

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Кологривов В. А.
Игумнова Н.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ MSK МОДУЛЯЦИИ

Методические указания по лабораторной работе в среде функционального моделирования Simulink системы MatLab для студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Томск 2020

УДК 621.396.61+621.376.3

ББК 32.811.7

К 611

Рецензент:

Захаров Ф.Н., доцент кафедры радиотехнических систем ТУСУР, канд.техн.наук

Кологривов В. А., Игумнова Н. А.

К 611 Исследование MSK модуляции: методические указания по лабораторной работе для студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» / Кологривов В. А., Игумнова Н. А. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2020 – 16 с.

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

Лабораторная работа «Исследование MSK-модуляции» посвящена экспериментальному исследованию MSK-модема с использованием пакета функционального моделирования Simulink системы для инженерных и научных расчетов MatLab.

Работа «Исследование MSK-модуляции» относится к циклу лабораторных работ по разделу «Модуляция/Демодуляция», входящему в дисциплины по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

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

Одобрено на заседании каф. РТС протокол № 9 от 02.06.20

УДК 621.396.61→621.376.3

ББК 32.811.7

© Кологривов В. А., Игумнова Н. А., 2020 г.

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2020 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О MSK-МОДУЛЯЦИИ	4
1.1 Теоретические сведения о MSK-модуляции	4
2 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ SIM-МОДЕЛИ MSK-МОДЕМА.....	6
3 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПАКЕТА SIMULINK И ИСПОЛЬЗУЕМЫХ БЛОКОВ.....	9
3.1 Запуск и работа с пакетом Simulink	9
3.2 Описание используемых блоков библиотеки Simulink	11
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ	14
5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	15
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	16

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О MSK-МОДУЛЯЦИИ

Цель работы: изучение способов реализации и приема MSK-сигналов использованием пакета функционального моделирования *Simulink*.

1.1 Теоретические сведения о MSK-модуляции

Частотная манипуляция – вид манипуляции, при которой скачкообразно изменяется частота несущего колебания в зависимости от значений символов информационной последовательности. У исследуемого вида MSK-модуляции минимальный разнос частот и фаза непрерывна, т.е. не имеет скачков. Данному виду манипуляции соответствует разнос частот, равный $\Delta f = 1/(2 \cdot T)$, где T – длительность бита, что соответствует условию ортогональности несущих.

По рисунку 1.1 видно, что главный лепесток MSK-сигнала шире чем главный лепесток спектра QPSK сигнала, но важной особенностью MSK-сигналов является быстрое спадание боковых лепестков. Большая скорость затухания лепестков является следствием того, что при MSK-модуляции плавные фазовые переходы [1].

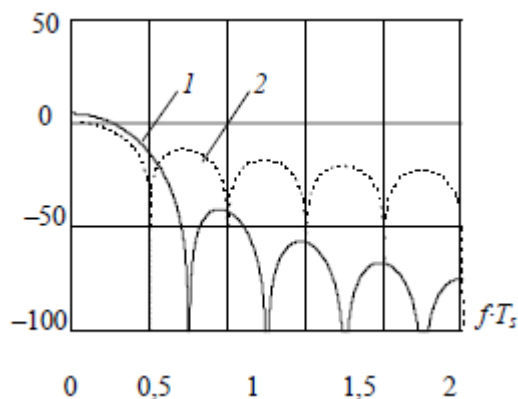


Рисунок 1.1 – Спектральная плотность мощности MSK-сигнала (1) и QPSK-сигнала (2)

MSK-модуляцию можно реализовать с помощью различных способов:

1. с помощью управляемого автогенератора;
2. с помощью переключаемых генераторов;
3. с помощью квадратурного модулятора.

Принять MSK-сигнал можно с помощью:

1. синхронного детектора;
2. корреляционного приемника.

Синхронное детектирование заключается в умножении принимаемого сигнала на опорное колебание, совпадающее с несущей, и последующем выделении полезного сигнала.

