

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Федеральное государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**А.М. ГОЛИКОВ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ  
СТАНДАРТА IEEE 802.15.4 ZIGBEE НА БАЗЕ ПО МАТЛАВ**

**Учебно-методическое пособие по лабораторной работе**

**Томск 2019**

**Голиков, А. М. Исследование модели системы мобильной связи стандарта IEEE 802.15.4 ZigBee на базе по MATLAB: Учебно-методическое пособие по лабораторной работе [Электронный ресурс] / А. М. Голиков. — Томск: ТУСУР, 2019. — 17 с.**

В лабораторной работе проводится исследование системы мобильной связи, построенной по стандарту IEEE 802.15.4 ZigBee на основе разработки программы для моделирования такой системы в среде MATLAB. Лабораторная работа предназначен для направления подготовки магистров 11.04.02 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" по магистерским программам подготовки: "Радиоэлектронные системы передачи информации", "Оптические системы связи и обработки информации", "Инфокоммуникационные системы беспроводного широкополосного доступа", "Защищенные системы связи", для направления подготовки магистров 11.04.01 "Радиотехника" по магистерской программе подготовки: "Радиотехнические системы и комплексы", "Радиоэлектронные устройства передачи информации", "Системы и устройства передачи, приема и обработки сигналов", "Видеоинформационные технологии и цифровое телевидение" и специалитета 11.05.01 "Радиоэлектронные системы и комплексы" специализации "Радиолокационные системы и комплексы", "Радиоэлектронные системы передачи информации", "Радиоэлектронные системы космических комплексов", а также бакалавриата направления 11.03.01 "Радиотехника" (Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов), бакалавриата 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи (Системы мобильной связи, Защищенные системы и сети связи, Системы радиосвязи и радиодоступа, Оптические системы и сети связи) и может быть полезна аспирантам.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| <b>1 ВВЕДЕНИЕ .....</b>           | <b>4</b>  |
| <b>2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....</b> | <b>4</b>  |
| <b>3 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....</b> | <b>9</b>  |
| <b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>            | <b>17</b> |

## **1 ВВЕДЕНИЕ**

Основу систем позиционирования радиотехнических линий связи (РТЛС) составляет инфраструктура, состоящая из анкерных – базовых станций беспроводной связи. Анкеры устанавливаются на обслуживаемой территории так, чтобы из любой точки было видно не менее трех анкерных. Места анкерных фиксированные, а их координаты известны серверу. Это позволяет позиционировать метки (и, соответственно, людей и предметы) на плане, используя измеренные расстояния от меток до анкерных.

Сети ZigBee используются в системе РТЛС в качестве беспроводных сетей передачи данных – альтернативы LAN для управления и конфигурирования базовых станций и меток, управления процессами позиционирования, а также для передачи результатов измерений от меток на сервер для дальнейшего использования.

**Альянс ZigBee** был учрежден в 2002 году. Сейчас в него входят более 300 компаний. Цель альянса – разработка эффективных протоколов беспроводной сети и обеспечение совместимости устройств разных производителей. Первые стандарты «родились» в 2003 году и активно совершенствовались и расширялись. Была внедрена стохастическая адресация, механизмы маршрутизации Many-to-One и Source Routing, а также возможность выявления асимметричных связей, что повысило эффективность сетей ZigBee для ряда специфических приложений.

Разработаны стандартные профили приложений и библиотека стандартных кластеров. Это существенно упростило разработку приложений, облегчило и ускорило внедрение новых решений с использованием аппаратуры разных производителей.

Предусмотрен автоматический переход на «чистый» частотный канал при возникновении помех. Действующая спецификация ZigBee Pro Feature Set 2006 принята в октябре 2007 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

## **2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

ZigBee – относительно новая беспроводная технология, которая ориентирована на приложения, требующие гарантированной безопасной передачи данных при относительно небольших скоростях и возможности длительной работы сетевых устройств от автономных источников питания (батарей). Технология ZigBee позволяет создавать самоорганизующиеся и самовосстанавливающиеся беспроводные сети с автоматической ретрансляцией сообщений. Сети ZigBee при относительно небольших скоростях передачи данных обеспечивают гарантированную доставку пакетов и защиту передаваемой информации. На рисунке 1 изображен внешний вид микросхемы ZigBee.



Рисунок 1 – Внешний вид микросхемы ZigBee

В отличие от других стандартов беспроводной связи, стандарт ZigBee имеет следующие достоинства и недостатки:

- Благодаря ячеистой (mesh) топологии сети и использованию специальных алгоритмов маршрутизации сеть ZigBee обеспечивает самовосстановление и гарантированную доставку пакетов в случаях обрыва связи между отдельными узлами (появления препятствия), перегрузки или отказа какого-то элемента
- Поддерживает встроенные аппаратные механизмы шифрации сообщений AES-128, исключая возможность несанкционированного доступа в сеть
- Устройства ZigBee отличаются низким электропотреблением, в особенности конечные устройства, для которых предусмотрен режим «сна», что позволяет этим устройствам работать достаточно продолжительное время.
- Она ориентирована на преимущественное использование в системах распределенного мульти-микропроцессорного управления со сбором информации с интеллектуальных датчиков, а также использование в системе «умный дом».
- Предоставляет возможность организации самоконфигурируемых сетей со сложной топологией, в которых маршрут сообщения автоматически определяется не только числом исправных или включенных/выключенных на текущий момент устройств (узлов), но и качеством связи между ними, которое автоматически определяется на аппаратном уровне.
- Однако обладает низкой скоростью передачи, за счет снижения потребляемой энергии.

