

УДК 621.396.24

## Моделирование сверхширокополосной системы в среде Simulink

Измestьева Е. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Постановка задачи:** разработка модели сверхширокополосного (СШП) приемника и передатчика с каналом связи в среде Simulink с учетом принципов построения СШП систем для проведения оценки первичных параметров. **Целью работы** является реализация в модели источника СШП сигнала в виде потока хаотических радиоимпульсов и последующее сопряжение с блоками, характерными для приемников и передатчиков. **Новизна:** элементы новизны носят настройки блоков схемы модели, необходимые для обеспечения работы с источником СШП сигнала, а также отвлечение в виде детектора для последующих исследований. **Результат:** получение алгоритма составления модели, проведение проверки на работоспособность при применении оценки по количественному параметру – коэффициенту битовых ошибок. **Практическая значимость:** разработанная в Simulink модель СШП системы является основой для изучения значений первичных параметров системы перед ее физической реализацией и проведения экспериментов, расширяющих возможности применения модели.

**Ключевые слова:** сверхширокополосные сигналы, хаотические радиоимпульсы, моделирование приемопередатчика, Simulink, MATLAB.

### Актуальность

Разработка сверхширокополосных (СШП) систем является одним из вариантов решения проблемы качественной передачи полезной информации по радиоканалу в условиях ограниченности радиочастотного спектра. Из-за постоянного роста пользователей и их требований к количеству, качеству, скорости передаваемой информации [1] необходимо увеличивать количество каналов в связи с ростом числа устройств, способных принимать и передавать сигнал, а также расширять эти самые каналы для увеличения пропускной способности в узкополосных и широкополосных системах связи. Однако подобный экстенсивный метод не является наиболее эффективным, потому что он приводит к уплотнению радиочастотного спектра. Поэтому развивается идея применения СШП систем, характеризующихся широкими полосами частот, к примеру, от 500 МГц в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, и возможностью повторного использования спектра [2].

Широкая полоса частот следует из определения СШП сигнала: СШП сигнал – это сигнал с полосой частот от 500 МГц в диапазоне 3,1–10,6 ГГц (в Российской Федерации диапазон: 2,85–10,6 ГГц) или с показателем широкополосности равным или более 20%. Под возможностью же повторного использования спектра понимается применение тех же частот, что и для ранее известных систем, без оказания значительного влияния на передачу информации по их каналам. Обеспечивается это за счет низкой спектральной мощности СШП сигналов, схожей с уровнем шумов. Без приемника, способного обнаружить СШП сигнал, будет сложно его идентифицировать.

### Библиографическая ссылка на статью:

Измestьева Е. А. Моделирование сверхширокополосной системы в среде Simulink // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 1. С. 1. EDN: AQHJOU

### Reference for citation:

Izmesteva E. Modeling a UWB system in the Simulink // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss. 1. P. 1. EDN: AQHJOU

Таким образом, разработка СШП систем и, соответственно, их моделей становится перспективным направлением. Модели являются важной частью, из-за того, что по ним оцениваются параметры СШП системы, которую планируется реализовать в физическом варианте без дополнительных затрат на постоянную доработку оборудования на всех этапах проектирования. Создание моделей экономит ресурсы, что и обуславливает актуальность их разработки в средах программирования.

### Постановка задачи моделирования

Результатом моделирования является рабочая СШП система на основе хаотических радиоимпульсов в среде Simulink. Для ее реализации необходимо разбить процесс на подзадачи:

- углубление в исследования, на основе которых были выявлены базовые принципы построения СШП систем с источником в виде потока хаотических радиоимпульсов;
- сборка источника из простейших блоков, представленных в среде моделирования за исключением в нем готовых блоков для работы с СШП сигналами;
- сопряжение всех элементов системы для формирования имитации передатчика и приемника радиосигнала в соответствии с параметрами, удовлетворяющими теории сверхширокополосности;
- проверка работоспособности модели по количественной характеристике, применяемой в широкополосных и узкополосных схемах – BER (*аббр. от англ. Bit Error Rate* или коэффициент битовых ошибок).

Таким образом упрощается процесс моделирования и формируются дальнейшие пути развития модели.

### Методы реализации СШП систем

Особенность СШП сигналов заключается в их сверхкратковременности, которая и приводит к расширению спектра, согласно первому документу, регулирующему данный вид сигналов [3]. Отсюда возникает разнообразие источников, так как применение в системах тех же пачек импульсов вместо одного импульса приводит к увеличению расстояния передачи данных.

Вид модели СШП системы в первую очередь зависит от источника СШП сигнала. На данный момент не существует стандартизированной классификации источников, однако на основе теоретических и практических исследований выделяются *четыре наиболее часто используемые* [4–6].

#### 1. Ультракороткие импульсы.

В СШП системах частот наиболее применяемым видом ультракороткого импульса является первая производная от кривой распределения Гаусса. При этом вид не влияет на общее определение ультракоротких (сверхкоротких) импульсов: они являются таковыми, если длительность одного импульса составляет 200 и менее пикосекунд. Спектр мощности же зависит от длительности импульса, и его ширина по частотной оси составляет от 0 до  $1/T$ , где  $T$  – длительность ультракороткого импульса.

#### 2. Хаотические радиоимпульсы.

Радиоимпульсы малой длительности, особенность которых заключается в спектре мощности, не зависящем от длительности импульса при соблюдении ряда условий. При этом спектральная мощность определяется исходным спектром непрерывного хаотического сигнала.

3. Сигналы с ортогонально-частотным мультиплексированием (OFDM, *аббр. от англ. Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

В основе лежит применение сигнала с OFDM-технологией, которая позволяет расширить полосу в спектре до требуемых 500 МГц и более.

#### 4. Сигналы с прямым расширением спектра (DSSS, *аббр. от англ. Direct Sequence Spread Spectrum*).

В широкополосных системах связи уже есть опыт применения сигналов с DSSS, однако в рамках СШП систем отличие от уже известных широкополосных систем с применением DSSS (т. е. сравнение идет с системами, которые описываются до запятой) заключается в укороченной длительности чипа, сравнимой со сверхкоротким импульсом. Сформированная псевдослучайная последовательность имеет низкий уровень плотности мощности на выходе, что делает его подходящим под определение.

Главными критериями выбора основы для проектируемой модели становятся низкая спектральная мощность и простота реализации в цифровом виде. Стоит отметить, что на каждый источник СШП сигнала приходится свои правила построения модели, которые, как и метод синтеза источника, могут влиять на выбор окончательного варианта для реализации в программной среде. Таким образом, хаотические радиоимпульсы, из которых формируется поток, становятся наиболее подходящим в рамках данного моделирования.

