

## Лабораторная работа №2

### Моделирования систем передачи данных и оценки их помехоустойчивости

#### Цели работы

Изучение процессов моделирования систем с передачи данных и оценки их помехоустойчивости с помощью пакета компьютерного моделирования Matlab.

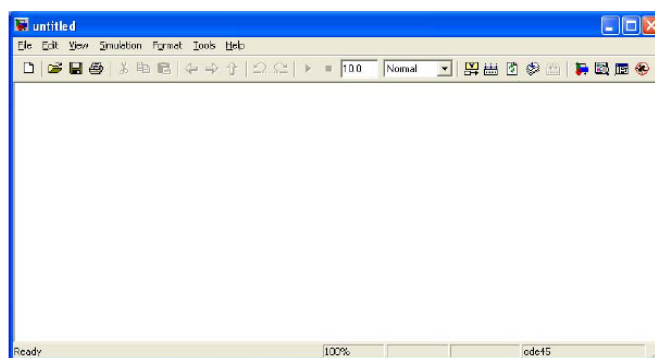
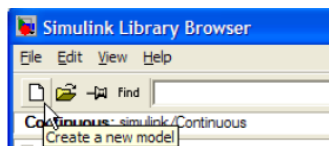
#### 1.1. Задание и указания к выполнению работы

##### 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 передачи данных.

Любая система передачи данных 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 передачи данных 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.*

Далее следует 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 нерекursивный 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 понижения 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. Для параметра Initial seed (начальное состояние генератора случайных чисел) задайте значение randseed (случайное начальное состояние).

**Замечание.** Прочие 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 ( $P_{ош}$  — оценка вероятности ошибки,  $N_{ош}$  — число произошедших ошибок,  $N_{бит}$  — число обработанных символов; последний столбец  $\sigma_p$  — среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки вероятности ошибки — заполняется при подготовке отчета):

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

**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 отношении 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 графическое 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:

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

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  $N_{oui} = 400$  ошибок. Чему равна относительная среднеквадратическая погрешность оценки?

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