

Том 1. № 1. 2023

Вестник СПбГУТ



Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Научный журнал

Вестник СПбГУТ

Том 1. № 1

Herald of SPbSUT

Vol. 1. Iss. 1

Санкт-Петербург

2023

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Editorial Board

Главный редактор *Editor-in-Chief*

Владыко А.Г. (Санкт-Петербург)
Vladyko A.G. (St. Petersburg)

Макаренко С.И. (Санкт-Петербург)
Makarenko S.I. (St. Petersburg)

Гехт А.Б. (Санкт-Петербург)
Gekht A.B. (St. Petersburg)

Дунайцев Р.А. (Санкт-Петербург)
Dunaytsev R.A. (St. Petersburg)

Зикратов И.А. (Санкт-Петербург)
Zikratov I.A. (St. Petersburg)

Калимуллина О.В. (Санкт-Петербург)
Kalimullina O.V. (St. Petersburg)

Кирик Д.И. (Санкт-Петербург)
Kirik D.I. (St. Petersburg)

Литвинов В.Л. (Санкт-Петербург)
Litvinov V.L. (St. Petersburg)

Окунева Д.В. (Санкт-Петербург)
Okuneva D.V. (St. Petersburg)

Симонина О.А. (Санкт-Петербург)
Simonina O.A. (St. Petersburg)

Сотников А.Д. (Санкт-Петербург)
Sotnikov A.D. (St. Petersburg)

Шутман Д.В. (Санкт-Петербург)
Shutman D.V. (St. Petersburg)

Юрова В.А. (Санкт-Петербург)
Yurova V.A. (St. Petersburg)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- 1 *Моделирование сверхширокополосной системы в среде Simulink*
Измestьева Е. А.
Modeling a UWB system in the Simulink
Izmesteva E.
- 2 *Технические требования к радиоконтрольному оборудованию для оценки параметров излучений беспилотных авиационных систем и определения местоположения их элементов*
Антипин Б. М., Виноградов Е. М., Терновская А. К., Александров И. В.
Technical requirements for radio monitoring equipment for assessing the radiation parameters of unmanned aircraft systems and determining the location of their elements
Antipin B., Vinogradov E., Ternovskaya A., Alexandrov I.
- 3 *Аналитический обзор подходов к построению моделей V2X-систем*
Суравцев Р. В.
Analytical Review of Approaches to Building Models of V2X Systems
Suravtsev R.
- 4 *Продвижение музыкального продукта с помощью личного бренда на примере альбома «Midnights» Тейлор Свифт*
Пыпина Д. Д., Астафьева-Румянцова И. Е.
Promoting a music product through personal branding using Taylor Swift's 'Midnights' album as an example
Pypina D., Astafjewa-Rumyantseva I.
- 5 *Перспективы систем передачи данных с поддержкой технологии прямого исправления ошибок*
Баталин Н. С., Подайко С. В., Кукунин Д. С.
Prospects of Data Transmission Systems with Support for Forward Error Correction Technology
Batalin N., Podaiko S., Kukunin D.
- 6 *Водородопроницаемые мембраны из сплавов V-Pd*
Передистов Е. Ю.
Hydrogen Permeable V-Pd Alloys Membranes
Peredistov E.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: Эл № ФС77-85553 от 28 июня 2023 г.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Адрес учредителя: 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, д. 61, литера А

Адрес редакции: 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22/1, к. 334/2

Тел.: +7 (812) 326-31-63, м. т. 2022, +79643759970

E-mail: vestnik@sut.ru
Web: <http://vestnik-sut.ru>

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.

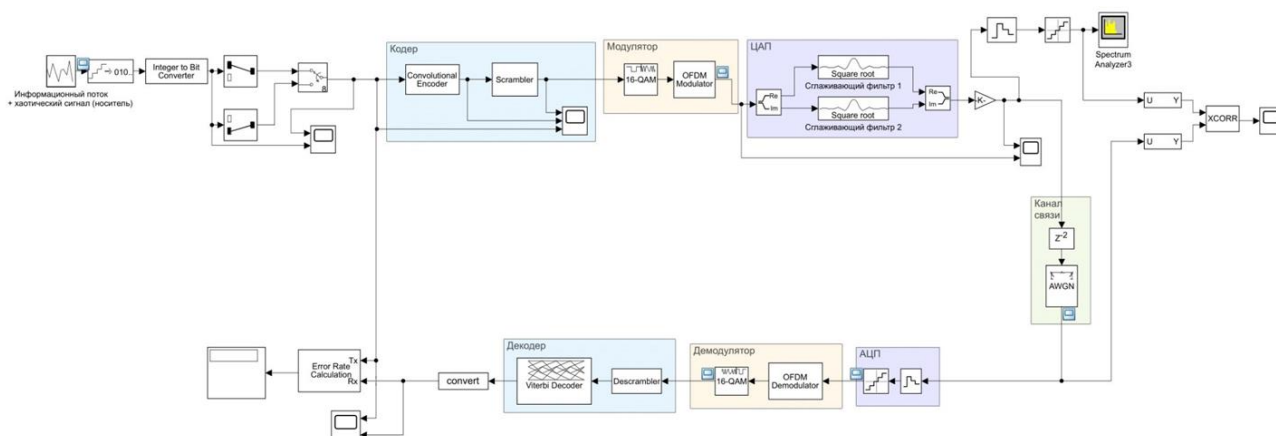


Рис. 1. Общий вид модели СШП системы в среде Simulink

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 псевдослучайного аналогового сигнала, который является одним из самых распространенных среди используемых [7] для осуществления генерации основы под информационный сигнал.

Генератор псевдослучайного 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; σ – 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.

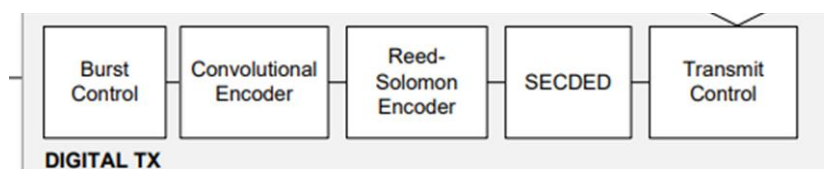


Рис. 2. Структурная схема цифрового СШП передатчика DW1000 [9]

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.

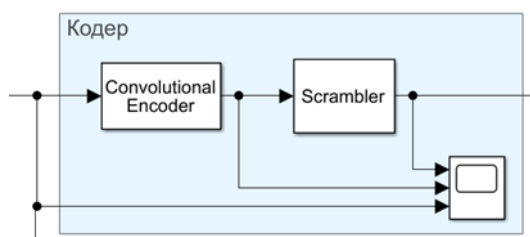


Рис. 3. Блок кодера

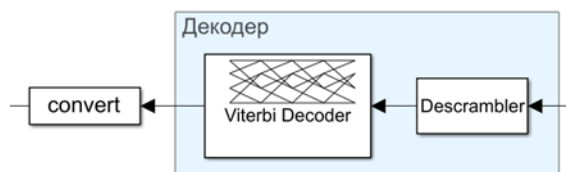


Рис. 4. Блок декодера

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.

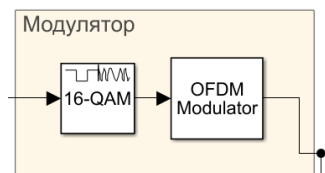


Рис. 5. Блок модулятора

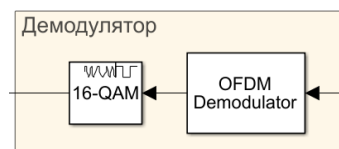


Рис. 6. Блок демодулятора

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.

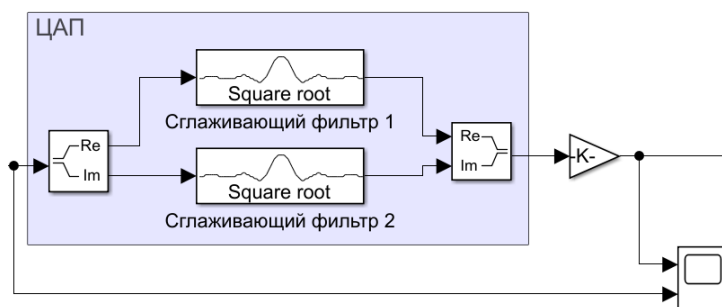


Рис. 7. Блок ЦАП

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).

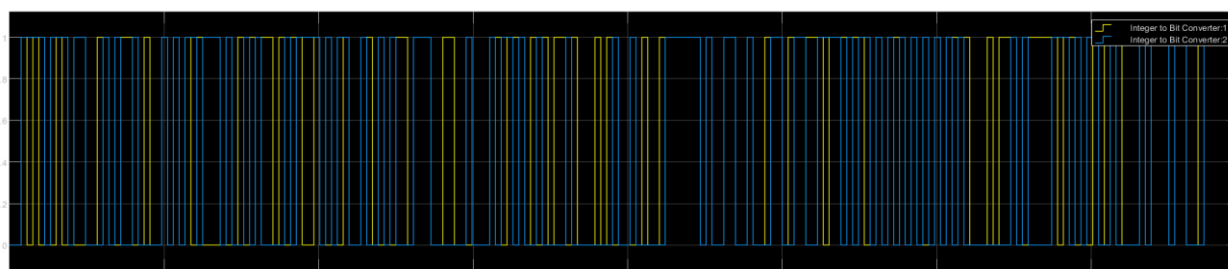


Рис. 8. Сигнал, сформированный блоком Integer to Bit Converter

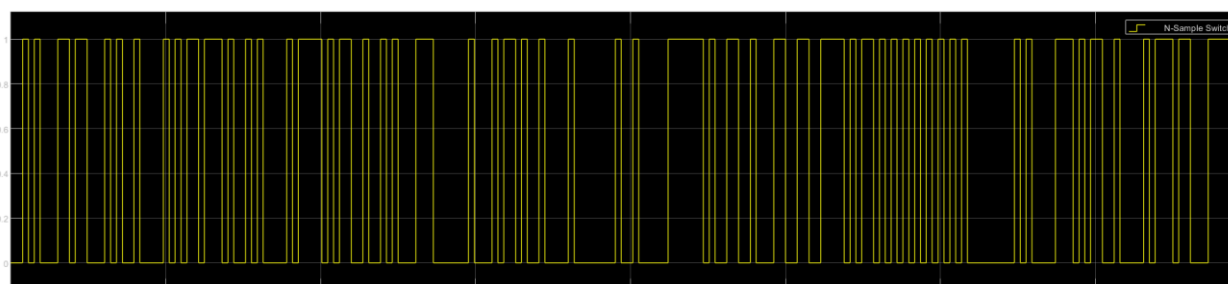


Рис. 9. Хаотический сигнал в цифровом виде

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; α – 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.

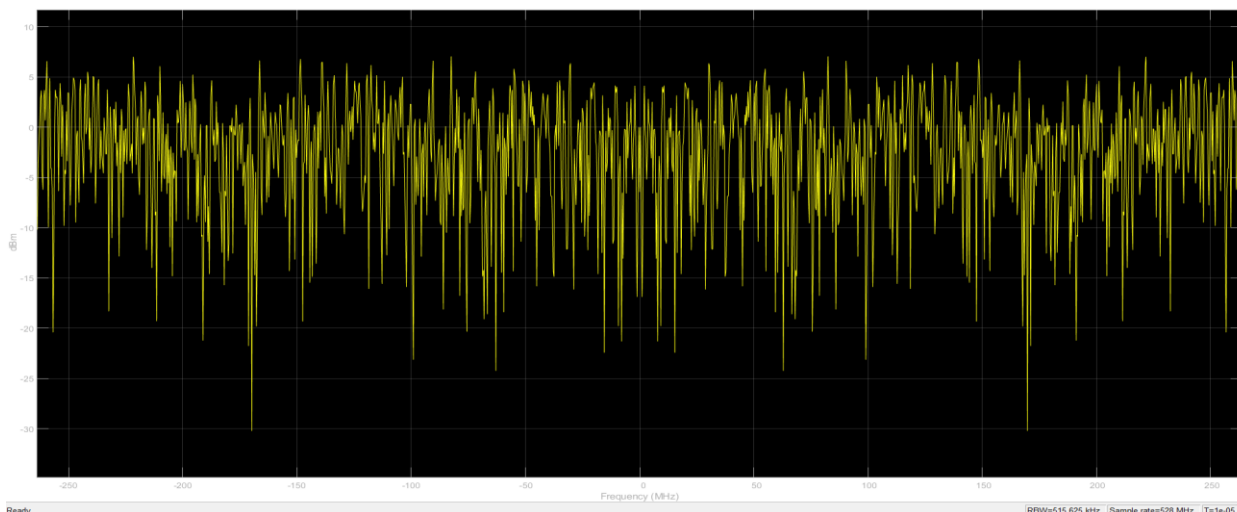


Рис. 10. Спектр хаотического радиосигнала

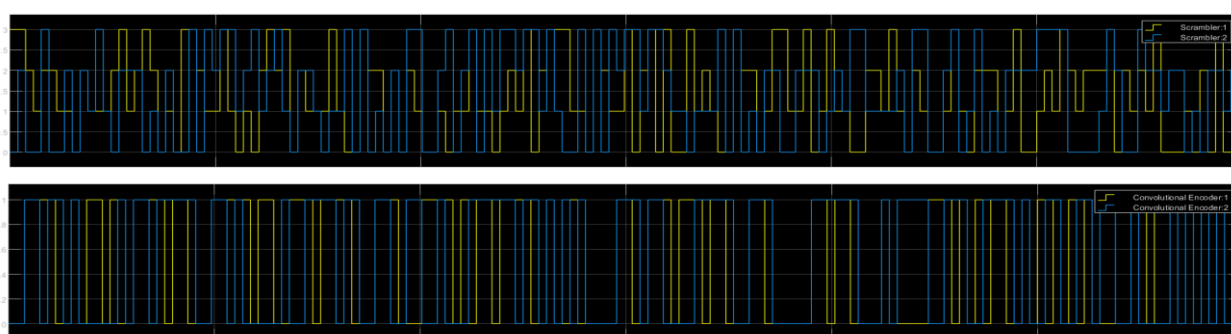


Рис. 11. Результаты кодирования

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].

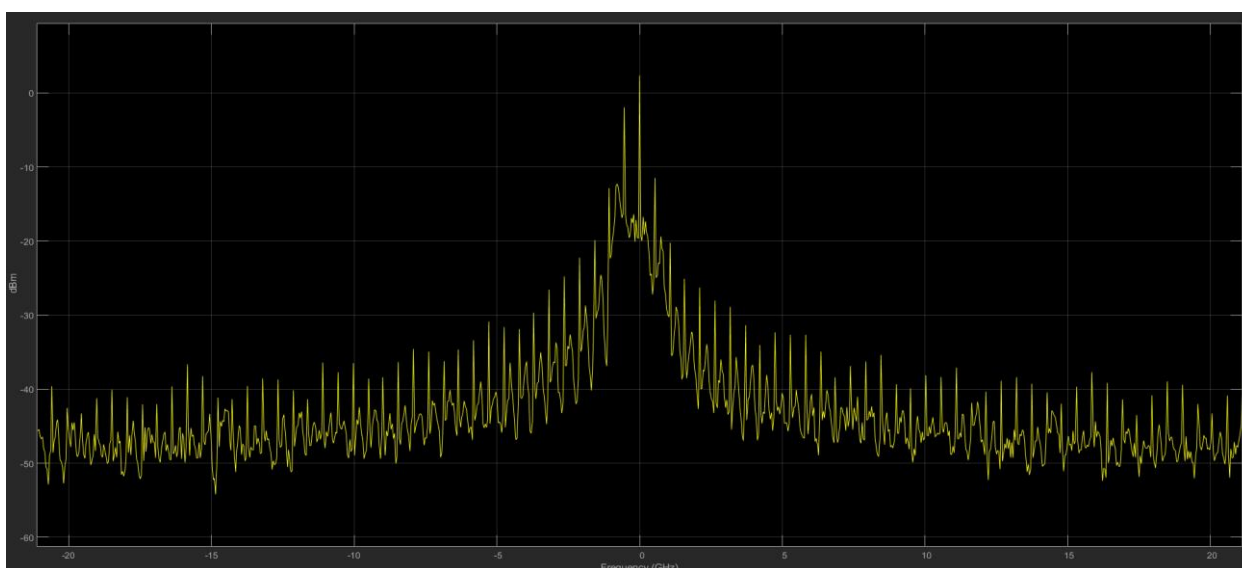


Рис. 12. Спектр хаотического сигнала после модуляции

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.

