

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

Кологривов В. А.  
Федорова И. А.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И РАССТОЯНИЕ**

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

Томск  
2020

УДК 621.398.91+621.398.92

ББК 32.811.3

К 611

**Рецензент:**

**Пушкарев В. П.**, доц. каф. РТС ТУСУР, к.т.н.

**Кологривов В. А., Федорова И. А.**

К 611 Исследование влияния скорости передачи на чувствительность и расстояние: методические указания по лабораторной работе для студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» / Кологривов В. А., Федорова И. А. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 19 с.

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

Лабораторная работа «Исследование влияния скорости передачи на чувствительность и расстояние» посвящена экспериментальному исследованию влияния скорости передачи на чувствительность и, следовательно, дальность действия системы на основе BPSK модема с применением формы огибающей модуль синуса в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB.

Работа «Исследование влияния скорости передачи на чувствительность и расстояние» относится к циклу лабораторных работ, входящему в дисциплины по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

В описании сформулирована цель лабораторной работы, приведены краткие теоретические сведения об UNB-технологии, BPSK-модуляции и необходимые для выполнения работы расчетные соотношения, 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 № 10 от 11.06.20

УДК 621.398.91+621.398.92

ББК 32.811.3

© Кологривов В. А., Федорова И. А., 2020 г.

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

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
1.1 Технология Ultra Narrow Band – UNB.....	4
1.2 Теоретические сведения о BPSK-модуляции.....	4
2 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПАКЕТА SIMULINK И ИСПОЛЬЗУЕМЫХ БЛОКОВ.....	6
2.1 Запуск и работа с пакетом Simulink.....	6
2.2 Описание используемых блоков библиотеки Simulink.....	7
3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА.....	11
4 СВЯЗЬ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКА И РАССТОЯНИЯ ПЕРЕДАЧИ.....	13
5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.....	17
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	18
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	19

## 1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Цель работы: изучить принцип влияния скорости передачи данных на чувствительность и дальность действия на основе BPSK-модуляции.

### 1.1 Технология Ultra Narrow Band – UNB

Технология, основанная на сверхузкополосной модуляции (Ultra Narrow Band), была предложена для решения проблем в условиях нехватки частотного ресурса. Данная технология позволяет передавать сигнал с существенным сжатием спектра.

Передача данных происходит на низких скоростях (100 бит/с), а занимаемая сигналом полоса узкая (менее 1 кГц). Поэтому мощность, приходящаяся на единичный интервал частот (1 Гц) – спектральная мощность – выше, в сравнении с широкополосным сигналом [1].

В UNB системах используется сверхмалая полоса пропускания (порядка 100 Гц). За счет этого обеспечивается низкий уровень собственного шума, т.е. высокая чувствительность, которая достигает  $-140$  дБм, а бюджеты линий при условии использования антенн с усилением составляют  $-160$  дБм, что позволяет достичь хороших показателей по продолжительности автономной работы конечных устройств (работа от одной батарейки АА-типа более 10 лет) и дальности связи.

В широкополосных системах связи используются метод последовательного расширения спектра SSS (sequence spread spectrum) и расширение спектра методом линейной частотной модуляции CSS (chirp spread spectrum), в то время как в UNB системах используются фильтры с высокой избирательностью, которые в идеальном случае обеспечивают селективность одного сигнала от других [2].

Высокое соотношение сигнал/шум достигается за счет сверхмалой полосы передачи, при этом необходимо, чтобы погрешность установки частоты передачи была меньше этой полосы (100 Гц). Поэтому основной задачей при проектировании системы на основе данной технологии является обеспечение высокой точности настройки частоты гетеродина, так как даже небольшой уход частоты кварцевого резонатора конечного устройства «выбросит» его рабочую частоту за пределы указанной полосы. Например, при передаче в диапазоне 868 МГц требования к стабильности генераторов должны быть не хуже  $100/868800000$  что примерно  $1,1 \cdot 10^{-7}$ , т. е. уход кварца должен быть меньше 0,1 ppm. Но при производстве крупных партий для уменьшения стоимости используются генераторы с показателями хуже 0,1 ppm.

