

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

Кологривов В. А.  
Суздальцева Е.В.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВРСК МОДЕМА С СИНХРОННЫМ ДЕТЕКТИРОВАНИЕМ И  
КОРРЕЛЯЦИОННЫМ ПРИЁМОМ**

Методические указания по лабораторной работе в среде функционального моделирования  
Simulink системы MatLab для студентов радиотехнических специальностей

Томск 2022

УДК 621.396  
ББК 32.844  
К 61

**Рецензент:**

**Мещеряков А.А.**, доцент кафедры радиотехнических систем ТУСУР, канд. техн. наук

**Кологривов В. А., Суздальцева Е. В.**

К 61 Исследование **BPSK** модема с синхронным детектированием и корреляционным приёмом: методические указания по лабораторной работе для студентов радиотехнических специальностей / Кологривов В. А., Суздальцева Е. В. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022 – 26 с.

Настоящие методические указания по лабораторной работе составлены с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО).

Лабораторная работа «Исследование **BPSK** модема с синхронным детектированием и корреляционным приёмом» с использованием пакета функционального моделирования **Simulink** системы для инженерных и научных расчетов **MatLab**.

Работа «Исследование **BPSK** модема с синхронным детектированием и корреляционным приёмом» относится к циклу лабораторных работ по разделу «Модуляция/Демодуляция», входящему в дисциплины радиотехнических специальностей.

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

Одобрено на заседании каф. РТС протокол № 3 от 27.10.22

УДК 621.396  
ББК 32.844

© Кологривов В. А., Суздальцева Е. В., 2022

© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектроники, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О BPSK-МОДУЛЯЦИИ</b>	<b>4</b>
1.1 Краткие теоретические сведения .....	4
1.2 Математическое описание <i>BPSK</i> модуляции.....	6
<b>2 ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ SIM-МОДЕЛЕЙ BPSK-МОДЕМА.....</b>	<b>7</b>
<b>3 ПРИНЦИП РАБОТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ SIM-МОДЕЛИ BPSK-МОДЕМА .....</b>	<b>13</b>
<b>4 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПАКЕТА SIMULINK И ИСПОЛЬЗУЕМЫХ БЛОКОВ .....</b>	<b>17</b>
4.1 Запуск и работа с пакетом <i>Simulink</i> .....	17
4.2 Описание используемых блоков библиотеки <i>Simulink</i> .....	19
<b>5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.....</b>	<b>24</b>
<b>6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....</b>	<b>25</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>26</b>

# 1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О BPSK-МОДУЛЯЦИИ

**Цель работы:** исследование *BPSK* модуляции – помехоустойчивости, энергетической и спектральной эффективности, сравнение способов приёма и установление основного достоинства связанного с лучшей среди *MPSK* помехоустойчивостью с использованием пакета функционального моделирования *Simulink*.

## 1.1 Краткие теоретические сведения

*PSK* модуляция относится к узкополосной технологии формирования и использования радиосигналов.

Наиболее простой является *BPSK* модуляция. Информационный битовый поток одновременно является модулирующим, то есть бит является управляющим символом. Модулятор *BPSK* представляет собой перемножитель биполярного информационного потока и гармонического колебания несущей частоты, то есть *BPSK* модуляция это манипуляция фазы несущего колебания.

Демодуляция *BPSK* представляет собой приёмник прямого преобразования, при котором принятый модулированный сигнал умножается на опорное колебание несущей частоты. В результате образуется разностный продукт нулевой частоты, содержащий модулирующий сигнал и суммарный продукт второй гармоники несущего колебания. Суммарный продукт преобразования отфильтровывается с помощью ФНЧ, а разностный продукт регенерируется по форме до передаваемого битового потока. Иногда прямое преобразование спектра принимаемого сигнала называют синхронным детектированием.

Вторым возможным способом приёма и обработки *BPSK* модулированного сигнала является корреляционный приём. При этом в буферах плеч коррелятора накапливаются отсчеты опорного гармонического колебания и отсчеты принятого в шумах *BPSK* модулированного сигнала. Далее накопленные в течении бита отсчеты скалярно перемножаются (то есть скалярно перемножаются и суммируются) и нормируются к  $\pm 1$ . Это соответствует вычислению автокорреляционной функции при нулевом смещении  $\tau = 0$ .

Биполярная версия информационного битового потока соответствует состояниям  $\pm E$  и межсигнальному расстоянию  $2E$ , где  $E$  – энергия сигнала. Это максимальное межсигнальное расстояние соответствует наибольшей помехоустойчивости *BPSK* или энергетической эффективности.

Спектральная эффективность *BPSK* определяется длительностью бита или скоростью передачи битового потока. В первом приближении спектр псевдослучайного информационного потока приравнивается к спектру биполярного меандра (последовательность прямоугольных импульсов со скважностью 2). Это означает, что при длительности бита  $\tau_b$  ширина основного лепестка спектра составляет  $2\pi/\tau_b$  радиан/сек. Величины фазовых переходов при *BPSK* модуляции составляют  $0$  и  $\pi$  радиан, что приводит к заметным переходным процессам в полосовом фильтре (провале огибающей радиосигнала) и предъявляет повышенные требования к линейности используемых усилителей мощности.

Следующей версией *PSK* модуляции является квадратурная фазовая манипуляция *QPSK* модуляция. В этом случае текущие биты группируются в пары (дибиты)  $\tau_s = 2 \cdot \tau_b$ . Скорость передачи в два раза выше, чем у *BPSK*, передача одного символа эквивалентна передаче двух битов. Дибиты могут принимать значения *00*, *01*, *10* и *11*. Каждому дибиту приписывается фазовое состояние, например,  $\varphi_k = \pm \pi/4$ , при этом используется так называемое кодирование по Грея (соседние состояния отличаются одним битом), что способствует равномерному распределению ошибок. Фазовое кодирование обычно выполняется программно. Далее от фазовых состояний вычисляются значения  $\cos(\varphi_k)$  и  $\sin(\varphi_k)$  и тем самым образуются квадратурные модулирующие импульсы длиной  $\tau_s$  и

амплитудой  $\pm 1/\sqrt{2}$ , которые подаются на квадратурный модулятор.

Квадратурный модулятор состоит из двух умножителей (преобразователей) на первые входы которых поступают модулирующие импульсы, а на вторые входы опорные квадратурные колебания несущей  $\cos(\omega_0 \cdot t)$  и  $\sin(\omega_0 \cdot t)$ . На выходе квадратурного модулятора стоит сумматор квадратурных составляющих модулированных несущих.

Демодулятор **QPSK** также имеет квадратурную структуру. Принятый модулированный сигнал разветвляется на первые входы умножителей (преобразователей), а на вторые входы подаются синхронизированные квадратурные опорные колебания несущих  $\cos(\omega_0 \cdot t)$  и  $\sin(\omega_0 \cdot t)$ . На выходах умножителей ФНЧ пропускают только низкочастотные разностные продукты преобразования и подавляют суммарные высокочастотные продукты преобразования. Низкочастотные разностные продукты преобразователей, представляющие собой квадратурные проекции фазовых состояний поступают на вход программного блока фазового декодера, в котором определяется квадрант комплексной плоскости, определяемой проекциями. По квадранту восстанавливается принадлежащее ему фазовое состояние и соответствующий дибит как вектор. Далее преобразователь параллельного представления в последовательное представление на основе двух портового переключателя выдаёт текущие биты принятого дибита.

Вторым возможным способом приёма и обработки **QPSK** модулированного сигнала является корреляционный приём. При этом для каждого квадратурного канала реализуется свой коррелятор. На первом плече коррелятора в пределах принимаемого дибита накапливаются отсчеты синхронизированного опорного генератора, а на втором плече накапливаются отсчеты принятого в помехах **QPSK** модулированного сигнала. Скалярно перемножая накопленные отсчеты как вектора, восстанавливаем соответствующую квадратурную проекцию. Далее восстановленные квадратурные проекции фазового состояния подаём на программный блок фазового декодера и преобразователь параллельного представления в последовательное представление и на выходе получаем последовательный поток принятых битов.

Так как при **QPSK** модулирующие символы в два раза длиннее чем у **BPSK** ширина основного лепестка спектра сокращается вдвое. Четыре фазовых состояния, равномерно расположенные на окружности радиусом  $E$  дают межсигнальное расстояние  $E\sqrt{2}$ , а значит и меньшую помехоустойчивость.

