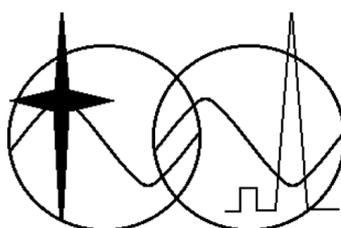


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего профессионального образования**  
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ**  
**УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра средств радиосвязи (СРС)**

Утверждаю:  
Зав. каф. СРС, проф., д.т.н.  
\_\_\_\_\_ Мелихов С.В.  
\_\_\_\_\_ 2015 г.



**Березин Е.А., Кологривов В.А.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ОТ**  
**СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО РАЗНОСКОРОСТНЫМ КАНАЛАМ**  
**С ОДИНАКОВЫМ ТИПОМ МАНИПУЛЯЦИИ**

**Учебно-методическое пособие по лабораторной работе**  
**для студентов направления**  
**«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»**  
**по дисциплине**  
**«Сети и системы мобильной связи»**

Разработчики:  
Доц. каф СРС Кологривов В.А. \_\_\_\_\_  
Студент гр. 1В1 Березин Е.А. \_\_\_\_\_

**Томск 2015**

**Березин Е.А., Кологривов В.А.**

**«Исследование зависимости помехоустойчивости от скорости передачи данных по разноскоростным каналам с одинаковым типом манипуляции»:** Учебно-методическое пособие по лабораторной работе для студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи. – Томск: ТУСУР. Научно-образовательный портал, 2015.– 22 с.

Учебно-методическое пособие содержит описание функциональной модели модема передачи команд управления, телеметрии и полезной нагрузки между беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) и наземным комплексом управления (НКУ), выполненной в среде функционального моделирования *Simulink*, системы для инженерных и научных расчетов *MatLab*.

В пособии приведены краткие теоретические сведения об организации каналов передачи данных между БПЛА и НКУ, краткая характеристика пакета *Simulink* системы *MatLab*, описание виртуального лабораторного макета и используемых блоков библиотеки *Simulink*, а также задание по экспериментальному исследованию и контрольные вопросы, ответы на которые необходимы для успешной защиты лабораторной работы.

## АННОТАЦИЯ

Лабораторная работа **«Исследование зависимости помехоустойчивости от скорости передачи данных по разноскоростным каналам с одинаковым типом манипуляции»** посвящена экспериментальному исследованию модели *приемопередающего устройства* передачи данных между БПЛА и НКУ с использованием пакета функционального моделирования *Simulink*, системы для инженерных и научных расчетов *MatLab*.

В описании сформулирована цель лабораторной работы, приведены краткие теоретические сведения, принцип организации канала передачи данных для БПЛА, 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.

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Цель работы. Краткие теоретические сведения	5
2 Краткое описание функциональной модели приемопередающего устройства	10
3 Краткое описание пакета Simulink и используемых блоков	16
4 Экспериментальное задание	21
5 Контрольные вопросы	21
Список использованных источников	22

.....

## 1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

**Цель работы:** изучение способа мультиплексирования разноскоростных сигналов с одним типом модуляции на примере каналов передачи данных между БПЛА и НКУ, моделирование приемопередающего устройства и модельное исследование зависимости помехоустойчивости от скорости передачи данных по каналам с использованием пакета функционального моделирования *Simulink*.

### Организация радиолиний связи с БПЛА

В БПЛА используется несколько способов реализации каналов связи.

Использование одного или двух каналов для передачи командно-телеметрических данных и данных полезной нагрузки обуславливается несколькими факторами, такими как: массогабаритные показатели ЛА, выбор способа управления ЛА [1].

В случае малых БПЛА (взлетная масса до 5 кг) вследствие ограничений по габаритам и массе приемопередающего оборудования рациональным является использование единого радиоканала связи для передачи командно-телеметрических данных и данных полезной нагрузки. В этом случае посадка будет осуществляться при помощи парашюта, что не требует дополнительного радиоканала связи для передачи изображения с видеокамер ЛА, необходимого при ручной посадке. Дополнительным каналом связи является только линия передачи данных системы автоматического спасения (САС).