В таблице 1 приведены основные характеристики популярных стандартов беспроводной связи.

Таблица 1. Технические характеристики ZigBee

| Стандарт                             | 802.15.4<br>ZigBee™   |   | 802.15.1<br>Bluetooth                                      | 802.15.3<br>High Rate WPAN,<br>WiMedia                  | 802.15.3a*<br>UWB                      | 802.11b<br>Wi-Fi                                      |           |
|--------------------------------------|---|---|--|---|--|---|-----------|
| Приложения                           | Мониторинг, управление, сети датчиков, домашняя/промышленная автоматика |   | Голос, данные, замена кабелей                              | Потоковое мультимедиа, замена кабелей аудио/видеосистем |  | Данные, видео, ЛВС                                    |           |
| Преимущества                         | Цена, энергосбережение, размеры сети, менее загруженные диапазоны       | Цена, энергосбережение, размеры сети, глобальный диапазон | Цена, энергосбережение, передача голоса, перескоки частоты | Высокая скорость, энергосбережение                      |  | Скорость, гибкость                                    |           |
| Частота, ГГц                         | 0,868   | 0,915   | 2,4  |   | 3,1 – 10,6                             | 2,4   |           |
| Макс. скорость                       | 20 Кбит/с   | 40 Кбит/с   | 250 Кбит/с   | 1 Мбит/с  | 22 Мбит/с (доп. 11, 33, 44, 55 Мбит/с) | 110 Мбит/с (10 м), 200 Мбит/с (4 м) (доп. 480 Мбит/с) | 11 Мбит/с |
| Выходная мощность (ном.), дБм        | 0   |   | 0 (класс 3)<br>4 (класс 2)<br>20 (класс 1)                 | 0   | < 20 (110 Мбит/с)<br>< 24 (200 Мбит/с) | 20  |           |
| Дальность, м                         | 10 – 100  |   | 10 (класс 3)<br>100 (класс 1)                              | 5 – 50  | 10 (110 Мбит/с)<br>4 (200 Мбит/с)      | 100   |           |
| Чувствительность (спецификация, дБм) | -92   | -85   | -70  | -75   | -                                      | -76   |           |
| Размер стека, Кбайт                  | 4 – 32  |   | > 250  | -   |  | > 1000  |           |
| Срок службы батареи, дней            | 100 – 1000+   |   | 1 – 7  | теоретически более 1000                                 |  | 0,5 – 5   |           |
| Размер сети                          | 65536 (16-битные адреса), 2 <sup>64</sup> (64-битные адреса)            |   | мастер +7  | до 127 на хост  |  | 32  |           |

### Организация сети стандарта ZigBee

ZigBee — относительно новый стандарт беспроводной связи, который изначально разрабатывался как средство для передачи небольших объемов информации на малые расстояния с минимальным энергопотреблением. Фактически этот стандарт описывает правила работы программно-аппаратного комплекса, реализующего беспроводное взаимодействие устройств друг с другом.

Стек протоколов ZigBee представляет собой иерархическую модель, построенную по принципу семиуровневой модели протоколов передачи данных в открытых системах OSI (OpenSystemInterconnection). Стек включает в себя уровни стандарта IEEE 802.15.4, отвечающие за реализацию канала связи, и программные сетевые уровни и уровни поддержки приложений, определенные спецификацией ZigBee.