При корреляционном приеме определяется наличие корреляции между принимаемым и опорным сигналом. Для получения отсчета корреляционной функции накапливаются отсчеты принятого и опорного сигналов и берется сумма покомпонентных произведений отсчетов.

Приемник может быть прямого преобразования, т.е. используемый гетеродин работает на частоте полезного сигнала.

Функциональная схема MSK-модема представлена на рисунке 1.2.

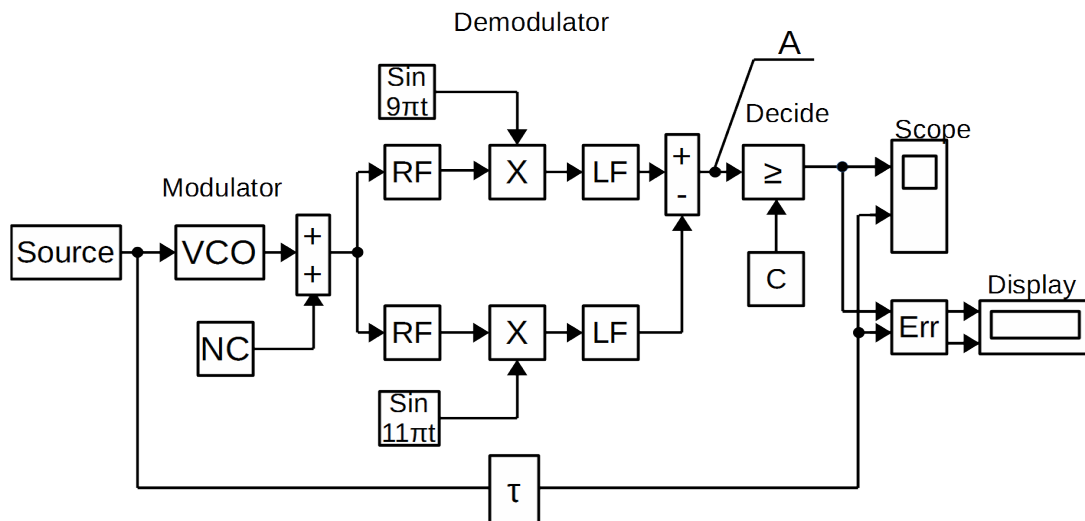


Рисунок 1.2 – Функциональная схема MSK-модема с использованием генератора управляемого напряжением (VCO) и синхронного детектора

Функциональная модель содержит: источник информационного потока данных (Source), модулятор, модель канала распространения, фильтры, демодулятор, подсистему принятия решений (Decide), опирающуюся на значение порога (C), регистрирующие приборы в виде двухканального осциллографа (Scope) и детектора ошибок (Err), подключенного к дисплею (Display). На вторые входы осциллографа и детектора ошибок от источника данных организуется «прямой канал» с необходимой задержкой (τ).

Блок Source формирует передаваемую последовательность. Далее в схеме в зависимости от передаваемого символа ГУН (VCO) передает одну из частот. Затем сформированный сигнал поступает в модель канала распространения, где к нему добавляется белый гауссовский шум NC. После канала распространения следует демодулятор. Демодулятор реализован в соответствии с принципом синхронного детектирования: т.е. полученный сигнал сначала фильтруют (блоки RF) от шумов канала распространения, затем происходит умножение на опорный колебание и выделение полезного сигнала с помощью фильтров низких частот LF. Фильтры должны быть настроены на оптимальную полосу частот, такую, при которой качество связи наилучшее, т.е. минимально количество ошибок и хорошая помехоустойчивость.

2 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ SIM-MODEЛИ MSK-MОДЕМА

На рисунке 2.1 представлен MSK-модем, в котором модуляция выполняется с помощью генератора, управляемого напряжением (ГУН), а демодуляция методом синхронного детектирования.