Исходя из этого, на комплексах БПЛА с взлетной массой более 5 кг целесообразным является использование отдельных радиолиний связи для передачи командно-телеметрических данных и данных полезной нагрузки.

Рассмотрим упрощенную классификацию радиоэлектронного оборудования БПЛА по требованиям к вероятности безотказной работы (рисунок 1.1).

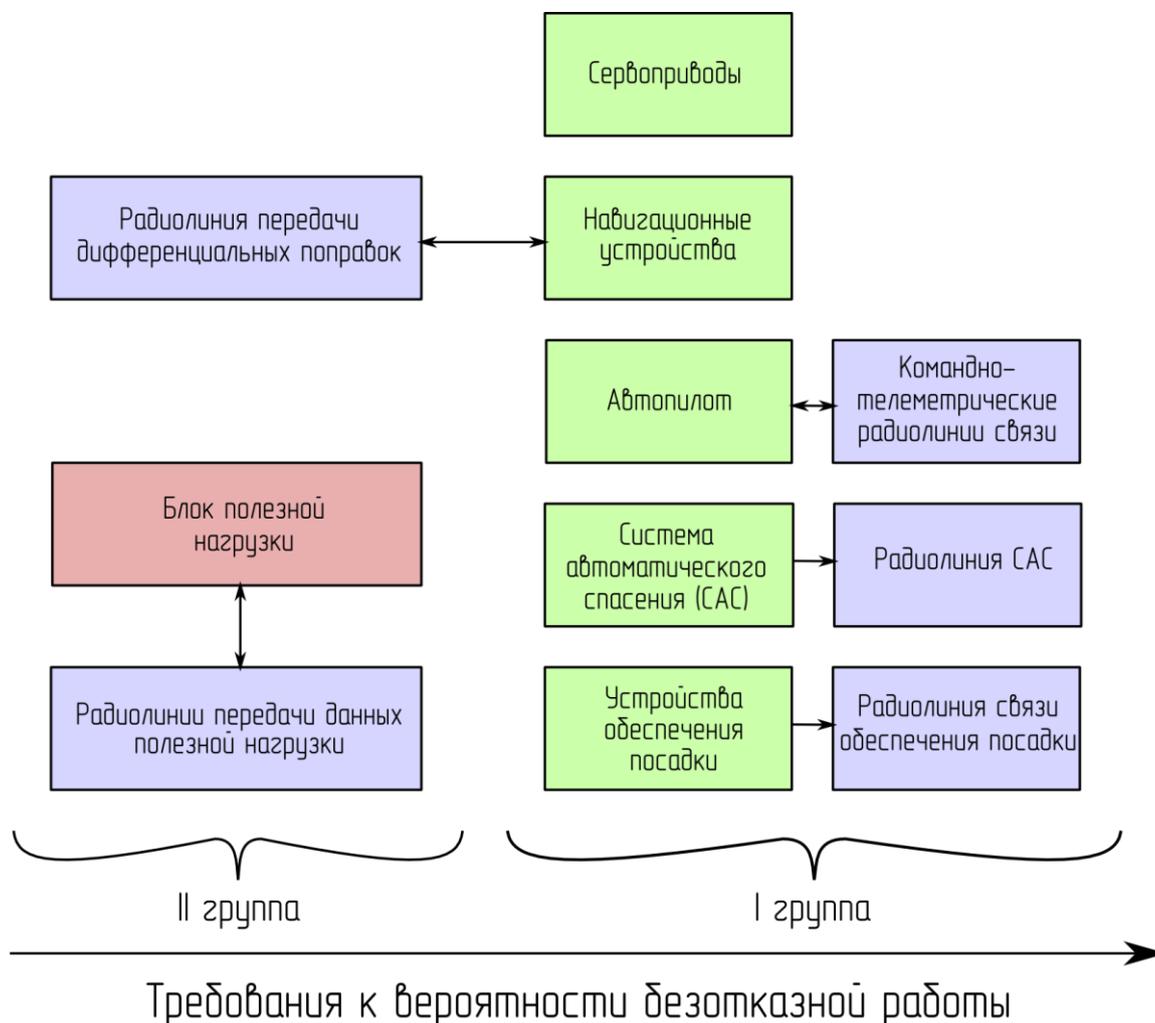


Рисунок 1.1 – Упрощенная классификация оборудования БПЛА по требованиям к вероятности безотказной работы