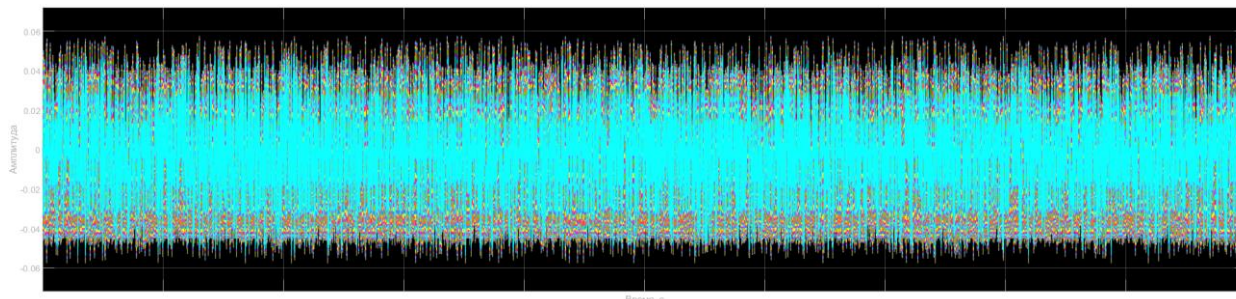


Рис. 13. Сигнал на выходе передатчика

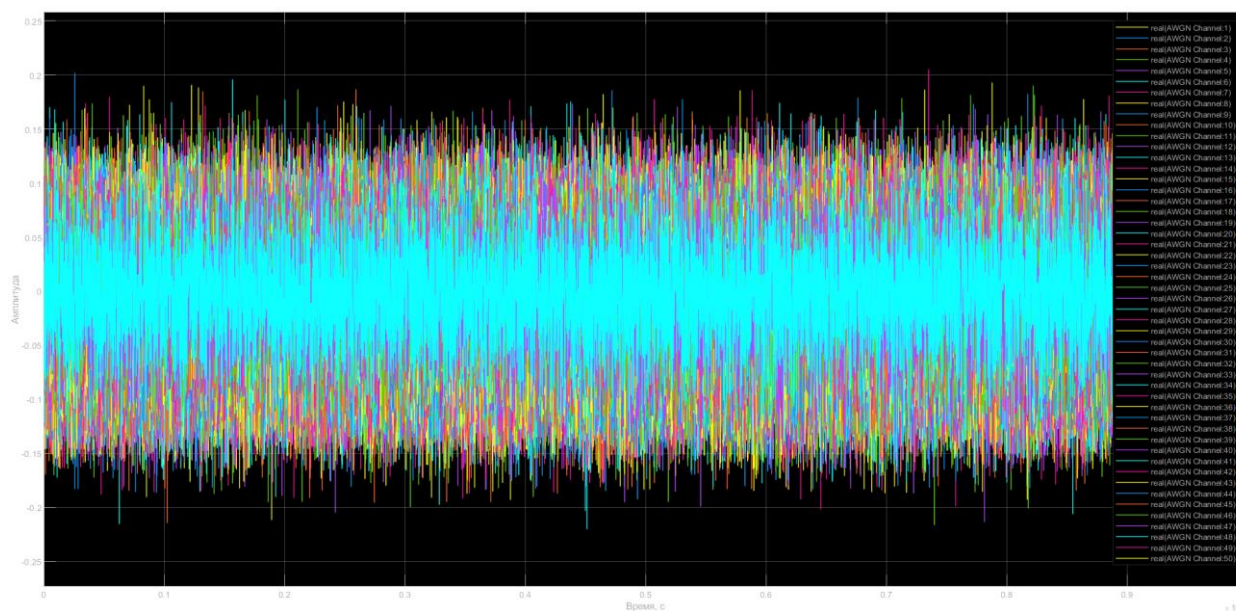


Рис. 14. Искаженный хаотический сигнал

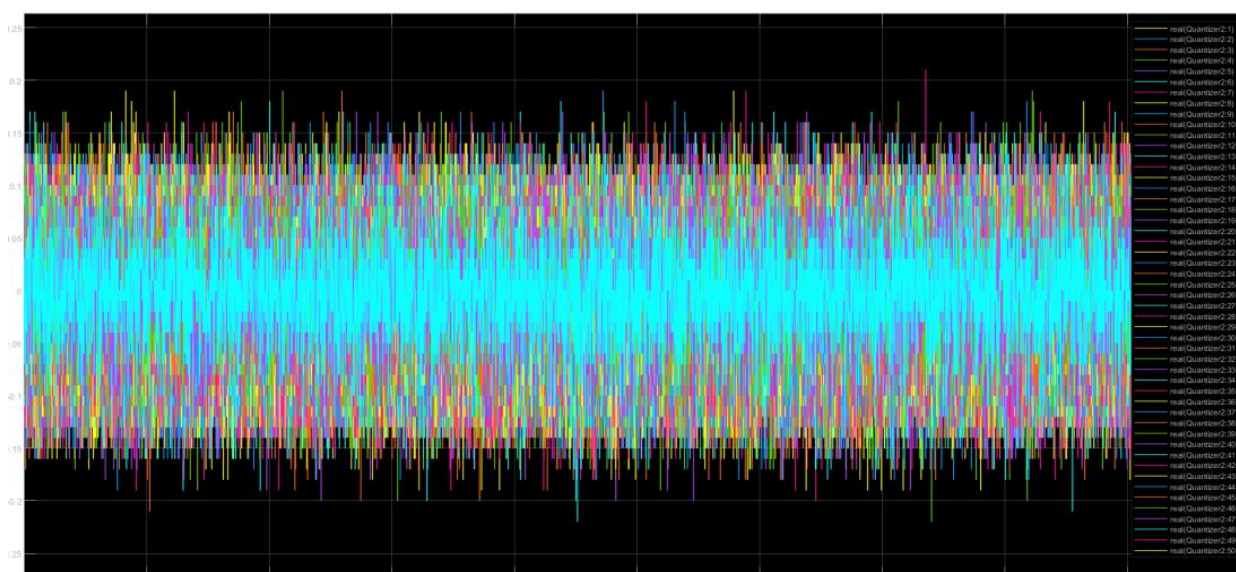


Рис. 15. Оцифрованный искаженный сигнал

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.

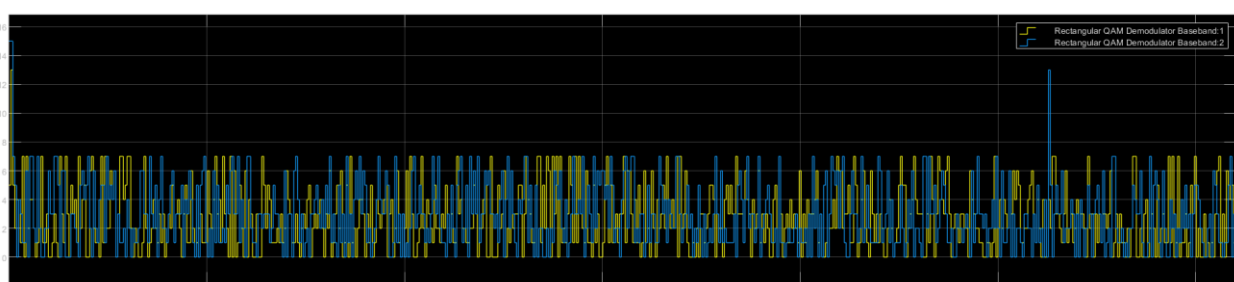


Рис. 16. Сигнал на выходе демодулятора

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).

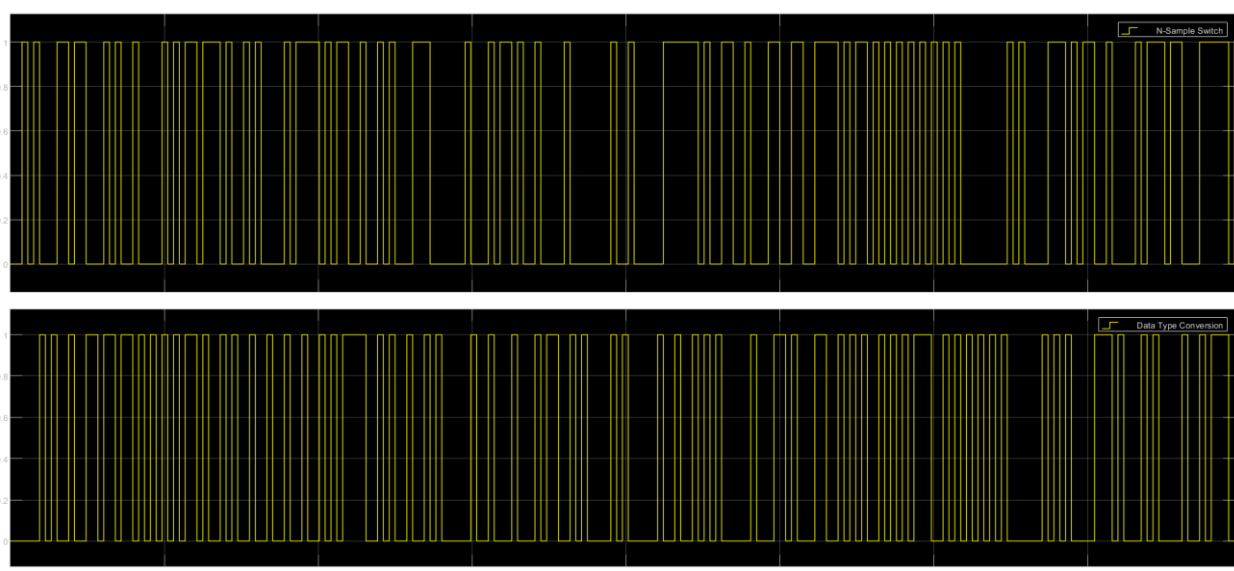


Рис. 17. Сравнение двух цифровых хаотических сигналов

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.

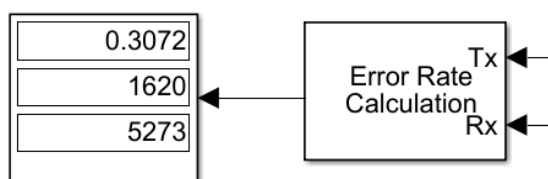


Рис. 18. Блоки для вычисления BER

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).

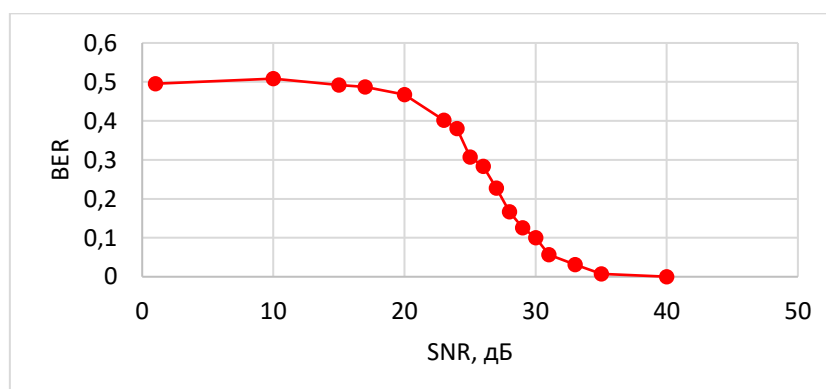


Рис. 19. Зависимость BER от SNR

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.

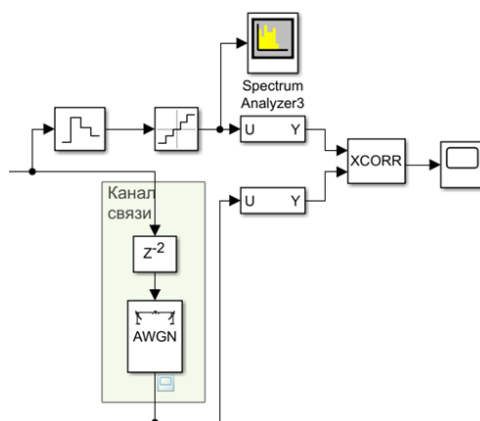


Рис. 20. Блок детектирования сигнала

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 (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

УДК 621.396.7

Технические требования к радиоконтрольному оборудованию для оценки параметров излучений беспилотных авиационных систем и определения местоположения их элементов

Антипин Б. М., Виноградов Е. М., Терновая А. К. ✉, Александров И. В.

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

Постановка задачи: Увеличение производства и применения беспилотных авиационных систем в РФ в рамках реализации государственных программ определяется их техническими возможностями, обеспечивающими повышение эффективности решения конкретных задач в гражданской сфере. Применение беспилотных авиационных систем в Российской Федерации может осуществляться только с соблюдением требований разрешительных и нормативных документов, а использование беспилотных воздушных судов — при условии обеспечения: 1) безопасности других пользователей воздушного пространства, а также людей и имущества на земле, 2) электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. **Целью работы** является определение основных технических требований к радиоконтрольному оборудованию, необходимому для оценки параметров излучений беспилотных авиационных систем, а также для определения местоположения беспилотных воздушных судов и пультов управления беспилотных авиационных систем. **Новизна:** в существующей практике регулирования использования национального радиочастотного ресурса практически отсутствуют нормативные документы, в которых были бы сформулированы требования к параметрам излучений радиотехнического оборудования беспилотных авиационных систем в части обеспечения электромагнитной совместимости с радиоэлектронными средствами других систем радиосвязи, а следовательно нет и требований к радиоконтрольному оборудованию, которое должно измерять и проверять излучения передатчиков беспилотных авиационных систем. **Результат:** на основе анализа функциональных возможностей элементов беспилотных авиационных систем, характеристик и параметров излучений их передатчиков, а также анализа действующих отечественных и международных нормативных документов сформулированы требования к радиоконтрольному оборудованию для оценки параметров излучений радиотехнического оборудования беспилотных авиационных систем. **Практическая значимость** работы состоит в возможности использования разработанных требований в качестве обоснованных ориентиров для закупки оборудования и оснащения подразделений радиоконтроля радиочастотной службы Администрации связи РФ, а также других министерств и ведомств.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, беспилотные воздушные суда, телеуправление, частотные диапазоны для радиоканалов, характеристики излучений, требования к оборудованию радиоконтроля.

Библиографическая ссылка на статью:

Антипин Б. М., Виноградов Е. М., Терновая А. К., Александров И. В. Технические требования к радиоконтрольному оборудованию для оценки параметров излучений беспилотных авиационных систем и определения местоположения их элементов // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 1. С. 2. EDN: CTDCNK

Reference for citation:

Antipin B., Vinogradov E., Ternovaya A., Alexandrov I. Technical requirements for radio monitoring equipment for assessing the radiation parameters of unmanned aircraft systems and determining the location of their elements // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss. 1. P. 2. EDN: CTDCNK

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках прикладных научных исследований по государственному заданию СПбГУТ на 2023 год, регистрационный номер 123060900012-6 в ЕГИСУ НИОКТР.

Введение

Вопрос радиочастотного обеспечения эксплуатации беспилотных авиационных систем (БАС) гражданского назначения был рассмотрен на заседании Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) от 24.04.2023 г. [1] в рамках гармонизации применения беспилотных воздушных судов (БВС) на межгосударственном уровне и выполнения рекомендаций Международной организации гражданской авиации (ICAO, аббр. от англ. International Civil Aviation Organization) и сектора радиосвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-R). Рассматривалось использование для линий управления и связи наземных систем дистанционного пилотирования воздушных судов радиочастотных каналов в соответствии с п. 3.1.4. Отчета МСЭ-R SM.2486-0 [2].

Для обеспечения безопасности полетов легитимных БВС и предотвращения инцидентов с ними актуальным является своевременное обнаружение и прекращение применения БАС, не имеющих разрешительных документов на использование радиочастотного спектра и на осуществление полетов. Кроме того, в соответствии с положениями ст. 25 Федерального закона «О связи» от 07.07.2003 г. N 126-ФЗ радиочастотная служба должна осуществлять радиоконтроль за излучениями радиотехнического оборудования БАС с целью обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (РЭС) и эксплуатационной готовности радиочастотного ресурса.

В связи с вышеизложенным, актуальной задачей является определение требований к оборудованию радиоконтроля за излучениями передатчиков БАС.

Функции элементов БАС и параметры излучений их радиопередатчиков

БАС гражданского назначения разрабатываются, создаются и применяются для решения конкретных народнохозяйственных задач с целью повышения эффективности производственных и других процессов.

Основными элементами БАС являются БВС и пульта управления (ПУ).

К функциям ПУ БАС относятся:

- передача команд управления полетом БВС (включение двигателя, взлет с набором высоты, снижение, зависание в одной точке — для БВС вертолетного типа, повороты и др.);
- передача сигналов управления полезной нагрузкой (включение, выключение, переключение режимов, сброс — для транспортных систем и др.);
- прием потокового видео;
- прием телеметрии от БВС.

Основные функции БВС (определяются целевым назначением БАС):

- передача изображения в режиме потокового видео при обеспечении наблюдения за объектом или районом;
- передача телеметрической информации о местонахождении БВС, техническом состоянии систем и о параметрах полета;
- передача информации о наличии (сбросе) полезной нагрузки при обеспечении ее доставки или информации о выполнении конкретных действий при выполнении сельскохозяйственных работ и др.

Из перечня приведенных выше функций следует, что на ПУ БАС необходимо наличие радиопередающих средств, обеспечивающих телеуправление полетом и полезной нагрузкой, а также приемников сигналов телеметрии, фотоизображений и видеосигнала в потоковом режиме.

FPV (аббр. от англ. First Person View — вид от первого лица) — способ управления БАС, находящейся вне поля зрения пилота, с использованием видеокамеры на борту, которая в реальном времени передает видеоизображение. В современных FPV БВС данные телеметрии могут совмещаться с видеоизображением (т. е. передаваться в одном радиоканале с ним и при приеме отображаться на том же экране или на устройствах дополненной реальности).

В канале телеуправления БВС может использоваться как аналоговая (в основном в оборудовании более ранних лет выпуска), так и цифровая модуляция сигнала. Как правило, аналоговая модуля-

ция сигнала используется на более низких радиочастотах 27 и 72 МГц, а сигналы с цифровой модуляцией — в более высоких частотных диапазонах (433 и 868/915 МГц; 1,2 и 2,4 ГГц).

У БВС гражданского применения частота радиоканала телеуправления определяется диапазоном работы радиомодуля ПУ и приемником сигналов телеуправления на борту (обычно передатчик радиомодуля и приемник сигналов телеуправления выпускаются в виде парного комплекта). Радиомодуль может быть встроенным в ПУ, т. е. несъемным или внешним, допускающим его замену, что позволяет производить модернизацию БАС по мере создания радиомодулей, поддерживающих новые функции. Наиболее распространенными являются ПУ с внешними радиомодулями, работающие с приемниками ELRS в диапазоне 2,4 ГГц или 868/915 МГц (например, TBS Tango 2, TBS Crossfire, Express LRS ES915TX и др.), кроме них применяются модули, использующие в канале управления частоты в диапазоне 1,3 ГГц и 433 МГц. Использование более низкой частоты в канале управления увеличивает дальность контролируемого полета БВС, что определяется меньшими потерями сигнала в канале.

В соответствии с п. 3.1.4. Отчета МСЭ-R SM.2486-0 [2] оператор БВС должен обеспечивать безопасность других пользователей воздушного пространства, а также людей и имущества на земле. Для этого на БВС могут быть установлены дополнительные устройств (акустический датчик для обнаружения и предупреждения столкновения во время полета, аварийный парашют, резервная линия связи и резервная система позиционирования), а канал телеуправления ПУ в рамках комплекса мероприятий для предотвращения инцидентов с БВС должен иметь защиту от несанкционированного перехвата управления полетом. Для этого в данном канале ПУ БВС абсолютного большинства современных БАС малого класса гражданского назначения используется режим псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ).