Системы на основе потока хаотических радиоимпульсов относят к системам динамического хаоса, где ключевой момент состоит в использовании фрагмента сигнала длиной, превышающей длину квазипериода хаотических колебаний. Поэтому с учетом данной особенности были сформированы три базовых правила, применяемых при построении СШП системы с потоком хаотических радиоимпульсов [7]:

- генерирование хаотических сигналов производится источником непосредственно в заданной полосе СВЧ диапазона;
- ввод сигнала, несущего полезную информацию, в хаотический сигнал осуществляется путем формирования потока хаотических радиоимпульсов;
- на приемной стороне извлечение полезного информационного сигнала из общего потока производится без промежуточного преобразования частоты.

Выбор простого в воспроизведении источника сигнала, формирование самого сигнала в определенном пределе полосы частот, соблюдение базовых правил делают из представленной ниже модели модель СШП системы, по которой можно проводить исследования в рамках учебных, научных и практических целей.

### Вид имитационной модели

Общий вид имитационной модели СШП системы представлен на рисунке 1.

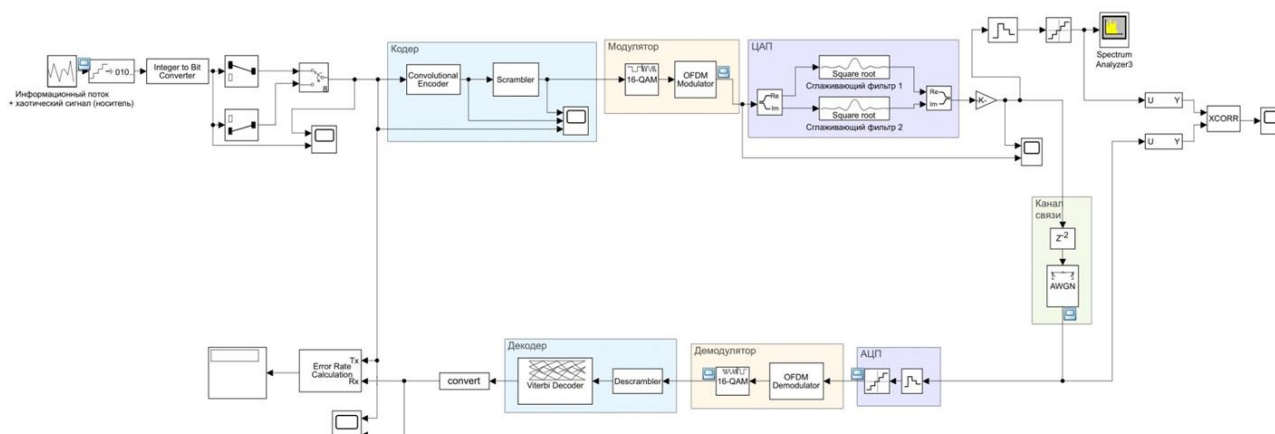


Рис. 1. Общий вид модели СШП системы в среде Simulink

В данной модели сохраняются главные блоки, присущие большинству систем связи: источник сигнала, кодер, модулятор, демодулятор, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), канал связи, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), демодулятор и декодер. Их синтезирование происходило в среде Simulink с использованием библиотек, таких как Communications Toolbox, Communications Toolbox HDL Support, DSP System Toolbox и стандартной.

Однако часть блоков системы, к примеру, промежуточные усилители, в целях упрощения были опущены, так как их нахождение в данной схеме минимально влияет на конечный результат, но вместе с этим может увеличить время, затрачиваемое на симуляцию.

Для приемной же стороны важно отметить нахождение в системе канала связи с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ), где и задается численное значение отношения сигнал/шум (ОСШ или SNR, аббр. от англ. Signal-to-Noise Ratio).

### Метод синтеза источника сигнала

Как упоминалось ранее, построение модели осуществляется на основе трех базовых принципов, адаптируемых в среде моделирования в соответствии с ее возможностями. В системе на основе хаотических радиоимпульсов ширина полосы частот данного импульса соответствует ширине полосы частот хаотического радиосигнала. Поэтому для реализации достаточно найти аналог источника хаотического сигнала, где есть возможность изменения начальных параметров для их приближения к реальным.

В качестве источника хаотического сигнала можно выбрать генератор псевдощумового аналогового сигнала, который является одним из самых распространенных среди используемых [7] для осуществления генерации основы под информационный сигнал.

Генератор псевдощумового сигнала, реализованный в модели, имеет в основе случайный процесс с нормальным распределением и с нулевым математическим ожиданием. Описывается он следующей функцией распределения:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (1)$$

где  $\Phi(x)$  – функция распределения вероятности;  $x$  – непрерывная случайная величина;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение (СКО);  $a$  – математическое ожидание.

Помимо этого, для упрощения блок Random Source, являющийся источником потока хаотических радиоимпульсов, на момент начала обработки сигнала уже содержит в себе сообщение. Предполагается, что несущая частота была промодулирована хаотическим сигналом с заданными параметрами до формирования битовой последовательности и только после этого наложена на информационный сигнал [8]. Подобный метод синтеза позволяет сократить ресурсы, затрачиваемые на симуляцию, а также упрощает понимание процессов, происходящих до начала кодирования, модулирования и передачи сигнала в канал связи.

### Принцип работы основных блоков

Сформированный на источнике сигнал в первую очередь подвергается кодированию, функция которого заключается в повышении помехоустойчивости системы. Кодирование также может применяться для повышения криптографической стойкости, но эта способность на данном этапе моделирования не учитывается.

В качестве помехоустойчивого кода был выбран непрерывный, потому что, во-первых, поток хаотических радиоимпульсов проще обрабатывать по битам, во-вторых, сверточное кодирование, относящееся к непрерывным кодам, используется в действующем приемопередатчике СШП сигналов, схема которого находится в технической спецификации [9]. На рисунке 2 представлена вырезка из документации, доказывающая применение непрерывных кодов для повышения помехоустойчивости.

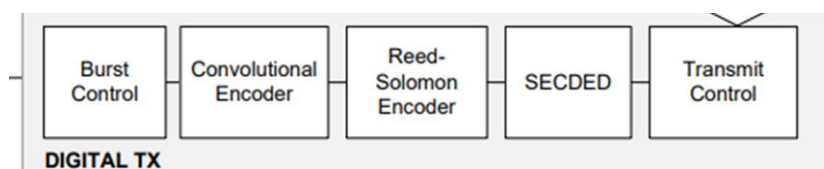


Рис. 2. Структурная схема цифрового СШП передатчика DW1000 [9]

На приемной стороне сверточному кодеру соответствует декодер Витерби. Его задача заключается в проведении алгоритма, по которому строится единственно верный путь по методу максимума правдоподобия. Именно таким образом формируется предполагаемая исходная последовательность [10].