Как видно из рисунка 1.1, повышенные требования по отказоустойчивости предъявляются к оборудованию БПЛА, осуществляющему навигацию и самолетовождение, обеспечивающему режимы ручной посадки (если это необходимо), к сервоприводам и системе автоматического спасения (САС). Перечисленное оборудование входит в первую группу классификации и обеспечивает надежность комплекса БПЛА в целом. Поломка любого элемента оборудования первой группы приводит к

немедленному прекращению выполнения летного задания и возврату ЛА на базу. Если же это невозможно, срабатывает САС и происходит выброс парашюта.

Остальное оборудование ЛА входит во вторую группу классификации. При выходе из строя оборудования этой группы решение о дальнейших действиях принимается управляющим персоналом комплекса. Взаимодействие оборудования первой и второй групп осуществляется посредством управляющих интерфейсов.

Также очень важным фактором является электромагнитная совместимость приемопередающего оборудования, частотное разделение каналов связи и размещение антенно-фидерного оборудования на борту БПЛА.

Выбор рабочего частотного диапазона радиоканала связи обуславливается несколькими факторами:

- требованиями к массе, габаритам и потреблению приемопередающего устройства БПЛА;
- необходимой дальностью работы при заданной вероятности битовой ошибки;
- возможностью получения лицензии на работу в необходимом диапазоне или возможностью безлицензионной работы.

Для систем связи малых БПЛА решающими факторами при выборе частотного диапазона являются масса и габариты бортового приемопередатчика и антенно-фидерного устройства (АФУ). Целесообразным является выбор диапазона сверхвысоких частот (СВЧ), при этом удастся создать антенну малых размеров, способную разместиться в профиле крыла. Плотная компоновка оборудования внутри малого БПЛА не позволяет эффективно использовать приемопередатчики большой мощности с укороченными антеннами ультракоротковолнового диапазона (УКВ)

вследствие проблем с электромагнитной совместимостью и большим влиянием окружающих объектов на характеристики антенны. Одним из подходящих частотных диапазонов является диапазон 2,4 ГГц. Безлицензионная работа в этом диапазоне разрешена только для внутриофисного оборудования, поэтому необходимо рассматривать варианты получения лицензии.

К системам связи БПЛА среднего и большого класса предъявляются более жесткие требования по дальности работы, помехозащищенности и вероятности битовой ошибки. В этом случае является возможным и оптимальным комплексирование нескольких каналов связи, работающих в разных частотных диапазонах (рисунок 1.2) [1].