Существует большое количество осуществления сверхузкополосной модуляции: EBPSK, VMSK, VPSK и т. д. В данной лабораторной работе исследуется модель на основе BPSK-модуляции с применением формы огибающей  $|\sin|$  как наиболее простой и наглядный способ реализации для исследования (например, применяя частотную модуляцию, следует учитывать возникающие в приемнике разностные продукты, что затрудняет выполнение работы). Различные формы огибающей радиоимпульсов позволяют увеличить компактность спектра, что обуславливает большой интерес к их применению в системах связи.

### 1.2 Теоретические сведения о BPSK-модуляции

Двухпозиционная или двоичная фазовая модуляция (BPSK, или 2-PSK, ФМ-2) является одной из простейших разновидностей цифровой модуляции. Принцип двоичной PSK заключается в том, что множеству значений информационного сигнала  $\{0, 1\}$  ставится в однозначное соответствие множество изменений фазы  $\{0, \pi\}$ . При изменении значения информационного сигнала фаза радиосигнала изменяется на  $180^\circ$ .

Временная форма сигнала и его созвездие изображены на рисунке 1.1.

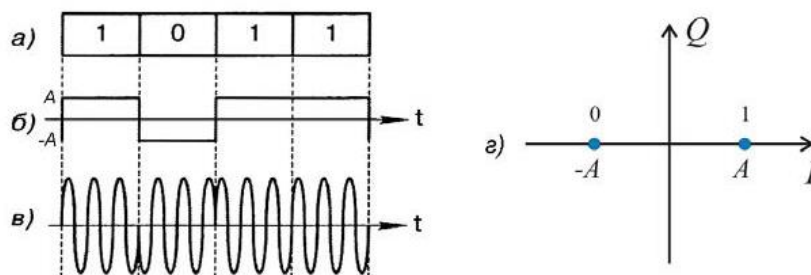


Рисунок 1.1 – Временная форма и сигнальное созвездие BPSK сигнала: а – цифровое сообщение; б – модулирующий сигнал; в – модулированное ВЧ-колебание; г – сигнальное созвездие

Модулированный сигнал можно записать в виде:

$$e(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi(t)), \quad (1.1)$$

где  $\varphi(t)$  – мгновенная фаза, зависящая от модулирующего сигнала;

$A_c$  – амплитуда сигнала.

Формирование BPSK сигнала осуществляется путем умножения модулирующего сигнала на колебания несущей частоты. В этом случае фазовая модуляция будет рассматриваться как вариант амплитудной модуляции с активной паузой, где сигнал с амплитудой  $A_c$  принимает значения минус 1 и +1. Такое изменение значения амплитуды эквивалентно изменению фазы на  $180^\circ$ . Операция умножения выполняется в балансных модуляторах (смесителях) с последующей фильтрацией частот высших порядков.


Сигналы BPSK обладают наилучшей потенциально достижимой помехоустойчивостью, т. е. при заданном отношении сигнал/шум (SNR) имеют наименьшую вероятность ошибочного приема. Однако при этом не обеспечивается высокая скорость передачи информации, поскольку каждому значению сигнала ставится в соответствие только один информационный символ. Для существенного повышения скорости используют многопозиционные сигналы, когда радиосигнал в одном тактовом интервале может принимать  $M$  различных значений [3 – 5].

## 2 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. Пакет *Simulink* обширной библиотекой готовых блоков с модифицируемыми параметрами для построения моделей рассматриваемых систем и наглядными средствами визуализации результатов моделирования [6, 7].

### 2.1 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*. Существует три способа запуска:

- 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 2.1).