При **QPSK** модуляции возможные фазовые переходы составляют  $0$ ,  $\pi/2$  и  $\pi$  радиан. Смена фазовых состояний вызывает переходные процессы в полосовом фильтре, что выражается в кратковременном изменении уровня огибающей модулированного сигнала и чревато появлением нелинейных искажений в усилителях мощности работающих в нелинейном режиме. Чем больше перепад фаз, тем больше провал огибающей и больше уровень нелинейных продуктов. В связи с этим желательно ограничить перепад фаз.

**OQPSK** – квадратурная модуляция со смещением является разновидностью **QPSK** модуляции в которой исключаются фазовые переходы на  $\pi$  радиан за счет смещения квадратурных модулирующих потоков на половину символа, что исключает одновременную смену управляющих символов. Формально смещение одного из модулирующих потоков на половину символа не должно влиять на энергетическую и спектральную эффективность, однако присутствие в структуре модема полосового фильтра **RF** способно заметно повлиять на ситуацию. Так возможность дальнейшего отслеживания смещения на  $1$  бит в демодуляторе заставляет при выборе полосы пропускания ориентироваться на  $\tau_b$ , а не на  $\tau_s$ . В свою очередь увеличение полосы пропускания полосового фильтра увеличивает уровень проходящих на демодулятор шумов, а значит, снижает помехоустойчивость канала передачи.

**8PSK** квадратурная модуляция – модулирующие символы по длительности равны трибитам, что эквивалентно снижению требуемой полосы в три раза. Трёх битам соответствует  $8$  возможных фазовых состояний. Равномерное размещение  $8$ -ми фазовых

состояний на окружности радиусом  $E$  приводит к сокращению межсигнального расстояния до  $E \cdot 0.7654$ , а значит и к снижению помехоустойчивости. Скорость передачи в три раза выше, чем у  $BPSK$ , передача одного символа эквивалентна передаче трёх битов. В отличие от  $BPSK$  и  $QPSK$  огибающая  $8PSK$  модулированного сигнала не постоянна.

$16PSK$  квадратурная модуляция – модулирующие символы по длительности равны квадробитам, что эквивалентно снижению требуемой полосы в четыре раза. четырём битам соответствует  $16$  возможных фазовых состояний. Равномерное размещение  $16$ -ми фазовых состояний на окружности радиусом  $E$  приводит к сокращению межсигнального расстояния до  $E \cdot 0.3902$ , а значит и к снижению помехоустойчивости. Скорость передачи в четыре раза выше, чем у  $BPSK$ , передача одного символа эквивалентна передаче четырёх битов. В отличие от  $BPSK$  и  $QPSK$  огибающая  $16PSK$  модулированного сигнала не постоянна.

## 1.2 Математическое описание $BPSK$ модуляции

Дадим простое математическое описание  $BPSK$  модуляции, используя структуру модема [1-3].

Обозначим текущее значение бита  $d_k = \pm 1$ , который является управляющим сигналом модулятора. В модуляторе (смесителе) управляющая последовательность перемножается с опорным гармоническим колебанием  $x_k = d_k \sin(\omega t)$ .

В модели канала распространения к переданному сигналу аддитивно добавляются шумы  $y_k = d_k \sin(\omega t) + n_k$ .

В демодуляторе зашумленный сигнал умножается на опорное колебание

$$\begin{aligned} z_k &= \langle d_k \sin(\omega t) + n_k \rangle \sin(\omega t) = d_k \sin^2(\omega t) + n_k \sin(\omega t) = \\ &= \frac{d_k}{2} (1 - \cos(2\omega t)) + n_k \sin(\omega t). \end{aligned}$$

На выходе ФНЧ после фильтрации высокочастотных составляющих имеем последовательность с точностью до постоянного коэффициента совпадающую и передаваемой информационной последовательностью  $z_k \sim d_k/2$ .

## 2 ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ SIM-МОДЕЛЕЙ BPSK-МОДЕМА

Функциональная модель **BPSK** модема с приёмником прямого преобразования (синхронного детектирования) представлена на рис. 2.1.

Источник биполярной информационной последовательности реализован на основе генератора псевдослучайной последовательности с гауссовским распределением **Random Number** и блока двухстороннего ограничителя на основе функции  $sign(x)$ .

Модулятор **BPSK** сигнала реализован на основе блока **Product**, на один вход которого поступает биполярная информационная последовательность, а на второй – опорное гармоническое колебание с частотой  $\omega_0 = 15 \cdot \pi$  радиан/сек -  $sin(\omega_0 t)$ .

Простейшая модель канала распространения собрана на основе блока **Sum**, на второй вход которого поступает шумовая псевдослучайная последовательность с гауссовским распределением **Random Number**. Параметр генератора **Sample Time** позволяет реализовать необходимую широкополосность шумов канала распространения, а параметр **Variance** регулировать мощность шумов в процессе измерения помехоустойчивости (зависимости вероятности битовой ошибки от соотношения сигнал/шум **SNR**).

Полосовой фильтр с полосой пропускания  $\Delta\omega = 4 \cdot \pi$  на основе блока **Analog Filter Design** призван отобразить формирующий фильтр на выходе передающей части и входную фильтрацию на входе приемной части.

**BPSK** демодулятор реализован подачей зашумлённого принятого радиосигнала на вход умножителя **Product**, на второй входы которого с генераторов **Sine Wave** подаются опорные колебания несущей частоты  $\omega_0 = 15 \cdot \pi$  радиан/сек -  $sin(\omega_0 t)$ . Система выделения и автоматической фазовой подстройки частоты опорного колебания в модели не представлена. На выходе умножителей установлен **ФНЧ (LF)** с полосой пропускания порядка  $\Delta\omega = 2 \cdot \pi$  радиан/сек, для фильтрации высокочастотных продуктов преобразования. Блок **Gain = 2** призван компенсировать коэффициент тригонометрических преобразований равный  $1/2$ .

Далее сигнал поступает на регенератор формы битов, состоящий из блока экстраполятора нулевого порядка **Zero Order Hold** с шагом в **1** бит и блока двухстороннего ограничителя на основе функции  $sign(x)$ .

Подсистема **Subsystem Calc Err**, блоки **Display** и **Scope** призваны отображать число ошибок передачи и фиксировать моменты их возникновения.

Подсистема **Subsystem Measuring Power** и блок **Scope** призваны вычислять и отображать изменение уровня мощности сигнала или смеси сигнал+шум в процессе измерения помехоустойчивости. Точка подключения измерителя мощности обусловлена блоком принятия решений, который соответствует блоку **Zero Order Hold**.

Блоки **Spectrum Scope** и **Averaging Power Spectral Density** призваны отображать спектры сигнальных и шумовых потоков.

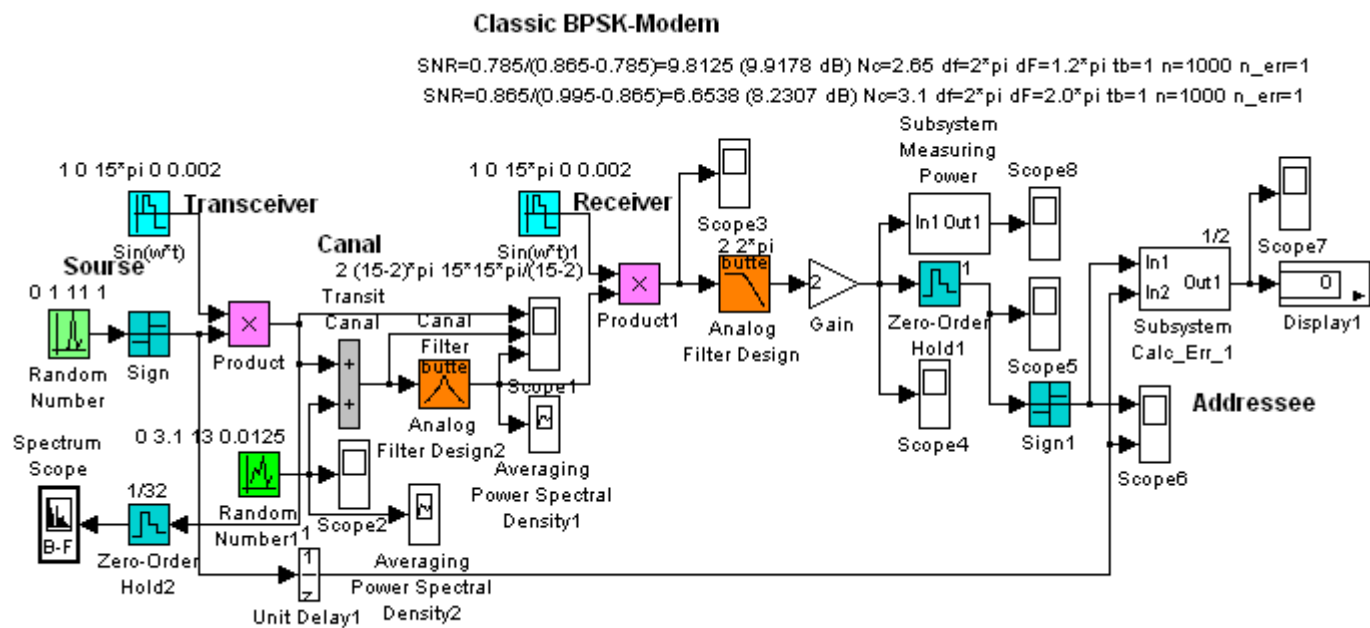


Рисунок 2.1 – Функциональная схема модели **BPSK**-модема с приёмником прямого преобразования



Функциональная модель **BPSK** модема с корреляционным приёмником представлена на рис. 2.2.