Параметры излучения радиопередатчиков ПУ в режиме ППРЧ

В канале телеуправления существующих БАС гражданского назначения зарубежного производства отмечено использование следующих параметров режима ППРЧ:

– скорость перестройки — 300–1000 скачков в секунду; (в БАС специализированного назначения отмечено применение ППРЧ с 2900 скачков в секунду и более);

– вид модуляции — FSK (*аббр. от англ. Frequency Shift Keying*, частотная манипуляция), PSK (*аббр. от англ. Phase Shift Keying*, фазовая манипуляция), OFDM (*аббр. от англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов), OFDMA (*аббр. от англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access*, многопользовательский доступ к мультиплексированию с ортогональным частотным разделением каналов);

– длительность импульса — от 500 мкс до 2,5 мс;

– ширина полосы частот импульса — 0,3–2,0 МГц;

– скорость передачи данных — до 2 Мбод;

– ширина полосы ППРЧ — от 34 до 200 МГц (наиболее часто встречается 80 МГц).

Число каналов ППРЧ — от 32 (для полосы 34 МГц) до 100 (для полосы 200 МГц).

В Российской Федерации для БАС параметры перестройки каналов с ППРЧ определены в Решении ГКРЧ от 07.05.2007 г. № 07-20-03-001 «О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия» (в ред. от 23.12.2022 г.) [3]:

– диапазон радиочастот — 2400–2483,5 МГц;

– ширина канала — не менее 1 МГц;

– время пребывания на одной несущей, выбор которой осуществляется по псевдослучайному закону, — не более 0,4 с;

– количество каналов ППРЧ — не менее 15.

Важной характеристикой БАС является гарантированная максимальная дальность управления БВС.

Для относительно небольших расстояний дальность передачи сигналов управления от наземного ПУ до БВС определяется исходя из следующих параметров:

– дальность радиогоризонта;

– чувствительность приемника, обеспечивающего прием сигналов телеметрии (или чувствительность приемника потокового видео, если данные телеметрии передаются в канале видеоизображения, что характерно для FPV БВС);

– эффективная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) передатчика на ПУ, используемого в канале управления.

Кроме того, влияние на дальность управления оказывают подстилающая поверхность, гидрометеорологические условия, сезонные физико-географические факторы и, конечно же, используемые аппаратные алгоритмы формирования и обработки полезного сигнала.

Частотный ресурс для ПУ БАС гражданского назначения, разрешенный для использования в РФ, на текущий момент составляет:

- 117,975–137 МГц,
- 5030–5091 МГц,
- 5,850–6,425 ГГц,

а также, в соответствии с Решением ГКРЧ [3] с учетом соответствующих ограничений по уровню мощности, виду модуляции, ширине и количеству каналов и др.:

- 26,957–27,283 МГц,
- 28,0–28,2 МГц,
- 40,66–40,7 МГц,
- 433,075–434,79 МГц,
- 2400–2483,5 МГц.

Уровни ЭИИМ передатчиков ПУ в зависимости от используемого частотного диапазона составляют от 10 мВт до 1 Вт. Разрешенное значение для устройств малого радиуса действия — 100 мВт [3] (запас мощности передатчиков ПУ, заложенный разработчиками, позволяет повысить мощность до 400 мВт, а с установкой дополнительного усилителя — до 1,5 Вт).

Мощность передатчиков БАС определяется в соответствии с принятым в стране стандартом:

- 100 мВт — для стандарта CE (стандарт Евросоюза);
- 400 мВт — для стандарта FCC (*аббр. от англ.* Federal Communication Commission, Федеральная комиссия по связи) для США и ряда других стран, чье законодательство в области связи гармонизировано с США);
- 100 или 150 мВт — для стандарта SRRC (*аббр. от англ.* State Radio Regulation Committee, Государственный комитет регулирования радиосвязи).

Ряд пультов для FPV-дронов производства КНР (например, Radiomaster Boxer, TBS Tango 2), использующих встроенный радиомодуль ELRS (поставляется в РФ в комплекте с дронами), имеют выходную мощность 1 Вт.

Функции и параметры излучений радиопередатчиков БВС

Основные функции БВС определяются целевым предназначением БАС. На сегодняшний день БАС гражданского назначения применяются для:

- наблюдения за объектами и территориями;
- поиска объектов;
- доставки грузов;
- сельскохозяйственных работ;
- спасательных работ и др.

Из перечня приведенных выше задач следует, что на БВС, помимо радиоприемных устройств, обеспечивающих прием команд телеуправления полетом и сигналов систем геопозиционирования, необходимо наличие радиопередающих средств для трансляции на ПУ фотографий (статических изображений), видеосигнала в потоковом режиме, телеметрической информации (о своем местоположении, параметрах полета, техническом состоянии систем БВС и выполнении команд телеуправления, а также об исполнении команд управления полезной нагрузкой).

Как было сказано выше, БАС для передачи сигналов телеметрии и приема потокового видео на ПУ использует, как правило, один радиоканал в диапазоне 2400–2483,5 или 5725–5825 или 5850–6425 МГц с полосой радиочастот 20 МГц и ЭИИМ не более 0,1 Вт.

Требования к радиоконтрольному оборудованию для обнаружения и оценки параметров излучений передатчиков ПУ и БВС

Основными требованиями к радиоконтрольному оборудованию (РКО) для проверки радиопередатчиков ПУ БАС (без учета массогабаритных характеристик) являются:

– охват всего частотного диапазона, который включает радиоканалы телеуправления полетом БВС, полезную нагрузку, прием сигналов телеметрии и потокового видео (от 20 МГц до 6,5 ГГц); необходимость такого частотного диапазона объясняется требованием универсальности РКО, поскольку не известно, для обнаружения какой системы управления БАС оно будет применяться;

– наличие полосы одновременного анализа до 200 МГц; чем шире эта полоса, тем выше вероятность обнаружения сигнала ППРЧ; минимально достаточное значение, обеспечивающее обнаружение каналов телеуправления функционирующих в режиме ППРЧ большинства ПУ БАС гражданского назначения, составляет 80 МГц;

– быстродействие системы обработки сигнала, позволяющее гарантированно отображать импульсы ППРЧ длительностью не более 500 мкс в полосе анализа; желательно, чтобы анализатор спектра обладал режимом реального времени с POI (*аббр. от англ. Point of Interest, точка интереса*), не превышающим 10 мкс;

– отображение спектрограммы в режиме растровой развертки или «водопада» (в осях «частота – время»);

– высокая чувствительность в сочетании с соответствующим динамическим диапазоном (конкретные значения этих величин должны определять по принципу «не хуже, чем ...» исходя из расчета для реальных условий);

– наличие «дифференциального» режима, аналогичного используемому в компактном мониторинговом приемнике реального времени R&S@PR100.

При активации дифференциального режима отображаются только отличающиеся от сохраненного спектра сигналы, что позволяет легко отобрать сигналы постоянных источников излучения, не занимая экран анализатора посторонними излучениями.

Для обнаружения излучения радиопередатчиков потокового видео, расположенных на БВС, РКО должно обеспечивать контроль полос 2400–2483,5 МГц или 5725–5825 МГц, или 5850–6425 МГц с полосой одновременного анализа не менее 20 МГц.

Таким образом, сопоставляя требования к РКО для обнаружения излучений передатчиков ПУ и БВС, можно сделать вывод, что к оборудованию для обнаружения излучений наземных ПУ предъявляются более жесткие требования по охвату частотного диапазона, полосе одновременного анализа, быстродействию и чувствительности, а к РКО для обнаружения излучений БВС – по динамическому диапазону.

Определение местоположения элементов БАС

Определение местоположения стационарного (ПУ) и мобильного (БВС) элементов БАС обладает рядом особенностей, обусловленных параметрами электромагнитных излучений передатчиков и подвижностью элементов БАС в пространстве.

Для определения местоположения стационарного РЭС наиболее рациональным (по критерию «стоимость – эффективность») способом является радиопеленгование.

Основной особенностью системы радиопеленгования передатчика ПУ в режиме ППРЧ является применение в радиопеленгаторе алгоритма с быстродействием, позволяющим определить направление (пеленг) на ПУ либо за время излучения одного импульса, либо в режиме постобработки результатов анализа фрагмента контролируемой полосы радиочастот. Последний вариант достовернее, так как обладает более высокой точностью, а с учетом квазистационарности ПУ и возможности перемещения радиопеленгатора позволяет определить местоположение ПУ БАС с приемлемой погрешностью. Конкретные значения среднеквадратической погрешности полученного местоположе-

ния ПУ можно приблизительно оценить, исходя из предполагаемого взаимного размещения системы пеленгования и ПУ БАС.

Необходимо учитывать, что максимальная дальность определения местоположения такой системы в реальных условиях не будет превышать дальности радиогоризонта.

Для определения местоположения БВС может быть применен как способ радиопеленгования, так и гиперболический (разностно-дальномерный) способ координатометрии на основе измерения времени прихода радиоволны в несколько (три и более) приемных пунктов, в которых размещены приемные устройства (сенсоры) системы обнаружения. Может быть применен и энергетически-дальномерный способ координатометрии, основанный на измерении уровней излучений от передатчика в трех пространственно разнесенных приемных пунктах [4], и другие способы [5, 6].

Каждый из перечисленных способов имеет свои достоинства и недостатки, определяемые количеством и стоимостью радиоконтрольного оборудования.

Оборудование российских производителей для радиоконтроля БАС

В результате санкционной политики, проводимой западными странами в области ограничения ввоза на территорию РФ радиоэлектронного оборудования различного назначения, включая измерительное, используемое в целях радиоконтроля, поставки радиоконтрольного оборудования ведущих мировых брендов в РФ официально практически прекращены.

Кроме того, во исполнение Указа Президента РФ от 30.03.2022 г. № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [7], а также подпункта г) пункта 71 Методических рекомендаций по переходу на использование российского программного обеспечения (ПО) [8], оборудование радиоконтроля, используемое в подразделениях радиоконтроля, должно функционировать под управлением российского ПО.

По информации, предоставленной разработчиками РКО, этим требованиям могут удовлетворять анализаторы спектра реального времени и панорамные приемники.

На сегодняшний день отечественные анализаторы спектра реального времени предлагаются несколькими компаниями, в том числе «INWAVE» и «АнтЭМС Групп», специализирующимися на изготовлении и поставке контрольно-измерительного оборудования и комплексов для испытаний технических средств различного назначения на электромагнитную совместимость.

Заключение

Анализ отечественных нормативных документов в области регулирования использования радиочастотного спектра показал, что в настоящее время практически отсутствуют положения, в которых были бы сформулированы требования к параметрам излучений передатчиков БВС. Соответственно, отсутствуют и требования к радиоконтрольному оборудованию, которое должно производить мониторинг передатчиков БВС. Однако согласно закону «О связи» радиоконтроль должен выполняться в целях обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных устройств, в том числе это касается и БВС.

В статье проведен анализ основных функциональных возможностей элементов БАС и основных технических характеристик параметров излучений передатчиков как ПУ, так и БВС, что позволило сформулировать требования к радиоконтрольному оборудованию за излучениями передатчиков БАС и к оборудованию для определения местоположения ПУ и БВС.

Литература

1. Об использовании полос радиочастот радиоэлектронными средствами для организации связи в беспилотных авиационных системах гражданского назначения. Решение ГКПЧ от 24 апреля 2023 г. № 23-66-01 // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. 2023. URL: digital.gov.ru/ru/documents/8969 (дата обращения 20.09.2023)

2. Применение коммерческих дронов для выполнения задач МСЭ-R по контролю за использованием спектра. Серия SM. Управление использованием спектра. Отчет МСЭ-R SM.2486-0 (06/2021). URL: <http://www.itu.int/publ/R-REP/en> (дата обращения 20.09.2023)
3. О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия (с изменениями на 10 марта 2017 г.). Решение ГКПЧ от 07 мая 2007 г. № 07-20-03-001. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902048009?marker=64U0IK> (дата обращения 20.09.2023)
4. Александров И. В., Антипин Б. М., Спиринов А. Д. Определение местоположения источников радиоизлучений в условиях сложного окружения // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: материалы VI международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 01–02 марта 2017 г.): в 4-х тт. СПб.: СПбГУТ, 2017. Т. 2. С. 31–35.
5. Логинов Ю. И., Екимов О. Б., Антипин Б. М., Гриценко А. А., Павлов В. Н., Портнаго Л. Б. Дальномерно-разностно-дальномерный способ определения координат местоположения источников радиоизлучений и реализующее его устройство // Патент на изобретение RU 2510038 C2, опубл. 20.03.2014. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37796043> (дата обращения 15.11.2023)
6. Spirin A. D., Antipin B. M. Non-Conventional Algorithm of Radio Transmission Sources Position Location // Proceedings of the 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus, St. Petersburg and Moscow, 01–03 February 2017). 2017. PP. 565–568. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910617
7. О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. Указ Президента РФ от 30.03.2022 г. № 166 // Гарант.ру. Информационно-правовой портал. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403684114/?ysclid=loum3s578s396313950> (дата обращения 20.09.2023)
8. Об утверждении Методических рекомендаций по переходу на использование российского программного обеспечения, в том числе на значимых объектах критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, и о реализации мер, направленных на ускоренный переход органов государственной власти и организаций на использование российского программного обеспечения в Российской Федерации. Приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ от 18.01.2023 г. № 21 // Гарант.ру. Информационно-правовой портал. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406310773/?ysclid=loum9153xi63289295> (дата обращения 20.09.2023)

Статья поступила 5 октября 2023 г.
Одобрена после рецензирования 24 октября 2023 г.
Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Информация об авторах

Антипин Борис Маврович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: antipin.bm@sut.ru

Виноградов Евгений Михайлович — кандидат технических наук, доцент, инженер 1-й кат. НИЛ Радиоконтроля и ЭМС Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: vinogradov.em@sut.ru

Терновая Анастасия Константиновна — магистрант 2 курса (направление 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: ternovaya_00@bk.ru

Александров Илья Владимирович — инженер 1-й кат. НИЛ Радиоконтроля и ЭМС Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: alexandrov.iv@sut.ru

Technical Requirements for Radio Monitoring Equipment for Assessing the Radiation Parameters of Unmanned Aircraft Systems and Determining the Location of Their Elements

B. Antipin, E. Vinogradov, A. Ternovaya✉, I. Alexandrov

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

Task statement: *The increase in the production and use of unmanned aircraft systems (UAS) in the Russian Federation within the framework of the implementation of state programs is determined by their technical capabilities, which ensure an increase in the efficiency of solving specific tasks in the civil sphere. The use of UAS in the Russian Federation can be carried out only if the requirements of licensing and regulatory documents are met, and the use of unmanned aerial vehicles is subject to compliance with the requirements for ensuring the safety of other airspace users, the safety of people and property on the ground, as well as ensuring electromagnetic compatibility of electronic means. **The purpose** of the work is to determine the basic technical requirements for radio monitoring equipment necessary to assess the radiation parameters of unmanned aircraft systems, as well as to determine the location of unmanned aircraft and control panels of unmanned aircraft systems. **Novelty:** in the existing practice of the functioning of the system for regulating the use of the national radio frequency resource, there are practically no regulatory documents that would formulate requirements for the radiation parameters of UAS radio equipment in terms of ensuring electromagnetic compatibility with radio electronic means of other radio communication systems and, consequently, there are no requirements for radio monitoring equipment that should measure and control the radiation of UAS transmitters. **Result:** based on the analysis of the functional capabilities of the elements of unmanned aircraft systems, the characteristics and parameters of the radiation of their transmitters, as well as the study of existing domestic and foreign regulatory documents, the requirements for radio monitoring equipment for assessing the radiation parameters of radio equipment of unmanned aircraft systems are formulated. **The practical significance** of the work consists in the possibility of using the developed requirements as reasonable guidelines for the purchase of equipment and equipping radio control units of the radio frequency service of Communications Administration, as well as radio frequency services of other ministries and departments.*

Keywords: *unmanned aircraft systems, unmanned aircraft, remote control, frequency ranges for radio channels, radiation characteristics, requirements for radio monitoring equipment.*

Funding: *the article was prepared within the framework of applied scientific research of SPbSUT, registration number 123060900012-6 in the EGISU R&D.*

Information about Authors

Boris Antipin — Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Television and Metrology (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications).
E-mail: antipin.bm@sut.ru

Evgeny Vinogradov — Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Engineer of Scientific Research Laboratory Radio Control and EMC (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: vinogradov.e.m.@sut.ru

Anastasia Ternovaya — a 2nd year master's student (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: ternovaya_00@bk.ru

Ilya Alexandrov — Engineer of Scientific Research Laboratory Radio Control and EMC (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: alexandrov.iv@sut.ru

УДК 004.722

Аналитический обзор подходов к построению моделей V2X-систем

Суравцев Р. В.

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

Постановка задачи: В современных интеллектуальных транспортных системах значительное влияние приобретают технологии V2V (аббр. от англ. Vehicle-to-Vehicle), способствующие обмену информацией между транспортными средствами, и V2I (аббр. от англ. Vehicle-to-Infrastructure), обеспечивающие взаимодействие между транспортными средствами и инфраструктурой. Процесс внедрения данных технологий в интеллектуальные транспортные системы направлен на оптимизацию организации передачи данных с целью минимизации чрезвычайных ситуаций на дороге и более эффективного управления транспортным потоком. Тем не менее высокая мобильность транспортного потока и ненадежность автомобильной связи, в т. ч. задержки и потери данных, могут нарушить стабильность функционирования системы совместного управления. **Целью работы** является аналитический обзор технологий V2V и V2I в контексте их важной роли в развитии автономного движения и интеллектуальных транспортных систем. Предлагается рассмотреть совместное использование, построение моделей V2V и V2I с технологией store-carry-and-forward с целью оптимизации задействованных ресурсов и минимизации задержки доставки данных. **Новизна:** в рамках данной статьи предлагается сравнительный анализ технологий V2V и V2I, который позволяет подробно изучить особенности, преимущества и ограничения каждой из них. Кроме того, в статье рассматривается перспектива интеграции технологий V2V и V2I в интеллектуальные транспортные системы с использованием метода store-carry-and-forward. Представленная концепция актуальна и способствует оптимизации передачи данных в интеллектуальных транспортных системах. **Результат:** сформулирован аналитический обзор подходов к построению моделей и принципов работы V2X-систем, подробно рассмотрены их функциональность и взаимодействие в контексте современных информационных и транспортных систем. Был проведен сравнительный анализ двух важных аспектов V2X-технологий: V2V и V2I. Сравнительный анализ технологий V2V и V2I показал, что V2V более проста в реализации, в то время как V2I обладает широкими возможностями для управления движением и повышения безопасности. Приведены возможности совместного применения V2V и V2I, как с использованием технологии store-carry-and-forward, так и без нее. Исследование показало, что такой подход способен оптимизировать обмен данными и повысить надежность связи в дорожной среде, особенно в сравнении с методами без применения данной технологии. **Теоретическая / Практическая значимость:** Теоретическая значимость статьи заключается в расширении знаний об интеграции подхода технологий V2V и V2I с методом store-carry-and-forward, что открывает новые возможности для оптимизации транспортных систем и эффективной передачи данных в интеллектуальных транспортных системах. Представленный подход предлагается реализовать в виде конкретных алгоритмов и программных модулей, которые могут быть интегрированы в существующие транспортные системы и практически применены для оптимизации передачи данных и управления транспортным потоком.