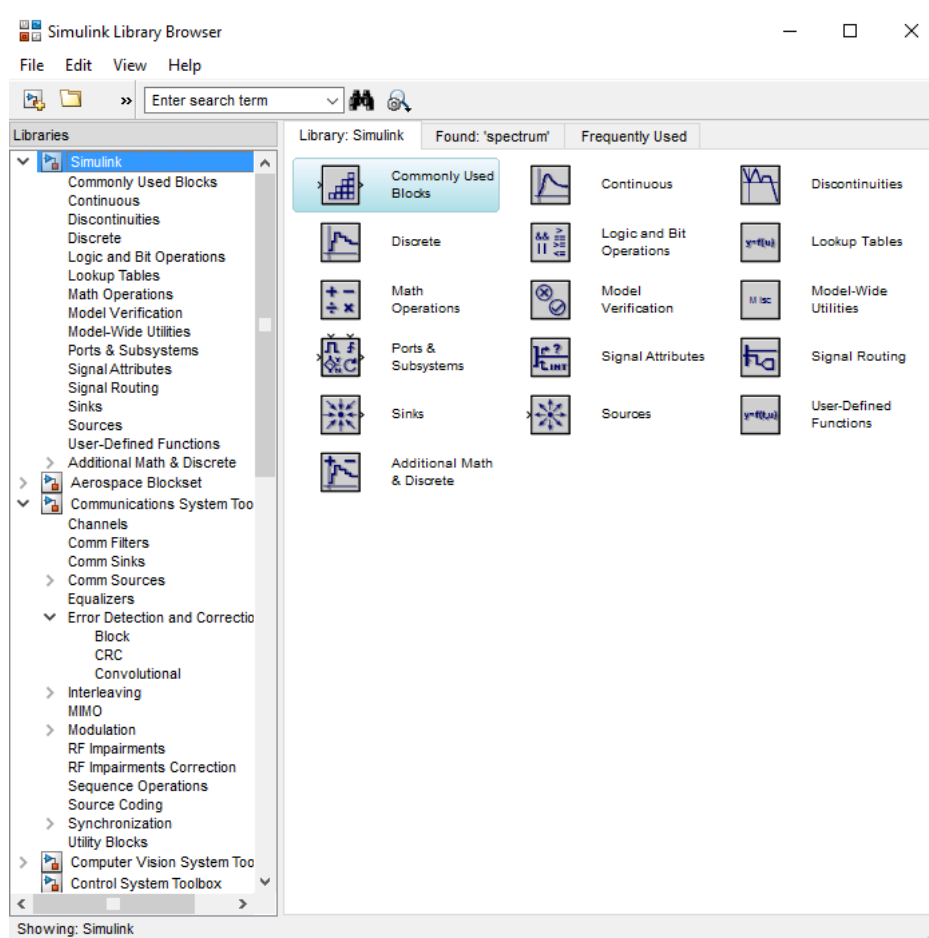


Рисунок 2.1 – Библиотека блоков *Simulink Library Browser*

На рисунке 2.1 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.

## 2.2 Описание используемых блоков библиотеки *Simulink*

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



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

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

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



*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.

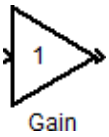


*Add* – блок сумматора. Назначение: вычисление алгебраической суммы текущих значений входных сигналов. Параметры блока: *Icon shape* – форма блока, выбирается из списка: *round* – круг; *rectangular* – прямоугольник. *List of sign* – список знаков из набора: + – плюс; - – минус, | – разделитель. Флажок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

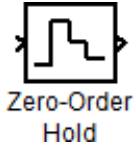


*Analog Filter Design* – блок аналогового фильтра заданного метода проектирования и типа из подраздела *Filter Design*; подраздела *Filtering*, раздела *DSP Blockset*. Назначение: аналоговая фильтрация низкочастотных составляющих спектра входного сигнала. Параметры блока: *Design method* – метод проектирования,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



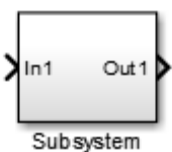
*Zero-Order Hold* – блок экстраполятора нулевого порядка. Назначение: экстраполяция входного сигнала на интервале дискретизации. Блок фиксирует значение входного сигнала в начале интервала дискретизации и поддерживает на выходе это значение до окончания интервала дискретизации. Затем выходной сигнал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

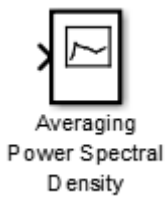


*Display* – блок цифрового дисплея. Назначение: отображает значение сигнала в виде числа. Параметры: *Format* – формат отображения данных. Параметр *Format* может принимать следующие значения: *short* – 5 значащих десятичных цифр, *long* – 15 значащих десятичных цифр, *short\_e* – 5 значащих десятичных 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...*).



*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.



*Averaging Power Spectral Density* – анализатор усредненной спектральной плотности мощности. Назначение: отображение частотной зависимости спектральной плотности мощности. Параметры: *Length of buffer* – длина буфера; *Number of points for fft* – количество точек; *Plot after how many points* – количество точек, по которым выводится график; *Sample time* – такт дискретности.



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

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

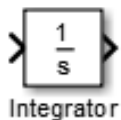
где  $u1$  и  $u1$  – входные векторы;

*conj* – операция вычисления комплексно-сопряженного числа;

*sum* – операция вычисления суммы.