Источником сигнала является блок *Random Number*. Данный блок генерирует последовательность псевдослучайных чисел. Далее этот поток преобразуется в однополярный поток случайных чисел (1 и 0). Преобразование происходит с помощью блоков *Sign*, *Constant* и *Relational operator*. Блок *Sign* приравнивает амплитуду сигнала к ± 1 или 0 в зависимости от поступающего сигнала, последующее сравнение с нулем превращает биполярную последовательность в однополярную. Однополярная случайная последовательность поступает в генератор, управляемый напряжением, реализованный с помощью блока *Matlab function*. В генераторе установлены частоты, разнос между которыми отвечает условию ортогональности, в зависимости от поступающих символов проходит переключение несущих частот. Далее с помощью блока *Sin* формируется гармоническое колебание соответствующей несущей.

После источника и модулятора следует модель канала распространения. Она состоит из блоков *Sum* и *Random Number*. Блок *Random Number* в данном случае выполняет роль источника шума канала распространения.

Следующей частью схемы является демодулятор. Сигнал после канала распространения попадает на полосовой фильтр, где формируется требуемая для обработки полоса. Далее полученный сигнал перемножается с опорным колебанием и проходит фильтрацию в ФНЧ. Т.е. происходит синхронное детектирование сигнала. На последнем этапе обработки происходит восстановление формы исходного сигнала.

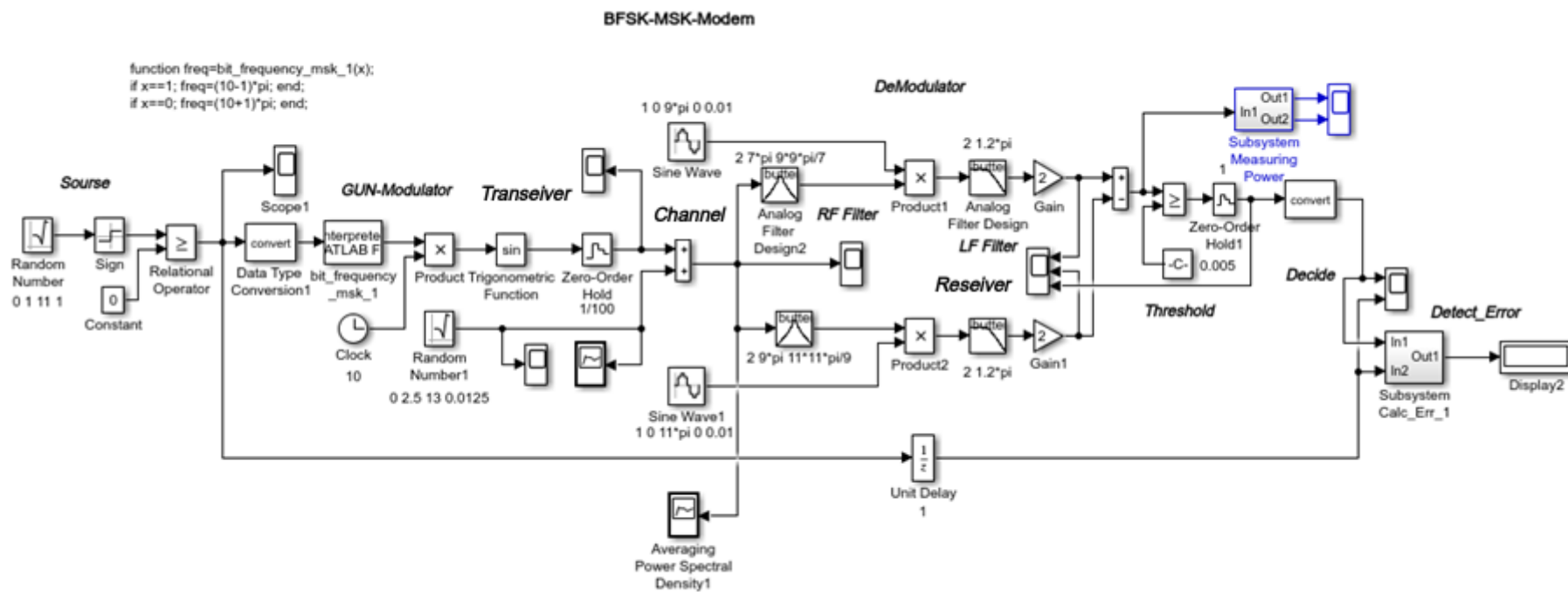


Рисунок 2.1 – Модем MSK на основе ГУН и синхронного приема

Подсистема измерения мощности сигнала выглядит следующим образом (см. рисунок 2.2).