При корреляционном приеме определяется значение функции корреляции между принимаемым и опорным сигналом. Функция корреляции является функцией параметра смещения  $\tau$  и обычно функция автокорреляции симметрична относительно  $\tau = 0$  и может содержать боковые пики. Функция корреляции непрерывного сигнала определяется соотношением:

$$R(\tau) = \int x(\tau) * y(t - \tau) d\tau,$$

где  $y(t) = x(t) + n(t)$ ;

$x(t)$  – полезный сигнал;

$n(t)$  – АБГШ.

При полном совпадении сигналов будет получен положительный максимум значения функции корреляции. Если сигналы находились в противофазе, то максимум станет отрицательным. При отсутствии похожести между сигналами значение функции корреляции будет равно нулю. При частичном совпадении и при наличии помех значение функции корреляции находится в диапазоне от нуля до значения ее максимума. Для дискретного и цифрового сигнала функция корреляции определяется через сумму произведения функций отсчетов

$$R(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{\infty} x(n) \cdot y(n - m).$$

При описании **BPSK** модема с корреляционным приёмником целесообразно остановиться на реализации корреляционного приема и обработке сигнала, поскольку передающие части модемов совпадают. Плечи корреляционного приёмника состоят из экстраполяторов нулевого порядка **Zero Order Hold** и блока **Buffer**, которые накапливают в течение бита отсчеты опорного колебания и принятого в шумах **BPSK** модулированного радиосигнала. Накопленные отсчеты, как вектора скалярно перемножаются и суммируются блоками **Product** и **Sum**. Блок **Frame Status Conversion** призван преобразовать фреймовый тип данных в тип **double**. В данном случае реализуется накопление **64** отсчетов в течение бита.

Такая упрощенная реализация корреляционной обработки позволяет найти отсчет автокорреляционной функции опорного колебания и зашумленного радиосигнала при смещении  $\tau = 0$  и в зависимости от знака корреляции принять решение о приеме **1** или **-1**.

$10 \cdot \log_{10}(64) = 18.0618 \text{ dB}$

### Classic BPSK-Modem+Correlation receiver

$SNR = 0.785 / (0.865 - 0.785) = 9.8125$  (9.9178 dB)  $N_c = 2.65$   $d_f = 2 \cdot \pi$   $d_F = 1.2 \cdot \pi$   $t_b = 1$   $n = 1000$   $n_{err} = 1$  Classic BPSK

$SNR = 0.865 / (0.995 - 0.865) = 6.6538$  (8.2307 dB)  $N_c = 3.1$   $d_f = 2 \cdot \pi$   $d_F = 2.0 \cdot \pi$   $t_b = 1$   $n = 1000$   $n_{err} = 1$  Classic BPSK

$SNR_{in} = 0.5 / (4.58 - 0.5) = 0.1225$  (-9.1169 dB)  $N_c = 4.05$   $t_b = 1$   $n = 1000$   $n_{err} = 1$  Classic BPSK+Corr

$SNR_{out} = 1022 / (1160 - 1022) = 7.4058$  (8.6957 dB)  $N_c = 4.05$   $t_b = 1$   $n = 1000$   $n_{err} = 1$  Classic BPSK+Corr

$SNR_{out} = 1022 / 125 = 8.1760$  (9.1254 dB)  $N_c = 4.05$   $t_b = 1$   $n = 1000$   $n_{err} = 1$  Classic BPSK+Corr

$SNR_{out} = (1160 - 125) / 125 = 8.2800$  (9.1803 dB)  $N_c = 4.05$   $t_b = 1$   $n = 1000$   $n_{err} = 1$  Classic BPSK+Corr

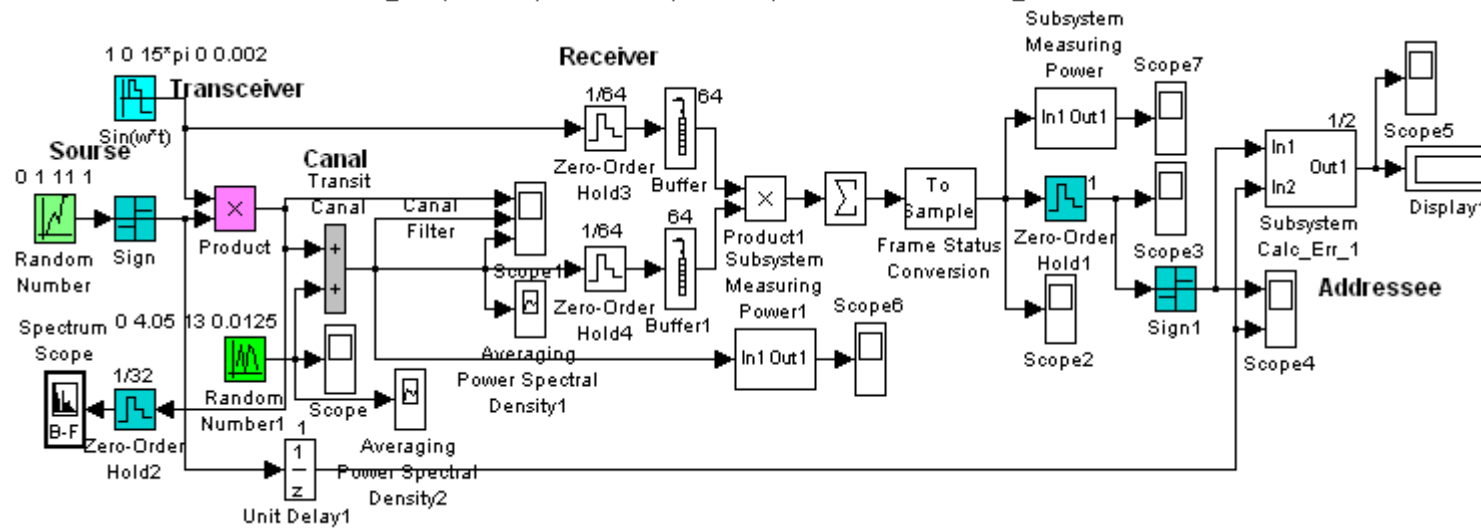


Рисунок 2.2 – Функциональная схема модели *BPSK*-модема с корреляционным приемником

Модель подсистемы детектора ошибок *Subsystem Calc Err* приведена на рис. 2.3.

В детекторе ошибок вычисляется интеграл от модуля разности входных последовательностей, т.е. площадь разностного процесса. Затем, в зависимости от длительности битов и одно- или биполярности подбирается множитель *Gain*, переводящий интеграл разности в эквивалентное количество битов (ошибок).

На первый вход подается сигнал, прошедший через всю схему, на второй вход поступает сигнал с генератора входной информационной последовательности с необходимой задержкой. К выходу подсистемы присоединены дисплей и осциллограф, на дисплее в случае наличия ошибок, будет указано их количество, а на осциллографе можно фиксировать время их возникновения.

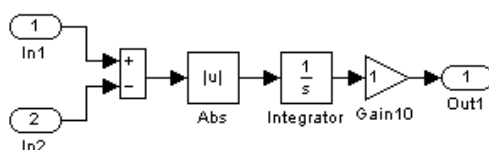


Рисунок 2.3 - Модель подсистемы детектора ошибок

Модель подсистемы измерителя мощности *Subsystem Measuring Power* приведена на рис. 2.4.