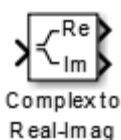
*Abs* – блок вычисления модуля. Назначение: выполняет абсолютного значения величины сигнала. Параметры: *Saturate on integer overflow* – подавление переполнение целого; *Enable zero crossing detection* – фиксирование прохождения сигнала через нулевой уровень.



*Integrator* – интегратор. Назначение: интегрирование входного сигнала. Параметры: *External reset* – внешний сброс. Выбирается из списка: *none* – нет (сброс не выполняется); *rising* – нарастающий сигнал (передний фронт сигнала); *falling* – спадающий сигнал (задний фронт сигнала); *either* – нарастающий либо спадающий сигнал; *level* – ненулевой сигнал (сброс выполняется, если сигнал на управляющем входе становится не равным нулю). *Initial condition source* – источник начального значения выходного сигнала. Выбирается из списка: *internal* – внутренний; *external* – внешний. *Initial condition* – начальное условие. *Limit output* – ограничение выходного сигнала. *Upper saturation limit* – верхний предел выходного сигнала. *Lower saturation limit* – нижний предел выходного сигнала. *Show saturation port* – показать на пиктограмме порт насыщения. Выходной сигнал данного порта может принимать следующие значения: нуль, если интегратор не находится на ограничении; +1, если выходной сигнал интегратора достиг верхнего предела; -1, если выходной сигнал интегратора достиг нижнего предела. *Show state port* – отобразить/скрыть порт состояния блока. *Absolute tolerance* – абсолютная погрешность. *Enable zero crossing detection* – определять прохождение сигнала через нулевой уровень.



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



*Complex to Real-Imag* – блок вычисления действительной и (или) мнимой части комплексного числа. Назначение: вычисляет действительную и (или) мнимую часть комплексного числа. Параметры: *Output* – выходной сигнал. Тип сигнала

выбирается из списка: *Real* – действительная часть; *Image* – мнимая часть; *Real&Imag* – действительная и мнимая часть.



Clock

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

### 3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Функциональная модель BPSK модема с формой радиоимпульсов  $|sin|$  с исходной скоростью передачи  $Speed=1$  приведена на рисунке 3.1. Параметры блоков для удобства прописаны прямо на схеме. Источником сигнала является блок *Random Number*. Данный блок генерирует псевдослучайную последовательность с нормальным распределением. Далее этот поток поступает на блок *Sign*, который преобразует данные в биполярную псевдослучайную последовательность. Формирование огибающей радиоимпульсов производится блоками *Sine Wave* и *Abs*. Полученный сигнал поступает на вход *Product1*, где происходит перемножение текущих значений сигнала с огибающей  $|sin|$ . В блоке *Product2* сигнал перемножается с колебанием несущей частоты, сформированный блоком *Sine Wave1*. Для проведения модельных экспериментов поставлен блок *Gain* с параметром 1. Блоки *Zero Order Hold1* и анализатор спектра *Spectrum Scope1* обеспечивают наблюдение спектра радиоимпульсов с огибающей  $|sin|$ . Блоки *Sine Wave2*, *Product3*, *Zero Order Hold* и анализатор спектра *Spectrum Scope* обеспечивают наблюдение спектра радиоимпульсов с прямоугольной огибающей.

После источника и модулятора с использованием блоков *Sum* и *Random Number1* реализована модель канала распространения. Блок *Random Number* в данном случае выполняет роль источника шума канала распространения. С помощью параметра *Sample time* обеспечивается широкополосность шумов, а параметром *Variance* регулируется мощность в процессе модельного эксперимента. Для контроля равномерности шумов канала распространения поставлен блок *Averaging Power Spectral Density1*.

В приемной части сигнал сначала поступает на полосовой фильтр *Analog Filter Design*, который позволяет подавить нежелательные излучения. Отфильтрованный сигнал подается на блок *Product4*, где путем перемножения сигнала с колебаниями опорного генератора несущей частоты (блок *Sine Wave3*) происходит демодуляция. Высокочастотные составляющие подавляются низкочастотным фильтром *Analog Filter Design1*. После ФНЧ сигнал усиливается (блок *Gain*) и поступает на блок *Zero-Order Hold2*, который фиксирует значение входного сигнала в начале интервала дискретизации и удерживает его до конца интервала. Блок *Sign1* завершает процесс регенерации формы принятого сигнала. Блок подсистемы *Subsystem Measuring Power2* позволяет измерять мощность сигнала, либо смеси сигнала с шумом в точке принятия решений. Блок подсистемы *Calc\_Err\_1* с помощью *Display1* визуализирует количество битовых ошибок.