В модели блоки реализованы под названиями Convolutional Encoder и Viterbi Decoder.

К кодированию также относятся блоки перемежения (на схеме – Scrambler) и устройство по восстановлению после перемежения (на схеме – Descrambler). Их использование позволяет более равно-

мерно распределить ошибки на приемной стороне, так как при воздействии помехи в каком-либо из моментов передачи на приемной стороне переставленная последовательность собирается в изначальную, из чего получается, что декодеру Витерби необходимо исправлять одиночные ошибки, а не их группу. Для наглядности блоки кодирования и декодирования из общей схемы представлены на рисунках 3 и 4.

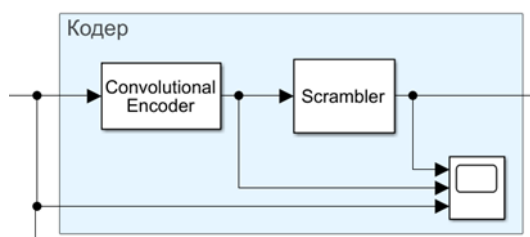


Рис. 3. Блок кодера

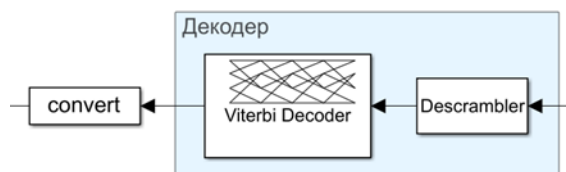


Рис. 4. Блок декодера

После кодирования сигнал проходит через модуляцию. В теории и на практике данная часть обработки сигнала может опускаться, что продемонстрировано в действующей модели [9]. Делается это по причине наличия у СШП сигналов спектральной мощности сравнимой с шумами, из-за чего их передаче не будут препятствовать внешние факторы, а возникающие ошибки легко исправляются кодированием. Модуляция, используемая в имитационной модели, позволяет увеличить количество передаваемых данных.

Используемая в схеме модуляция – 16-QAM (аббр. от англ. Quadrature Amplitude Modulation, квадратурно-амплитудная модуляция), позволяющая увеличить передачу за момент времени с 1 бита до 4 битов. На приемной стороне ей соответствует блок демодуляции. Непосредственно в модели они являются готовыми блоками, как и блоки кодирования. Их названия: Rectangular QAM Modulator Baseband и Rectangular QAM Demodulator Baseband (рисунок 5).

Помимо QAM-модуляции в модели используется OFDM-модуляция (рисунок 6). Она выражена блоками OFDM Modulator и OFDM Demodulator, используемыми для борьбы с негативными эффектами от многолучевого распространения. Данные блоки представлены как вырезки из общей блочной схемы имитационной модели.

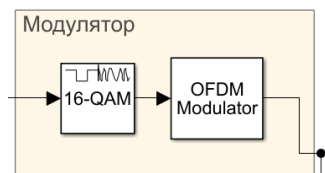


Рис. 5. Блок модулятора

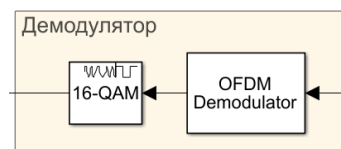


Рис. 6. Блок демодулятора

Заключительными блоками приемника и передатчика являются ЦАП и АЦП. Первый (рисунок 7) необходим для сглаживания и ограничения спектра цифрового сигнала, поступающего с выхода модулятора, так как прямоугольный импульс в сигнале имеет бесконечный спектр, из-за чего в теории может мешать передаче информации на соседних каналах. Применение функции позволяет ограничить спектр и сохранить концентрирование энергии в главном лепестке спектра.

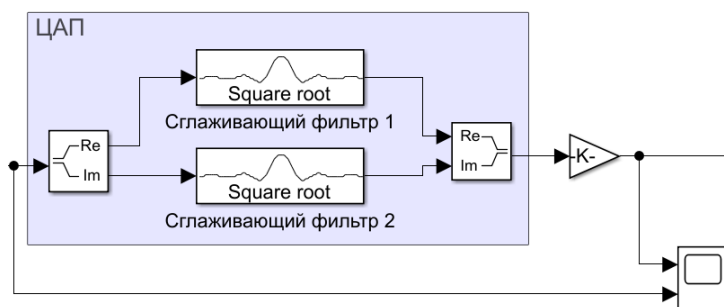


Рис. 7. Блок ЦАП

Блок ЦАП строится на основе двух сглаживающих фильтров с функцией корня из приподнятого косинуса. Это необходимо для обработки реальной и мнимой частей, возникающих после использования блока QAM-модулятора.

Что касается АЦП на приемной стороне, то он состоит стандартных блоков: дискретизатора, реализованного в схеме как блок Zero-Order Hold, и квантователя, который находится в схеме под именем Quantizer.

Применение всех упомянутых блоков удовлетворяет базовым принципам построения, что и являлось одной из главных задач при создании имитационной модели СШП системы.

### Назначение параметров

Для корректной работы модели необходимо задать параметры, которые будут соответствовать интересующим параметрам СШП сигнала (в модели частота моделирования – 528 МГц), а также согласовать все блоки из разных библиотек между собой [11]. По данной причине в общей схеме (см. рисунок 1) помимо основных блоков находятся такие, как Convert, Complex to Real-Imag и т. д.

Так, в генераторе потока хаотических радиоимпульсов присутствуют блоки:

- Random Source или поток хаотических радиоимпульсов в данной модели с параметрами: среднее значение выборки – 0, дисперсия – 1,1;
- Uniform Encoder и Integer to Bit Converter, необходимые для формирования из случайного сигнала поток единиц и нулей;
- N-Sample Switch, предназначенный для формирования единого потока, так как на рисунке 8 продемонстрировано, что после блока Integer to Bit Converter формируется две последовательности, хотя для дальнейшей работы необходима одна, которая данным блоком и формируется (рисунок 9).