Ключевые слова: V2X, V2V, V2I, store-carry-and-forward, модель, аналитический обзор

Библиографическая ссылка на статью:

Суравцев Р. В. Аналитический обзор подходов к построению моделей V2X-систем // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 1. С. 3. EDN: DKAQCO

Reference for citation:

Suravtsev R. Analytical Review of Approaches to Building Models of V2X Systems // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss. 1. P. 3. EDN: DKAQCO

Актуальность

В настоящее время наблюдается стремительное развитие автономных транспортных систем и интеллектуальных дорожных инфраструктур, что создает предпосылки для будущих транспортных услуг, ориентированных на обеспечение безопасности, комфорта и интеллектуальных возможностей для пассажиров. Тем не менее внедрение новейших технологических решений, связанных с реализацией интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [1], вносит определенную сложность в управление дорожным движением. Прежде всего, важно оптимизировать управление дорожным движением и обеспечить эффективную интеграцию новых технологий в уже существующую инфраструктуру. Для успешного решения этих задач необходимо уделить особое внимание технологии V2X (аббр. от англ. Vehicle-to-Everything) [2–4], которая используется для организации взаимодействия между каждым транспортным средством (ТС) и другими типами узлов. В этом контексте значительно выделяются две ключевые технологии:

1) «транспортное средство — транспортное средство» (V2V, аббр. от англ. Vehicle-to-Vehicle), применяется для организации взаимодействия между автомобилями; подход V2V увеличивает радиус коммуникации за счет использования подвижности автомобилей и многопереходных ретрансляторов между ними;

2) «транспортное средство — инфраструктура» (V2I, аббр. от англ. Vehicle-to-Infrastructure), используется для организации взаимодействия между автомобилями и инфраструктурой; подход V2I позволяет подключать ТС к инфраструктуре с доступом в интернет.

Для эффективной реализации V2X-системы, включая V2V и V2I, требуются надежные и действенные методы моделирования, которые будут соответствовать высоким стандартам качества связи. Базовыми узлами [5] коммуникации служат бортовые устройства (OBU, аббр. от англ. On-Board Unit), установленные на каждом ТС, и придорожные устройства (RSU, аббр. от англ. Road-Side Unit), расположенные вдоль трасс. Совместная работа этих устройств обеспечивает относительно непрерывное и качественное взаимодействие, что в частности позволяет своевременно предупреждать водителей о различных дорожных факторах [6–8].

В данной работе был проведен комплексный анализ технологий V2V и V2I, включая детальное рассмотрение и сравнительный анализ их характеристик. Также было исследовано совместное использование V2V и V2I как с технологией store-carry-and-forward (хранение-передача-пересылка), так и без нее. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение модели с технологией store-carry-and-forward обеспечивает высокую эффективность при оценке двух ключевых параметров: времени задержки и объема задействованных ресурсов.

Технология V2V

В этом разделе будет рассмотрено V2V-технологии [9, 10], принципа работы V2V, а также процесса построения моделей. Принцип работы V2V является ключевой основой для понимания взаимодействия между различными ТС. V2V-технология позволяет ТС обмениваться важной информацией, включая данные о направлении движения, скорости, положении на дороге и других релевантных параметрах, с окружающими ТС.

Основные принципы работы V2V представляю собой последовательность шагов.

Шаг 1. Каждое ТС оснащено специальным устройством (OBU), которое собирает информацию о его местоположении, скорости и других параметрах. После сбора данных OBU конвертирует их в уникальное сообщение, пригодное для передачи.

Шаг 2. ТС непрерывно сканирует окружающую обстановку и ищет другие ТС, которые могут быть оборудованы OBU. Как только одно ТС обнаруживает другое, оно осуществляет передачу сообщения, содержащего некоторую информацию, например, о резком замедлении ТС.

Шаг 3. Процесс коммуникации между ТС осуществляется посредством специальных технологий, таких как DSRC (аббр. от англ. Dedicated Short Range Communications, выделенная связь ближнего действия) или Wi-Fi, которые обеспечивают надежное соединение на коротких расстояниях. Этот обмен информацией помогает взаимодействию между ТС и обмену актуальной информацией о текущей обстановке на дороге, способствуя безопасному движению.

Шаг 4. ТС, получив сообщение от другого ТС, производит анализ содержания сообщения. В случае если там содержится предупреждение о потенциальной опасности, ТС принимает соответствующие меры. Кроме того, возможна обратная связь для подтверждения получения сообщения и уведомления отправителя.

Моделирование V2V-технологии [10] представляет собой создание абстрактных математических или компьютерных моделей, описывающих сложные взаимодействия между ТС в процессе передачи данных. Этот подход позволяет детализировано изучать, как происходит обмен информацией между ТС, оценивать эффективность различных протоколов и алгоритмов, а также делать прогнозы относительно поведения системы в разнообразных сценариях дорожных условий.

Этапы моделирования V2V:

- 1) определение ключевых характеристик связи, таких как максимальная дальность передачи, рабочая частота, уровень сигнала, вероятность успешной передачи и др., что позволяет установить базовые параметры для точного моделирования реальных условий;
- 2) выбор подходящей модели распространения, которая должна учитывать множество дестабилизирующих факторов, включая влияние препятствий, ослабление сигнала, интерференцию и т. д.;
- 3) разработка алгоритмов, определяющих, когда и как ТС будут передавать и принимать данные; алгоритмы основываются на текущем состоянии ТС, параметрах связи и стратегии обработки данных;
- 4) имитационное моделирование и эксперименты; позволяют проверить эффективность протоколов и алгоритмов в различных условиях мобильности транспортного потока, уровня трафика и других факторов дорожной среды.

Технология V2I

В сравнении с V2V, где информация передается между ТС, технология V2I предполагает передачу данных от ТС к инфраструктуре [8–10], поэтому принципы ее функционирования несколько отличаются.

Принципы работы V2I состоят в последовательности шагов.

Шаг 1. Каждое ТС передает информацию о состоянии инфраструктуре дороги, используя OBU.

Шаг 2. Инфраструктура дороги, представленная придорожными устройствами (RSU), анализирует полученные данные и может отправить обратно инструкции или предупреждения на ТС.

Шаг 3. Информация от инфраструктуры может использоваться для управления светофорами, скоростными режимами и другими параметрами дорожного движения с целью обеспечения безопасности и оптимизации транспортного потока.

Этапы моделирования V2I [11]:

- 1) определение характеристик связи, радиуса действия, частоты и других параметров V2I;
- 2) выбор способа описания распространения сигнала, который учитывает такие дестабилизирующие факторы, как препятствия, затухание сигнала и т. п.;
- 3) выполнение имитационных моделирований или реальных экспериментов, чтобы провести анализ производительности системы V2I в различных сценариях, таких как высокая мобильность транспортного потока, плотная застройка вдоль дороги или экстремальные погодные условия.

Моделирование V2I играет важную роль в понимании и оптимизации взаимодействия между ТС и инфраструктурой дороги, повышая эффективность и безопасность дорожного движения.

На завершающем этапе рассмотрения моделирования V2I и V2V необходимо перейти к проведению их сравнительного анализа. Это позволит оценить эффективность обоих типов технологий в различных сценариях дорожного движения и определить, какая из них является подходящей для конкретных дорожных ситуаций.

Сравнительный анализ технологий V2V и V2I

На основе приведенного выше обзорного анализа технологий V2V и V2I более надежной и технически реализуемой оказалась V2V-технология. В таблице 1 представлен сравнительный анализ характеристик V2V- и V2I-систем.

Таблица 1. Сравнительный анализ технологий V2V и V2I по ключевым параметрам

Ключевые параметры	V2V	V2I
Характеристики сигнала	Короткие дистанции, высокая скорость передачи	Большие дистанции, устойчивость сигнала
Типы препятствий	Препятствия от других ТС	Препятствия от зданий и инфраструктуры
Интерференция	Возможна из-за близости множества ТС	Влияние окружающей среды на сигнал
Пропускная способность	Ограничена объемом данных между ТС	Большая пропускная способность для данных
Задержка передачи	Низкая задержка из-за близости ТС	Небольшая задержка, связанная с оборудованием инфраструктуры и процессами обработки данных внутри нее
Применение	Мгновенное реагирование на дороге	Управление трафиком и безопасностью
Алгоритмы и протоколы	Для быстрого обмена между ТС	Для обработки и анализа данных на стороне инфраструктуры (например, на серверах или оборудовании) для обработки информации от ТС
Безопасность	Защита от несанкционированного доступа	Обеспечение безопасности и управления

Проведенный анализ выявляет преимущества V2V в обеспечении быстрой и надежной передачи данных между ТС на близких расстояниях. При этом V2I отличается тем, что обеспечивает взаимодействие между ТС и дорожной инфраструктурой; это позволяет эффективно управлять движением и повышать безопасность.

По результатам сравнения V2V демонстрирует превосходство в снижении задержки передачи данных на коротких дистанциях, в то время как V2I преуспевает в обеспечении взаимодействия с инфраструктурой и управлении трафиком. Выбор между этими двумя типами технологий зависит от конкретных условий и требований.

С другой стороны, V2I обладает значительными преимуществами в снижении интерференции по сравнению с V2V. В сетях V2V мобильные ТС часто находятся близко друг к другу, что может привести к возникновению помех и искажений сигнала, особенно в случае, если у ТС имеется металлический кузов. V2I в большей степени использует высоко расположенные инфраструктурные узлы с более высокими антеннами и их благоприятным пространственным размещением. Это значительно снижает вероятность воздействия внешних факторов, которые могли бы мешать передаче данных. Более того, V2I может эффективно применять специализированные антенны и методы управления сигналом с целью минимизации воздействия интерференции и обеспечения стабильной связи. Следующий этап данного обзора – рассмотрение возможностей совместного использования V2V и V2I.

Совместное использование V2V и V2I

В ИТС [1] активно развиваются технологии взаимодействия ТС между собой (V2V) и с инфраструктурой (V2I), играющие ключевую роль в управлении движением транспорта. Эти совместные коммуникации способствуют рациональной организации движения и, таким образом, повышению эффективности движения ТС. Основная идея улучшенного кооперативного управления заключается в разработке алгоритмов консенсуса, которые позволяют ТС взаимодействовать согласованно. Алгоритмы обеспечивают координацию движения между ТС и помогают смягчать колебания, возникающие в результате неравномерности движения в транспортной системе.

Для оценки эффективности разработанных алгоритмов проводится моделирование в различных сценариях движения. Используется PLEXE [12] – платформа, предоставляющая возможность реалистичного моделирования системы управления ТС в разнообразных сценариях. Она объединяет OMNeT++, среду имитационного моделирования, обладающую развитым графическим интерфейсом как для построения моделей, в том числе в V2X, так и для анализа полученных результатов, и SUMO (аббр. от англ. Simulation of Urban Mobility, моделирование городской мобильности), программное обеспечение для моделирования движения ТС, пешеходов и транспортных систем в городской среде, для моделирования общего движения транспорта и его взаимодействия.

Процесс моделирования и интеграции V2V и V2I

Одной из основных сложностей в области V2V- и V2I-коммуникаций является высокая подвижность ТС. Нестабильные передачи данных, включая потери пакетов и задержки, могут серьезно подорвать эффективность системы совместного движения (CDS, *аббр. от англ. Cooperative Driving Systems*) [7]. Для решения этой проблемы предлагается разработка усовершенствованной микроскопической модели движения, учитывающей как V2V, так и V2I, обозначаемой как V2X. Основное внимание уделяется анализу влияния внутритранспортных коммуникаций на совместное движение ТС.

Поэтапное описание процесса моделирования.

Этап 1. Каждое ТС оборудуется V2V- и V2I-устройствами. Они обеспечивают обмен данными как с другими ТС, так и с инфраструктурой. Ключевые элементы этой системы взаимодействия технологий, как отмечалось ранее, — это бортовое оборудование, установленное в ТС (OBU), и вычислительные устройства инфраструктуры дороги (RSU);

Этап 2. Технологии V2V и V2I обеспечивают обмен информацией о скорости, позиции и намерениях ТС. Системы V2V позволяют ТС взаимодействовать напрямую друг с другом. В тоже же время RSU, являющиеся базовым узлом V2I, обмениваются данными с ТС и другими RSU, обеспечивая широкий охват информацией о дорожной ситуации.

Этап 3. Полученная информация используется для адаптации движения каждого ТС к динамике окружающего трафика и дорожной обстановке. ТС могут реагировать на предупреждения о сложных ситуациях и других случаях, обеспечивая безопасность и снижение вероятности аварий.

Этап 4. Процесс моделирования позволяет оптимизировать управление потоками ТС. Учитывая информацию от V2X и алгоритмы управления, система способна регулировать скорости и интервалы между ТС, уменьшая задержки и обеспечивая непрерывное движение.

Этап 5. Моделирование V2X может включать математические модели, описывающие динамику транспортных потоков с учетом информации от устройств V2V и V2I. Например, можно использовать модель следования ТС с учетом данных о скоростях и различных параметрах движения.

Технологии V2V и V2I взаимодействуют для обеспечения безопасности и эффективности движения: V2V позволяет ТС обмениваться данными напрямую, сокращая задержки, а V2I связывает ТС с инфраструктурой дороги, предоставляя ценную информацию о дорожной ситуации и планировании маршрута.

Однако, несмотря на преимущества, совместное использование V2V и V2I также имеет некоторые ограничения. Первым недостатком является зависимость от доступности сети и оборудования. Кроме того, V2X подвержена риску несанкционированного доступа к данным, что может подорвать ее безопасность и надежность. Следующим этапом аналитического обзора будет рассмотрение совместного использования V2V и V2I.

Совместное использование V2V и V2I с применением технологии store-carry-and-forward

При рассмотрении перспектив совместного использования технологий V2V и V2I [7–9] в автомобильных сетях стоит выделить ключевые аспекты, которые могут повлиять на их эффективность. Ограниченная область покрытия сети, проблемы с оборудованием, повышенная мобильность транспортного потока и ограниченность ресурсов — все эти факторы могут сказаться на функциональности и устойчивости V2V и V2I.

Для создания надежной, масштабируемой и эффективной системы передачи данных невозможно ограничиваться исключительно V2V или V2I. Во взаимодействии V2V и V2I приоритетной задачей является достижение эффективности при оценке двух ключевых параметров: времени задержки и объема задействованных мощностей. Для решения этой задачи используется технология store-carry-and-forward [9], представляющая собой инновационный подход к решению проблем, связанных с передачей данных в условиях высокой мобильности ТС. Суть механизма передачи заключается в следующем: ТС, несущее сообщение, передает его следующему ТС в направлении распространения данных. Если это невозможно из-за временной потери связи, сообщение сохраняется и передается до тех пор, пока не будет восстановлена связь с ретранслятором. В частности, необходимо оптимизировать решение, в какой момент времени каким ТС следует передавать сообщение, содержащее несколько пакетов, и опреде-

лить, нужно ли передавать только часть сообщения, до тех пор, пока оно не достигнет зоны покрытия инфраструктуры.

В существующей литературе [13, 14] поднимается вопрос о сложности моделирования и анализа распространения данных в автомобильных сетях. Основные трудности связаны с влиянием случайной мобильности ТС на связь и, следовательно, на производительность. Также возникает сложность в оценке различных факторов, таких как расположение точек RSU, скорость передачи данных V2V / V2I и местоположение источников данных.

В настоящее время опубликовано достаточно работ, посвященных распространению данных в сценарии шоссе с использованием технологии store-carry-and-forward. Например, в работах [15, 16] решения фокусировались на производительности однонаправленной передачи данных или широкополосной передачи. Группой авторов предложена аналитическая модель, основанная на кластеризации ТС и технологии store-carry-and-forward [9], на базе которой разрабатывается понятный аналитический фундамент для количественной оценки емкости загрузки и производительности задержки в гибридной системе V2V / V2I.

На основе проведенного анализа предлагается распределенная онлайн-стратегия и проводится соответствующее моделирование.

Модель системы и постановка задачи

Предлагается сценарий, в котором ТС движутся в обоих направлениях по шоссе. Как упомянуто ранее, между ними возможен обмен информацией через технологии V2V и V2I. Эффективная организация автомобильной сети и реализация распространения данных являются важнейшими аспектами сценария. В контексте данной модели предполагается, что маяки и загруженные пакеты данных используют различные беспроводные ресурсы для коммуникации, такие как временные интервалы в одноканальных системах или различные каналы в многоканальных системах. В процессе доставки данных ТС, имеющие данные для загрузки, должны оповестить другие ТС, включив запрос на загрузки в свои маяки. После этого другие ТС в обоих направлениях реагируют на наличие ресурсов связи.

Предполагается, что скорость передачи данных постоянна при условии, что приемник находится в пределах диапазона передачи. Благодаря более высокой мощности передачи и усилению антенны скорость передачи данных и дальность связи V2I значительно превосходят аналогичные параметры V2V. В целях упрощения модели предполагается, что все ТС движутся с постоянной скоростью на каждом участке дороги и интервалы между ними имеют экспоненциальное распределение.