Для контроля формы спектра радиосигналов и мощности на входе приемника использованы блоки *Averaging Power Spectral Density2* и *Subsystem Measuring Power*.

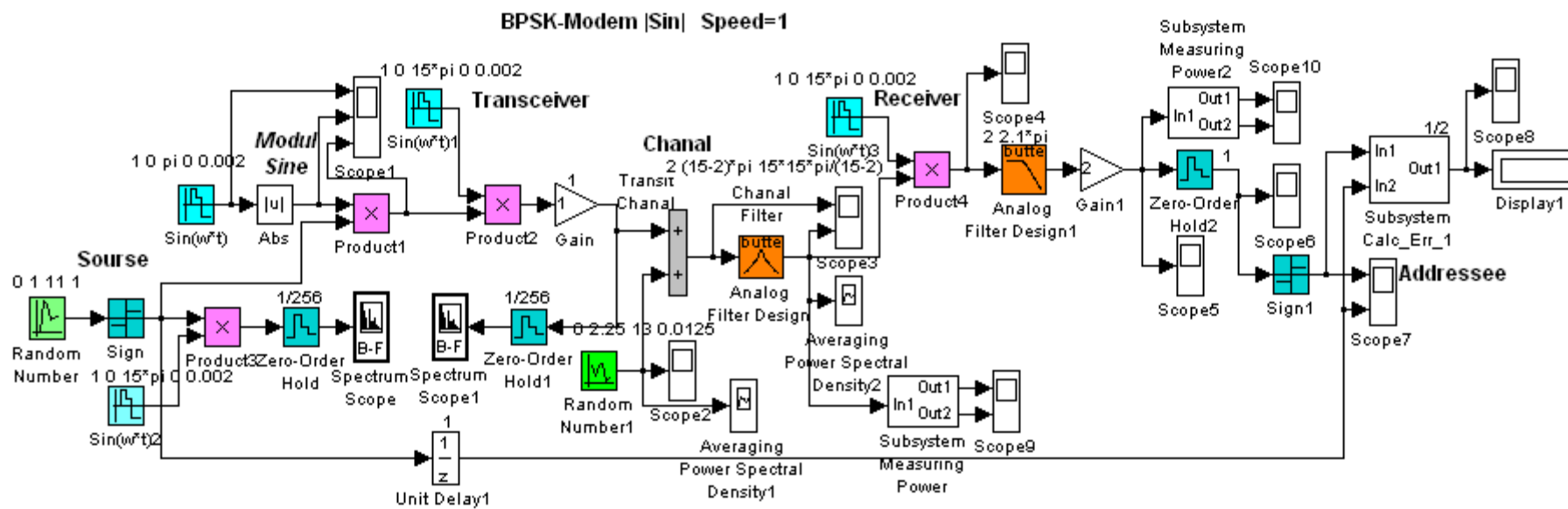


Рисунок 3.1 – Функциональная модель BPSK модема с формой радиоимпульсов  $|sin|$

Для проведения оценки помехоустойчивости на выходе демодулятора перед блоком принятия решения реализован блок измерителя мощности, позволяющий производить измерение SNR в процессе модельного эксперимента. Функциональная схема измерителя мощности сигнала (блок *Subsystem Measuring Power*) представлена на рисунке 3.2.

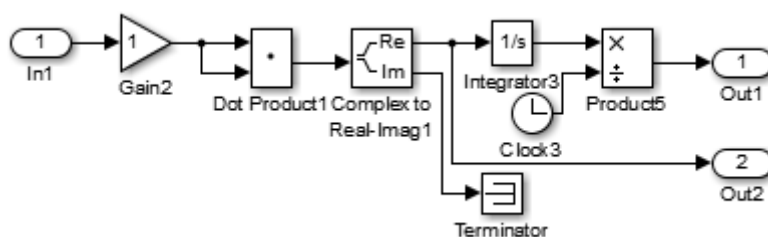


Рисунок 3.2 – Функциональная схема измерителя мощности

Для обеспечения контроля ошибок реализован блок детектора ошибок (блок *Subsystem Calc\_Err*), функциональная схема которого представлена на рисунке 3.3. На вход *In1* поступает сигнал, прошедший через всю схему, а на вход *In2* – сигнал от источника. При наличии ошибок на дисплее (блок *Display1*) будет отображаться их количество.