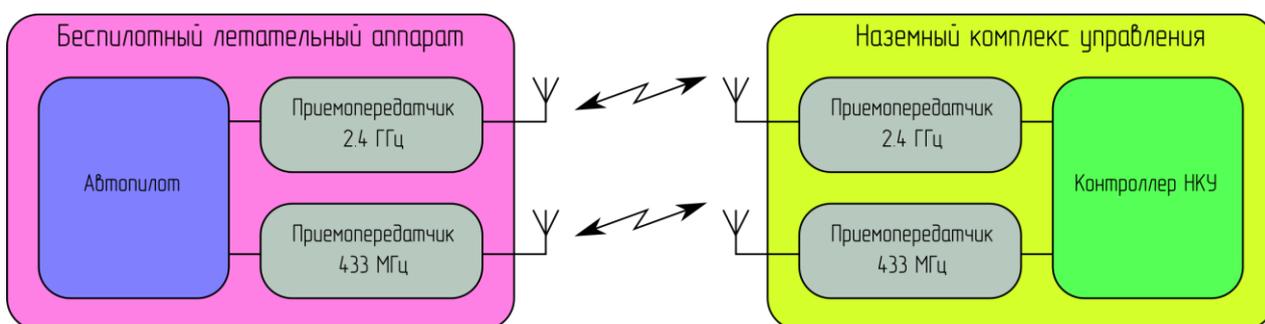


Рисунок 1.2 – Пример комплексирования радиоканалов связи

В процессе работы системы связи (рисунок 1.2) оцениваются вероятности битовой ошибки для каждого канала связи и принимается решение о распределении командно-телеметрического потока данных между каналами. Использование нескольких каналов связи повышает надежность системы передачи данных и в тоже время является избыточным с точки зрения эффективного использования радиочастотного спектра. Одним из способов повышения эффективности комплексированной системы связи является адаптивная работа системы, которая подразумевает передачу по командно-телеметрическим каналам связи части данных полезной нагрузки, объем которых варьируется в зависимости от текущих условий передачи радиосигнала.

Основным требованием при создании системы связи с БПЛА является обеспечение возможности передачи данных с заданной скоростью и вероятностью ошибки при больших расстояниях между ЛА и НКУ. Типовое значение необходимой скорости передачи телеметрических данных с борта ЛА на землю составляет 115200 бит/сек при вероятности битовой ошибки не более  $10^{-6}$  ...  $10^{-8}$ . В некоторых случаях допустимо снижение скорости до 38400 бит/сек для поддержания вероятности битовой ошибки на том же уровне. Максимальное значение полосы частот, занимаемой радиосистемой, ограничивается требованиями государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) и зависит от рабочего диапазона частот и типа работы (лицензионная, безлицензионная) [2].

## 2 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Приведем краткое описание работы приемопередающего устройства на основе *Sim*-модели, представленной на рисунке 2.1. Функциональная *Sim*-модель состоит из передатчика (*Transmitter*), блока моделирующего шум в канале (*Random Number*) и приемника (*Receiver*).

Передатчик (*Transmitter*, см. рисунок 2.2) состоит из двух источников сигналов (данных) реализованных на основе блоков псевдослучайных последовательностей *Random Number* и блоков *Sign*, смесителя (блок *Product*), гетеродинов (блоки *Sine Wave*), приборов отслеживания формы сигналов (блоки *Scope*) и сумматора каналов (блок *Add*).

Итак, входной поток данных реализуется блоками источников псевдослучайных последовательностей на основе генераторов случайных процессов с нормальным распределением (*Random Number*), на выходе которых включены блоки определения знака сигнала (*Sign*). Изменяя параметры блока источника *Seed* и *Sample time*, задается вид случайной последовательности и длительности импульсов (*битов*), т.е. скорость передачи. Для каждого из источников выбираются разные значения параметра *Seed*, задавая тем самым, независимые случайные последовательности.