В контексте автотранспортной сети происходит организация ТС в группы, которые называют кластерами [5]. В этих кластерах ТС находятся на расстоянии, не превышающем дальность связи V2V. Внутри такого кластера возможна передача сообщений с применением многих последовательных V2V-соединений. Важно отметить, что в этот кластер не включаются ТС, движущиеся в противоположном направлении, из-за потенциальной нестабильности в процессе установления связи в случае движения встречных направлений. В пределах кластера предлагается выбирать самое удаленное ТС в диапазоне связи предыдущего передатчика в качестве следующего ретранслятора. Это позволяет уменьшить количество пересылок данных и избежать перегрузки сети. Процесс выбора ретранслятора продолжается до тех пор, пока сообщение не достигнет своего пункта назначения или не пересечет границу группы ТС. Для эффективной передачи больших объемов информации ретрансляторы передают пакеты данных следующему ретранслятору после получения от предыдущего пакета, а не всего сообщения. Этот метод позволяет ретрансляторам передавать и принимать пакеты данных как внутри кластера, так и между кластерами. В этом случае используется ТС, оборудованное устройством OBU для получения данных. Исследование направлено на изучение сложности загрузки данных из нескольких источников на участке дороги, где расположены два RSU — по одному на каждом из концов.

Стратегия определяет, какие источники данных будут выполнять загрузку данных в следующем временном интервале, а также какое RSU выбрано в качестве приемника (пункта назначения) для каждого активного источника. Путем оптимизации стратегии, включая выбор источника данных и ТС для ретрансляции в каждом временном интервале, можно достичь максимальной пропускной способности сети при передаче данных. Однако на текущий момент существует несколько актуальных вопросов, требующих более глубокого исследования:

1) когда для доставки данных используются ТС, движущиеся в обоих направлениях, целью исследования является количественная оценка переданного объема данных и задержки доставки в сложных сценариях;

2) учитывая большой размер файлов, несколько разных ТС могут нести разные фрагменты файла, что создает более сложные условия по сравнению с доставкой целого сообщения;

3) рассматривается случай множественных передатчиков, в котором транспортные средства выполняют не только функцию ретрансляции данных друг для друга, но также сотрудничают как источники данных для совместного уменьшения коллизий в беспроводных связях.

Ключевые этапы для решения представленных выше задач — анализ пропускной способности передачи данных ТС и задержек в доставке данных.

На первом этапе процесс доставки данных ограничен различными факторами, такими как доступность и качество беспроводной сети, движение ТС и количество запросов на передачу данных, которые могут поступать одновременно. Количественное измерение пропускной способности при различных условиях играет критическую роль в оптимизации работы сети.

Второй этап связан с анализом задержек в доставке данных. Выбор направления с наименьшими задержками выгоден как для источника данных, так и для экономии ресурсов сети для других пользователей.

Следовательно, оценка соответствующих задержек при определенных условиях доставки является неотъемлемой частью процесса принятия решений. При доставке данных стратегия определяет не только, какую базовую станцию следует использовать для передачи данных, но также точное время и местоположение начала доставки данных.

Для проверки численных результатов было произведено моделирование с одним и несколькими источниками. В ходе моделирования [9] использованные параметры в текущей модели NS-3 (аббр. от англ. Network Simulator, сетевой симулятор), были модифицированы для внедрения технологии store-carry-and-forward. Например, для долгосрочного хранения данных в ретранслирующих ТС максимальное количество пакетов и максимальная задержка должны быть увеличены в соответствии с настройками параметров симуляции, указанных в таблице 2.

Таблица 2. Параметры симуляции

Параметры	Значение
Плотность транспортных средств, ТС/км	от 2,5 до 20
Расстояние между RSU, км	2
Скорость движения транспортных средств, м/с	20
Скорость передачи V2V, Мбит/с	1
Скорость передачи V2I, Мбит/с	4,5
Размер данных сообщения, Мб	20
Длительность режима передачи данных, мс	50
Период выбора ретранслятора, сек	2

В эксперименте с одним источником этот источник начинает двигаться после выхода из зоны покрытия предыдущей базовой станции RSU и заканчивает движение после преодоления расстояния между RSU. Для сбора статистических данных было проведено 200 итераций эксперимента. Для проверки точности аналитической модели результаты моделирования были сопоставлены с теоретическими данными.

Сравнительный анализ показал, что увеличение плотности транспортных средств приводит к увеличению пропускной способности доставки сообщений. Это объясняется тем, что более высокая плотность способствует более надежной связи, что является критически важным для доставки сообщений с несколькими переходами. Более высокая плотность позволяет объединять или группировать ТС в более крупные кластеры. Задержка данных также уменьшается при более высокой плотности ТС.

Следует отметить, что результаты моделирования могут отличаться от теоретических результатов по ряду причин.

1) При моделировании, даже если мощность принятого сигнала превышает порог обнаружения мощности, всегда существует вероятность ошибки при приеме пакета. В теоретических результатах, в отличие от результатов моделирования, ошибка передачи не учитывается;

2) Выбор ретранслятора в режиме реального времени осуществляется дискретным, а не непрерывным образом. Решение о выборе ретранслятора принимается не непрерывно в каждый момент времени, а в дискретные моменты времени с определенным интервалом. Это означает, что система принимает решение о переключении или выборе ретранслятора через определенные промежутки времени, а не непрерывно в течение каждого момента времени.

Помимо этого, исследуется сценарий, в котором четыре источника данных одновременно запрашивают передачу информации на базовую станцию RSU. Проводится сравнительный анализ между предложенной стратегией и стандартными методами. В стандартных методах источники выбирают ближайшее к ним RSU для передачи данных. Однако предложенная стратегия всегда выбирает источники данных с наибольшей скоростью передачи информации. Это приводит к существенному снижению задержек в доставке данных по сравнению со стандартными методами.

Результаты указывают на то, что предложенная стратегия обеспечивает не только улучшенную производительность, но и более справедливое распределение ресурсов. Это происходит потому, что каждый источник данных приходит к оптимальному местоположению среди других источников в определенный момент времени. Этот результат подтверждает, что предложенная стратегия может значительно увеличить эффективность использования коммуникационных ресурсов и снизить задержки в доставке данных по сравнению со стандартными методами маршрутизации в автомобильных беспроводных самоорганизующихся сетях (VANETs, аббр. от англ. Vehicular Ad-hoc Networks), которые опираются на физическое расстояние между ТС, чтобы принимать решение о передаче данных.

Кроме того, данная стратегия предоставляет график передачи данных, в котором отсутствуют конфликты между ТС (одновременно не более одного источника данных использует одни и те же ретрансляторы или базовую станцию RSU для передачи информации). Это способствует более эффективной коммуникации. Анализ, учитывающий размер данных, местоположение и движение ТС, позволяет определить наилучшее местоположение RSU для передачи данных с учетом всех факторов.

Выводы

Представленный аналитический обзор раскрывает основные модели и принципы работы V2V и V2I, показывая их взаимодействие в сфере современных ИТС. Проведен сравнительный анализ V2V и V2I, выявлены достоинства и недостатки данных технологий. Показано, что V2V обеспечивает быструю передачу данных между ТС при условии, если расстояние между ними меньше или равно дальности связи V2V (может быть особенно полезным в ситуации аварийного торможения). В свою очередь, V2I позволяет интегрировать автомобили с инфраструктурой города, способствуя более эффективному управлению дорожным движением и безопасности.

Рассмотрено совместное использование V2V и V2I, как с применением, так и без применения технологии store-carry-and-forward. Анализ показал, что совместное использование этих технологий способно оптимизировать обмен данными и повысить надежность связи в дорожной среде. В частности при использовании технологии store-carry-and-forward можно достичь улучшения двух важных параметров — времени задержки и объема задействованных ресурсов, в отличие от метода без применения этой технологии, который характеризуется значительным количеством недостатков.

Аналитический обзор подчеркивает важность и актуальность построения моделей V2X-систем. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований в этой области. Новизна заключается в глубоком анализе различных аспектов V2X-систем и выявлении путей их оптимизации для улучшения транспортных систем и безопасности на дорогах. Подход, описанный в данной статье по построению моделей V2X-систем, может быть полезен и усовершенствован в следующих областях, связанных с развитием V2X: транспортная логистика, системы управления транспортом, городская инфраструктура.

Литература

1. Zhu L., Yu F. R., Wang Y., Ning B., Tang T. Big Data Analytics in Intelligent Transportation Systems: A Survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2019. Vol. 20. Iss. 8. PP. 383–398. DOI: 10.1109/TITS.2018.2815678
2. Vladyko A., Khakimov A., Muthanna A., Ateya A. A., Koucheryavy A. Distributed Edge Computing to Assist Ultra-Low-Latency VANET Applications // Future Internet. 2019. Vol. 11. Iss. 6. P. 128. DOI: 10.3390/fi11060128
3. Vladyko A., Elagin V., Spirikina A., Muthanna A., Ateya A. Distributed Edge Computing with Blockchain Technology to Enable Ultra-Reliable Low-Latency V2X Communications // Electronics. 2022. Vol. 11. P. 173. DOI: 10.3390/electronics11020173
4. Brehon-Grataloup L., Kacimi R., Beylot A. L. Mobile Edge Computing for V2X Architectures and Applications: A Survey // Computer Networks. 2022. Vol. 206. P. 108797. DOI: 10.1016/j.comnet.2022.108797
5. Плотников П. В., Владыко А. Г. Минимизация задержек при взаимодействии граничных устройств с использованием кластеризации в сетях VANETs // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 6–13. DOI: 10.31854/1813-324X-2022-8-2-6-13
6. Плотников П. В., Владыко А. Г. Численный анализ математической модели кластерной V2X-системы // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 1. С. 14–23. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-1-14-23
7. Dongyao J., Dong N. Enhanced Cooperative Car-Following Traffic Model with the Combination of V2V and V2I Communication // Transportation Research. Part B. Methodological. 2016. Vol. 90. PP. 172–191. DOI: 10.1016/j.trb.2016.03.008
8. Feng M., Yao H., Ungurean I. A Roadside Unit Deployment Optimization Algorithm for Vehicles Serving as Obstacles // Mathematics. 2022. Vol. 10. P. 3282. DOI: 10.3390/math10183282
9. Ni Y., He J., Cai L., Bo Y. Data Uploading in Hybrid V2V/V2I Vehicular Networks: Modeling and Cooperative Strategy // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2018. Vol. 67. Iss. 5. PP. 4602–4614. DOI: 10.1109/TVT.2018.2796563
10. Vinel A., Lyamin N., Isachenkov P. Modeling of V2V Communications for C-ITS Safety Applications: A CPS Perspective // IEEE Communications Letters. 2018. Vol. 22. Iss. 8. PP. 1600–1603. DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2835484
11. Atallah R., Khabbaz M., Assi M. Multihop V2I Communications: A Feasibility Study, Modeling, and Performance Analysis // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66. Iss. 3. PP. 2801–2810. DOI: 10.1109/TVT.2016.2586758
12. Plexe. URL: <http://plexe.car2x.org> (дата обращения 10.09.2023)
13. Arteaga A., Cespedes S., Azurdia-Meza C. Vehicular Communications Over TV White Spaces in the Presence of Secondary Users // IEEE Access. 2019. Vol. 7. PP. 53496–53508. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2912144
14. Lai C., Zhang K., Cheng N., Li H., Shen X. SIRC: A Secure Incentive Scheme for Reliable Cooperative Downloading in Highway VANETs // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 18. Iss. 6. PP. 1559–1574. DOI: 10.1109/TITS.2016.2620620
15. Wang M., Hanguan S., Lu R., Zhang R., Shen X. & Others. Real-Time Path Planning Based on Hybrid-VANET-Enhanced Transportation System // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2015. Vol. 64. Iss. 5. PP. 1664–1678. DOI: 10.1109/TVT.2014.2335201
16. Chen J., Guoqiang M., Li C., Zafar A., Zomaya A. Y. Throughput of Infrastructure-Based Cooperative Vehicular Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 18. Iss. 11. PP. 2964–2979. DOI: 10.1109/TITS.2017.2663434

Статья поступила 5 октября 2023 г.
Одобрена после рецензирования 24 октября 2023 г.
Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Информация об авторе

Суравцев Руслан Витальевич — аспирант кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: canelorus7@gmail.com

Analytical Review of V2X System Modeling

R. Suravtsev

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

Purpose. In modern intelligent transport systems (ITS), V2V (Vehicle-to-Vehicle) technologies that facilitate the exchange of information between vehicles and V2I (Vehicle-to-Infrastructure) technologies that ensure interaction between vehicles and infrastructure are gaining significant influence. This process is aimed at optimizing the organization of data transmission in order to minimize emergencies on the road and more efficient traffic flow management. Nevertheless, the high mobility of the traffic flow and the unreliability of automobile communication, including delays and data loss, can disrupt the stability of the joint management system. **The aim of the work** is an analytical review of V2V and V2I technologies in the context of their important role in the development of autonomous movement and ITS. It is proposed to consider the joint use, construction of V2V and V2I models with store-carry-and-forward technology in order to optimize the resources involved and minimize the delay in data delivery. **Novelty** within the framework of this article, a comparative analysis of V2V and V2I technologies is proposed. The analysis allows you to deeply understand the features, advantages and limitations of each of these technologies. Additionally, the article discusses the prospect of integrating V2V and V2I technologies into ITS using the «store-carry-and-forward» method. The presented concept is relevant and contributes to the optimization of data transmission in ITS. **Results.** An analytical review of the models and principles of operation of V2X systems is formulated, their functionality and interaction in the context of modern information and transport systems are considered in detail. A comparative analysis of two important aspects of V2X technologies was carried out: V2V and V2I. The possibilities of sharing V2V and V2I, both using store-carry-and-forward technology, and without it, are given. The study showed that this approach is able to optimize data exchange and improve the reliability of communication in the road environment, especially in comparison with methods without the use of this technology. **Theoretical / Practical relevance.** The theoretical significance of the article is to expand knowledge about the integration of the V2V and V2I technology approach with the store-carry-and-forward method, which opens up new opportunities for optimizing transport systems and efficient data transfer to ITS. The presented approach is proposed to be implemented in the form of specific algorithms and software modules that can be integrated into existing transport systems and practically applied to optimize data transmission and traffic flow management.

Key words: V2X, V2V, V2I, store-carry-and-forward, model, analytical review.

Information about Author

Ruslan Suravtsev — Postgraduate at the Department of Higher Mathematics (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: canelorus7@gmail.com

УДК 659.11

Продвижение музыкального продукта с помощью личного бренда на примере альбома «Midnights» Тейлор Свифт

Пыпина Д. Д.[✉], Астафьева-Румянцева И. Е.

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

Постановка задачи. Исследование специфики продвижения музыкального продукта с помощью личного бренда на примере альбома «Midnights» Тейлор Свифт. **Гипотеза:** эффективность продвижения музыкального продукта повышается при использовании креативных и минимизации традиционных (медиа-тур, появление на ток-шоу, интервью в журналах) методов. Основным каналом продвижения альбома посредством личного бренда является сообщество социальных сетей, а ключевым инструментом – креативная адаптация контента в соответствии с форматом интернет-платформы в целях максимизации влияния маркетинговых сообщений на аудиторию. **Цель:** изучение и обобщение практики креативного продвижения музыкального альбома в социальных сетях посредством личного бренда, позволяющей избежать прямого рекламирования товара, а также существенно сократить дистанцию между лидером мнений и аудиторией, что увеличит ее лояльность и экономический эффект от взаимодействия. **Результат:** проанализированы инструменты продвижения музыкального продукта с помощью личного бренда на примере «Midnights» Тейлор Свифт, благодаря которым альбом стал самым прослушиваемым, а концертный тур – коммерчески успешным не только для нее и организаторов тура. Среди них: увеличение объема и жанрового разнообразия контента в социальных сетях; отказ от традиционных средств продвижения музыкального продукта; партнерство с инфлюенсерами, брендами, администрациями штатов; эффективные техники вовлечения аудитории; сторителлинг.

Ключевые слова: личный бренд, продвижение музыкального альбома, инфлюенсер, креативное продвижение, продвижение через социальные сети.

Данное исследование направлено на изучение особенностей продвижения музыкального альбома в социальных сетях посредством личного бренда. Актуальность темы обусловлена быстрым ростом музыкальной индустрии благодаря развитию интернет-технологий, вслед за которыми сменяются существующие модели продвижения. Сегодня уже не удивительно, что основные кампании по продвижению музыкальных продуктов проходят не на радио и телевидении, а в социальных сетях.

В рамках данного исследования были проанализированы инструменты продвижения альбома «Midnights» американской певицы Тейлор Свифт, вышедшего 21 октября 2022 г. Эмпирическая составляющая исследования представлена материалом, распространяемым в социальных сетях от имени Тейлор Свифт; контентом, созданным партнерскими компаниями в социальных сетях. Использованы метод сравнения и контент-анализ. Контент-анализ, материалом для которого стали личные блоги и каналы Тейлор Свифт, СМИ, партнеров тура, *TikTok*, *Spotify*, *Amazon Prime Video*, *Tumblr*, демонстри-

Библиографическая ссылка на статью:

Пыпина Д. Д., Астафьева-Румянцева И. Е. Продвижение музыкального продукта с помощью личного бренда на примере альбома «Midnights» Тейлор Свифт // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 1. С. 4. EDN: EIGQRY

Reference for citation:

Pypina D., Astafjewa-Rumyantseva I. Promoting a music product through personal branding using Taylor Swift's 'Midnights' album as an example // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss. 1. P. 4. EDN: EIGQRY

рует непосредственную связь личности создателя с альбомом, позволяющую целевой аудитории взаимодействовать с брендом на более глубоком уровне, чем при использовании только прямой рекламы, которая все чаще вызывает у нее негативную реакцию. Так, в одном из промовидео сети *Tumblr* Тейлор Свифт пересматривала свои подростковые блоги, что позитивно отразилось на ее репутации, вызвав у поклонников сопереживание и чувство ностальгии [1, 2]. Целевой аудиторией альбома являются поколения Y и Z, представители которых в большей степени проводят время в Интернете в поисках постоянно обновляемого контента. Исследователи выделяют несколько поведенческих характеристик слушателей музыки, четыре из которых соответствуют аудитории альбома Тейлор Свифт: логика развлечения, логика погружения, логика социальной связи, логика идентификации [3]. Находит свое подтверждение гипотеза, предполагающая, что известные личности музыкальной индустрии привлекают значительное внимание СМИ к выходу альбома. Издание *Tampa Bay Time* проанализировало, сколько процентов времени в сет-листе тура в поддержку альбома занимают песни из каждого этапа творчества Тейлор Свифт и объявило конкурс на лучшую песню [4] (рисунок 1); журнал *Consequence* за несколько недель до выхода альбома составил топ-10 самых значимых песен Тейлор [5]; *Rolling Stone* включил песню «Fearless» из нового альбома в список «Лучших кантри-альбомов всех времен», а также выдвинул теорию о существовании потерянного альбома *Karma* [6]; издание *American Songwriter* составило список из самых важных моментов в карьере Тейлор [7]; *Pollstar* сравнило ожидаемую прибыль от тура с бюджетом маленькой страны [8]; издание *Insider* назвало «Wouid've, Should've, Coud've» лучшей песней года [9]; издание *Bustle* составило список песен по знаку зодиака [10]; *Vogue* написал, что тур имеет больше влияние, чем фестиваль *Coachella* [11].