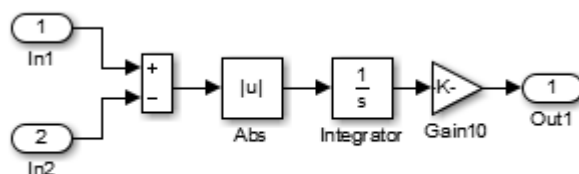


Рисунок 3.3 – Функциональная схема детектора ошибок

#### 4 СВЯЗЬ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКА И РАССТОЯНИЯ ПЕРЕДАЧИ

Установление связи чувствительности приемника с расстоянием передачи будем производить на основе упрощенного выражения связывающего уровень сигнала в точке приема при заданной изотропно-излучаемой мощности

$$P_{min} = \frac{P_s}{A \cdot r^2}, \quad (4.1)$$

где  $P_s$  – изотропно излучаемая мощность сигнала (дБ/Вт);

$A$  – коэффициент, учитывающий условие распространения (дБ);

$r^2$  – коэффициент, учитывающий рассеяние мощности обратно пропорционально расстоянию;

$r$  – расстояние (км).

Пусть  $P_s = 0.5$  Вт,  $A = 100$  дБ,  $r = 2$  км, тогда по формуле 4.1 получаем уровень сигнала, т.е. чувствительность требуемую на расстоянии 2 км. Выполнив вычисления по выражению (4.1), получаем уровень сигнала в точке приема или чувствительность равную  $P_{min} = -109.031$  (дБ/Вт).

Далее, снизив скорость передачи и, соответственно полосу обработки, в 4 раза,

видим, что соотношение сигнал/шум SNR увеличилось в 4 раза. Причем увеличение SNR произошло за счет снижения уровня шума, что эквивалентно, либо увеличению расстояния, согласно (4.1) в  $\sqrt{4}$  раз, либо снижению изотропно-излучаемой мощности в 4 раза, при том же расстоянии.

Подставляя в выражение (4.1) увеличенное в  $\sqrt{4}$  раза расстояние, получаем чувствительность равную  $P_{min} = -115.051$  (дБ/Вт).

Используя выражение (4.1) при сниженной в 4 раза изотропно-излучаемой мощности ( $P_s/4$ ), получаем чувствительность равную  $P_{min} = -115.051$  (дБ/Вт) при исходном расстоянии.

Таким образом, на основании общих представлений приходим к выводу, что снижение скорости передачи эквивалентно либо увеличению SNR и, соответственно расстояния, либо снижению уровня изотропно-излучаемой мощности при том же расстоянии.

Суть лабораторной работы заключается в подтверждении указанных эквивалентностей при сохранении вероятности ошибочного приема.

Для этого исходная функциональная модель дважды перестраивается (на самом деле проще снять копию и поменять скорость передачи (снизив в 4 раза) и полосу обработки (перенастроив полоснопропускающий фильтр и фильтр нижних частот). В первой копии (см. рис. 4.1) устанавливаем прежнее значение параметра блока **Gain** равный 1 и фиксируем изменение мощности шумов канала распространения  $N_c$ , при которой наблюдаются прежние SNR и  $P_b$ . Во второй копии (см. рис. 4.2) устанавливаем значение параметра блока **Gain** равный 1/2 (это эквивалентно снижению мощности сигнала в 4 раза) и убеждаемся, что в пределах незначительной подстройки  $N_c$ , наблюдаются прежние SNR и  $P_b$ .