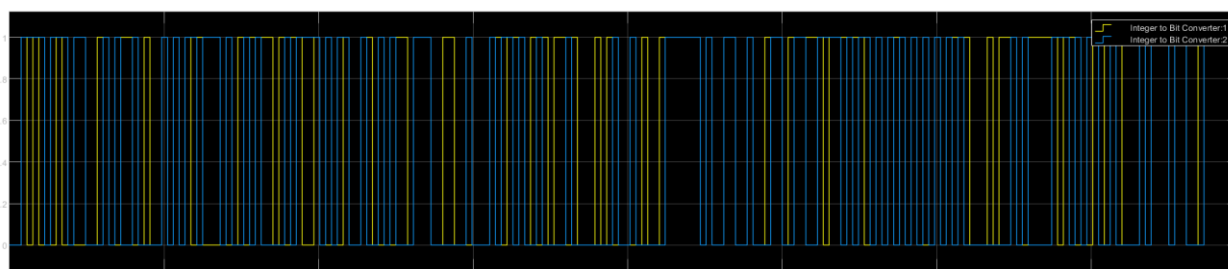


Рис. 8. Сигнал, сформированный блоком Integer to Bit Converter

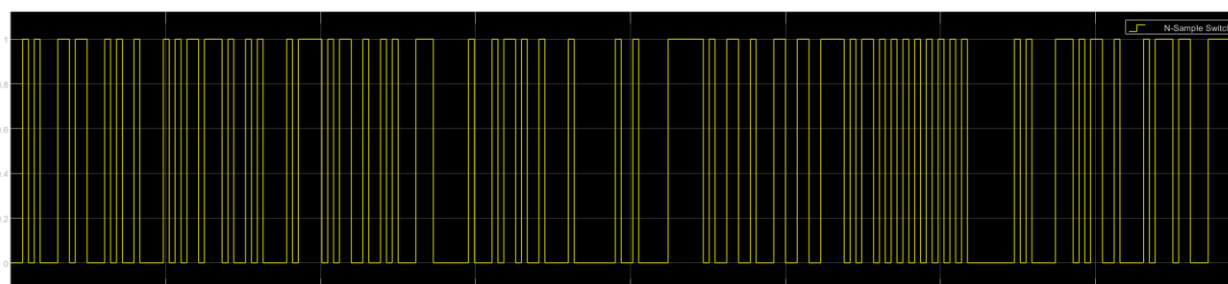


Рис. 9. Хаотический сигнал в цифровом виде

Таким образом, на рисунке 8 представлены последовательности, где желтый график соответствует первым битам, формирующимся при квантовании уровней, а синий график – вторым битам. На рисунке 9 представлено их объединение, являющееся оцифрованным хаотическим сигналом.

Параметр сверточного кодера: скорость кодирования, задаваемая в поле Trellis Structure: poly2trellis (3 [6, 7], что расшифровывается, как скорость равная 1/2) [12].

В декодере Витерби для корректной расшифровки задается та же структура. Единственное отличие заключается в наличии поля Traceback Depth (глубина обратной трассировки), которому задается

значение 5. Сделано это с целью исключения ошибок в BER, связанных с задержками в сигнале. В модели данная глубина представляет собой количество нулевых символов, предшествующих первому декодированному символу.

Параметр перемежителя: Scramble Polynomial – [0 – 1 – 2 – 3]. Данное выставление необходимо для обработки сигнала в 16-QAM модуляторе. Параметры устройства перемежения и устройства по восстановлению после перемежения полностью совпадают. Настройки, выставленные в блоке 16-QAM модулятора: формирование созвездия по минимальной дистанции между символами, минимальная дистанция – 1, сдвиг фазы – 0. На приемной стороне эти данные совпадают.

Особенность вставки параметров в OFDM: длина быстрого преобразования Фурье (аналог количества поднесущих) – 64, длина CP (*аббр. от англ. Cycle Prefix* – циклический префикс) – 16, количество поднесущих, выделенных для защитного интервала – (31; 31). Физически защитные интервалы необходимы для предотвращения межсимвольной интерференции [13], однако из-за необходимости согласования блоков интервал выставляется таким образом для формирования на выходе только двух последовательностей – максимальное количество, которое может обработать блок Витерби на приемнике.

Параметры сглаживающего фильтра в блоке ЦАП: основа – корень из приподнятого косинуса; коэффициент скругления – 0,8; количество символов, до которых обрезается бесконечная импульсная характеристика, равно 4. Последняя характеристика влияет на скорость симуляции, которая упирается в производительность вычислительной машины, поэтому, чтобы не перегружать устройство, было выбрано малое количество символов. Хотя для лучшего сглаживания, конечно, необходимо большее их число.

В блоке коэффициента усиления Gain выставляется значение 1,1.

### Канал связи

В качестве канала связи был выбран канал с АБГШ, который на схеме (см. рисунок 1) представлен блоком AWGN. В нем, как и говорилось изначально, выставляется SNR, влияющий на количество ошибок на приемнике.

Выбор данного канала связан с тем, что он использует аддитивную помеху, влияющую на параметры передаваемого сигнала, но от этих самых параметров не зависящую. Поэтому модель канала можно представить в виде следующей зависимости:

$$s(t) = \alpha x(t) + n(t), \quad (2)$$

где  $s(t)$  – сигнал на выходе канала;  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $x(t)$  – сигнал на входе канала;  $n(t)$  – случайный процесс.

В качестве случайного процесса был выбран АБГШ, так как такого простого и известного распределения достаточно для проведения проверки на помехоустойчивость.

Выставляемое ОСШ для наглядности работы блоков равно 25 дБ. В дальнейшем для получения зависимости данное значение будет изменяться.

### Результаты работы блоков

Для демонстрации того, что источник потока хаотического радиоимпульса действительно генерирует сигнал в полосе 528 МГц, на рисунке 10 показан его спектр. График отображает заданное значение. Однако стоит отметить, что для исключения в схеме фильтрации сигнал был сразу сгенерирован в рамках выбранной полосы, поэтому спектр и выглядит следующим образом. Оцифровывание данного сигнала было представлено на рисунке 9, где объяснялась причина появления ряда дополнительных блоков, не имеющих прямого отношения к модуляции. В таком виде появляется возможность обработки сигнала, поэтому он поступает на вход кодера. Результаты отображаются на осциллографе (рисунок 11).

Для понимания на рисунке 11 представлены осциллограммы сразу с двух устройств: нижняя принадлежит сверточному кодеру, а верхняя – перемежителю. В ходе проведения кодирования исходная последовательность преобразуется в две из-за отсутствия в блоке Convolutional Encoder внутреннего

коммутатора, который делал бы из двух последовательностей одну согласно заданному алгоритму. Это поясняет и результаты на осциллограмме перемежителя, а точнее, почему на ней отображены две последовательности.