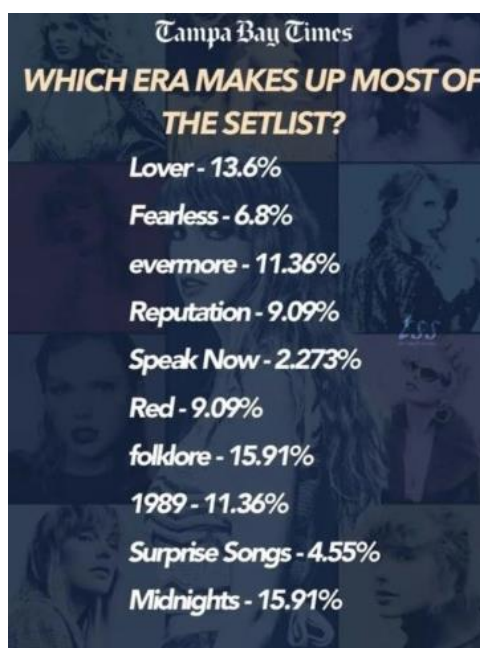


Рис. 1. Аналитика *Tampa Bay Time* относительно композиций сет-листа тура, символизирующих отдельные этапы карьеры Тейлор Свифт

В музыкальной сфере выделяют четыре направления становления проекта: развитие артиста и альбома (выступления), продвижение (прослушивания на стриминговых сервисах), связи с общественностью (СМИ, социальные сети), поиск новой аудитории [12]. Специфика аудитории кампании, которая строится на личном бренде, состоит в том, что потенциальные клиенты уже «прогреты» и готовы к совершению покупки альбома и билета на концерт, так как долгое время следят за социальными сетями певицы, следуют ее рекомендациям, стараются быть похожими на нее внешне и внутренне [13]. Как и при продвижении предыдущего альбома «Reputation», Тейлор провела ребрендинг своих социальных сетей, изменила дизайн, фотоконтент профиля и актуальных историй (на момент анонса альбома у нее было 223 млн подписчиков, а спустя неделю аудитория увеличилась на один миллион).

В рамках продвижения предыдущего альбома и тура Тейлор поддерживала тесные связи с фанатами через общение на *Tumblr* и тайные аудиовечеринки, а также запустила хэштег в *TikTok*, под ко-

торым размещала свои изображения в 17 лет и строчку из альбома «такое сияние, которое у тебя есть только в 17 лет», активизируя пользователей [14]. Инфографические посты Тейлор написаны доступным языком с использованием эмодзи и фото, становятся интернет-мемами, которые быстро распространяются по сети и не требуют от новых пользователей глубокой эмоциональной вовлеченности в творчество певицы, что способствует повышению охватов с использованием новостного контента о выходе альбома [15]. В продвижении нового альбома Тейлор также взаимодействует со сложившимся за годы карьеры фандомом (фанатским сообществом), во многом берущим инициативу на себя: поклонники выкладывали варианты обложки альбома с собственными фото или коллажами, созданными искусственным интеллектом, распространяли комиксы (рисунок 2).

Тейлор много общается и фотографируется с фанатами, которые отмечают ее на фото, что способствует росту известности альбома: они делятся историями о том, как встретили Тейлор и общались с ней благодаря тому, что купили билет на концерт, что также подогревает интерес к ее личности и творчеству и стимулирует продажи билетов, музыкальных носителей и сувенирной продукции, а также иных товаров с символикой исполнительницы (мерчендайза).

В рамках партнерства с *YouTube Shorts* Тейлор запустила актуальный хештег по названию песни из альбома *#TSAntiHeroChallenge*, под которым были опубликованы пять короткометражных видео, где певица откровенно повествует о своей интровертности, пережитом отвращении к самой себе, несчастной влюбленности, мыслях о мщении после расставания [16]. Наравне с серьезными рассуждениями она делится историей о нежной привязанности к кошкам, фантазирует о будущем, обещает обо всех упомянутых темах вспомнить в своем новом альбоме. Данный контент направлен не только на подростков, которые сталкиваются с похожими проблемами, но и на тех, кто их уже сумел преодолеть и готов говорить о своем опыте или интересах. Для сопровождения видео выбирался один музыкальный отрывок песни «Anti-Hero». Пользователям предлагалось использовать его, чтобы рассказать о себе и о том, что делает их уникальными, тем самым поучаствовав в конкурсе (было выложено более 3000 видео), по результатам которого одна из поклонниц получила ко дню рождения гитару с автографом Тейлор (рисунок 3). Видео с получением подарка стало вирусным, что подогрело интерес к хештегу. Данный формат взаимодействия с аудиторией не является уникальным, им пользуются и другие исполнители, например Эд Ширан [17]. Впоследствии вышел клип «Anti-Hero», связанный со скандальным обвинением певицы в фэтфобии (*от англ. fat – жир, толстый*) и впоследствии отредактированный *Apple Music* [18].

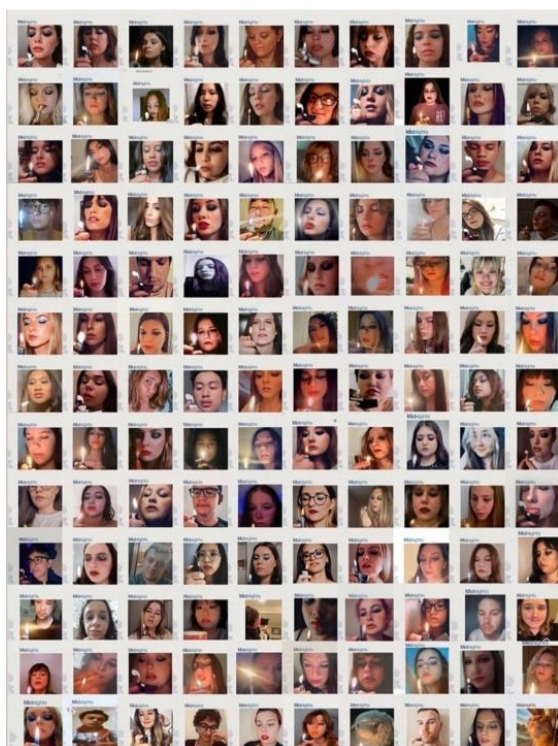


Рис. 2. Примеры фанатских версий обложек альбома Тейлор



Рис. 3. Реакция поклонницы на подарок Тейлор

Специальные посты с ответами на вопросы фанатов и двухсекундное видео были выпущены для *Spotify* и *Tumblr*, где Тейлор рассказывала о предстоящем выходе альбома, о смыслах его композиций. Она также стала лицом плейлиста «Pop Culture» на *Amazon Music*. В партнерстве с *TikTok* Тейлор выпустила серию видео «Midnights Mayhem With Me», где непоследовательно раскрыла 13 названий песен, представляя каждую через номер бинго (более 230 млн просмотров видео и 150 млн хэштегов). Каждый жест в ролике пристально изучается аудиторией (в двух случаях трубку держат вверх ногами, в двух других телефон подносится к правому уху, а не к левому), потому что фанаты понимают: Тейлор ничего не делает без причины, и это подсказки о содержании альбома, что также подогревает интерес аудитории, рождая множественные интерпретации, а с увеличением вовлеченности фанатов растет и количество загрузок песен. В «Твиттере» интерпретации объединяются и продолжают держать аудиторию в напряжении: анонс альбома собрал 1,6 млн твитов за три дня [19]. Альбом продвигается посредством размещения подсказок: для того, чтобы найти ответы, потребители ищут знаки в прошлых работах певицы, увеличивая продажи предыдущих релизов; переиздание альбома «Fearless» 2012 г. побило рекорды в день его выпуска [20].

Технический сбой произошел у компании *Ticketmaster* во время предпродажи билетов на *The Eras Tour*. Сайт не выдержал нагрузки 3,5 млн человек, в результате чего зрителям пришлось переплачивать, при том, что Тейлор не использовала динамическое ценообразование [21]. После расследования представители *Live Nation Entertainment* извинились перед певицей и ее поклонниками, а Тейлор, в свою очередь, публично высказалась перед прессой в день отмены продажи: «Я не собираюсь ни перед кем оправдываться, потому что мы несколько раз уточняли и компания заверила нас, что справится с таким спросом. Мне мучительно наблюдать за ошибками без права исправления» [22]. Обсуждая проблему монополизации рынка компанией *Live Nation Entertainment*, сенаторы щедро цитировали строчки из песен «Midnights», что стало отдельным инфоповодом и не оставило фанатов равнодушными [23].

Альбом «Midnights» был выпущен без промосингла, что происходит впервые в американской поп-индустрии. Тейлор не использует традиционные методы продвижения альбома: медиатюры, многочисленные появления на ток-шоу, интервью в журналах. Она полагается на сообщество социальных сетей (на момент выхода альбома, октябрь 2022 г. – 228 млн подписчиков), креативно адаптирует свой контент в соответствии с интернет-платформами, чтобы максимизировать влияние постов на свою аудиторию.

Тейлор выпустила лимитированный лавандовый CD с тремя бонусными треками, буклетом с песнями, новыми фото и уникальным дизайном самого диска. Также был издан эксклюзивный лавандовый винил с коллекционной обложкой, полноразмерной фотографией и чехлом для пластинки. Подарочный набор включал и символ альбома – часы, и стикеры в виде звезд. В честь дня святого Валентина на сайте появились винилы в виде сердца с записью концерта «*Lover: Live from Paris*». Лимитированные подписанные пластинки стали доступны к заказу только в полночь и в определенные дни, провоцируя ажиотажный спрос у аудитории и заставляя ее выстраиваться в электронные очереди [24].

Тейлор Свифт использует свои социальные сети в основном для систематического напоминания о том, что осталось немного времени для заказа лимитированного издания или просмотра тизера, показанного во время футбольного матча в поддержку альбома. Она публикует записи о том, что некоторые композиции присутствуют только в лимитированных CD, поэтому у фанатов есть повод выбраться из дома в магазин. Иногда она рассказывает в публикациях о творческом процессе, в котором создавались песни, выкладывает благодарности зрителям, ремиксы и делится процессом съемок клипа.

После выхода альбома «Midnights» всего за три дня было продано свыше миллиона копий [25] (для сравнения: на предпродаже предыдущего альбома «*Reputation*» было продано свыше 400 тыс.) [26]. Впоследствии, по данным *Billboard*, композиции альбома занимали лидирующие места в рейтингах за счет прослушиваний на стриминговом сервисе *Spotify*, продаж и трансляций по радио. В таблице, представленной ниже, даны результаты анализа композиций альбома по рейтингу, количеству прослушиваний, аудитории и продажам (рисунок 4) [27]. Чем явственнее продукт воспринимается как редкий, тем больше потребители склонны его покупать: с помощью выдачи обрывков информации, бонусов и эксклюзивности Тейлор увеличивает желание аудитории приобрести альбом.

Интернет-сообщества практически каждую минуту выкладывают частички новой актуальной информации об альбоме, например о дополнительных вариантах композиций с пометкой «Taylor's

Version», о которых фанаты узнали лишь в первый день тура, благодаря этому контент стал еще более популярным [28]. Другим примером инфоповода, умело использованного в рамках тура, является ситуация, произошедшая в Хьюстоне, где применялась столь яркая концертная иллюминация, что жители приняли ее за инопланетные объекты; это обстоятельство также активно обсуждалось в СМИ [29].

	Рейтинг	Кол-во стримов	Аудитория эфиров	Продажи
Anti-Hero	1 🤩	59,7 млн	32 млн	13 500 тыс
Lavender Haze	2 😄	41,4 млн	2,4 млн	2800 тыс
Maroon	3 😄	37,6 млн	471 тыс	2900 тыс
Snow on the Beach	4 😄	37,2 млн	615 тыс	2600тыс
Midnight Rain	5 😄	36,9 млн	449 тыс	2200тыс

	Рейтинг	Кол-во стримов	Аудитория эфиров	Продажи
Bejeweled	6 😄	35,5 млн	1,6 млн	16100 тыс
Question...?	7 😄	31 млн	425 тыс	21400тыс
You're on Your Own, Kid	8 😄	34,1 млн	498 тыс	1500 тыс
Karma	9 😄	33 млн	1,9 млн	3400 тыс
Vigilante Shit	10 😞	32,2 млн	424 тыс	6400 тыс

Рис. 4. Сравнительный анализ композиций альбома «Midnights» по рейтингу, количеству прослушиваний, аудитории и продажам (21–27 октября 2022 г.)

В сотрудничестве со *Spotify* Тейлор использует рекламные щиты на Таймс-Сквер в качестве тизерной рекламы, отсчитывающей время до релиза альбома и раскрывающей некоторые строчки из его композиций (рисунок 5).



Рис. 5. Рекламный щит *Spotify* на Таймс-Сквер

Кроме основных партнеров к продвижению были подключены официальный аккаунт *Oreo*, который воссоздал собственную версию символа альбома Тейлор – циферблат «Midnights» в виде печенье; компания по производству бытовой техники *iRobot*, создавшая свою версию символа – в виде робота-пылесоса с использованием хэштегов Тейлор Свифт; офис *Empire State Building*, разместивший видео в блоге с использованием музыки Тейлор (рисунок 6).

Тейлор также была упомянута в телеигре «Wheel of Fortune», в одном из плакатов к новому сезону сериала «Анатомия страсти», где присутствует отсылка к песне «Begin Again», а одна из серий будет названа «Everything Has Changed», что очевидно увеличивает присутствие Тейлор в медиапространстве [30].



а)



б)

Рис. 6. Символы «Midnights»: а) версия Oreo; б) версия iRobot

На билбордах *Spotify* (центральные площади, торговые центры, музыкальные магазины Лондона, Нэшвилла, Сан-Паоло, Мехико) транслируются строки из композиций альбома. Также платформа разработала специальное оформление баннеров с новостью о том, что альбом побил все рекорды года (рисунок 7).

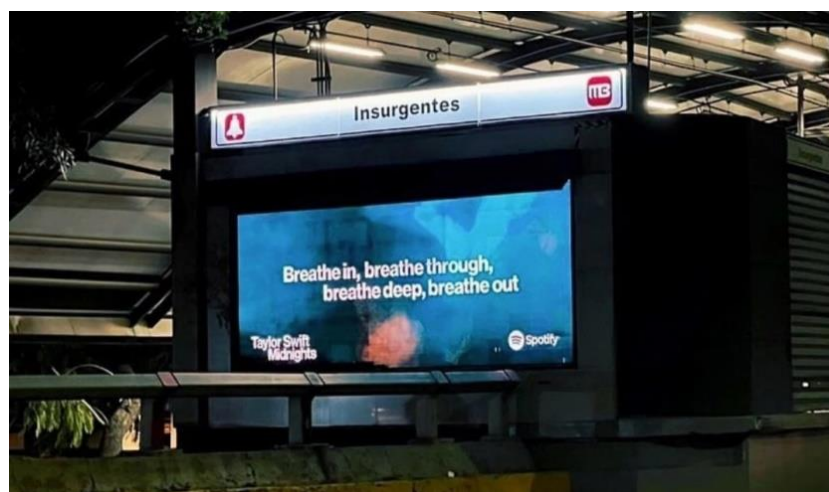


Рис. 7. Билборд *Spotify* в торговом центре

В ночь выхода альбома на *Spotify* произошел сбой, и пользователи со всего мира делились снимком замершего экрана (более 300 тыс. твитов за ночь), а спустя 24 часа альбом уже становится самым прослушиваемым [31].

Результаты контент-анализа показывают, что взаимодействие Тейлор с фанатами строится на выдаче им большого количества подсказок (пасхалок) об альбоме. В данной стратегии значимой становится каждая мелочь. Так, например, фанаты замечают, что названия некоторых треков упоминались в видео и фото певицы задолго до их выпуска, в другом случае Тейлор выкладывает сразу пять промо-роликов, чем удивляет фанатов, которые ждали ролики по расписанию (один в неделю), в результате чего количество предзаказов альбома увеличилось, так как сработал эффект неожиданности [32]. В период ожидания нового альбома оживился интерес к предыдущему творчеству Тейлор, фанаты начали выпускать анкеты с вопросами о ее творчестве.

В поддержку альбома 1 ноября 2022 г. на официальном сайте Тейлор был анонсирован 6-й тур по США из 50 концертов. Его оформление отражает концепцию альбома «Путешествие по всем моим музыкальным эрам».

Фанатам, купившим билеты категории VIP, приходят подарки с открытками, посвященными туру, а для иностранных поклонников, сделавших предзаказ альбома, Тейлор выпустила подписанные CD (были проданы в течение 15 минут, за что впоследствии певица поблагодарила поклонников) и специальный код для раннего доступа к покупке билетов [33].

В рамках сотрудничества с Тейлор *TikTok* создал специальное оформление, появляющееся при поиске информации о туре, а также рассортировал видео по городам, где прошел или пройдет тур; добавил стикеры, которые можно было размещать, публикуя отзывы о концерте; *Spotify* оформил плейлист «Teen Beats» в стиле альбома; *Apple Music* создал плейлисты из песен Тейлор для тренировок (йога, бег), обложки которых были вдохновлены фотосессиями к альбому «Midnights» (рисунок 8). Отдельно стоит упомянуть рекламу для *Capital One*, главного спонсора тура: в ролике отражена его концепция – становление карьеры Тейлор [34].