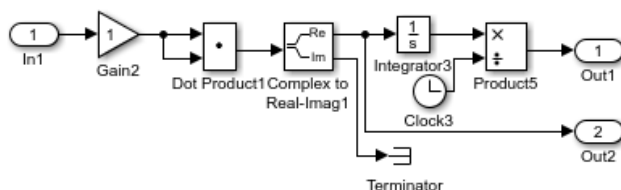


Рисунок 2.2 – Подсистема измерения мощности

Подсистема подсчета ошибок представлена на рисунке 2.3.

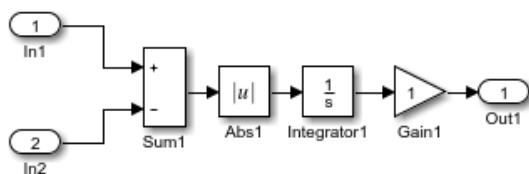


Рисунок 2.3 – Подсистема подсчета ошибок

На первый вход подается сигнал, прошедший через всю схему, на второй вход подан сигнал с генератора сигнала с необходимой задержкой. К выходу подсистемы присоединен дисплей, на котором в случае наличия ошибок, будет указано их количество.

Отношение сигнал/шум (SNR) измеряется по следующей методике: SNR измеряется в точке А (рисунок 1.2). 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:

$$SNR = S / (SN - S). \tag{2.1}$$

Результаты измерений фиксируется в дБ.


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

3 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 [2 – 5].

3.1 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 3.1).