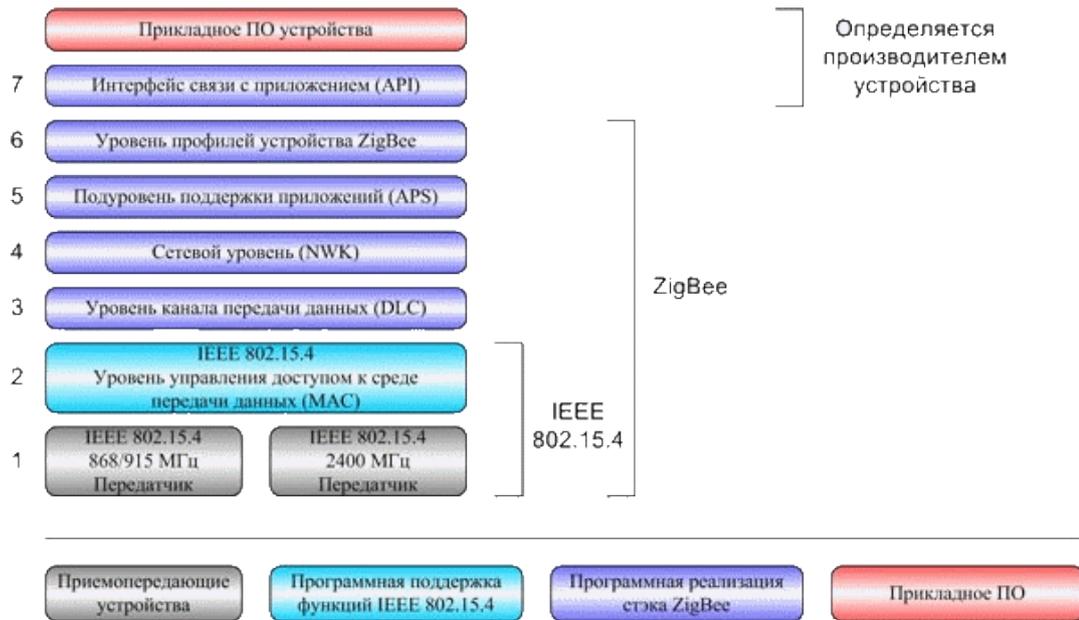


Рисунок 2 – Многоуровневая модель стандарта связи ZigBee

Стандарт IEEE 802.15.4 определяет два нижних уровня стека: уровень доступа к среде (MAC) и физический уровень передачи данных в среде распространения (PHY), то есть нижние уровни протокола беспроводной передачи данных. Альянс определяет программные уровни стека ZigBee от уровня канала передачи данных (DataLinkControl) до уровня профилей устройств (ZigBeeProfiles). Прием и передача данных по радиоканалу осуществляется на физическом уровне PHY, определяющем рабочий частотный диапазон, тип модуляции, максимальную скорость, число каналов. Уровень PHY осуществляет активацию-деактивацию приемопередатчика, детектирование энергии принимаемого сигнала на рабочем канале, выбор физического частотного канала, индикацию качества связи при получении пакета данных и оценку свободного канала. Важно понимать, что стандарт 802.15.4 — это физическое радио (микросхема радио-приемопередатчика), а ZigBee — это логическая сеть и программный стек, обеспечивающие функции безопасности и маршрутизации.

Далее в структуре стека ZigBee следует уровень контроля доступа к среде IEEE 802.15.4 MAC, осуществляющий вход и выход из сети устройств, организацию сети, формирование пакетов данных, реализацию различных режимов безопасности (включая 128-битное шифрование AES), 16- и 64-битную адресацию.

Уровень MAC обеспечивает различные механизмы доступа в сеть, поддержку сетевых топологий от «точка-точка» до «многочейковая сеть», гарантированный обмен данными (ACK, CRC), поддерживает потоковую и пакетную передачи данных.

Для предотвращения нежелательных взаимодействий возможно использование временного разделения на основе протокола CSMA-CA (протокол множественного доступа к среде с контролем несущей и предотвращением коллизий).

Временное разделение ZigBee базируется на использовании режима синхронизации, при котором подчиненные сетевые устройства, большую часть времени находящиеся в «спящем» состоянии, периодически «просыпаются» для приема сигнала синхронизации от сетевого координатора, что позволяет устройствам внутри локальной сетевой ячейки знать, в какой момент времени осуществлять передачу данных. Данный механизм, основанный на определении состояния канала связи перед началом передачи, позволяет существенно сократить (но не устранить) столкновения, вызванные передачей данных одновременно несколькими устройствами. Стандарт 802.15.4 основывается на полудуплексной передаче данных (устройство может либо передавать, либо принимать данные), что не позволяет использовать метод CSMA-CA для обнаружения коллизий — только для их предотвращения.

### **Устройства ZigBee:**

Сети ZigBee строятся из трех типов узлов: координатор, маршрутизатор и оконечное устройство. Рассмотрим каждое из них:

**Координатор** — главное устройство в сети ZigBee. Запускает сеть и управляет ею. Он формирует сеть, выполняет функции центра управления сетью и доверительного центра (trust-центра) – устанавливает политику безопасности, задает настройки в процессе присоединения устройств к сети, ведет ключами безопасности.

**Маршрутизатор** — отвечает за выбор пути доставки сообщения, передаваемого по сети от одного узла к другому, транслирует пакеты, осуществляет динамическую маршрутизацию, восстанавливает маршруты при перегрузках в сети или отказе какого-либо устройства. При формировании сети маршрутизаторы присоединяются к координатору или другим маршрутизаторам, а также могут присоединять дочерние устройства – маршрутизаторы и конечные устройства. Маршрутизаторы работают в непрерывном режиме, имеют стационарное питание и могут обслуживать «спящие» устройства. Маршрутизатор может обслуживать до 32 спящих устройств.

**Оконечное устройство** — может принимать и отправлять пакеты, но не занимается их трансляцией и маршрутизацией. Конечные устройства могут подключаться к координатору или маршрутизатору, но не могут иметь дочерних устройств. Конечные устройства могут переводиться в спящий режим для экономии заряда аккумуляторов.

Среди свойств ZigBee следует особо выделить поддержку сложных топологий сетей. Именно за счет этого, при относительно малой максимальной дальности связи двух близлежащих устройств, возможно расширить зону покрытия сети в целом. Также этому способствует 16-битная адресация, позволяющая объединять в одну сеть более 65 тыс. устройств.

На рисунке 3 изображена динамика сети стандарта ZigBee. А так же показан пример переподключения. Устройство с адресом «0E3B» переподключается как «097D», а затем как «0260». Каждый раз оно присоединяется к другому маршрутизатору и получает адрес из имеющегося в распоряжении присоединяющего маршрутизатора диапазона адресов.