Рис. 8. Сравнение оформления альбома и плейлистов *Spotify*

Концерты Тейлор традиционно начинаются в Глендейле, мэр которого в рамках тура на время приезда певицы переименовал город в ее честь (Swift City), о чем рассказал СМИ и написал в своем блоге; развлекательный район Вестгейт вывесил приветственные сообщения, а местные рестораны предложили блюда с названиями из альбома [35].

На бульваре Лас-Вегас каждую ночь демонстрировались световые шоу, вдохновленные цветовой палитрой тура, а на дорожных указателях были размещены предупреждающие надписи в виде строчек из песен Тейлор, которые обращали внимание на важность аккуратного вождения (рисунок 9) [36].



Рис. 9. Предупреждающие надписи в виде строк песен на дорожных указателях

Арлингтон (штат Техас) переименовал улицу рядом с концертной площадкой в Taylor Swift Way (рисунок 10), а его мэр Джим Росс объявил 31 марта – 2 апреля «выходными Тейлор Свифт», во время которых скульптуры у здания мэрии были подсвечены красным цветом. Свифт был вручен ключ от города, а музей искусств Арлингтона устроил выставку «The Eras Tour Collection» на тему ее творчества. Приют для животных *Arlington Animal Services* организовал тематическую акцию: при приобретении питомца можно было пожертвовать 40 долларов в честь 40-й композиции Тейлор, вошедшей в топ-10 чарта *Billboard Hot 100*, и 9 долларов за особенных питомцев в честь девяти хитов певицы, возглавляющих чарт [37].



Рис. 10. Переименование улицы Арлингтона в Taylor Swift Way

Радиостанция в городе Хьюстон была переименована в *Tay-RBE* и весь день воспроизводила исключительно треки Тейлор, переименование коснулось и местного стадиона *NRG Stadium*, к названию которого добавили (*Taylor's Version*). Приют для кошек отдавал питомцев в добрые руки за 13 долларов, памятуя о любви к ним Тейлор. Ювелирный салон *Burdlife* выпустил специальную коллекцию украшений, вдохновленную альбомом Тейлор, а также устроил мероприятие в честь ее приезда [38].

Тампа (штат Флорида) вручает певице символический ключ от города с приглашением стать на один день почетным мэром (рисунок 11). *Starbucks* перечислил бывших возлюбленных певицы, назвав напитки их именами в меню и сопроводив заголовком «Кто ты из “бывших” Тейлор Свифт?» (рисунок 12). Здания городского центра подсвечиваются красным светом, а округ Хиллсборо временно меняет название на Свифтсборо (*Swiftsborough*). Пиццерия в Новом Орлеане *Zee's* предлагает посетителям годовой запас пиццы в обмен на концертные билеты [39].



Рис. 11. Приветствие для Тейлор в Тампе (Флорида)



Рис. 12. Оформление меню Starbucks

Ажиотаж, связанный с туром, постепенно затягивает в процессы организации промоакций не только различные сферы бизнеса, но и научно-образовательные центры. Стэнфордский университет выпустил курс «All To Well», используя название одной из композиций Тейлор. В рамках курса студенты смогут анализировать литературу, используя написанные исполнительницей песни [40]. В Королевском университете в Кингстоне читается курс «Литературное наследие Тейлор Свифт (Версия Тейлор)», в котором анализируются тексты песен и их литературная составляющая [41]. Академия звукозаписи включила «Midnights» в список «самых ожидаемых альбомов октября». Исследователи из Технологического института Вирджинии опубликовали работу, в которой подробно описали обнаруженный вид многоножек *Nannaria swiftae*, названный в честь Тейлор [42].

Отдельное место в продвижении альбома занимает сотрудничество певицы с приглашенными артистами (Girl in Red, Ланой Дель Рей и др.) и дизайнерами костюмов (Versace, Roberto Cavalli, Oscar de la Renta, Christian Louboutin). Артисты и дизайнеры выкладывают в своих блогах фото с выступлений, аудитория обсуждает лучшие/худшие образы Тейлор (в том числе ее маникюр), тем самым продвигая альбом [43]. С участием артистов генерируются видео с ожиданиями от альбома, усиливающие шквал инфоповодов. Писательница Тейлор Дженкинс Рейд сопоставила героев своих книг с песнями певицы, что получило большой отклик аудитории [44]. В *TikTok* появились вирусные видео, в которых Долли Партон и Джимми Феллон танцуют под музыку из альбома.

В рамках тура была организована продажа мерчендайза, отражающего четыре этапа карьеры певицы: от ранних альбомов до современных. Тейлор уделяет большое внимание смысловой части своего творчества, поэтому среди сувенирной продукции представлены одежда, брелки, наклейки и иные предметы-символы из клипов ее подросткового творчества. Это не только символизирует идею альбома, но и расширяет целевую аудиторию: выросший вместе с ней сегмент наравне с юными фанатами получает возможность вновь прочувствовать атмосферу творчества Тейлор. Чтобы стать обладателем заветных предметов культа певицы самым отчаянным фанатам приходилось за день до концерта занимать очередь у трейлеров, в которых представлена сувенирная продукция, а рассказывающие об этом репортажи подогрели интерес к мероприятию у остальных [45]. Наиболее популярным артефактом стал браслет, каждый элемент которого символизирует один из альбомов певицы [46].

Тейлор активно взаимодействует с инфлюенсерами-партнерами: на концертах среди фанатов были такие звезды, как Эмма Стоун, Селена Гомес, Лора Дерн и др., которые рассказали о концерте в своих социальных сетях. Инфлюенсеры также продвигают мерчендайз альбома: Майа Хоук и Марго Робби рассказали, что первыми удостоились его получения; Селену Гомес, лучшую подругу Тейлор, папарацци ловят в брюках *Midnights*, она вела трансляцию «Золотого Глобуса» под песни альбома, а также выкладывала фото с вечеринки, устроенной в стиле тура, талисманом которого являются «браслеты дружбы», главный символ творчества Тейлор (рисунок 13); у Ланы Дель Рей папарацци заметили кольцо из коллекции *Midnights*; Джессика Честейн сняла распаковку сувениров под альбом Тейлор; Камилла Кобельо сняла танец в толстовке с символикой *Midnights* [47]. Холзи и Райан Рейнольдс поздравили Тейлор с выходом альбома, и сказали, что они одержимы творчеством певицы, а Марени Моррис назвала альбом своим любимым.

В рамках продвижения тура артисты говорили в интервью о влиянии, которое Тейлор и ее музыка оказали на них: Рина Саваяма писала, что она была вдохновлена песней «Folklore» во время написания своего второго альбома; Келли Кларксон исполнила кавер на песню «Welcome to New York» на своем шоу; Джордана Брайант рассказала журналу *People*, что песня Тейлор «Love Story» побудила ее написать песню «Romeo» [48]; режиссер Дженнифер Кейтин Робинсон отметила, что творчество Тейлор послужило мотивацией для создания ее фильмов «Кто-то великий» и «Отомсти за меня» [49]; Джиджи Хадид упомянула, что Тейлор снималась в проморолике альбома в одежде ее бренда.

Тейлор общается со своей аудиторией как со старыми друзьями, которые уже давно ее знают, что увеличивает лояльность к альбому, туру и к ней самой. Фанатские видео не остаются без комментариев с ее стороны, что создает значительный имиджевый эффект. Тейлор также откровенно рассказывает о соавторах альбома (Зои Кравиц, Дилан О'Брайен), в какой атмосфере проходила работа и что они хотели высказать своим творчеством. Когда альбом занял все первые десять мест в чарте *Billboard Hot 100*, Тейлор эмоционально написала, что удивлена, потому что не ожидала такого успеха, сопроводив восторженную реакцию множеством восклицательных и вопросительных знаков.



Рис. 13. Стиль мероприятия Селены Гомес для продвижения тура Тейлор

На момент написания данной статьи в социальных сетях у Тейлор Свифт 273 млн подписчиков против 223 млн, которые были в августе; сразу же после первых концертов пять альбомов певицы вошли в топ-40 чарта альбомов Великобритании; в ежедневных прослушиваниях вырос не только альбом «Midnights», но и ранее выпущенные альбомы, которые стали еще более популярными (особенно песни из сет-листа тура) [50].

Тур способствовал развитию экономики и бизнеса в городах его проведения: три концерта во Флориде принесли 730 000 долларов в виде налогов [51]. Прогнозируется, что «The Eras Tour» соберет общую сумму в 728 млн долларов, которая в итоге может вырасти до 1 млрд впервые в истории [52]. Тейлор Свифт может оказать влияние на будущее поп-индустрии: сет-лист из 40 песен увеличит спрос на более продолжительные концерты, а исполнители будут организовывать основные кампании в социальных сетях с применением креативных методов. Так, предстоящий тур Дрейка уже вдохновлен Тейлор: плакат также изображает историю жизни музыканта.

Пример успешной рекламной кампании альбома Тейлор Свифт «Midnights» говорит о том, что личный бренд является одним из эффективных инструментов продвижения музыкального альбома в социальных сетях: у аудитории возникают ассоциации, управляющие представлениями о продукте, которые можно выгодно использовать в разработке маркетинговой стратегии.

Рекламная стратегия, избранная для поддержания личного бренда Тейлор Свифт, идеально вписывается в систему ценностей общества потребления: качественная реклама и мифология, выстроенная вокруг продукта, для потребителя оказывается важнее самого продукта. Управление образом исполнителя подчинено цели четкой идентификации этого образа в сознании аудитории, принципиального отличия от конкурентных образов, а также поддержания постоянно углубляющейся эмоциональной связи со слушателями. Одним из проявлений этой эмоциональной связи становится подражание кумиру. Любые действия любимого исполнителя отслеживаются; его привычкам, стилю в одежде, причёске, макияжу подражают; предметы ценные для кумира становятся абсолютной ценностью и для фаната. Возрастает и потребление музыкального продукта, фанаты скупают и коллекционируют любые вещи, связанные с исполнителем. Ключевыми задачами продвижения становятся: информирование аудитории о любых (разной степени значимости) событиях в жизни кумира с использованием особого языка и символов по каналам высокого уровня эффективности; трансляция ценностей актуальных как для исполнителя, так и для слушателей; поддержание постоянной обратной связи музыканта с аудиторией, закрепляющей доверительный характер отношений между ними.

Литература

1. Taylor Swift promo for *Midnights* on Tumblr. URL: <https://youtube.com/shorts/Sb3z4n4c8Dc?feature=share> (дата обращения 10.04.2023)
2. Данилова В. Г. *Self-брендинг, или Маркетинг индивидуальности*. Ростов-на-Дону, 2019. 125 с.
3. Соколова Е. С. *Продвижение артистов музыкальной индустрии: тренды отрасли и современные PR-технологии*. Выпускная квалификационная работа. СПб., 2016. (Рукопись). 101 с.
4. Review: Taylor Swift's First Tampa Eras Tour Show Enchanted a Sold-Out Stadium // Tampa Bay Times. 2023. URL: <https://www.tampabay.com/life-culture/music/music-reviews/2023/04/14/taylor-swift-tampa-review-eras-tour-first-night> (дата обращения 10.04.2023)
5. Taylor Swift Crash Course: A Look at Her Most Essential Eras. URL: <https://consequence.net/video/taylor-swift-crash-course-video> (дата обращения 10.04.2023)
6. Taylor Swift's Re-Recorded 'Fearless' Makes Record-Breaking Debut at Number One // Rolling Stone. 2021. URL: <https://www.rollingstone.com/music/music-news/rs-charts-top-200-taylor-swift-fearless-dmx-1156272> (дата обращения 10.04.2023)
7. 12 Milestone Taylor Swift Moments // American Songwriter. 2022. URL: <https://americansongwriter.com/12-milestone-taylor-swift-moments> (дата обращения 10.04.2023)
8. How Much Money Has Taylor Swift Made From Her 'Eras' Tour? // Inside the Industry. 2023. URL: <https://inside-the-industry.com/2023/05/28/how-much-money-taylor-swift-made-from-eras-tour> (дата обращения 29.05.2023)
9. The best song from Taylor Swift's 'Midnights' is one she left off the actual album // Insider. 2022. URL: <https://www.insider.com/taylor-swift-midnights-3am-edition-best-song-wouldve-couldve-shouldve-2022-10> (дата обращения 10.04.2023)
10. Each Zodiac Sign Has a Taylor Swift Song That Is *So* Them – Here's Yours // Bustle. 2023. URL: <https://www.bustle.com/life/zodiac-sign-taylor-swift-song-astrologer> (дата обращения 10.04.2023)
11. Taylor Swift Kicks off Her Eras Tour in Fully Bejewelled Fashion // Vogue. 2023. URL: <https://www.vogue.co.uk/fashion/gallery/taylor-swift-eras-tour-best-fashion-moments> (дата обращения 10.04.2023)
12. Ирхина А. А. Особенности продвижения продукта в музыкальной сфере // Молодой ученый. 2022. № 1 (396). С. 122–124.
13. Карпова С. В., Захаренко И. К. *Брендинг: учебник и практикум для прикладного бакалавриата*. М.: Юрайт, 2023. 439 с.
14. Taylor Swift's TikTok reign is 'Nothing New' // Mashable. 2021. URL: <https://mashable.com/article/taylor-swift-tiktok-trend-nothing-new> (дата обращения 10.04.2023)
15. Белова Е. В. Ресурсы развития личности в современном медиапространстве // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: материалы V международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 01–02 марта 2017). СПб.: СПбГУТ, 2018. Т. 4. С. 77–82.
16. Taylor Swift Inviting Fans to Share Reactions to 'Midnights' // Variety. 2022. URL: <https://variety.com/2022/digital/news/taylor-swift-youtube-shorts-tsantiherochallenge-midnights-music-video-1235410787> (дата обращения 10.04.2023)
17. Ed Sheeran Previews Each Song on His New Album With 14 YouTube Shorts // Variety. 2021. URL: <https://variety.com/2021/digital/news/ed-sheeran-youtube-shorts-equals-1235096812> (дата обращения 10.04.2023)
18. Taylor Swift Edits Music Video after 'Fatphobia' Accusations // The Guardian. 2022. URL: <https://www.theguardian.com/music/2022/oct/27/taylor-swift-edits-anti-hero-music-video-fat-bathroom-scales> (дата обращения 10.04.2023)
19. Taylor Swift's *Midnights*: Easter Eggs, Hidden References, Meanings, and More // Teen Vogue. 2022. URL: <https://www.teenvogue.com/story/taylor-swift-midnights-easter-eggs-hidden-references-meanings> (дата обращения 10.04.2023)
20. Taylor Swift 'Midnights' Easter Eggs and Song Meanings – Including '3 AM Edition' and Bonus Tracks // Parade. 08.11.2022. URL: <https://parade.com/entertainment/taylor-swift-midnights-easter-eggs> (дата обращения 10.04.2023)
21. Meet a Taylor Swift Fan Who Regrets Paying \$ 5,500 for Resale Tickets // Business Insider. 2022. URL: <https://www.businessinsider.com/how-much-taylor-swift-tickets-regret-spending-eras-ticketmaster-stubhub-2022-11> (дата обращения 10.04.2023)

22. Ticketmaster Apologizes to Taylor Swift and Fans Over 'Terrible Experience' with Eras Tour Tickets // Rolling Stone. 2022. URL: <https://www.rollingstone.com/music/music-news/ticketmaster-apology-taylor-swift-fans-1234633761> (дата обращения 10.04.2023)
23. At Ticketmaster Hearing, Taylor Swift Lyrics Were the Headliner // New York Times. 25.01.2023. URL: <https://www.nytimes.com/2023/01/25/style/taylor-swift-ticketmaster-hearing.html> (дата обращения 10.04.2023)
24. Taylor Swift Is Celebrating the Holidays Early with a Merch Drop – And Yes, All Eras Are Included // Billboard. 11.11.2022. URL: <https://www.billboard.com/music/music-news/taylor-swift-2022-holiday-merch-drop-1235170056> (дата обращения 10.04.2023)
25. Taylor Swift's 'Midnights' Has Already Sold 1 Million Albums in the U.S. (Updating) // Billboard. 27.10.2022. URL: <https://www.billboard.com/music/chart-beat/taylor-swift-midnights-sales-record-breaking-start-1235159835> (дата обращения 10.04.2023)
26. Pre-Orders for Taylor Swift's 'Reputation' Reach More Than 400,000 Units // Billboard. 03.11.2017. URL: <https://www.billboard.com/music/pop/taylor-swift-reputation-presale-400000-units-8023099> (дата обращения 10.04.2023)
27. Taylor Swift Makes History as First Artist With Entire Top 10 on Billboard Hot 100, Led by 'Anti-Hero' at No. 1 // Billboard. 31.10.2022. URL: <https://www.billboard.com/music/chart-beat/taylor-swift-all-hot-100-top-10-anti-hero-1235163664> (дата обращения 10.04.2023)
28. All the Surprise Songs Taylor Swift Has Performed on The Eras Tour (So Far) // Billboard. 28.08.2023. URL: <https://www.billboard.com/lists/taylor-swift-eras-tour-surprise-songs> (дата обращения 10.04.2023)
29. 'We thought it was an alien ... it was Taylor Swift' // The Boston Globe. 2023. URL: <https://www.bostonglobe.com/2023/04/25/nation/taylor-swift-light-show-sparks-ufo-fears> (дата обращения 10.04.2023)
30. Here's Why Fans Think Taylor Swift Is on the 'Grey's Anatomy' Finale // Billboard. 24.05.2022. URL: <https://www.billboard.com/music/music-news/taylor-swift-greys-anatomy-finale-1235074871> (дата обращения 10.04.2023)
31. Spotify Crashes as Taylor Swift's Hotly-Anticipated 'Midnights' Album Launches // New York Post. 21.10.2022. URL: <https://nypost.com/2022/10/21/taylor-swift-midnights-album-release-causes-spotify-outage> (дата обращения 10.04.2023)
32. Taylor Swift Reveals a Colorful New 'Midnights' Album Track // Billboard. 30.09.2022. URL: <https://www.billboard.com/music/pop/taylor-swift-maroon-midnights-1235147974> (дата обращения 10.04.2023)
33. Taylor Swift Is Selling Digital Copies of 'Midnights' With Bonus Material... And You Only Have Hours to Buy Them // Billboard. 05.01.2023. URL: <https://www.billboard.com/music/music-news/taylor-swift-midnights-bonus-material-behind-the-song-12-hour-sale-1235194632> (дата обращения 10.04.2023)
34. Taylor Swift – Capital One 'The Eras' Commercial. Taylor Croatia. URL: https://youtu.be/xRcUmAay_UY?feature=shared (дата обращения 10.04.2023)
35. We Built 'Swift City' // Rolling Stone. 2023. URL: <https://www.rollingstone.com/music/music-news/glendale-arizona-renamed-swift-city-taylor-swift-eras-tour-1234695783> (дата обращения 10.04.2023)
36. 'You need to calm down.' RTC, NDOT get into Taylor Swift fandom ahead of Las Vegas concerts // Fox5. 24.03.2023. URL: <https://www.fox5vegas.com/2023/03/24/you-need-calm-down-rtc-ndot-get-into-taylor-swift-fandom-ahead-las-vegas-concerts> (дата обращения 10.04.2023)
37. Taylor Swift Given Key to City & Street Name in Her Honor Ahead of Arlington Concerts // Billboard. 31.03.2023. URL: <https://www.billboard.com/music/music-news/taylor-swift-key-to-city-street-name-arlington-shows-1235296160> (дата обращения 10.04.2023)
38. Taylor Swift Takeover: Dance Parties, Booze, and Quizzes before the Eraserhead Tour // News Wall. URL: <https://en.newswall.org/story/houston-radio-station-rebrands-as-tay-rbe-before-taylor-swift-concerts> (дата обращения 10.04.2023)
39. New Orleans Pizzeria Offering Free Pizza for a Year in Exchange for Taylor Swift Tour Tickets // The Hill. 18.04.2023. URL: <https://thehill.com/changing-america/enrichment/arts-culture/3956580-new-orleans-pizzeria-offering-free-pizza-for-a-year-in-exchange-for-taylor-swift-tour-tickets> (дата обращения 10.04.2023)
40. Taylor Swift's 'All Too Well (Ten Minute Version)' Is Now on the Syllabus at Stanford University // People. 09.03.2023. URL: <https://people.com/music/taylor-swift-stanford-all-too-well-ten-minute-version> (дата обращения 10.04.2023)
41. Queen's English department running Taylor Swift course // The Queen's Journal. 30.05.2022. URL: <https://www.queensjournal.ca/queens-english-department-running-taylor-swift-course/> (дата обращения 10.04.2023)

