))^{d/2}, & d \text{ четно,} \end{cases}$$

где  $p(\gamma) = Q(\sqrt{2\gamma})$  — вероятность битовой ошибки для модуляции ФМ-2;

$C_d^k = \frac{d(d-1)\dots(d-k+1)}{k!}$  — биномиальный коэффициент;

- АБГШ-канал, мягкие решения:

$$P(d, \gamma) = Q(\sqrt{2d\gamma});$$

- рэлеевский канал, «длинный» перемежитель (данная формула дает вероятность ошибки при разнесенном приеме ФМ-2 сигнала с оптимальным сложением  $d$  независимых рэлеевских ветвей):

$$P(d, \gamma) = \frac{1}{2^d} \left( 1 - \sqrt{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \right)^d \sum_{p=0}^{d-1} \frac{1}{2^p} C_{d-1+p}^p \left( 1 + \sqrt{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \right)^p.$$

Теоретические графики должны быть построены в диапазоне по оси абсцисс ( $E_b/N_0$ ) от 2 до 11 дБ.

3. Выводы.

### 7.3. Контрольные вопросы

1. Изобразите структурную схему кодера для сверточного кода, используемого в данной работе (числа 171 и 133 являются *восьмеричным* описанием порождающих полиномов).

2. Качественно объясните, за счет чего достигается выигрыш от кодирования в АБГШ-канале?

3. Объясните формулу для расчета вероятности ошибки в АБГШ-канале.

4. Как изменится формула для расчета вероятности ошибки в АБГШ-канале, если будет использоваться сверточный код со скоростью 1/4?

5. В чем состоит различие между жесткими и мягкими решениями при декодировании?

6. Что необходимо изменить в созданных моделях, чтобы реализовать жесткие решения вместо мягких?

7. Качественно объясните, за счет чего достигается выигрыш от кодирования в канале с медленными амплитудными замираниями.

8. Почему в канале с замираниями в сочетании с кодированием необходимо использовать перемежение?

9. Чем определяется необходимая глубина перемежения при использовании помехоустойчивого кодирования в канале с медленными амплитудными замираниями?

10. Почему уменьшение глубины перемежения резко снижает помехоустойчивость?

11. Каково назначение блоков Product (2 шт.) и Math Function в модели для канала с замираниями?

12. Сколько нужно разнесенных антенн в приемнике для некодированной системы связи с ФМ-2 в рэлеевском канале, чтобы при больших отношениях С/Ш угол наклона кривой помехоустойчивости был таким же, как и для исследованной в работе кодированной системы?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Прокис Дж. Цифровая связь / Пер. с англ.; Под ред. Д. Д. Кловского. — М.: Радио и связь, 2000.

Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.

Волков Л. Н., Немировский М. С., Шинаков Ю. С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: Учеб. пособие. — М.: Эко-Трендз, 2005.

Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь: Учеб. пособие для вузов. — М.: Горячая линия–Телеком, 2007.

Вернер М. Основы кодирования / Пер. с нем. — М.: Техносфера, 2004.

Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Пер. с англ. — М.: Техносфера, 2005.

## Содержание

1. Знакомство с Simulink. Общие принципы моделирования систем связи и оценки их помехоустойчивости .....	3
2. Линейная цифровая модуляция .....	11
3. Прием сигналов при наличии межсимвольной интерференции .....	18
4. Замирания и разнесенный прием.....	22
5. Расширение спектра.....	29
6. Фазовая синхронизация .....	33
7. Помехоустойчивое кодирование .....	38
Список рекомендуемой литературы.....	43

Редактор Э. К. Долгатов

---

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 2,75.

Гарнитура «Times New Roman». Тираж 100 экз. Заказ

---

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5