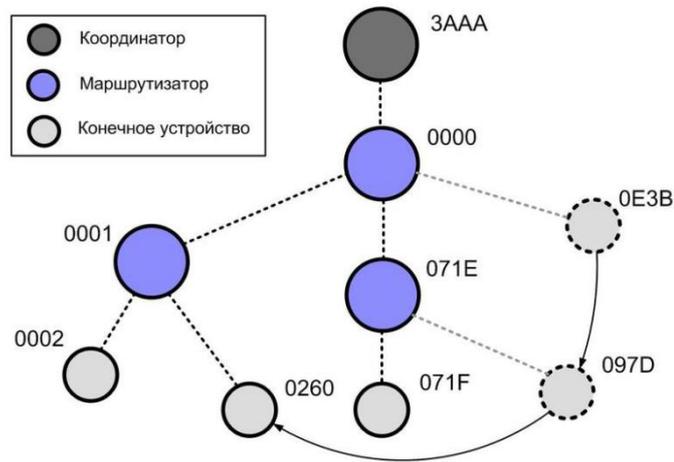


Рисунок 3 – Динамика сети стандарта ZigBee

### 3 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В ходе индивидуального задания исследовали схему для работы стандарта IEEE.802.15.4 ZigBee

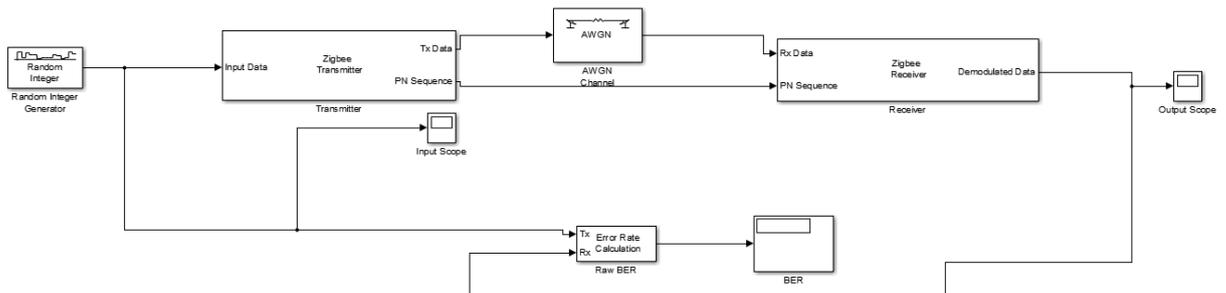


Рисунок 4 – Схема стандарта IEEE.802.15.4 ZigBee Simulink MATLAB

Данная схема состоит из следующих элементов:

- RandomIntegerGenerator
- ZigBeeTransmitter (передатчик)
- AWGN Channel (канал передачи)
- ZigBeeReceiver (приемник)
- ErrorRateCalculation (анализатор ошибок)
- Display

Рассмотрим каждый блок отдельно.

На рисунке 5 изображены параметры блока Random Integer Generator. Данный блок генерирует случайные данные, которые в последствие идут на передатчик.

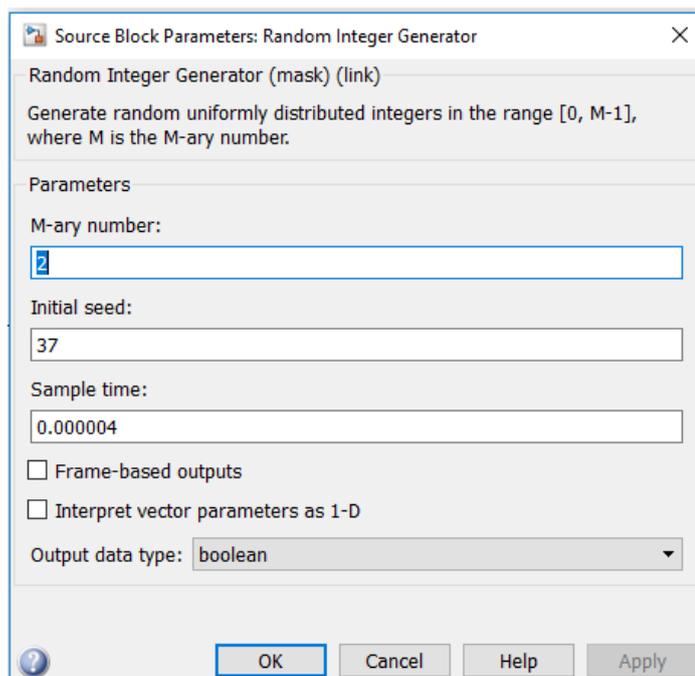


Рисунок 5 – Параметры блока Random Integer Generator

На рисунке 6 изображена схема блока ZigBeeTransmitter. Данный блок осуществляет передачу и модуляцию данных.

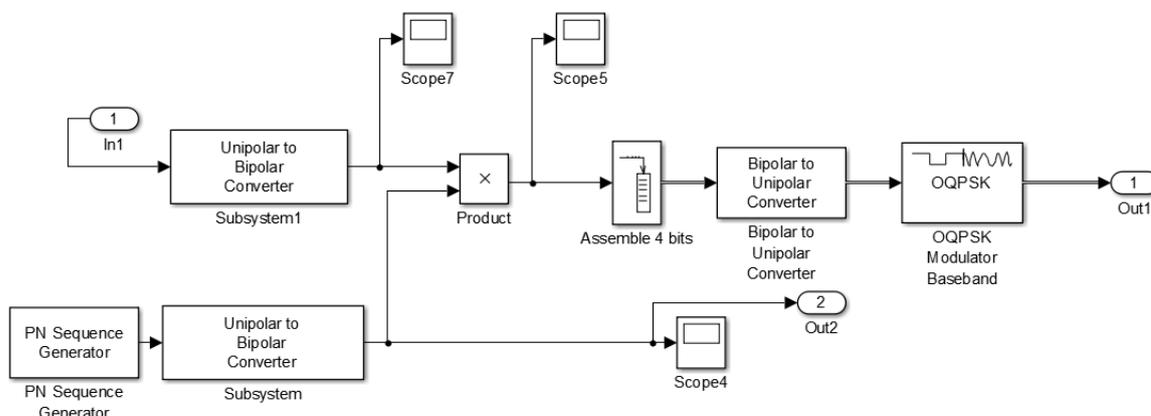


Рисунок 6 – Схема ZigBeeTransmitter

В самой схеме имеются несколько подсхем, которые выполняют различные функции:

На рисунке 7 изображены параметры блока PN Sequence generator (генератор последовательности). Данный блок генерирует последовательность псевдослучайных двоичных чисел.