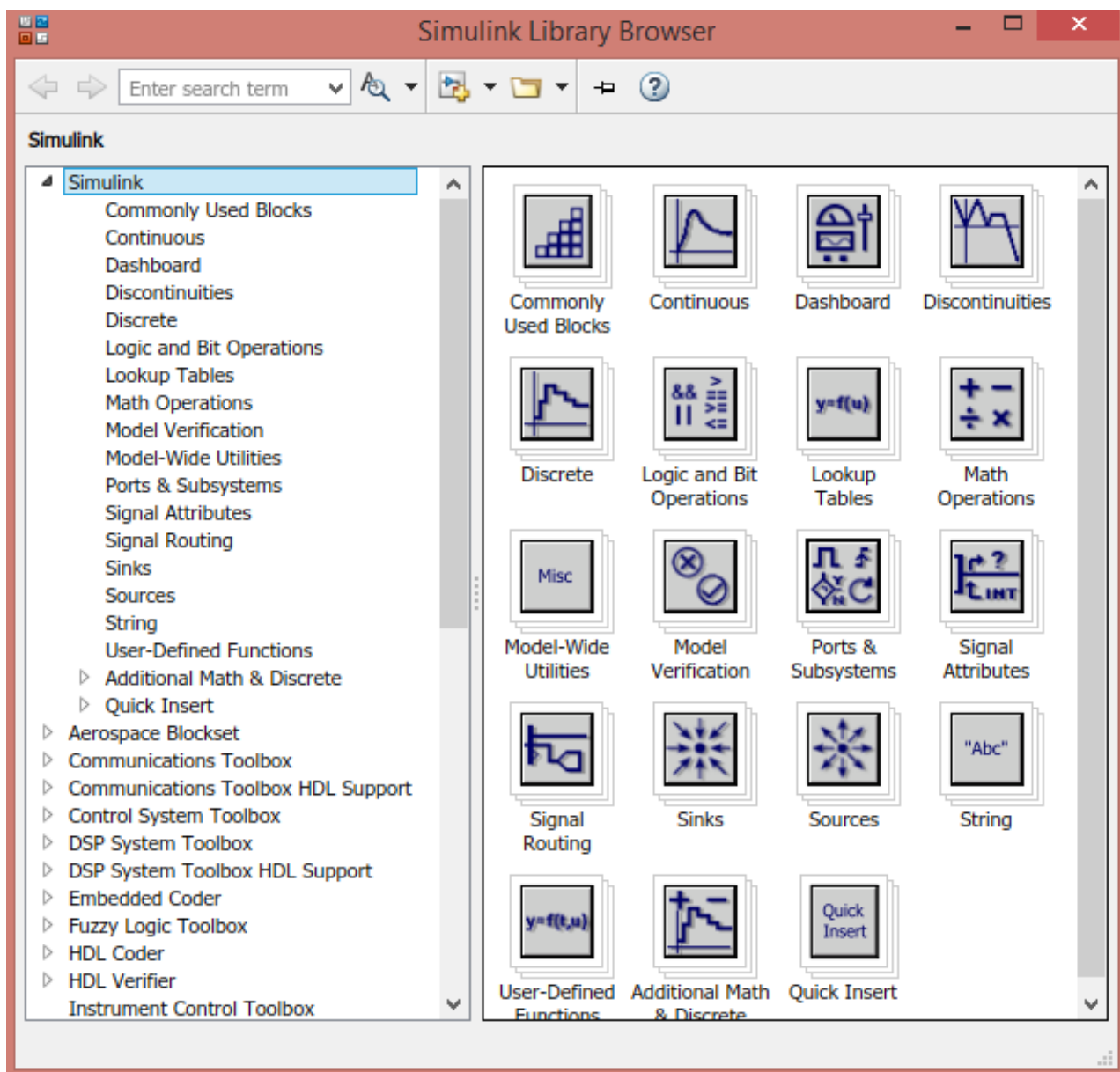


Рисунок 3.1 – Библиотека блоков *Simulink Library Browser*

На рисунке 3.1 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.

3.2 Описание используемых блоков библиотеки Simulink

Ниже описаны основные блоки базовых разделов библиотеки *Simulink*, используемые в функциональной схеме MSK-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.

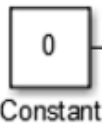


Sign

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

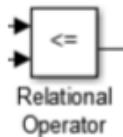
$$\text{sign} = \begin{cases} -1, & \text{где } x < 0; \\ 0, & \text{где } x = 0; \\ 1, & \text{где } x > 0. \end{cases}$$

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



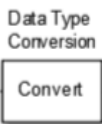
Constant

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.

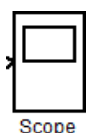


Product

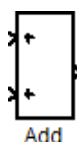
Product – блок умножения и деления. Назначение: вычисление произведения текущих значений сигналов. Параметры блока: *Number of inputs* – количество входов, может задаваться как число или как список знаков. В списке знаков можно использовать знаки: * – умножить и / – разделить. *Multiplication* – способ 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.



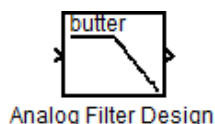
Sine Wave – блок источника синусоидального сигнала. Назначение: формирование синусоидального сигнала с заданной частотой, амплитудой, фазой и смещением. Параметры блока: *Sine Type* – способ формирования сигнала реализуется двумя алгоритмами: *Time-based* – по текущему времени (для аналоговых систем) 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.



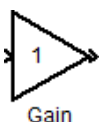
Scope – блок осциллографа. Назначение: построение графиков исследуемых сигналов как функций времени. Открытие окна осциллографа производится двойным щелчком ЛКМ на пиктограмме блока. В случае векторного сигнала каждая компонента вектора отображается отдельным цветом. Настройка окна осциллографа выполняется 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.



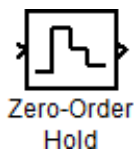
Add – блок сумматора. Назначение: вычисление алгебраической суммы текущих значений входных сигналов. Параметры блока: *Icon shape* – форма блока, выбирается из списка: *round* – круг; *rectangular* – прямоугольник. *List of sign* – список знаков из набора: + – плюс; - – минус, | – разделитель. Флажок *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.