## BPLA TRANSCEIVER

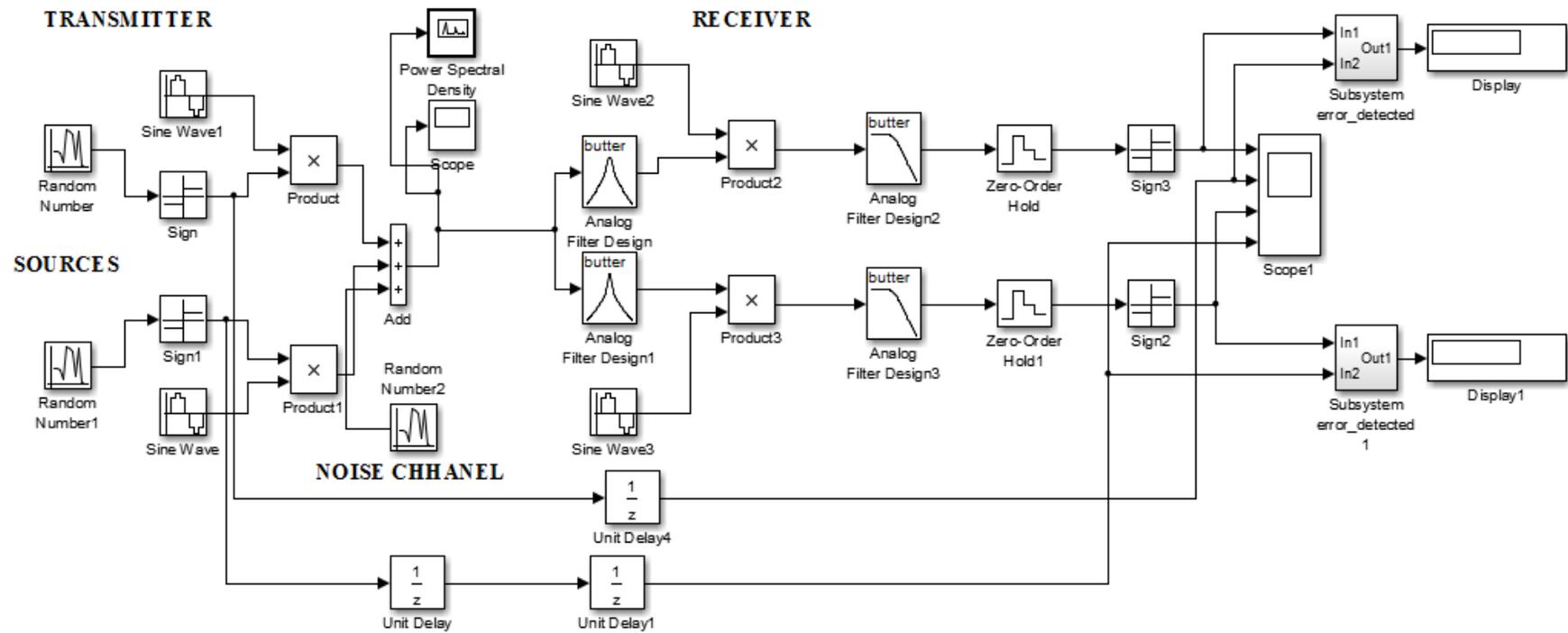


Рисунок 2.1 – Функциональная Sim-модель приемопередатчика

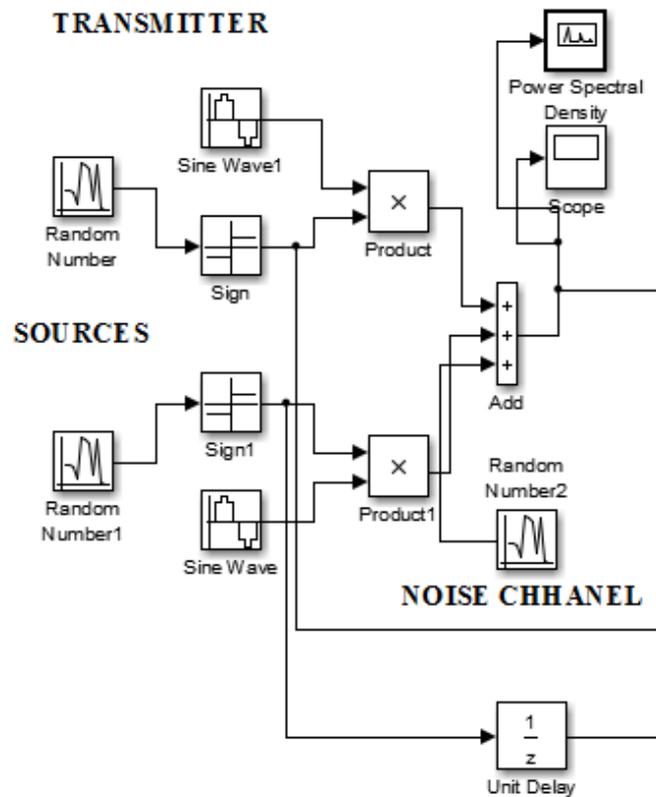


Рисунок 2.2 – Sim-модель передатчика

Далее последовательности поступают на входы BPSK модуляторов несущей частоты – умножителей (*Product*), на первые входы которых подаются псевдослучайные последовательности (сигналы), а на вторые входы поступают колебания с опорных генераторов несущей частоты (*Sine Wave*). Несущие частоты гармонических генераторов выбираются либо одинаковыми со сдвигом фаз на  $\pi/2$ , либо ортогональными с разном равным  $\Delta\omega = k/\tau_{min}$ , где  $k = 1, 2, 3, \dots$ . Разделение на приемной стороне осуществляется на основе взаимной ортогональности несущих колебаний. Выходным блоком модулятора является сумматор (*Add*), на который подаются и шумы канала распространения.