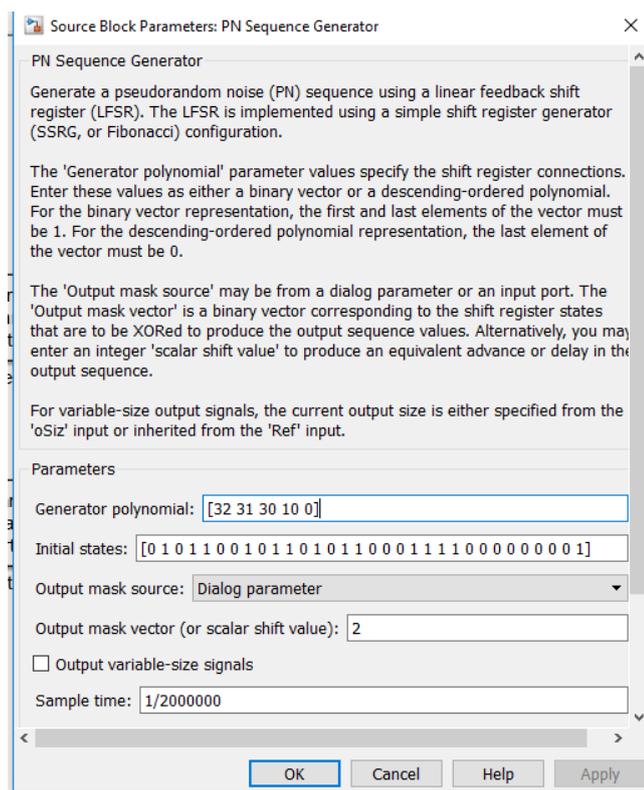


Рисунок 7 – Параметры блока PN sequence generator

На рисунке 8 изображена подхема, которая преобразует униполярный код в биполярный.

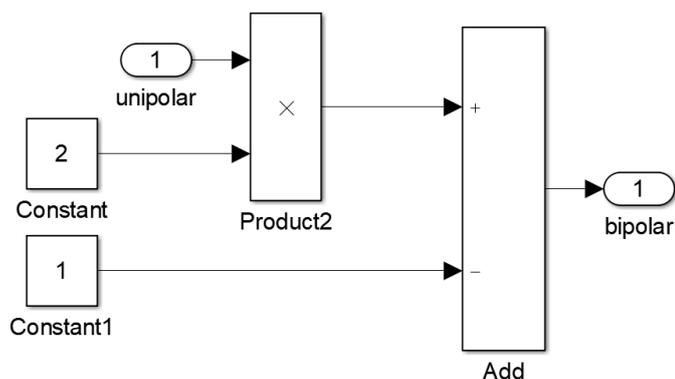


Рисунок 8 – Преобразователь униполярного кода в биполярный

Затем преобразованные биполярные коды перемножаются и попадают в блок Assemble 4 bits. Данный блок преобразует входные данные в выходные данные с другим размером кадра.

После этого биполярный код преобразуется в униполярный и осуществляется его модуляция с помощью блока OQPSK modulator baseband, параметры которого представлены на рисунке 9.

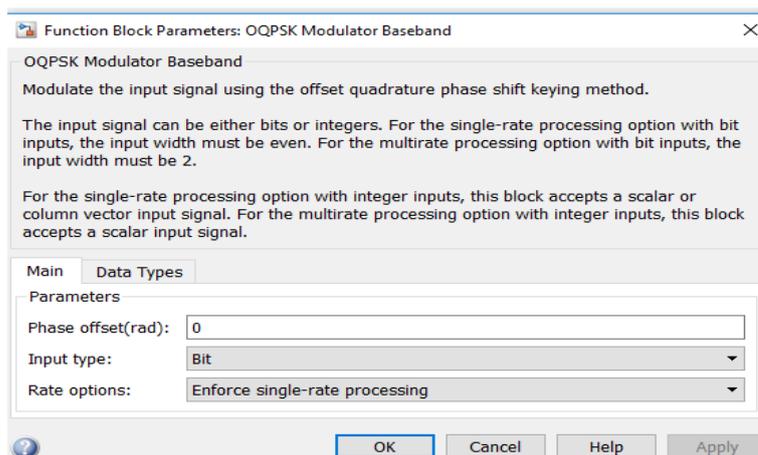


Рисунок 9 – Параметры блока OQPSK modulator baseband

OQPSK - четырехпозиционная фазовая модуляция со сдвигом квадратур (**OQPSK**), где битовые потоки, подаваемые на модуляторы квадратур I и Q, сдвинуты друг относительно друга на длительность одного бита (половина символического интервала).