Подсистема позволяет измерить мощность как регулярных, так и случайных процессов, как вещественных, так и комплексных. С помощью блока *Dot Product* процесс умножается на сопряженный. Блоком *Complex to Real-Imag* выделяется вещественная часть. Блок *Integrator* вычисляет энергию процесса, а деление блоком *Product* энергии на время (блок *Clock*) вычисляет мощность как скорость поступления энергии.

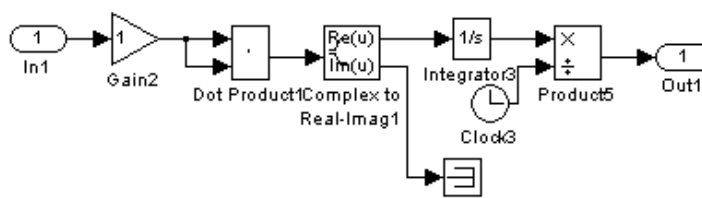


Рисунок 2.4 - Модель подсистемы измерителя мощности

**Модель коррелятора.** Корреляционный приемник реализован следующим образом (см. рис. 2.5):

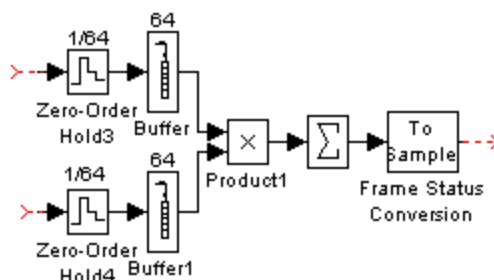


Рисунок 2.5 – Реализация корреляционного приемника

При реализации функциональной модели корреляционного приема решено ограничиться значением функции корреляции при  $\tau = 0$ .

Т.к. используются дискретные (цифровые) сигналы, то значение функции корреляции вычисляется через сумму произведений отсчетов принятого сигнала и колебаний опорного генератора соответствующей несущей. Модель коррелятора содержит два плеча накопления отсчетов. В каждом плече с помощью блоков *Zero-Order Hold* сигнал дискретизируется на отсчеты (в данном случае на **64**) и накапливается в блоках *Buffer*. Далее накопленные отсчеты попарно перемножаются в блоке *Product*. Затем вычисляется сумма этих произведений блоком *Sum*, т.е. реализуется скалярное произведение векторов накопленных отсчетов.

**Измерение SNR.** Отношение сигнал/шум (*SNR*) измеряется по следующей методике: для того чтобы определить мощность сигнала без шумовой составляющей *S* необходимо отсоединить генератор шума от модели канала распространения. Для того чтобы определить мощность смеси полезного сигнала с шумом *SN* генератор шумов должен быть подключен к каналу распространения. Изменение отношения сигнал/шум *SNR* достигается вариацией параметра дисперсии генератора псевдослучайной гауссовской последовательности модели канала распространения.

*SNR* рассчитывается по формуле, представленной ниже:

$$SNR = S / (SN - S).$$

Результаты измерений фиксируются в дБ.

При большом числе испытаний, частота появлений битовых ошибок, т.е. отношение числа ошибок к общему числу битов, стремится к вероятности битовых ошибок.

**Рекомендации** для проведения исследования помехоустойчивости. При отключенном генераторе шумов канала распространения на выходе преобразователя измеряется уровень мощности сигнала *S*. Подключив генератор шумов канала распространения, меняя параметр *Variance* добиваемся скажем **1**-ой ошибки на **1000** битов, получаем одну точку водопадоподобной кривой. Далее, постепенно увеличивая мощность шумов с помощью параметра *Variance* добиваемся по очереди **3**-х, **5**-ти и **8**-ми ошибок, получаем **4**-е точки водопадоподобной кривой, которую строим в полулогарифмическом масштабе с помощью *MatLab*- функции *semilogy*.

Таким образом, измерение *SNR* при соответствующем числе ошибок позволяет определить точки водопадоподобной характеристики, позволяющей оценить помехоустойчивость модема.

### 3 ПРИНЦИП РАБОТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ SIM-МОДЕЛИ BPSK-МОДЕМА

Опишем принцип работы **BPSK** модема с приёмником прямого преобразования по функциональной модели представленной на рис. 2.1. Источник на основе генератора **Random Number** и блока **Sign** формирует псевдослучайный информационный биполярный битовый поток.

Квадратурный модулятор на основе блока **Product** умножает биполярный битовый поток на колебания несущей частоты  $\sin(\omega_0 t)$ .

Модель канала распространения на основе блока **Sum**, на второй вход которого поступает шумовая псевдослучайная последовательность с гауссовским распределением **Random Number** с параметром **Sample Time** определяющим необходимую широкополосность шумов канала распространения и параметром **Variance** регулирующем мощность шумов в процессе измерения помехоустойчивости.

Полосовой фильтр на основе блока **Analog Filter Design** с полосой пропускания  $\Delta\omega = 4 \cdot \pi$  призван отобразить формирующий фильтр на выходе передающей части и входную фильтрацию на входе приемной части.

Демодулятор реализован умножением (блок **Product**) зашумлённого принятого радиосигнала с колебаниями генератора **Sine Wave** несущей частоты  $\omega_0 = 15 \cdot \pi$  радиан/сек -  $\sin(\omega_0 t)$ . На выходе умножителя **ФНЧ (LF)** с полосой пропускания порядка  $\Delta\omega = 2 \cdot \pi$  радиан фильтруют высокочастотные продукты преобразования. Блоки **Gain = 2** компенсируют коэффициент тригонометрических преобразований равный  $1/2$ .

Далее форма принятого сигнала регенерируется блоком экстраполятора нулевого порядка **Zero Order Hold** с шагом в **1** бит и блоком двухстороннего ограничителя на основе функции  $\text{sign}(x)$ .

Блок **Scope**, установленный на выходе, позволяет наблюдать и сравнивать принятый информационный поток и подаваемый на второй вход передаваемый информационный поток.

Опишем принцип работы **BPSK** модема с корреляционным приёмником по функциональной модели представленной на рис. 2.2. Поскольку передающая часть модемов совпадает, рассмотрим подробнее корреляционный приёмник. Корреляционный приёмник работает с отсчетами в пределах каждого бита. Отсчеты принятого зашумленного **BPSK** сигнала в пределах текущего бита накапливаются в буфере первого плеча коррелятора, в буфере второго плеча коррелятора в это время накапливаются отсчеты несущего опорного гармонического колебания. Подразумевается, что генератор опорного колебания приёмника синхронизирован с генератором опорного колебания передатчика системой фазовой автоподстройки частоты **ФАПЧ** с точностью до фазы. Далее накопленные в буферах отсчеты покомпонентно перемножаются и суммируются как векторы (скалярное произведение). Результат этого скалярного произведения представляет собой отсчет корреляционной функции при смещении  $\tau = 0$ . В зависимости от знака принимаемого бита и шумов канала распространения значение отсчета корреляционной функции может быть как положительным так и отрицательным. Применение блока двухстороннего ограничителя на основе функции  $\text{sign}(x)$  нормирует принятые значения к  $\pm 1$ , что эквивалентно восстановлению биполярной формы принятого информационного потока.

Измерение отношения сигнал/шум **SNR** может быть осуществлено как на входе так и на выходе коррелятора, что позволяет оценить влияние коррелятора на **SNR** в зависимости от конкретных условий.

Для иллюстрации работы **BPSK** модема на рис. 3.1 приведены фрагменты осциллограмм **BPSK** модулированного сигнала, зашумленного передаваемого сигнала и сигнала прошедшего полосовой фильтр.

На рисунке 3.2 приведен фрагмент осциллограммы принятого в шумах сигнала после

ФНЧ демодулятора.