Источник шума канала распространения реализован блоком (*Random Number* или *Band-Limited White Noise*). Параметр *Variance* (*Дисперсия*) или *Noise power* (*Мощность шума*) позволяют задать необходимое соотношение сигнал/шум. Параметр *Sample Time* выбирается из соображения перекрытия шумами рабочего диапазона частот  $\omega_{gr} = 2 \cdot \pi / \text{Sample\_time}$ .

Приемник (*Receiver*, см. рисунок 2.3) состоит из гетеродинов (блоки *Sine Wave*), смесителей (блоки *Product*), набора ФНЧ (блоки *Analog Filter Design*), экстраполяторов нулевого порядка (блоки *Zero-Order Hold*) и блоков нормировки уровня сигнала (*Sign*). Для контроля принятых и переданных последовательностей использован блок *Scope* с четырьмя входами. Для выравнивания по времени принятых и переданных последовательностей использованы линии задержек (блоки *Unit Delay*). Для контроля ошибок передачи в зашумленном канале использованы детекторы ошибок и блоки *Display*.

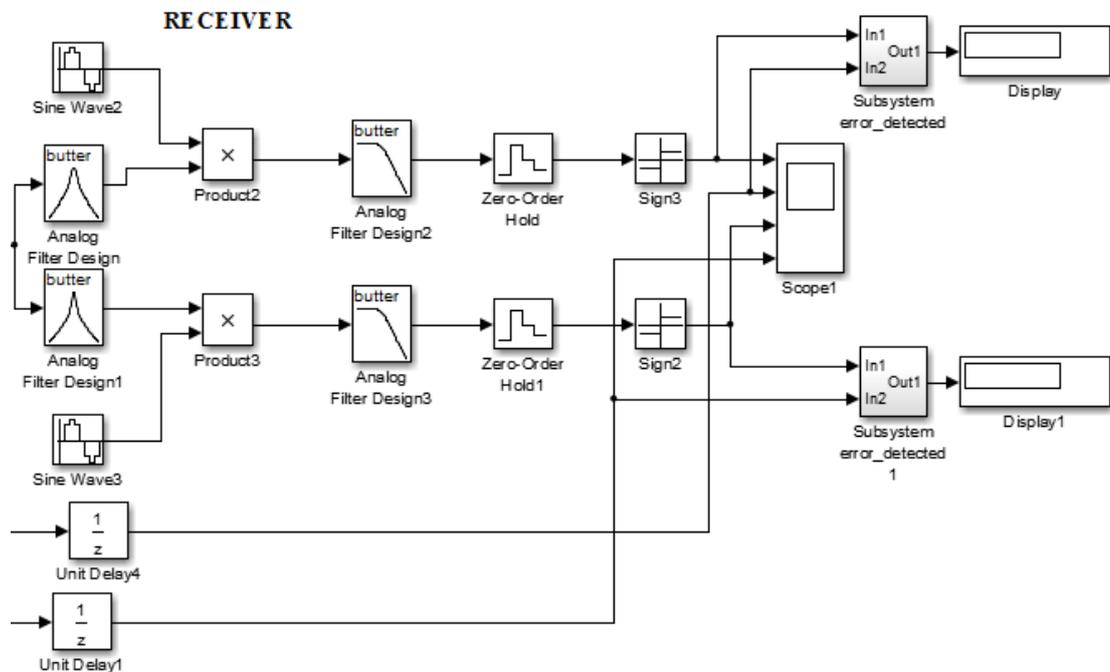


Рисунок 2.3 - Sim-модель приемника

Демодуляторы реализованы на основе умножителей (*Product*), на первые входы которых подается принятая смесь радиосигналов, а на вторые входы поступают колебания с опорных генераторов несущей частоты (*Sine Wave*), синхронизированные с генераторами передающей части. С выходов умножителей сигналы поступают на *ФНЧ* (*Analog Filter Design*), которые отфильтровывают высокочастотные гармоники. С выходов *ФНЧ* сигналы тактируются и экстраполируются блоками *Zero-Order Hold*. Блоки нормировки уровня сигнала (*Sign*) восстанавливают значение и форму текущего импульса (*бита*) исходного потока данных.