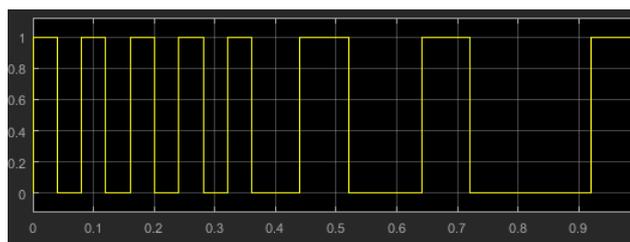


Рисунок 10 – Осциллограмма униполярного кода сигнала

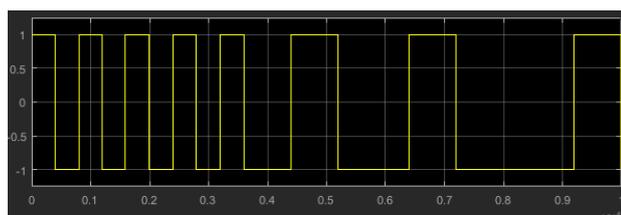


Рисунок 11 – Осциллограмма биполярного кода сигнала

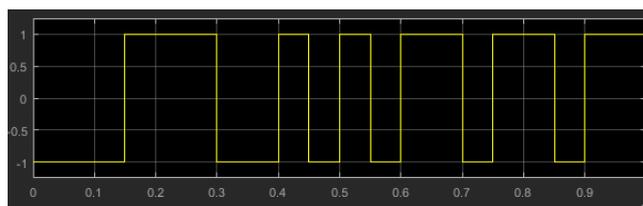


Рисунок 12 – Осциллограмма биполярного кода сигнала после перемножения

После передатчика, сигнал попадает на AWGN Channel (канал передачи), параметры которого изображена на рисунке 13.

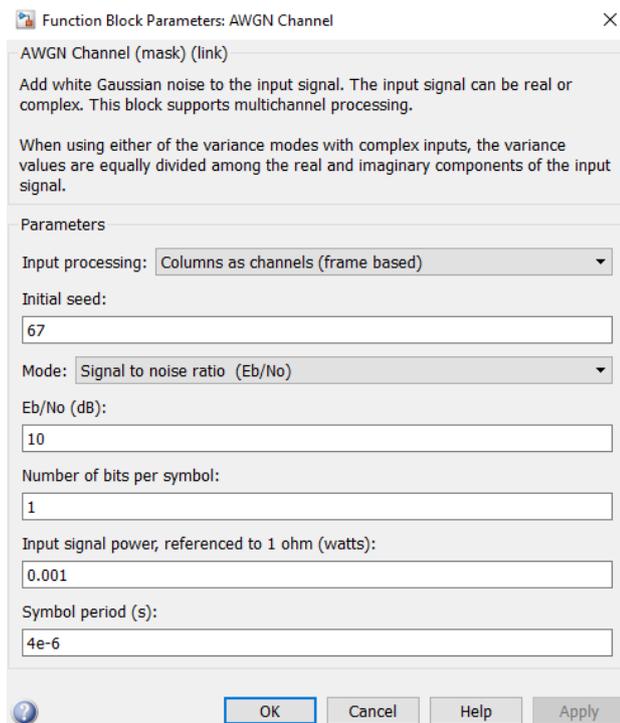


Рисунок 13 – Параметры блока AWGN channel

В данном блоке можно изменять отношение с/ш для исследования помехоустойчивости стандарта ZigBee.

После того, как передали сигнал по каналу передачи, он попадает в блок ZigBee Receiver (приемник).

На рисунке 14 изображена схема блока ZigBee Receiver.

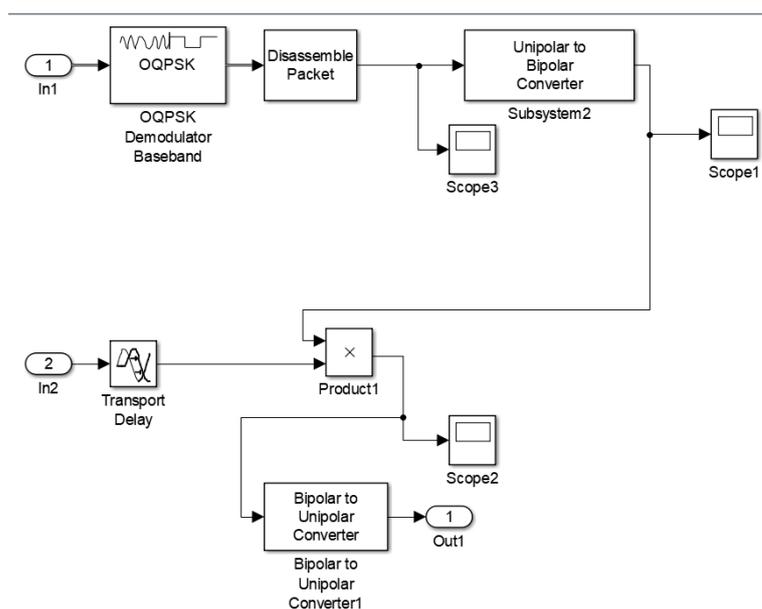


Рисунок 14 – Схема приемника стандарта ZigBee

В самой схеме имеются несколько подсхем, которые выполняют различные функции. Рассмотрим несколько из них.