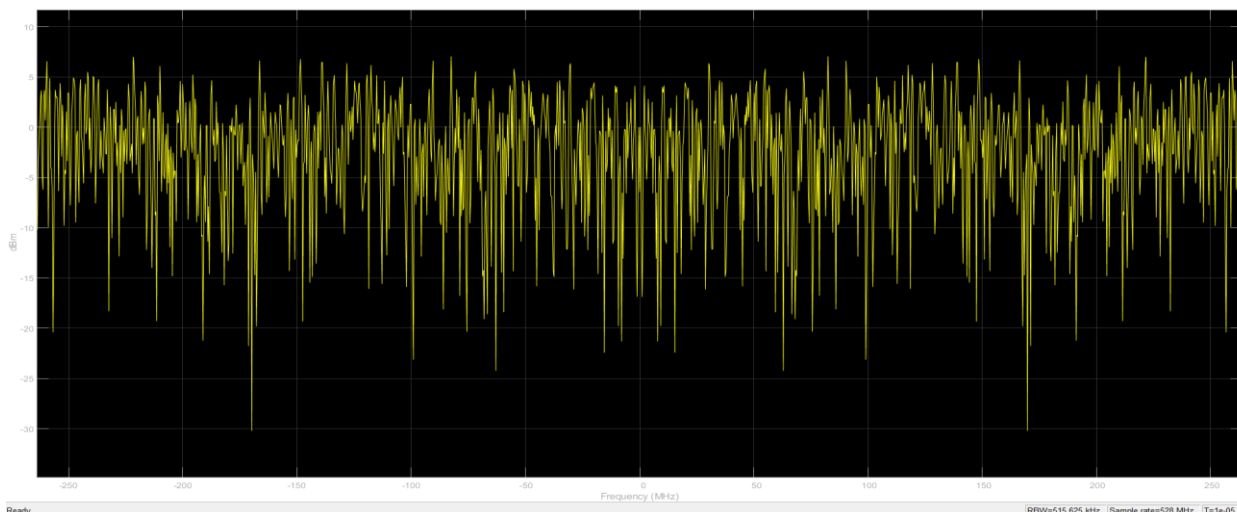


Рис. 10. Спектр хаотического радиосигнала

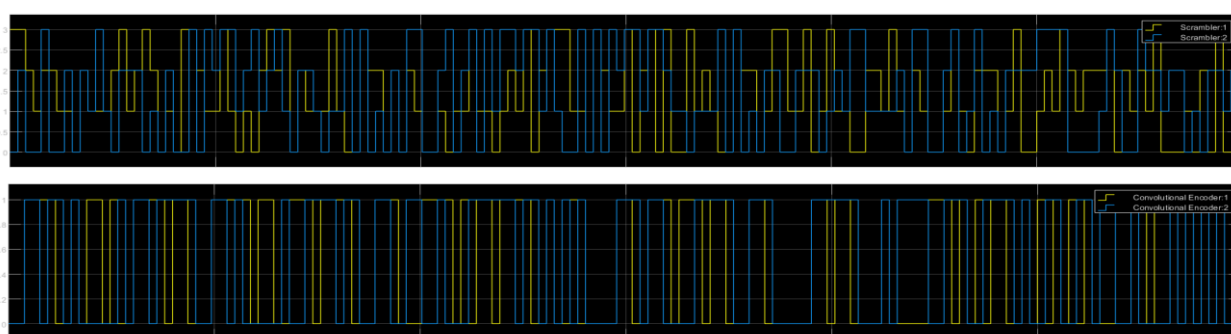


Рис. 11. Результаты кодирования

Полученный после кодирования сигнал поступает в блок модулятора. Главной частью, интересующей нас после преобразования, является спектр на выходе модулятора (рисунок 12). Он отличается от спектра на источнике (см. рисунок 10), однако данное представление сигнала допустимо и не противоречит основам построения СШП систем [14].

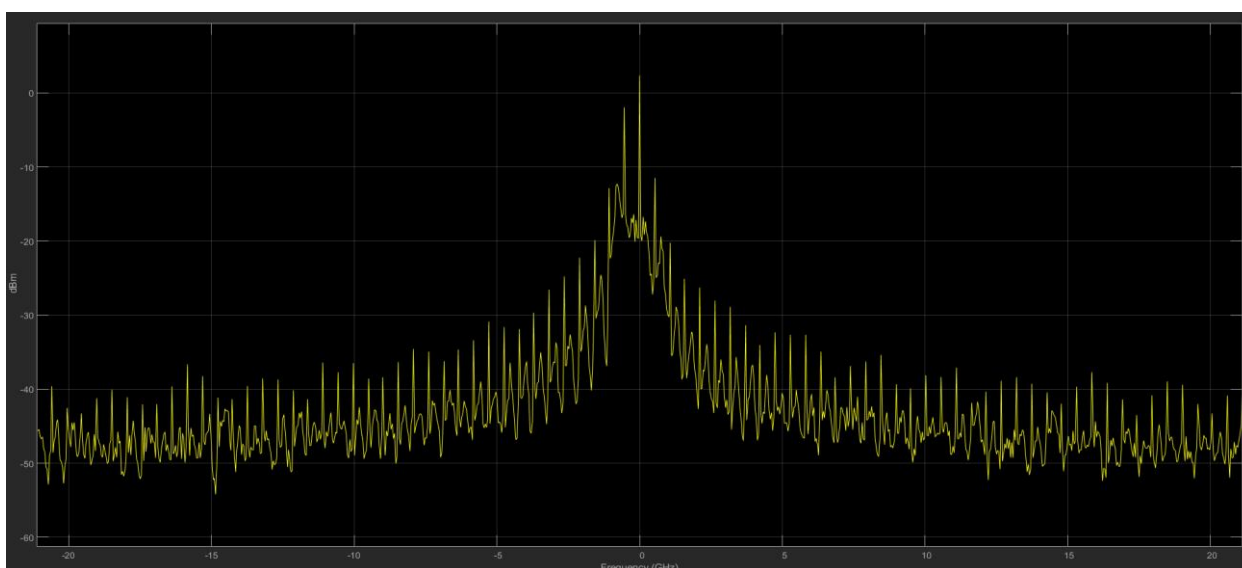


Рис. 12. Спектр хаотического сигнала после модуляции



Сигнал на выходе передатчика изображен на рисунке 13. Множество графиков демонстрирует работу модулятора, а также ЦАП, что оценивается по вершинам – они сглажены. В таком виде хаотический сигнал с полезной информацией поступает на приемник после прохождения через АБГШ канал связи (рисунок 14). Искажение проявляется увеличением амплитуды каждого сигнала по сравнению с множеством сигналов на рисунке 13. На приемной стороне сигнал подвергается оцифровке (рисунок 15) с помощью применения блока АЦП.