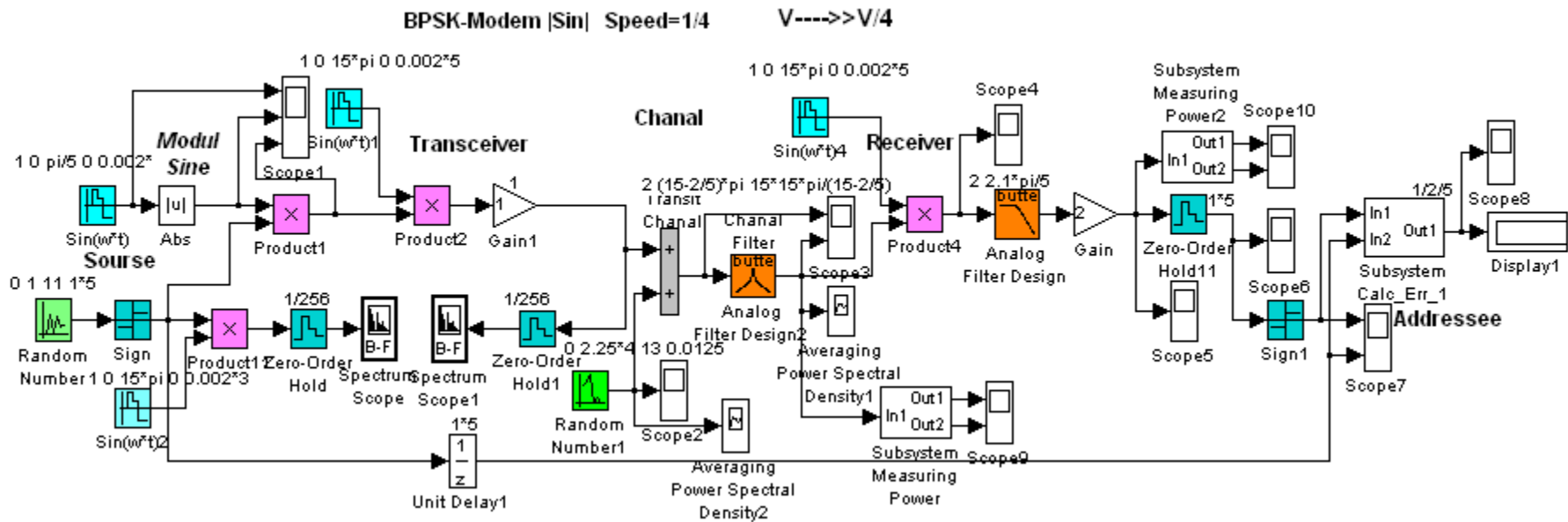


Рисунок 4.1 – Функциональная модель BPSK модема с формой радиоимпульсов  $|sin|$  при сниженной скорости передаче и увеличенных шумах канала распространения

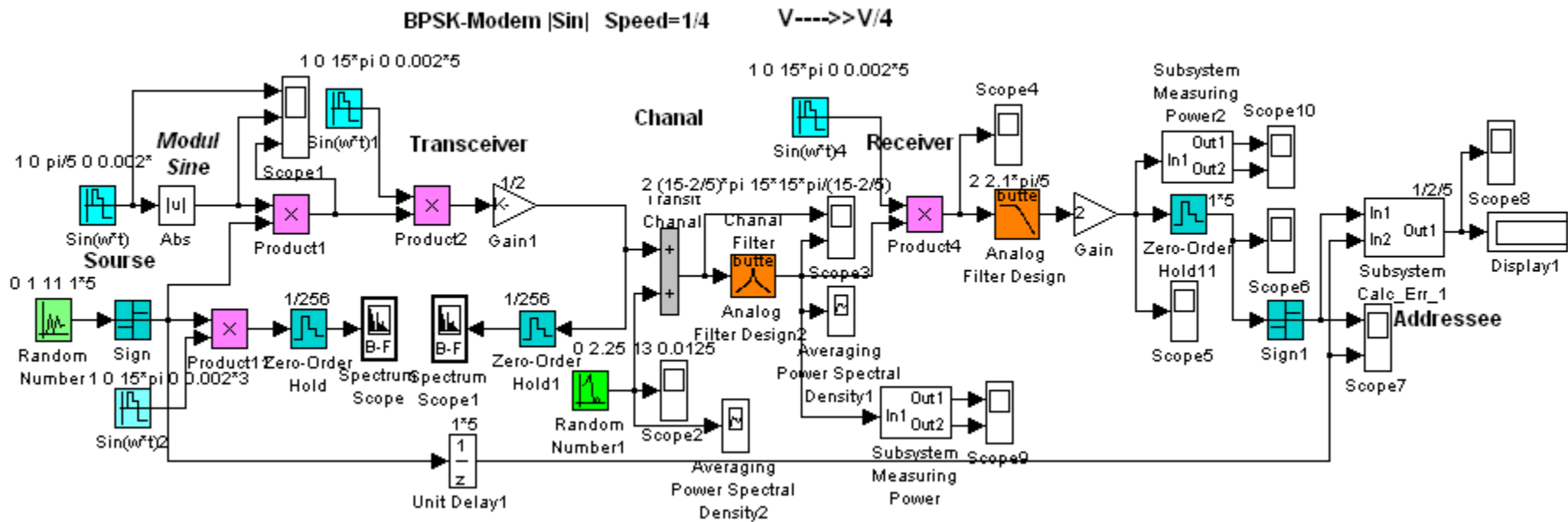


Рисунок 4.2 – Функциональная модель BPSK модема с формой радиоимпульсов  $|sin|$  при сниженной скорости передаче и уменьшенной мощностью сигнала