Как видно по рисунку 14, сигнал поступает на два входа приемника. Через первый вход сигнал демодулируется, затем демодулированный сигнал попадает в блок Dissassemble, где данные преобразуются в начальные данные с заданным размером кадра. Далее униполярный код сигнала преобразуется в биполярный и попадает на перемножитель, где перемножается со вторым входным сигналом, пройденным через Transport Delay, где произошла задержка ввода на некоторое время. После того, как сигналы перемножились, полученный код сигнала преобразовался из биполярного в униполярный, и был подан на выходное устройство.

На рисунке 15 изображены параметры блока TransportDelay, с помощью которого и осуществлялась задержка второго входного сигнала.

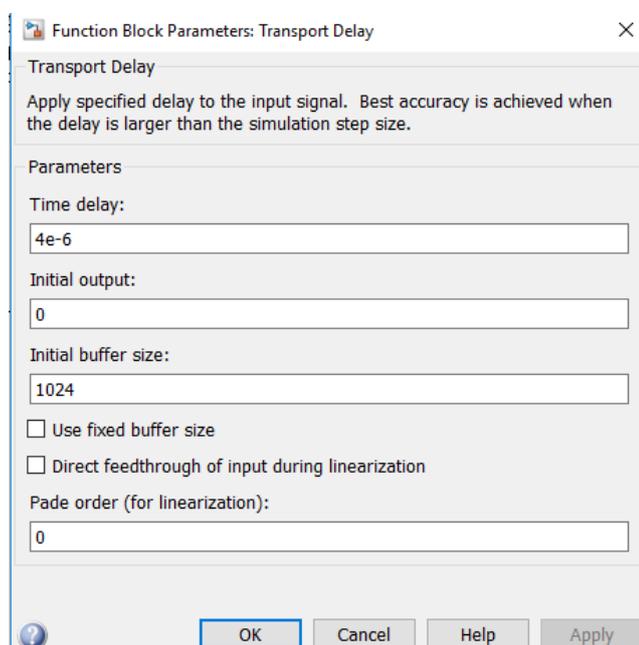


Рисунок 15 – Параметры блока TransportDelay

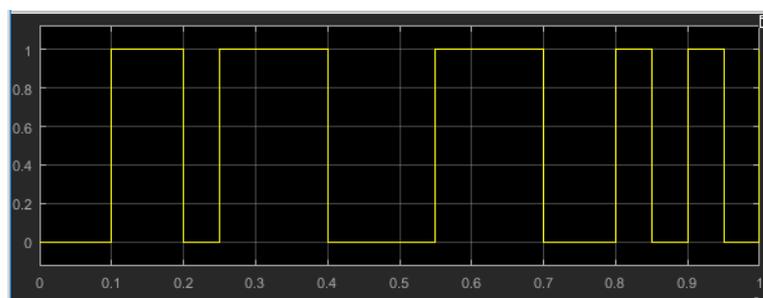


Рисунок 16 – Осциллограмма первого демодулированного входного сигнала, имеющего униполярный код

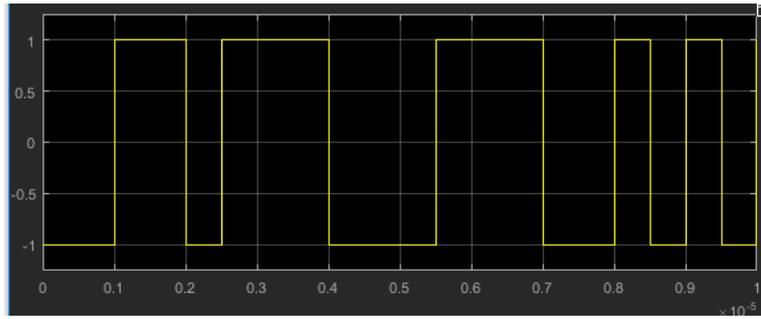


Рисунок 17 – Осциллограмма первого демодулированного входного сигнала, после преобразования в биполярный код

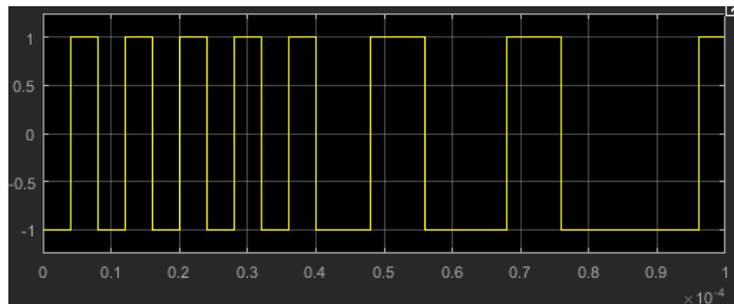


Рисунок 18 – Осциллограмма перемноженных входных сигналов, имеющего биполярный код

В качестве проверки работоспособности стандарта ZigBee, на рисунках 19 и 20 приведены осциллограммы входного сигнала и сигнала, полученного приемником.