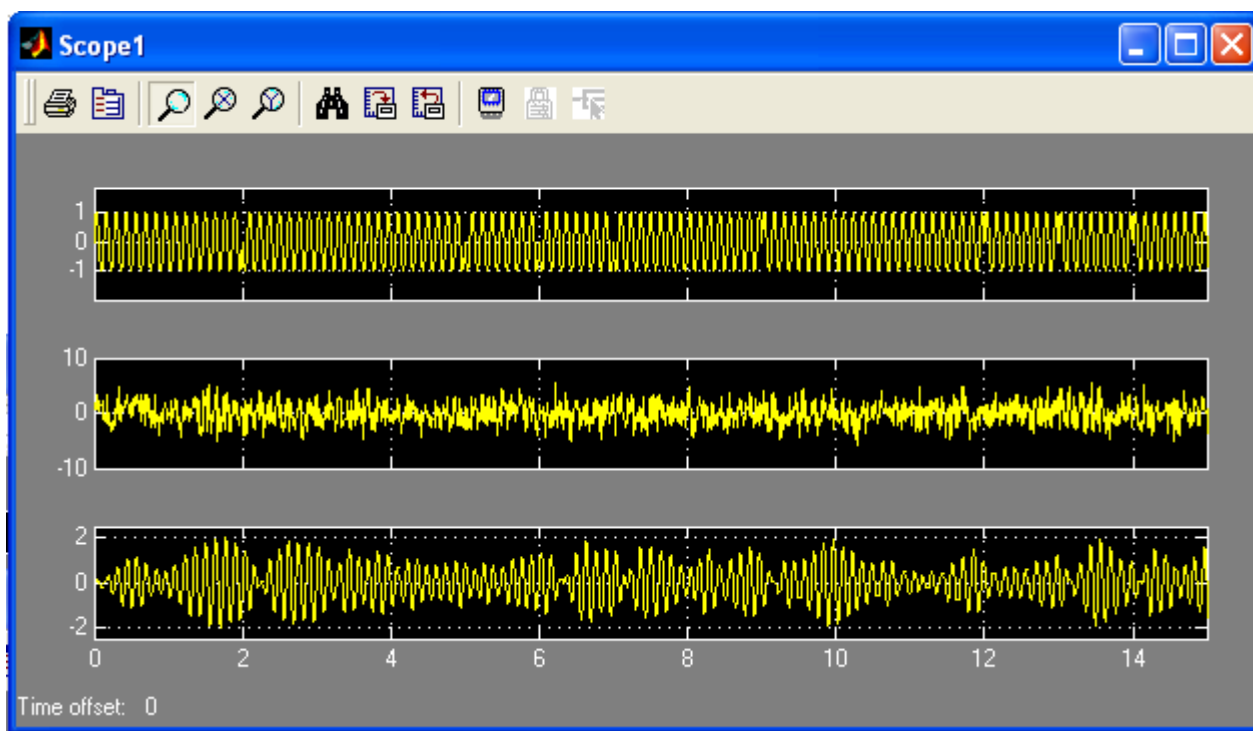


Рисунок 3.1 - Фрагменты осциллограмм *BPSK* модулированного сигнала, зашумленного передаваемого сигнала и сигнала прошедшего полосовой фильтр

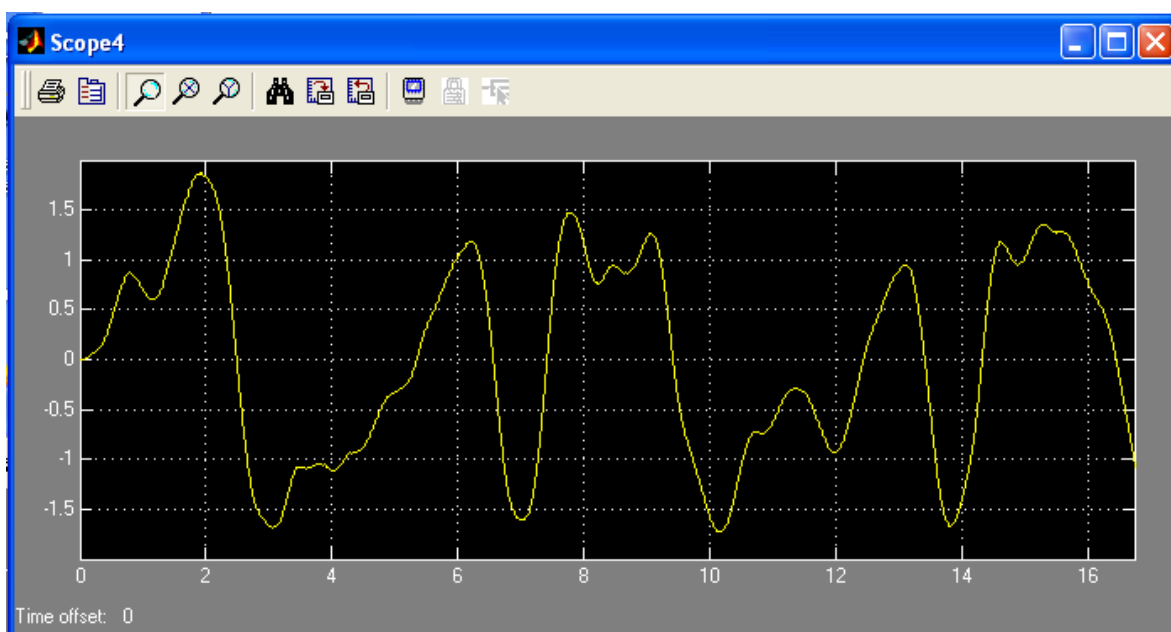


Рисунок 3.2 - Фрагмент осциллограммы принятого в шумах сигнала после ФНЧ демодулятора

На рисунке 3.3 приведены фрагменты осциллограмм принятого и передаваемого информационных потоков.

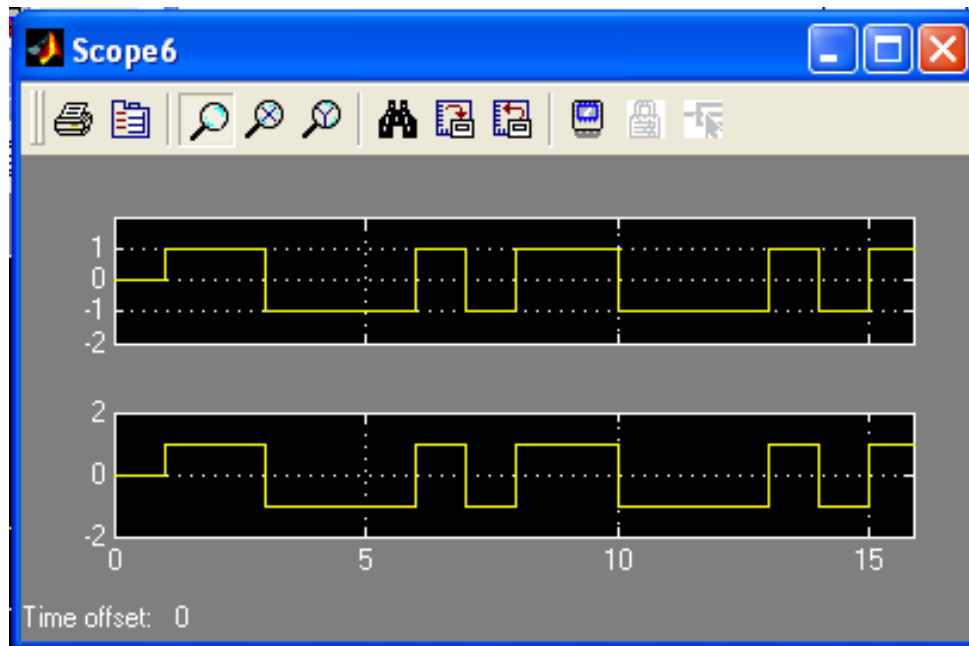


Рисунок 3.3 - Фрагменты осциллограмм принятого и передаваемого информационных потоков в отсутствии шумов

На рисунке 3.4 приведена спектрограмма **BPSK** модулированного сигнала в отсутствие шумов.

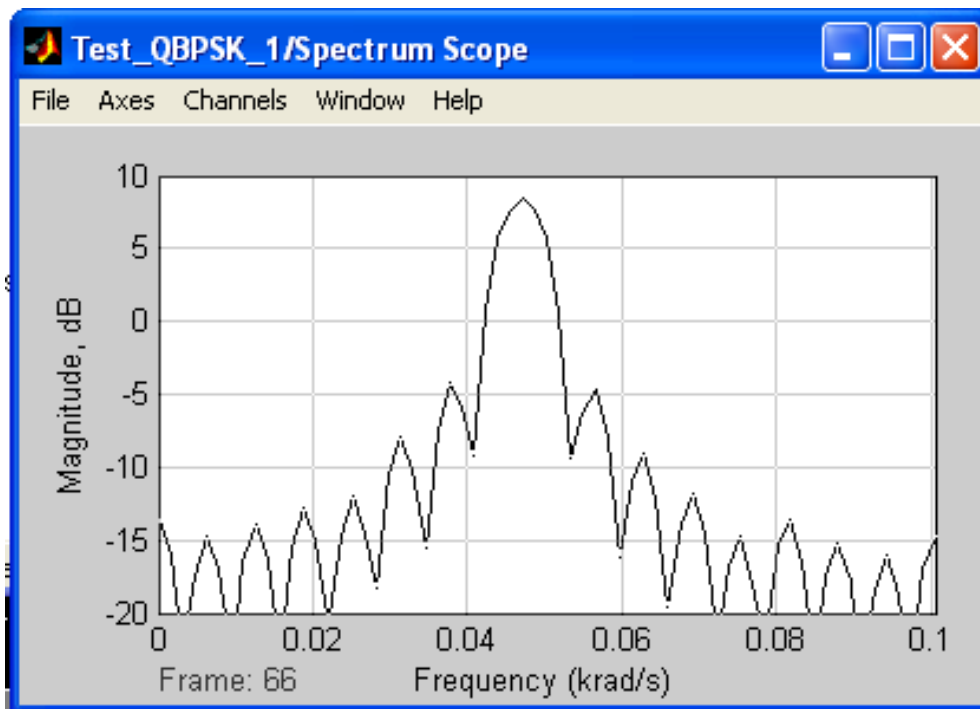


Рисунок 3.4 - Спектрограмма **BPSK** модулированного сигнала в отсутствие шумов

На рисунке 3.5 приведен фрагмент осциллограммы на выходе коррелятора в присутствии шумов.