Фрагмент функциональной модели модема с подключенными детекторами ошибок приведен на рисунке 2.4.

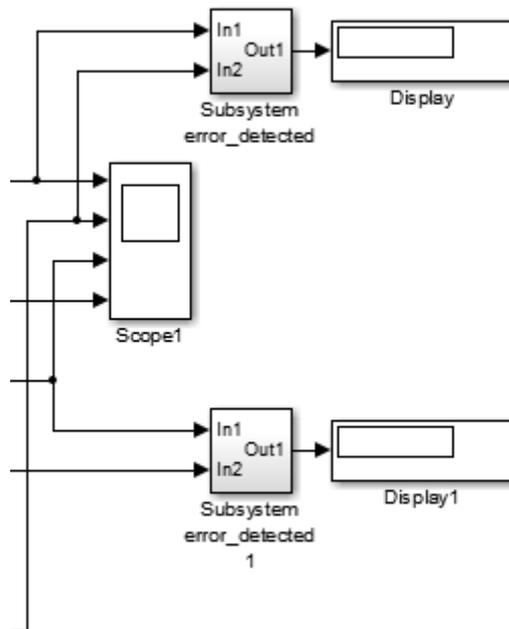


Рисунок 2.4 – Включение детектора ошибок на выходе приемной части

Детектор ошибок оформлен в виде блока *Subsystem*, функциональная модель *Error detected* представлена на рисунке 2.5.

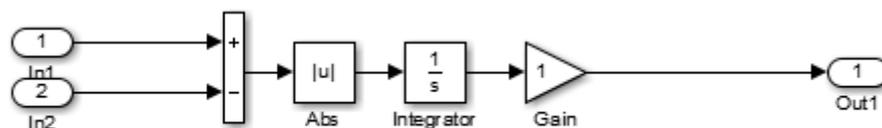


Рисунок 2.5 – Sim-модель детектора в подсистеме

Принцип работы детектора основан на вычислении разности исходного и принятого сигналов, взятии модуля для исключения влияния знака, далее функция модуля разности интегрируется в течение времени моделирования. Блок *Gain* позволяет откалибровать показания детектора ошибок с учетом того, что число ошибок оказывается пропорциональным площади под кривой. Так, если последовательности однополярные и  $\tau_b = 1$ , то  $Gain = 1$ , если последовательности биполярные и  $\tau_b = 1$ , то  $Gain = 1/2$ . Далее правило - насколько сокращаем  $\tau_b$ , настолько увеличиваем параметр *Gain*. Изменение числа ошибок со временем можно отобразить на *Scope*, но гораздо удобнее использовать *Display*.