## Методика оценки помехоустойчивости

Отношение сигнал/шум (SNR) измеряется по следующей методике: выставляется такая мощность (дисперсия) шума  $N$ , при которой число ошибок составляет 1 на 1000 отсчетов, т. е. измерение проводится при вероятности битовой ошибки  $P_b = 10^{-3}$ . Далее вычисляется SNR по следующей формуле:

$$SNR = S / (SN - S). \quad (4.2)$$

Мощность сигнала  $S$  измеряется однократно при отключении шумов. Для построения водопадоподобной характеристики, которая необходима для оценки помехоустойчивости, поэтапно увеличивается мощность шума канала. При этом фиксируется мощность смеси сигнала с шумом  $SN$  и число ошибок, для измерения этих параметров используются измеритель мощности и детектор ошибок соответственно.

## 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Перед допуском к работе дать ответы на контрольные вопросы.

1. Собрать функциональную модель BPSK модема в соответствии с рисунком 3.1
2. Пронаблюдать и зафиксировать основные осциллограммы, иллюстрирующие работу модема.
3. Получить и записать SNR при вероятности появления битовых ошибок  $P_b = 10^{-3}$ , а также уровень шума канала распространения  $N_c$ . Исследование производить при длине информационного потока 1000 бит.
4. Перестроить модель на скорость передачи в 4 раза ниже (см. рис. 4.1) и добиться той же вероятности ошибок  $P_b = 10^{-3}$ , фиксируя SNR и шум канала распространения  $N_c$ . Исследование производить при длине информационного потока 4000 бит.
5. Перестроить модель на скорость передачи в 4 раза ниже (см. рис. 4.2), параметр блока Gain установить равным 1/2, уровень шумов канала распространения  $N_c$  вернуть в прежнее значение и добиться той же вероятности ошибок  $P_b = 10^{-3}$ , путем незначительного изменения шумов канала распространения  $N_c$ , фиксируя SNR. Исследование производить при длине информационного потока 4000 бит.
5. Проанализировать, как влияет скорость передачи на чувствительность и дальность действия. Данные занести в отчет и сделать выводы.
6. Составить отчет по проделанной работе.

## 6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое BPSK-модуляция?
2. В чем заключается принцип работы BPSK модулятора?
3. В чем заключается принцип работы BPSK демодулятора?
4. В чем заключаются преимущества и недостатки BPSK-модуляции по сравнению с другими видами фазовой манипуляции?
5. С какой целью выбрана огибающая радиоимпульса в форме модуля синуса?
6. Объясните методику проведения оценки помехоустойчивости.
7. С какой целью проводится полосовая и низкочастотная фильтрация?
8. В чем заключается суть UNB технологии?
9. Как в UNB достигается сверхнизкое потребление энергии?
10. Как в UNB технологии достигают большой зоны покрытия?
11. В чем проявляется предел снижения скорости передачи и повышения узкополосности?
12. Как изменяется чувствительность приемного тракта с уменьшением полосы пропускания.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Интернет Вещей. Протокол передачи данных для высокочастотных сетей на основе сверхузкополосной модуляции радиосигнала. – М.: Стандартинформ, 2019.- 64 с.
2. Алексеев, В. Сравнительные характеристики широкополосных и узкополосных сетей LPWAN нелицензируемого диапазона для приложения M2M и IoT. – Беспроводные технологии, 2017. Т. 1 № 46 – С. 10-20.
3. Двухпозиционная фазовая манипуляция. [Электронный ресурс] – Режим доступа: helpiks.org
4. Цифровая техника в радиосвязи: Двухпозиционная фазовая модуляция (BPSK). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://digteh.ru/WLL/BPSK.php>.
5. Галкин, В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов / В.А. Галкин – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 432 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.