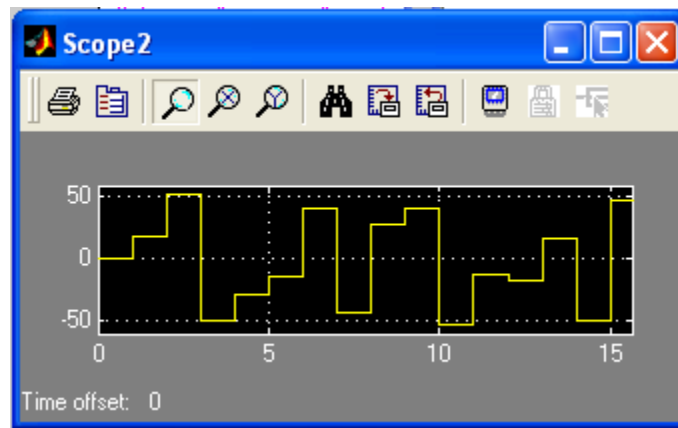


Рисунок 3.5 - Фрагмент осциллограммы на выходе коррелятора в присутствии шумов

Приведённые осциллограммы модельного исследования *BPSK* модема призваны ориентировать студента в процессе выполнения лабораторной работы.




## 4 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПАКЕТА SIMULINK И ИСПОЛЬЗУЕМЫХ БЛОКОВ

Пакет *Simulink* разработан компанией *Mathworks* и распространяется в составе математического пакета *MatLab*. Пакет основан на графическом интерфейсе и является типичным средством визуально-ориентированного программирования. Он обладает обширной библиотекой готовых блоков с модифицируемыми параметрами для построения моделей рассматриваемых систем и наглядными средствами визуализации результатов моделирования [4 – 7].

### 4.1 Запуск и работа с пакетом *Simulink*

Для запуска пакета *Simulink* необходимо предварительно выполнить запуск системы *MatLab*. После открытия командного окна системы *MatLab* нужно запустить систему *Simulink*. Это можно сделать одним из трех способов:

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

Последний способ предпочтителен при запуске уже готовой и отлаженной модели, когда требуется лишь провести моделирование и не нужно добавлять новые блоки в модель. При применении двух первых способов открывается окно обозревателя библиотеки блоков (*Simulink Library Browser*) (рисунок 4.1).

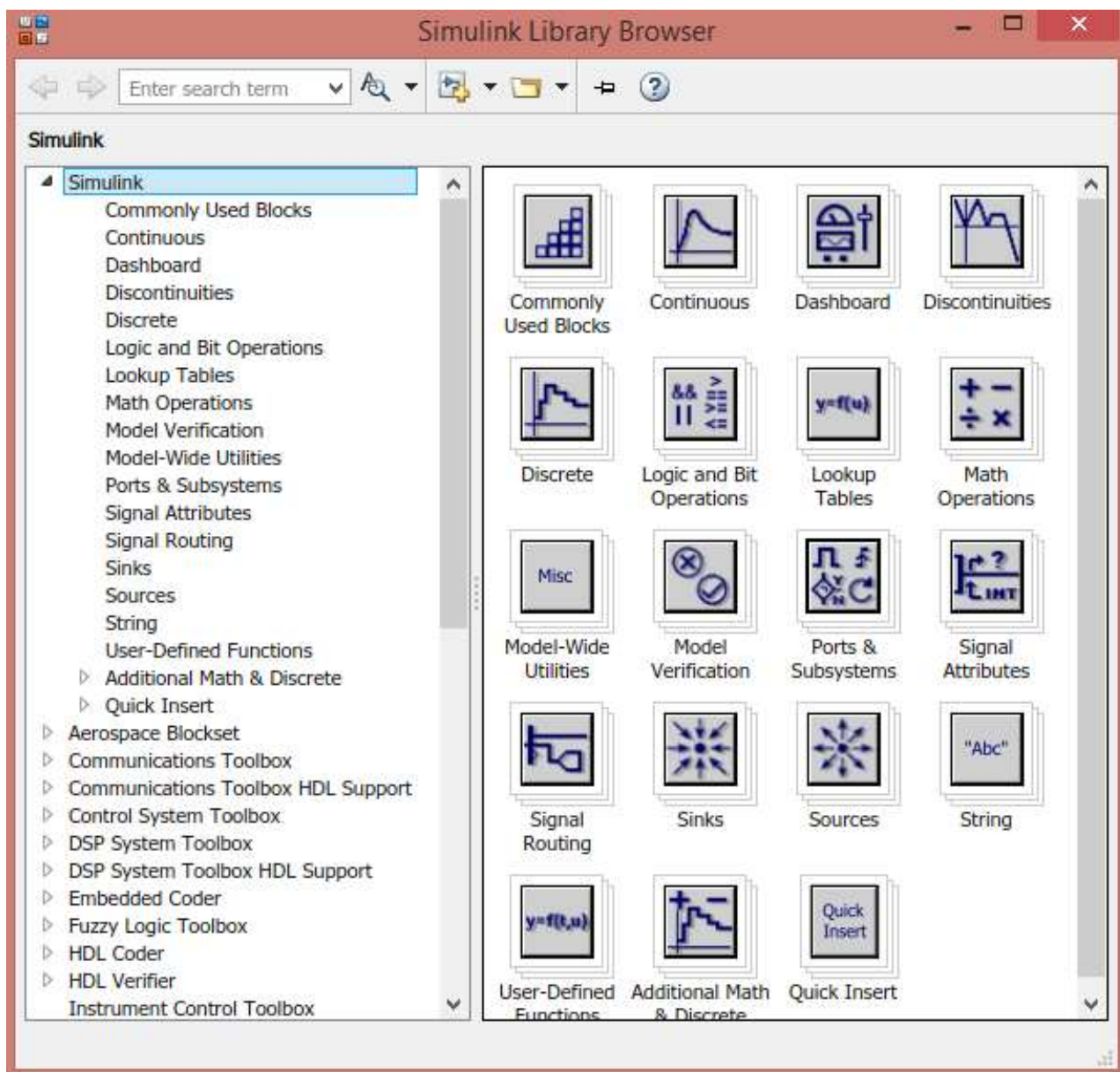


Рисунок 4.1 – Библиотека блоков *Simulink Library Browser*

На рисунке 4.1 выведена библиотека системы *Simulink* (в левой части окна) и показаны ее разделы (в правой части окна). Основная библиотека системы содержит следующие разделы:

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

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

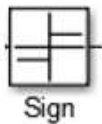
## 4.2 Описание используемых блоков библиотеки *Simulink*

Ниже описаны основные блоки базовых разделов библиотеки *Simulink*, используемые в функциональной схеме *OQPSK*-модема:



Random Number

**Random Number** – блок источника случайного дискретного сигнала с нормальным распределением. Назначение: формирование случайного сигнала с нормальным распределением уровня сигнала. Параметры блока: **Mean** – среднее значение сигнала, **Variance** – дисперсия (среднеквадратическое отклонение), **Initial seed** – начальное значение.