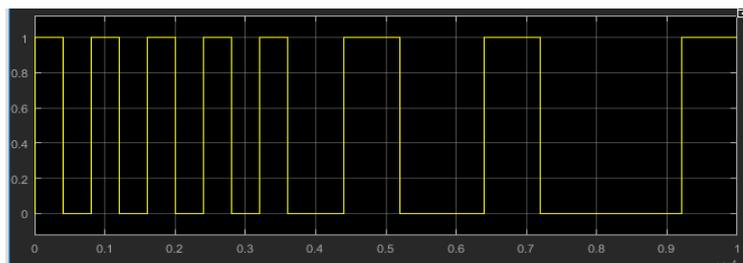


Рисунок 19 – Осциллограмма входного сигнала

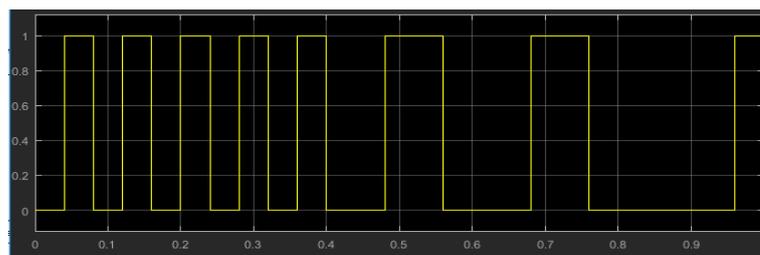


Рисунок 20 – Осциллограмма сигнала, полученного приемником

Как видно по рисунку, сигнал сдвинут по времени, и был передан без ошибок. Стандарт ZigBee пригоден к использованию.

Для оценки помехоустойчивости и определения вероятности битовой ошибки в схеме стандарта ZigBee используется блок Raw BER, параметры которого представлены на рисунке 21.

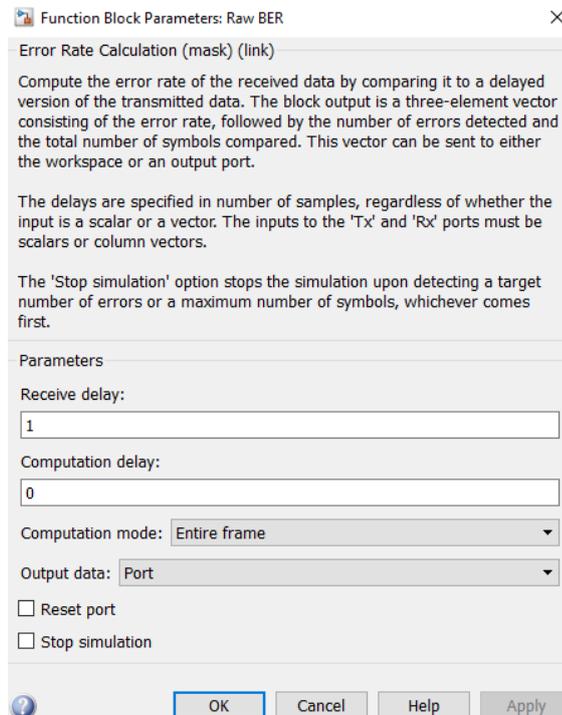


Рисунок 21 – Параметры блока RawBER

Также в схеме присутствует счетчик ошибок, который показывает, сколько бит с ошибкой было получено приемником.

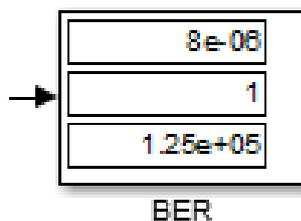


Рисунок 22 – Счетчик ошибок

Оценим помехоустойчивость стандарта ZigBee. Для этого построим график зависимости BER от отношения SNR.

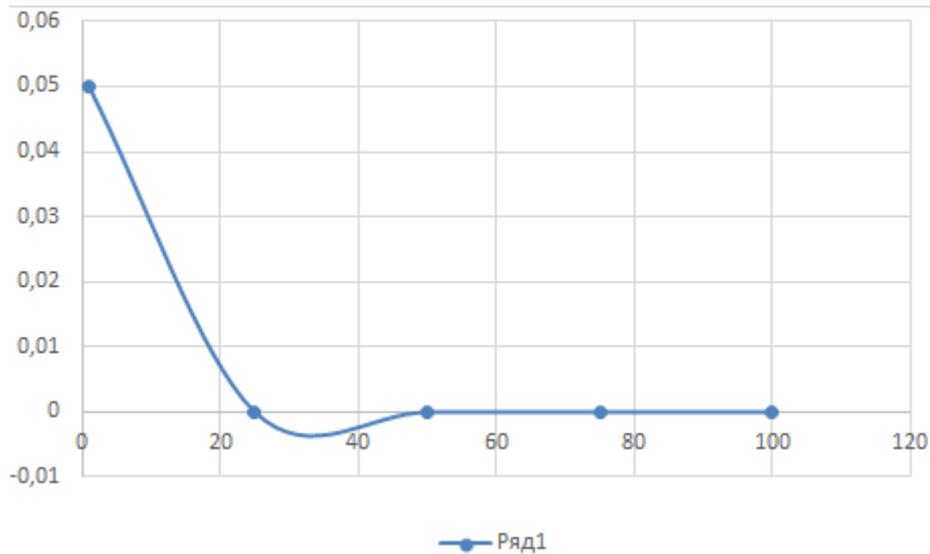


Рисунок 23 – График зависимости BER от SNR  
(1000 символов в сообщении)

По рисунку 23 видно, что с увеличением SNR снижается количество ошибок. В ходе выполнения лабораторной работы изучается принцип работы стандарта IEEE.802.15.4 ZigBee. Исследуется структура модели системы мобильной связи стандарта IEEE.802.15.4 ZigBee MATLAB, исследуется помехоустойчивость - зависимость BER от SNR.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: Учебное пособие / А.М. Голиков. - СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 452с.