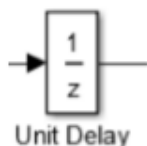
Analog Filter Design – блок аналогового фильтра заданного метода проектирования и типа из подраздела *Filter Design*; подраздела *Filtering*, раздела *DSP Blockset*. Назначение: аналоговая фильтрация низкочастотных составляющих спектра входного сигнала. Параметры блока: *Design method* – метод проектирования,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



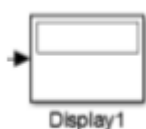
Gain – блок усилителя. Назначение: блок *Gain* умножает входной сигнал на постоянный коэффициент; Параметры блока: *Multiplication* – способ выполнения операции, значение параметра выбирается из списка: *Element-wise $K*u$* – поэлементный; *Matrix $K*u$* – матричный, коэффициент усиления является левосторонним 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.



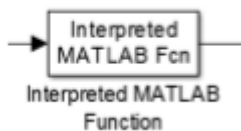
Zero-Order Hold – экстраполятор нулевого порядка. Назначение: экстраполяция входного сигнала на интервале дискретизации. Блок фиксирует значение входного сигнала в начале интервала дискретизации и поддерживает на выходе это значение до окончания интервала дискретизации. Затем выходной сигнал изменяется 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.



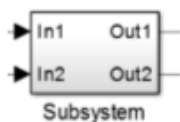
Unit delay – блок единичной дискретной задержки. Назначение: выполняет задержку дискретного сигнала на заданный шаг модельного времени. Параметры блока: *Initial conditions* – начальное значение выходного сигнала; *Sample time* – шаг модельного времени.



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.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Собрать Sim-модель MSK модема и написать Matlab-функцию `bit_frequency_msk_1` (см. рисунок 2.1).
2. Пронаблюдать и зафиксировать основные осциллограммы, иллюстрирующие работу модема.
3. Получить зависимость вероятности появления битовых ошибок от соотношения сигнал/шум. Длину информационного потока установить порядка 1000 битов. Исследование вести от появления одной ошибки до семи-восьми ошибок (три-четыре точки), фиксируя SNR в dB. Данные исследования занести в отчет.
4. По полученным данным построить график зависимости вероятности появления битовой ошибки от соотношения сигнал/шум.
5. Определить оптимальную полосу пропускания ФНЧ демодулятора, обеспечивающую минимум ошибок. Зафиксировать результаты.
6. Изменить разнос частот в функции `bit_frequency_msk_1` (см. рисунок 2.1) на $\pm 0,5\pi$. Проследить за работой схемы, в частности за фазой при смене несущих.
5. Составить отчет по проделанной работе.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему при модуляции используются ортогональные сигналы?
2. В чем заключается явление непрерывности фазы при данном виде модуляции?
3. Объясните принцип работы модулятора.
4. Объясните принцип работы демодулятора.
5. Изобразите схему ГУН и поясните принцип работы.
6. Как ведут себя боковые лепестки спектра MSK-сигнала?
7. Опишите способы реализации MSK- модуляции.
8. MSK-модуляция частотная или фазовая?
9. Опишите способы возможного приема MSK-сигналов.
10. Опишите суть синхронного детектирования.
11. Опишите суть корреляционного приема.
12. Что такое прямое преобразование?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов / В.А. Галкин – М.: Горячая линия–Телеком, 2007.– 432 с.
2. Гультяев А.К. MatLab 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows: Практическое пособие / А.К. Гультяев – СПб.: КОРОНА принт, 2001.- 400 с.
3. Черных И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений. / Под общ. ред. В.Г. Потемкина – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.- 496 с.
4. 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
5. Дьяконов В.П. MatLab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Сер. Библиотека профессионала / В. П. Дьяконов - М.: СОЛОН-Пресс, 2005.- 576 с.