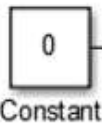


Sign

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

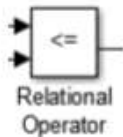
$$\text{sign} = \begin{cases} -1, & \text{где } x < 0; \\ 0, & \text{где } x = 0; \\ 1, & \text{где } x > 0. \end{cases}$$

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



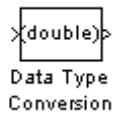
Constant

**Constant** – блок источника постоянного сигнала. Назначение: задает постоянный по уровню сигнал. Параметры: **Constant value** – постоянная величина, **Interpret vector parameters as 1-D** – интерпретировать вектор параметров как одномерный (при установленном флажке). Значение константы может быть действительным или комплексным числом, вычисляемым выражением, вектором или матрицей.



Relational Operator

**Relational Operator** – блок вычисления операции отношения. Назначение: блок сравнивает текущие значения входных сигналов. Параметры: **Relational Operator** – тип операции отношения (выбирается из списка): «= =» – тождественно равно, «~ =» – не равно, «<» – меньше, «< =» – меньше или равно, «> =» – больше или равно, «>» – больше.



Data Type Conversion

**Data Type Conversion** – блок преобразования типа сигнала. Назначение: блок преобразует тип входного сигнала. Параметры: **Data type** – тип данных выходного сигнала. Может принимать значения (выбираются из списка): **auto, double, single, int8, int16, int32, uint8, uint16, uint32** и **boolean**. **Saturate on integer overflow** (флажок) – подавляет переполнение целого. При установленном флажке ограничение сигналов целого типа выполняется корректно.



Product

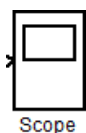
**Product** – блок умножения и деления. Назначение: вычисление произведения текущих значений сигналов. Параметры блока: **Number of inputs** – количество входов, может задаваться как число или как список знаков. В списке знаков можно использовать знаки: \* – умножить и / – разделить. **Multiplication**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



Sine Wave

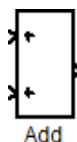
**Sine Wave** – блок источника синусоидального сигнала. Назначение:

формирование синусоидального сигнала с заданной частотой, амплитудой, фазой и смещением. Параметры блока: **Sine Type** – способ формирования сигнала реализуется двумя алгоритмами: **Time-based** – по текущему времени (для аналоговых систем) или по значению сигнала на предыдущем шаге и величине такта дискретности (для дискретных систем); **Sample-based** – по величине такта дискретности и количеству расчетных шагов на один период синусоидального сигнала. Вид окна задания параметров меняется в зависимости от выбранного способа формирования синусоидального сигнала.



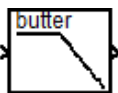
Scope

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



Add

**Add** – блок сумматора. Назначение: вычисление алгебраической суммы текущих значений входных сигналов. Параметры блока: **Icon shape** – форма блока, выбирается из списка: **round** – круг; **rectangular** – прямоугольник. **List of sign** – список знаков из набора: + – плюс; - – минус, | – разделитель. Флажок **Show additional parameters** – показать дополнительные параметры, при выставленном флажке отображаются окна списка **Output data type mode**, в нашем случае не используется. Количество входов и соответствующие им операции определяются списком знаков **List of sign**. При этом метки входов обозначаются соответствующими знаками. В списке **List of sign** можно также указать число входов, при этом все входы будут суммирующими.



Analog Filter Design

**Analog Filter Design** – блок аналогового фильтра заданного метода проектирования и типа из подраздела **Filter Design**; подраздела **Filtering**, раздела **DSP Blockset**. Назначение: аналоговая фильтрация низкочастотных составляющих спектра входного сигнала. Параметры блока: **Design method** – метод проектирования, выбирается из списка: **Butterworth** – фильтр Баттерворта; **Chebyshev I** – фильтр Чебышева 1-го рода; **Chebyshev II** – фильтр Чебышева 2-го рода; **Elliptic** – фильтр эллиптический; **Bessel** – фильтр Бесселя. **Filter type** – тип фильтра, выбирается из списка: **Lowpass** – нижних частот; **Highpass** – верхних частот; **Bandpass** – полосно-пропускающий; **Bandstop** – полосно-заграждающий. Далее для каждого метода проектирования и типа фильтра выдается свой список параметров. Так для фильтра Баттерворта типа нижних частот параметрами являются: **Filter order** – порядок фильтра; **Passband edge frequency (rads/sec)** – нижняя граничная частота (радиан в секунду). Для других методик проектирования и типов фильтров определяемые параметры очевидны.



Gain

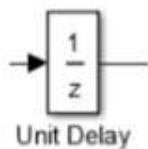
**Gain** – блок усилителя. Назначение: блок **Gain** умножает входной сигнал на постоянный коэффициент; Параметры блока: **Multiplication** – способ выполнения операции, значение параметра выбирается из списка: **Element-wise  $K*u$**  – поэлементный; **Matrix  $K*u$**  – матричный, коэффициент усиления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



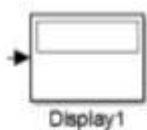
Zero-Order Hold

**Zero-Order Hold** – экстраполятор нулевого порядка. Назначение:

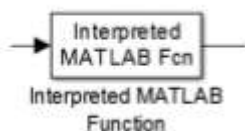
экстраполяция входного сигнала на интервале дискретизации. Блок фиксирует значение входного сигнала в начале интервала дискретизации и поддерживает на выходе это значение до окончания интервала дискретизации. Затем выходной сигнал изменяется скачком до величины входного сигнала на следующем шаге дискретизации.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



**Unit delay** – блок единичной дискретной задержки. Назначение: выполняет задержку дискретного сигнала на заданный шаг модельного времени. Параметры блока: **Initial conditions** – начальное значение выходного сигнала; **Sample time** – шаг модельного времени.

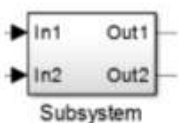


**Display** – блок цифрового дисплея. Назначение: отображает значение сигнала в виде числа. Параметры: **Format** – формат отображения данных. Параметр **Format** может принимать следующие значения: **short** – 5 значащих десятичных цифр, **long** – 15 значащих десятичных цифр, **short\_e** – 5 значащих десятичных цифр и 3 символа степени десяти, **long\_e** – 15 значащих десятичных цифр и 3 символа степени десяти, **bank** – "денежный" формат. Формат с фиксированной точкой и двумя десятичными цифрами в дробной части числа; **Decimation** – кратность отображения входного сигнала, при **Decimation = 1** отображается каждое значение входного сигнала, при **Decimation = 2** отображается каждое второе значение, при **Decimation = 3** – каждое третье значение и т.д.; **Sample time** – шаг модельного времени. Определяет дискретность отображения данных; **Floating display** (флажок) – перевод блока в "свободный" режим. В данном режиме входной порт блока отсутствует, а выбор сигнала для отображения выполняется щелчком ЛВМ на соответствующей линии связи. В этом режиме для параметра расчета **Signal storage reuse** должно быть установлено значение **off** (вкладка **Advanced** в окне диалога **Simulation parameters...**).



**MatLab Fcn** – блок задания функции. Назначение: задает выражение в стиле языка программирования **MatLab**. Параметры: **MatLab function** – Выражение на языке **MatLab**. **Output dimensions** – размерность выходного сигнала. Значение параметра минус 1 предписывает блоку определять размерность автоматически. **Output signal type** – тип выходного сигнала.

Выбирается из списка: **real** – действительный сигнал, **complex** – комплексный сигнал, **auto** – автоматическое определение типа сигнала; **Collapse 2-D results to 1-D** – преобразование двумерного выходного сигнала к одномерному.



**Subsystem** – виртуальная и монолитная подсистемы. Доступ к окну параметров подсистемы осуществляется через меню **Edit** командой **Block Parameters**. Параметры: **Show port labels** – показать метки портов, **Treat as atomic unit** (флажок) – считать подсистему монолитной. Таким образом, блоки виртуальной и монолитной подсистем – это один и тот же блок,

отличающийся значением данного параметра. **Access** – доступность подсистемы для изменений. Выбирается из списка: **ReadWrite** – пользователь может открывать и изменять подсистему, **ReadOnly** – пользователь может открывать подсистему только для просмотра, **NoReadOrWrite** – пользователь не может открывать и изменять подсистему; **Name of error callback function** – имя функции используемой для обработки ошибок возникающих в данной подсистеме.



**Переключатель.** Назначение: Выполняет переключение входных сигналов по сигналу управления.

Параметры блока: **Criteria for passing first input:** Значение параметра выбирается из списка:

**U2 >= Threshold** – входной сигнал больше или равен пороговому значению;

$U2 > Threshold$  – входной сигнал больше порогового значения;  
 $U2 \sim Threshold$  – входной сигнал не равен пороговому значению.  
 $Threshold$  – порог.