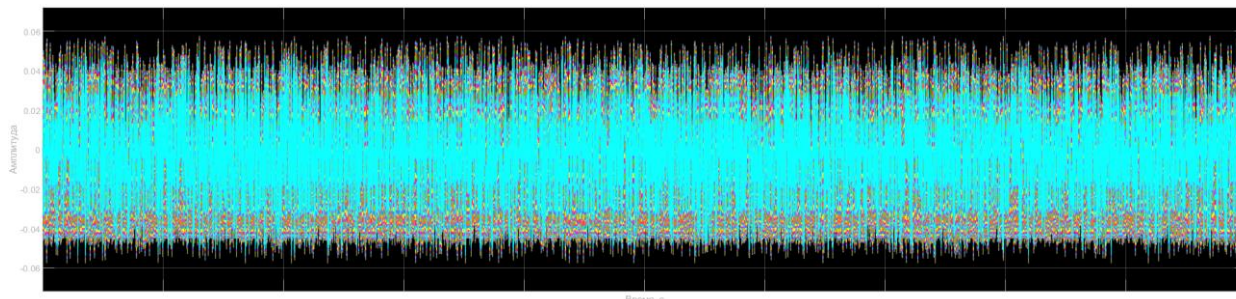


Рис. 13. Сигнал на выходе передатчика

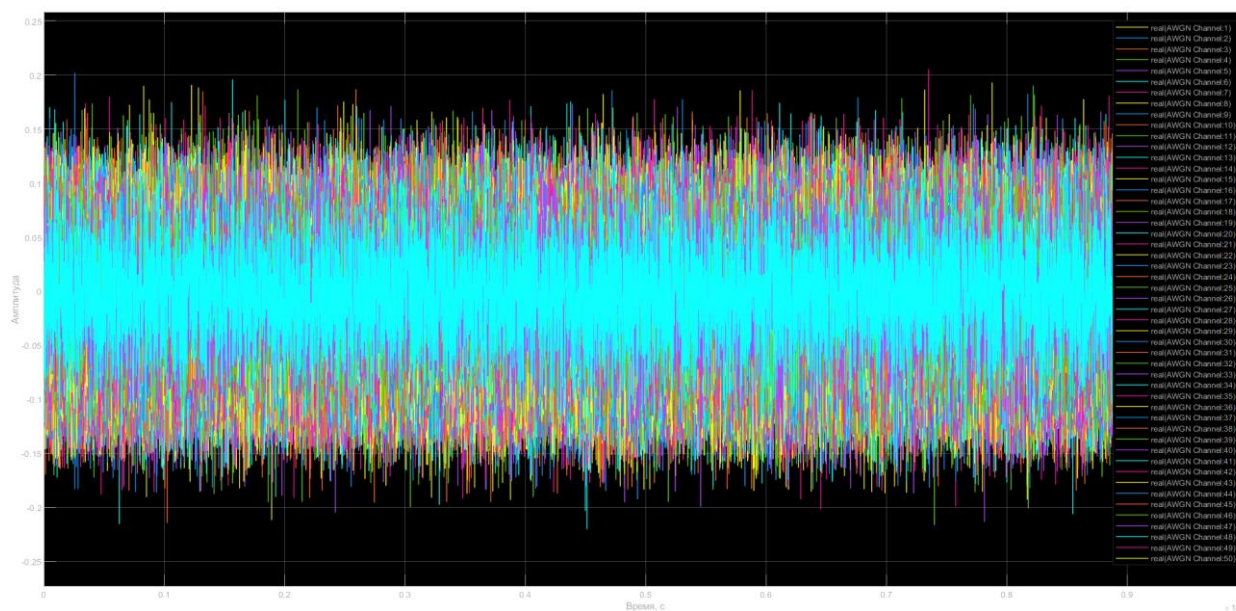


Рис. 14. Искаженный хаотический сигнал

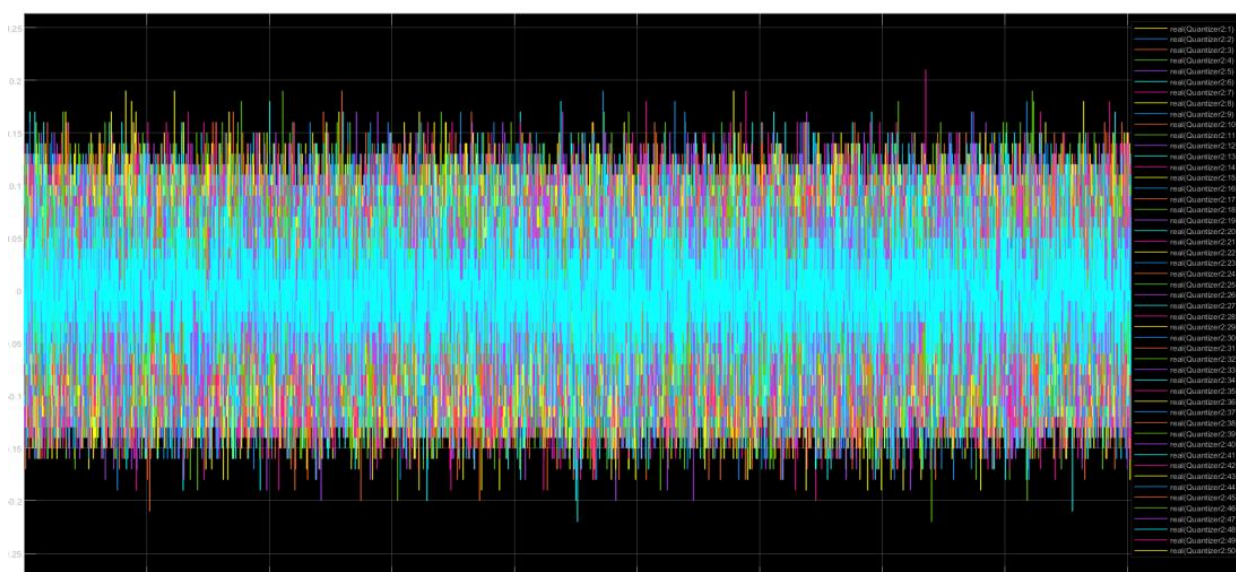


Рис. 15. Оцифрованный искаженный сигнал

По прямоугольным краям и делениям на промежутки времени делается вывод, что блок АЦП работает. Это происходит как с реальной частью сигнала, так и с мнимой. В подобном виде сигнал поступает на блок демодулятора, результаты которого представлены на рисунке 16.

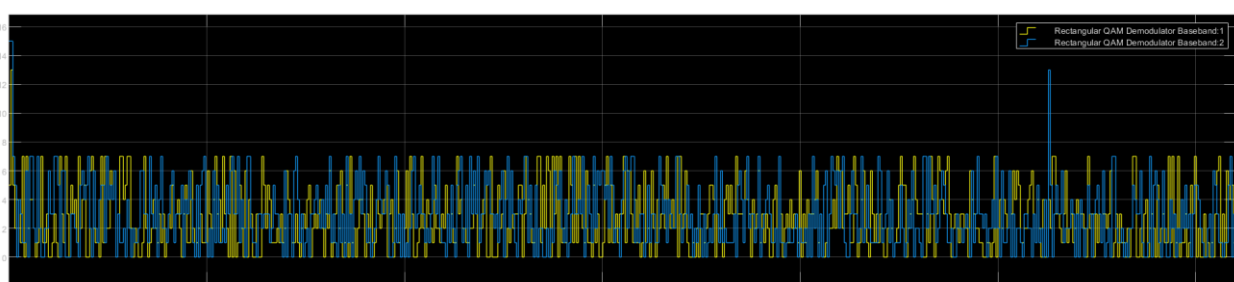


Рис. 16. Сигнал на выходе демодулятора

Из множества сигналов произошло преобразование в две последовательности, которые и поступали на блок модулятора, что говорит о корректности работы блока.