### 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.

#### 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).

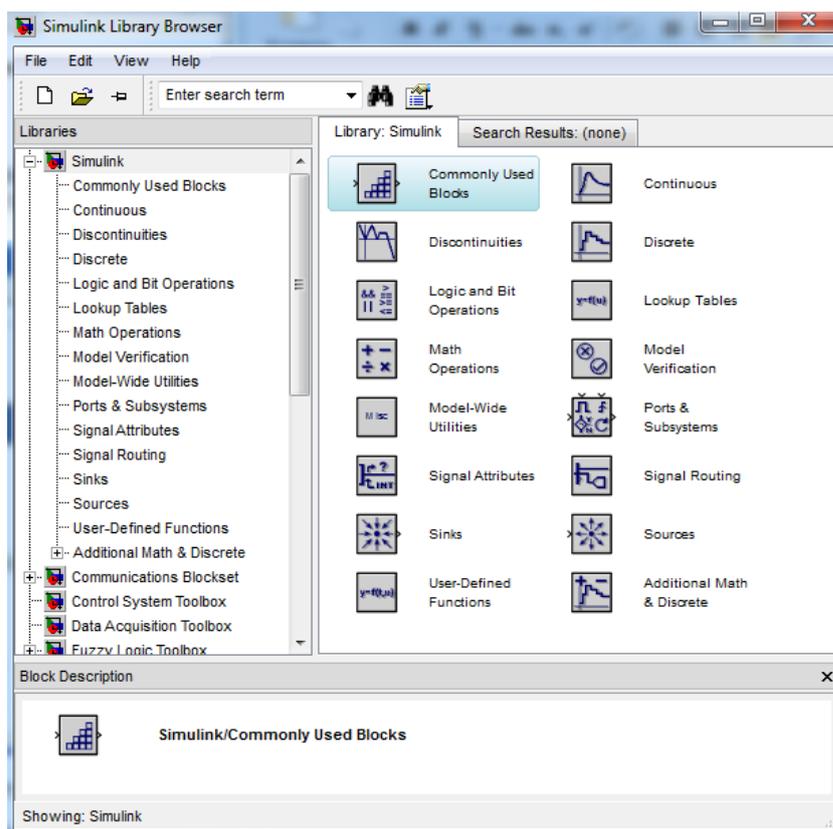


Рисунок 3.1 – Библиотека блоков *Simulink Library Browser*

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;

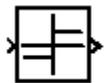
- *User-Defined Function* – функции, определяемые пользователем.

### Описание используемых блоков библиотеки Simulink



Random Number

**Random Number** - генерирует нормальный белый шум с заданными математическим ожиданием и дисперсией и имеет следующие параметры: *Mean* — математическое ожидание (среднее значение); *Variance* — дисперсия; *Initial seed* — аналогичен параметру *Seed*; *Sample time* — такт дискретности; *Interpret vector parameters as 1-D* — флаг интерпретации вектора параметров.

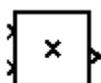


Sign

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

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

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



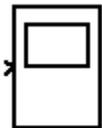
Product

**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.



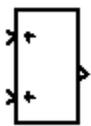
Sine Wave

**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.



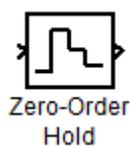
Add

**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** – 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.



**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.

## 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Собрать *Sim*-модель для исследования зависимости помехоустойчивости от скорости передачи данных (разноскоростных сигнальных потоков) в соответствии с рисунком 2.1.

2. Выставить параметры блоков *Sim*-модели. Для *источников псевдослучайных последовательностей* на основе блоков случайных процессов с нормальным распределением (*Random Number*) выставить различные значения параметра *Seed*, а параметры *Sample time* выставить в соответствии с распределением скоростей передачи. Один из каналов передачи принять за опорный, установив, например, *Sample time=1*.

3. Проверить возможность использования в качестве опорных колебаний ортогональные несущие и исследовать влияние этой замены на помехоустойчивость системы передачи.

4. Пронаблюдать, зафиксировать и пояснить основные осциллограммы, иллюстрирующие работу приемопередатчика и сделать выводы по работе в целом.

## 5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как в модели формируются данные от источников информации?
2. Чем определяется скорость поступления или передачи данных?
3. Как мультиплицируются в модели сигналы от разных источников?
4. Благодаря чему и как разделяются в приемнике сигналы от разных источников?
5. Как осуществляется в модели процесс модуляции и какой модуляции?
6. Как осуществляется процесс демодуляции?
7. Назначение блоков ФНЧ, *Zero-Order Hold* и *Sign*?
8. Принцип функционирования *SubSystem Detector Error*?

9. От каких параметров зависит помехоустойчивость системы передачи?
10. Как оценить рабочий диапазон частот системы при заданных скоростях источников данных?

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Боев, Н.М., Шаршавин, П.В., Нигруца, И.В. Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния // Известия Южного федерального университета. Технические науки, 2014, Вып. 3. – С. 147–158.
2. Польшинкин А.В., Ле Х.Т, Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013, Вып. 7. Ч.2 – С. 98-99.