**Pulse generator** – блок источника импульсного сигнала. *Назначение:* формирование сигнала в форме прямоугольных импульсов. *Параметры блока:* **Pulse Type** – способ формирования сигнала, может принимать два значения: **Time-based** – по текущему времени; **Sample-based** – по величине такта дискретности и количеству шагов моделирования. Вид окна параметров зависит от выбранного способа формирования сигнала. **Amplitude** – амплитуда; **Period** – период, задается в секундах при способе **Time-based** или количеством тактов при способе **Sample-based**; **Pulse width** – ширина импульса, задается в процентах от периода при способе **Time-based** или количеством тактов при способе **Sample-based**; **Phase delay** – фазовая задержка, задается в секундах при способе **Time-based** или количеством тактов при способе **Sample-based**; **Sample time** – такт дискретности; флажок **Interpret vector parameters as 1 - D** – интерпретировать вектор как массив скаляров.



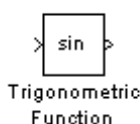
**Источник времени.** *Назначение:* Формирует сигнал, величина которого на каждом шаге равна текущему времени моделирования. *Параметры блока:* **Display time:** Включение отображения времени на пиктограмме; **Decimation:** Шаг обновления времени.



**Блок скалярного произведения.** *Назначение:* Выполняет вычисление скалярного произведения двух векторов. *Параметров блока нет.* Блок выполняет вычисление выходного сигнала в соответствии с выражением

$$y = \text{sum}(\text{conj}(u1)) .* u2,$$

где  $u1$  и  $u2$  – входные векторы;  $\text{conj}$  – операция комплексного сопряжения;  $\text{sum}$  – операция суммирования.



**Trigonometric Function-** тригонометрическая функция. *Назначение:* вычляет выбранную тригонометрическую функцию. *Параметры блока:* **Function-** вид вычисляемой функции. Вид функции выбирается из списка: **sin, cos, tan, asin, acos, atan, atan2, sinh, cosh, tanh.** **Output signal type-** тип выходного сигнала. Тип выходного сигнала выбирается из списка: **auto-** автоматическое

определение типа, **real-** действительный сигнал, **complex-** комплексный сигнал. При векторном или матричном входном сигнале блок выполняет поэлементное вычисление заданной функции.



**Блок вычисления комплексного числа** по его действительной и мнимой части. *Параметры блока:*

**Input:** Значение параметра выбирается из списка:

**Real** – действительная часть;

**Image** – мнимая часть;

**Real&Imag** – действительная и мнимая часть.

**Блок вычисления действительной и/или мнимой части** комплексного числа. *Параметры блока:*

**Output:** Тип сигнала выбирается из списка:

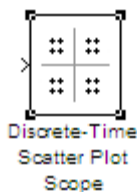
**Real** – действительная часть;

**Image** – мнимая часть;

**Real&Imag** – действительная и мнимая часть.

Входной сигнал блока может быть скалярным, векторным или матричным.





**Discrete-Time Scatter Plot Scope** – блок отображения диаграммы рассеяния фазовых состояний сигнала из подраздела **Comm Sinks** раздела **Communication Blockset** библиотеки **Simulink** [6]. *Назначение:* отображение диаграммы рассеяния фазовых состояний за счет влияния полосы пропускания и помех тракта передачи. *Параметры блока:* Флажок **Show Plotting Properties** – показать графические установки; **Samples per Symbol** – шаг периода символа; **Offset (samples)** –

смещение шагов; **Points displayed** – число отсчетов сигнала, начиная с которого отображается диаграмма; **New points per display** – число отсчетов при обновлении отображения; флажки **Show Rendering Properties**, **Show Axes Properties**, **Show Figure Properties** – показать свойства отображения, осей и фигуры в нашем случае не используются.



**Discrete-Time Signal Trajectory Scope** – блок отображения диаграммы переходов фазовых состояний сигнала из подраздела **Comm Sinks** раздела **Communication Blockset** библиотеки **Simulink** [6]. *Назначение:* отображение диаграммы рассеяния фазовых состояний за счет влияния полосы пропускания и помех тракта передачи. *Параметры блока:* Флажок **Show Plotting Properties** – показать графические установки; **Samples per Symbol** – шаг периода символа; **Offset (samples)** –

смещение шагов; **Points displayed** – число отсчетов сигнала, начиная с которого отображается диаграмма; **New points per display** – число отсчетов при обновлении отображения; флажки **Show Rendering Properties**, **Show Axes Properties**, **Show Figure Properties** – показать свойства отображения, осей и фигуры в нашем случае не используются.

В нашем случае диаграммы блоков **Discrete-Time Scatter Plot Scope** и **Discrete-Time Signal Trajectory Scope** позволяют оценить влияние метода модуляции, полосы пропускания и шумов канала передачи на фазовую диаграмму состояний принятого сигнала.

## 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

### Исходные данные.

Для исследования *BPSK* модема устанавливаем в генераторе *Random Number* с помощью параметра *Sample Time* длительность бита информационного потока  $\tau_b = 1$ , для обеспечения широкополосности шума в генераторе шума канала распространения параметр *Sample Time* задать равным *0.0125*; частоты опорных гармонических генераторов выставить равными  $\omega_0 = 15 \cdot \pi$  радиан/сек; для корректной работы блока *Averaging Power Spectral Density* следующие параметры: *Length of buffer* – 128, *Number of points for fft* – 512, *Plot after how many points* – 64, *Sample time* – 0.05. Все основные параметры блоков, в качестве подсказок указаны на рис. 2.1 и 2.2 над блоками.

### Экспериментальное задание.

1. Собрать *Sim*-модели *BPSK* модемов с приёмником прямого преобразования и корреляционным приёмником, показанные на рисунках 2.1 и 2.2. Параметры моделей задать, как показано на рис. 2.1 и 2.2. Отладку моделей вести при отключенных шумах канала распространения.
2. Определить при каком уровне шума появляется вероятность появления битовой ошибки равная *0.001* для исследуемых моделей. По полученным данным рассчитать *SNR* (в *dB*). Длину информационного потока установить порядка *1000* битов. Данные исследования занести в отчет.
3. Сравнить результаты измерения помехоустойчивостей (*SNR*) *BPSK* модемов и сделать выводы.
4. Составить отчёт по проделанной работе (цели, задачи, функциональная схема, принцип работы, наиболее важные осциллограммы и спектрограммы, выводы).



## 6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип **BPSK** манипуляции (модуляции).
2. Принцип приёмника прямого преобразования (синхронного детектирования).
3. Принцип работы корреляционного приёмника.
4. Устройство **BPSK** модулятора.
5. Назначение ФНЧ (**LF**) **BPSK** демодулятора.
6. Назначение полосового фильтра в **BPSK** модеме.
7. От чего зависит вероятность появления битовых ошибок?
8. Какова помехоустойчивость **BPSK** модуляции среди **MPSK** модуляций?
9. Какова спектральная эффективность **BPSK** модуляции среди **MPSK** модуляций?
10. Чем определяется полоса пропускания псевдослучайного битового потока?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Муравьёв В.В. Полосовая модуляция в системах телекоммуникаций: учеб.-метод. пособие / В.В. Муравьёв, С.А. Кореневский, Т.М. Печень. – Минск: БГУИР, 2019.- 79 с.
2. Леонидов В.В. Конспект лекций «Модуляция и демодуляция цифровых сигналов». Учебно-методический комплект по дисциплине «Цифровая обработка». МГТУ имени Н.Э. Баумана. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://leonidov.su/wp-content/uploads/2020/04/Modulation-and-Demodulation-of-Digital-Signals-Lecture-V.V.-Leonidov.pdf> (дата обращения 09.09.2022).
3. Сигналы с двоичной фазовой манипуляцией (BPSK). [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.dsplib.org/content/signal\\_bpsk/signal\\_bpsk.html](https://ru.dsplib.org/content/signal_bpsk/signal_bpsk.html) (дата обращения 14.09.2022).
4. Гультияев А.К. MatLab 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows: Практическое пособие / А.К. Гультияев – СПб.: КОРОНА принт, 2001.– 400 с.
5. Черных И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений. / Под общ. ред. В.Г. Потемкина – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.– 496 с.
6. Дьяконов В.П. MatLab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения. Сер. Библиотека профессионала / В. П. Дьяконов - М.: СОЛОН-Пресс, 2005.– 800 с.
7. Дьяконов В.П. MatLab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Сер. Библиотека профессионала / В. П. Дьяконов - М.: СОЛОН-Пресс, 2005.– 576 с.