Последующие выводы о работоспособности делаются после прохождения сигнала через блок декодирования при помощи сравнения с цифровым сигналом, отправленным на передачу в канал (рисунок 17).

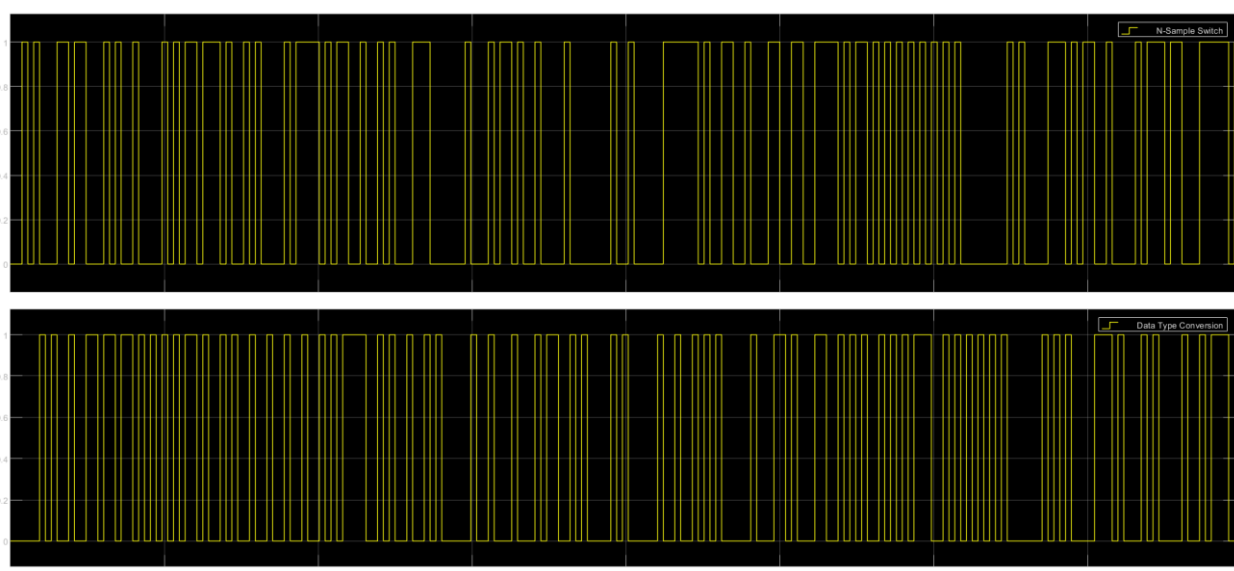


Рис. 17. Сравнение двух цифровых хаотических сигналов

В численном значении сравнение происходит при помощи блока Error Rate Calculation, где необходимо выставить значение в строке «задержка принятого сигнала» – 8. Задержка образуется из блока сверточного кодирования.

Численное значение BER отображено на рисунке 18.

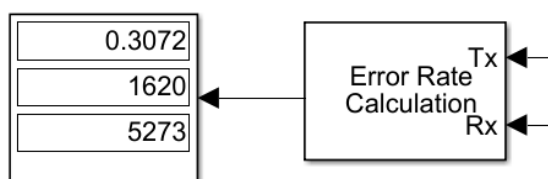


Рис. 18. Блоки для вычисления BER

Первое поле, изображенное на выходе калькулятора ошибок, обозначает непосредственно значение BER, второе поле – количество ошибок, а третье поле – общее количество бит, по которым проводились измерения.

### Результаты проверки работоспособности модели

Для вычисления коэффициента битовых ошибок в среде моделирования Simulink есть блок Error Rate Calculation. При изменении ОСШ в канале значения на дисплее должны изменяться. Поэтому для проведения проверки работоспособности модели СШП системы были произведены несколько симуляций, значения которых сведены в таблицу 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты исследования зависимости BER от SNR

SNR, дБ	BER	Количество битов	
		ошибочных	принятых
1	0,4954	2612	5273
10	0,5084	2681	
15	0,4923	2596	
17	0,4872	2569	
20	0,4675	2465	
23	0,4017	2118	
24	0,3808	2008	
25	0,3072	1620	
26	0,2833	1494	
27	0,2274	1199	
28	0,1669	880	
29	0,1254	661	
30	0,0999	527	
31	0,0565	298	
33	0,0313	165	
35	0,0076	40	
40	0,0002	1	

По данной таблице был сделан график зависимости коэффициента битовых ошибок (BER) от значения ОСШ (SNR) в канале связи (рисунок 19).

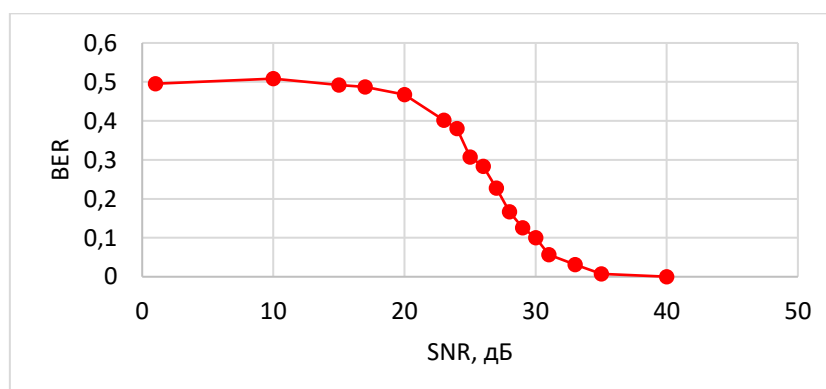


Рис. 19. Зависимость BER от SNR

Итоговая имитационная модель меняет значение BER на выходе в диапазон от 0,0002 до 0,5084, при этом с ростом ОСШ в итоговой последовательности уменьшается количество ошибочных битов. Это типичная зависимость для систем связи, где от уровня сигнала на приеме зависит качество обработки информации.

При неверном сопряжении блоков или ошибочно указанной задержке в конечном блоке, рассчитывающем коэффициент, показатель BER оставался бы в пределе от 0,49 до 0,51 независимо от ОСШ. График в таком случае представлял бы из себя прямую, что как раз не является типичным случаем.

По итогу работоспособность модели доказывается типичной зависимостью одного из количественного параметра, присущего для описания большинства систем связи.

## Заключение

В ходе моделирования были выявлены основные принципы построения СШП систем на основе хаотических радиоимпульсов и проблемы, возникающие при попытке сопряжения блоков из различных библиотек в программной среде Simulink. Результатом стала рабочая модель, подразумевающая под собой основу для дальнейших исследований, потому что анализ помехоустойчивости системы для одной конфигурации (16-QAM + OFDM) не является единственным критерием оценки.

В работе также подробно описываются входные параметры блоков всех частей системы, которые можно изменять для получения результатов в других направлениях исследования системы.

Для упрощения восприятия на каждый процесс, происходящий при передаче сигнала по системе, была предоставлена осциллограмма или изображение из спектроанализатора.

Данная имитационная модель, помимо всего упомянутого, также оставляет пространство для модификации и проведения исследований другого характера. К примеру, на ее основе можно составить схему, которая позволит проследить зависимость пропускной способности системы от вида модуляции.

Другим направлением исследования может стать доработка блока детектирования, представленного на рисунке 20.

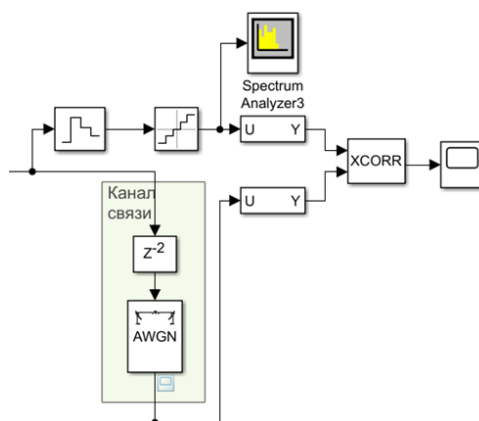


Рис. 20. Блок детектирования сигнала

Коррелятор в приемнике необходим для определения полезного сигнала среди шумов. В большинстве систем фигурируют такие понятия, как когерентный и некогерентный приемник. На рисунке 20 представлен вариант некогерентного приемника, который проще реализовать в рамках моделирования. Однако для СШП систем существуют и другие методы детектирования, к примеру, энергетическое [15], которое позволит определять нахождение сигнала по заранее заданному значению мощности.

## Литература

1. Шахнович Н. В. Современные технологии беспроводной связи. 2-е изд. М.: Техносфера, 2006. 288 с.
2. Косичкина Т. П. Исследование и разработка методов передачи и приема информации сверхширокополосными сигналами в системах радиодоступа: Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 10.02.2015. М., 2004. 24 с.
3. CFR 47. Chapter 1. Subchapter A. Part 15. Subpart F // Federal Communications Commission Federal Register. Rules and Regulations. 2002. Vol. 67. No. 95.
4. Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Клецов А. В., Кузьмин Л. В., Лактюшкин А. М. и др. Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 10. С. 1278–1289.
5. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. Часть 1. Основные понятия, модели и методы описания // Радиоп физика и радиоастрономия. 2008. Т. 13. № 2. С. 166–194.
6. Дмитриев А. С., Кузьмин Л. В., Панас А. И., Пузиков Д. Ю., Старков С. О. Прямохаотические системы связи // Успехи современной радиоэлектроники. 2003. № 9. С. 40–56.
7. Дмитриев А. С., Клецов А. В., Лактюшкин А. М., Панас А. И., Старков С. О. и др. Сверхширокополосная беспроводная связь на основе динамического хаоса // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 10. С. 1193–1209.

8. Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Клецов А. В., Кузьмин Л. В., Панас А. И. Способ формирования потока хаотических радиоимпульсов и формирователь хаотических радиоимпульсов // Патент на изобретение RU 2429566 С1; опубл. 20.09.2011.
9. DW1000 IEEE802.15.4-2011 UWB Transceiver. URL: <https://www.qorvo.com/products/p/DW1000#documents> (дата обращения 26.10.2023)
10. Никитин Г. И. Сверточные коды: Учебное пособие. СПб.: СПбГУАП, 2001. 80 с.
11. Солонина А. И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Simulink. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 432 с.
12. Convert Convolutional Code Polynomials to Trellis Description – MATLAB poly2trellis // Mathworks. Support. URL: <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/poly2trellis.html> (дата обращения 26.10.2023)
13. Modulate using OFDM method // Mathworks. Support. URL: [https://www.mathworks.com/help/comm/ref/ofdmmodulatorbaseband.html#mw\\_444477fd-1c40-40b8-8ec3-c05a14d4b495\\_head](https://www.mathworks.com/help/comm/ref/ofdmmodulatorbaseband.html#mw_444477fd-1c40-40b8-8ec3-c05a14d4b495_head) (дата обращения 26.10.2023)
14. Budhwar P., Kapoor D., Gupta N. Comparison Analysis of Modulation Technique of UWB, OFDM, and CDMA for Different Parameter // International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology. 2017. Vol. 3. Iss. 4. PP. 228–238.
15. Shaban H. A., Abou El-Nasr M. Performance Comparison of ED, TR and DTR IR-UWB Receivers for Combined PAM-PPM Modulation in Realistic UWB Channels // Progress in Electromagnetics Research Letters. 2012. Vol. 30. PP. 91–103. DOI:10.2528/PIERL11120906

**Статья поступила 24 сентября 2023 г.**  
**Одобрена после рецензирования 5 октября 2023 г.**  
**Принята к публикации 23 октября 2023 г.**

### **Информация об авторе**

*Измestъева Екатерина Александровна* – магистрант (направление 11.03.01 «Радиотехника»). Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: chainlo@yandex.ru

## Modeling a UWB system in the Simulink

E. Izmesteva

The Bonch-Bruевич St.-Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Purpose.** Development of a model of an ultra-wideband (UWB) receiver and transmitter with a communication channel in the Simulink environment, taking into account the principles of constructing UWB systems to evaluate the primary parameters. Also it is to implement a signal in the UWB source model in the form of a stream of chaotic radio pulses and subsequent interface with blocks characteristic of receivers and transmitters.

**Novelty.** Elements of novelty include the settings of the model circuit blocks necessary to ensure work with a UWB signal source, as well as a branch in the form of a detector for subsequent research. **Results.** Obtaining an algorithm for compiling a model, conducting a performance test when applying an assessment based on a quantitative parameter – the bit error rate. **Practical relevance.** The UWB system model developed in Simulink is the basis for studying the values of the primary parameters of the system before its physical implementation and conducting experiments that expand the possibilities of using the model.

**Key words:** UWB, chaotic radio pulses, transceiver modeling, Simulink, MATLAB.

### Information about Author

Ekaterina Izmesteva – master degree student. The Saint-Petersburg State University of Telecommunications. E-mail: chainlo@yandex.ru