42. Ученые назвали новый вид многоножек в честь Тейлор Свифт // РБК. 19.04.2022. URL: <https://style.rbc.ru/repost/625ed7e29a79473dd8a46f34> (дата обращения 10.04.2023)
43. The Best Book & Song Pairings from Taylor Swift's New Album, *Midnights* // Libby Life. 07.11.2022. URL: <https://www.libbylife.com/2022-11-07-the-best-book-song-pairings-from-taylor-swift-s-new-album-midnights> (дата обращения 10.04.2023)
44. Thousands of Houston Swifties Line up for Taylor Swift Merch Truck // Chron. 20.04.23. URL: <https://www.chron.com/news/houston-texas/article/taylor-swift-houston-concert-merch-17908865.php> (дата обращения 10.04.2023)
45. Thousands of Houston Swifties Line up for Taylor Swift Merch Truck // Chron. 20.04.23. URL: <https://www.chron.com/news/houston-texas/article/taylor-swift-houston-concert-merch-17908865.php> (дата обращения 10.04.2023)
46. Taylor Swift and Selena Gomez's Sister Exchange Gifts: a Sweet Moment Captured on the Eras Tour // Daily Musicroll. 03.04.2023. URL: <https://www.dailymusicroll.com/latest-news/taylor-swift-and-selena-gomez-s-sister-exchange-gifts-a-sweet-moment-captured-on-the-eras-tour.html> (дата обращения 10.04.2023)
47. Selena Gomez Shows Her Love For Taylor Swift in a Pair of Eras Tour Sweats // Popsugar. 06.04.2023. URL: https://www.popsugar.co.uk/fashion/selena-gomez-taylor-swift-eras-tour-sweats-49137607?utm_medium=redirect&utm_campaign=US:DE&utm_source=www.popsugar.com.au (дата обращения 10.04.2023)
48. Jordana Bryant Reveals How Taylor Swift's 'Love Story' Inspired Her to Sit Down and Write Her New Single 'Romeo' // People. 15.09.2022. URL: <https://people.com/country/jordana-bryant-reveals-how-taylor-swift-inspired-her-new-song-romeo> (дата обращения 10.04.2023)
49. How Taylor Swift Influenced Camila Mendes and Maya Hawke's Netflix Movie *Do Revenge* // ENews. 21.09.2022. URL: <https://www.eonline.com/news/1347211/how-taylor-swift-influenced-camila-mendes-and-maya-hawkes-netflix-movie-do-revenge> (дата обращения 10.04.2023)
50. Five Reasons Why Taylor Swift Was Able to Make Chart History With Her 'Midnights' Debut Week // Billboard. 31.10.2022. URL: <https://www.billboard.com/music/chart-beat/taylor-swift-midnights-chart-history-hot-100-1235163645> (дата обращения 10.04.2023)
51. Taylor Swift Has Made Tampa Taxpayers \$730,000. Here Are the Receipts // MSN. URL: <https://www.msn.com/en-us/music/news/taylor-swift-has-made-tampa-taxpayers-730000-here-are-the-receipts/ar-AA19B70n> (дата обращения 10.04.2023)
52. Taylor Swift Set to Earn a Record-Breaking Amount from The Eras Tour // Capital. 21.03.2022. URL: <https://www.capitalfm.com/news/taylor-swift-eras-tour-earnings/> (дата обращения 10.04.2023)

Статья поступила 8 октября 2023 г.
Одобрена после рецензирования 12 октября 2023 г.
Принята к публикации 16 октября 2023 г.

Информация об авторах

Пыпина Дарья Дмитриевна – студент факультета социальных цифровых технологий Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: dariapupina@gmail.com

Астафьева-Румянцева Ирина Евгеньевна – кандидат философских наук, доцент, доцент кафедры социально-политических наук Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: rina.astafjewa@ya.ru

Promoting a Music Product through Personal Branding Using Taylor Swift's 'Midnights' Album as an Example

D. Pypina ✉, I. Astafjewa-Rumyantseva

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

Problem statement. A study of the specifics of promoting a musical product with the help of a personal brand using the example of Taylor Swift's album *Midnights*. **Hypothesis:** the effectiveness of the promotion of a musical product increases when using creative methods and minimizing the value of traditional (media tour, appearances on talk shows, interviews in magazines). The main channel for promoting the album through a personal brand is the social media community, and the key tool is the creative adaptation of content in accordance with the format of the platform in order to maximize the impact of marketing messages on the audience. **Objective:** to study and generalize the practice of creative promotion of a music album in social networks through a personal brand, which avoids direct advertising of the product, as well as significantly reduce the distance between the opinion leader and the audience, which will increase its loyalty and the economic effect of interaction. **Result:** the tools of promoting a musical product with the help of a personal brand are analyzed on the example of Taylor Swift's album *Midnights*, thanks to which the singer's album became the most listened to, and the concert tour was commercially successful not only for her and the tour organizers. Among them: increasing the volume and genre diversity of content in social networks; abandoning traditional means of promoting a musical product; partnership with influencers, brands, state administrations; effective audience engagement techniques; storytelling.

Keywords: personal brand, music album promotion, influencer, creative promotion, social media promotion.

Information about Authors

Daria Pypina – undergraduate student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: dariapypina@gmail.com

Irina Astafjewa-Rumyantseva – PhD, associate Professor of the Department of Social and Political Sciences (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: rina.astafjewa@ya.ru

УДК 621.391

Перспективы систем передачи данных с поддержкой технологии прямого исправления ошибок

Баталин Н. С.✉, Подайко С. В., Кукунин Д. С.

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

Постановка задачи: в настоящее время активно развивается рынок телекоммуникационных услуг, требующих обеспечения надежной передачи данных между сетевыми узлами. **Предмет исследования:** в статье рассматривается применение технологии прямого исправления ошибок (FEC, аббр. от англ. Forward Error Correction) в рамках адаптивной системы передачи данных. Использование этой технологии подразумевает применение алгоритмов помехоустойчивого кодирования к передаваемой информации, тем самым минимизируя потребность в повторной передаче данных и уменьшая нагрузку на сеть. **Цель исследования:** обзор современных методов оптимизации технологии FEC в адаптивной системе передачи данных для повышения качества канала связи и снижения нагрузки на приемопередающие устройства. **Метод исследования:** анализ технологий исправления ошибок в системах передачи данных. **Результат:** проведен обзор технологии FEC. Рассмотрены преимущества и недостатки ее применения и проблемы адаптивной реализации.

Ключевые слова: FEC, адаптивная модель передачи данных, помехоустойчивое кодирование.

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках прикладных научных исследований по государственному заданию СПбГУТ на 2023 год, регистрационный номер 123060900012-6 в ЕГИСУ НИОКТР.

Введение

На сегодняшний день актуальность технологии FEC (аббр. от англ. Forward Error Correction, прямое исправление ошибок) обусловлена появлением новых телекоммуникационных услуг, чувствительных к повторной передаче информации. Минимизация числа повторных передач для таких услуг может быть достигнута путем добавления к информационным последовательностям избыточных элементов, что позволяет не только обнаруживать, но и исправлять на приеме возникшие в процессе передачи данных ошибки [1].

Размер избыточной части передаваемой последовательности зависит от выбранного помехоустойчивого кода. Обоснованием выбора того или иного кода являются его корректирующие способности и вероятность ошибки в канале связи [2]. Таким образом, выбор оптимального кода позволит системе передачи данных гарантировать заданный уровень помехоустойчивости при минимальной избыточности. Очевидным недостатком данной технологии является увеличение затрат на вычислительные ресурсы: процессорное время и утилизацию оперативной памяти, что ведет к росту задержки и возможному ограничению низкопроизводительных устройств сферы интернета вещей.

Библиографическая ссылка на статью:

Баталин Н. С., Подайко С. В., Кукунин Д. С. Перспективы систем передачи данных с поддержкой технологии прямого исправления ошибок // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 1. С. 5. EDN: DWAXXI

Reference for citation:

Batalin N., Podaiko S., Kukunin D. Prospects of Data Transmission Systems with Support for Forward Error Correction Technology // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss.1. P. 5. EDN: DWAXXI

Методы применения FEC

Применение технологии FEC подразумевает использование кодирующего устройства, на вход которого поступает информационная последовательность длины k элементов, а на выходе формируется последовательность $U = f(k)$, $U > k$, принадлежащая пространству разрешенных кодовых комбинаций для данного типа кодера. Таким образом, если на вход декодирующего устройства поступит комбинация, не принадлежащая разрешенным, будет принято решение о наличии ошибки. В зависимости от количества ошибок в принятой комбинации и корректирующих способностей декодера принятая последовательность может быть исправлена до разрешенной [3]. Следует отметить, что не всегда полученная в результате исправления ошибок разрешенная комбинация соответствует комбинации на выходе кодера. Данное замечание описано ниже.

Одним из наиболее распространенных методов FEC является кодирование по Хэммингу. Его распространенность обеспечивается простой реализацией и относительно небольшой избыточностью, позволяющей исправлять одиночные ошибки в передаваемых последовательностях [4].

Рассмотрим код Хэмминга (n, k) , при $n = 7, k = 4$, где n — длина кодового слова на выходе кодера; k — длина информационной последовательности; $r = n - k = 3$ — длина проверочной части. Общее число возможных комбинаций определяется выражением $N_n = 2^n = 32$, из которых $N_k = 2^k = 16$ являются разрешенными [5]. Избыточность кода соответствует соотношению $\frac{r}{n} = \frac{3}{7}$, значение избыточности является ключевым критерием выбора кода при соответствующих корректирующих способностях.

Пусть передаваемая информационная последовательность соответствует $k = \{1011\}$, а образующий полином $g(x)$ равен $g(x) = x^3 + x + 1$, тогда:

$$G(x) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$H(x) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$U = m * G(x) = 1011100,$$

где $G(x)$ — порождающая матрица образующего полинома $g(x)$; $H(x)$ — проверочная матрица, U — комбинация на выходе кодера.

Поскольку код является систематическим, декодеру известно, какие четыре бита принятой комбинации являются информационными. Проверка наличия ошибок выполняется следующим образом:

$$S = U' * H^T(x),$$

где S — синдром ошибки; $U' = U + e$ — комбинация на входе декодера; e — полином ошибки.

Синдром S принятой последовательности U' определяет позицию ошибки e и не зависит от последовательности U . Синдромы можно вычислить заранее по формуле:

$$S = e * H^T(x).$$

В таблице 1 представлены значения синдрома для всех возможных одиночных ошибок в последовательности из семи символов.

Нетрудно заметить, что поскольку количество проверочных битов равно трем и всевозможные сочетания нулей и единиц соответствуют конкретному вектору единичной ошибки, коррекция большего числа ошибок невозможна.

Таблица 1. Синдромы для всех возможных одиночных ошибок

Вектор ошибки	Синдром ошибки	Десятичный код синдрома
1000000	110	6
0100000	011	3
0010000	111	7
0001000	101	5
0000100	100	4
0000010	010	2
0000001	001	1
0000000	000	0

Рассмотрим ситуацию, когда на вход декодера поступила последовательность с двумя ошибками. Пусть $e = \{0110000\}$, тогда $U' = 1101100$. В результате работы декодера получен синдром $S = U' * H^T(x) = 100$, который, согласно таблице 1, указывает на ошибку в пятом разряде. При повторной попытке декодирования уже исправленной последовательности $U^* = 1101000$, полученный синдром соответствует $S^* = U^* * H^T(x) = 000$, тогда информационная комбинация равна $k^* = \{1101\}$. В данном случае произошла ошибка второго рода: декодер скорректировал разряд последовательности до ошибочной комбинации, считая ее разрешенной.

Поскольку ошибки второго рода являются уязвимым местом для системы передачи данных, рекомендуется осуществлять дополнительную проверку, например, передавая хеш-сумму выходной последовательности кодера. Так, в случае для кода Хэмминга ($n = 7, k = 4$) описанного выше, для возможности обнаружения двух ошибок можно добавить дополнительный разряд к выходной последовательности кодера, обеспечивающий контроль четности единиц [6].

Кроме того, существуют и другие методы реализации FEC, такие, как кодирование Боуза — Чоудхури — Хоквингема (БЧХ), кодирование Рида — Соломона и турбокодирование. Особый интерес представляет код Рида — Соломона, позволяющий исправлять ошибки большой кратности [7]. Однако он является недвоичным, а все операции выполняются в поле Галуа, поэтому его реализация требует довольно больших затрат аппаратных ресурсов и может вносить дополнительную задержку в систему передачи данных. Выбор оптимального метода FEC является нетривиальной задачей, решение которой может быть реализовано адаптивной системой передачи данных.

Применение модели адаптивной системы передачи данных

На рисунке 1 представлена классическая модель цифровой системы передачи данных. Кодер канала данной модели реализует избыточность, которая до недавнего времени использовалась только для проверки на наличие ошибок принятой в декодер информации. При обнаружении ошибки принимающая сторона запрашивает повторную отправку ошибочного блока информации, но не пытается эту ошибку исправить.

Отсутствие необходимости исправления ошибок во многом является следствием развития вычислительных мощностей и высокоскоростных каналов связи, в которых повторная передача информации является менее затратной процедурой, чем исправление ошибок. Как следствие, целевой задачей кодера канала в таких системах является использование простых помехоустойчивых кодов исключительно для обнаружения ошибок принимающей стороной. Следует отметить, что в некоторых технологиях используются CRC-коды (аббр. от англ. Cyclic Redundancy Check, циклический избыточный код), например, X.25, Bluetooth, Ethernet, корректирующие способности которых позволяют исправлять ошибки, однако на практике их применение ограничивается только обнаружением [5].

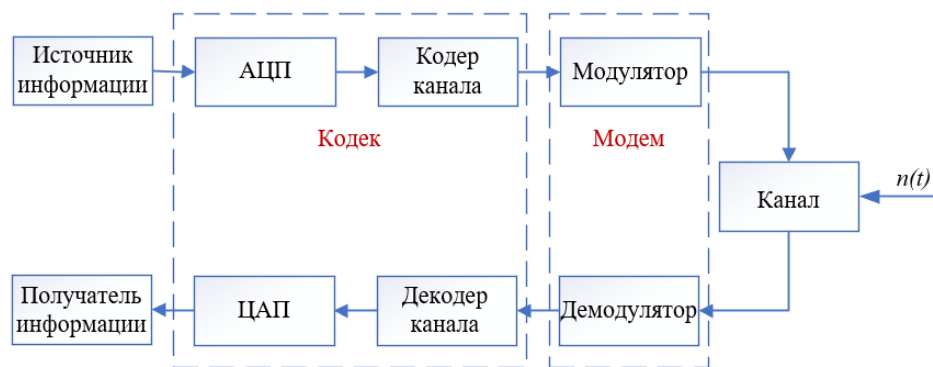


Рис. 1. Модель цифровой системы передачи данных

Появление технологии FEC связано в том числе с развитием телекоммуникационных услуг, базирующихся на беспроводных низкоскоростных сетях связи с мощностью информационного сигнала близкого к уровню шума. Здесь может наблюдаться ситуация, при которой услуги, использующие данные сети, могут быть чувствительны к повторной передаче информации. Тогда кодер канала таких сетей должен использовать более сложные помехоустойчивые коды, позволяющие и обнаруживать, и исправлять ошибки с целью сокращения числа повторных передач информации.

Результатом развития технологии FEC является ее адаптивное применение в зависимости от качества канала — A-FEC (аббр. от англ. Adaptive Forward Error Correction, адаптивная прямая коррекция ошибок). A-FEC подразумевает наличие в модели системы передачи данных дополнительного логического блока, задачей которого является контроль частоты ошибок и принятие решения об увеличении (уменьшении) избыточности или смене метода FEC [8]. На рисунке 2 этот логический блок представлен как блок контроля разрядности (БКР).

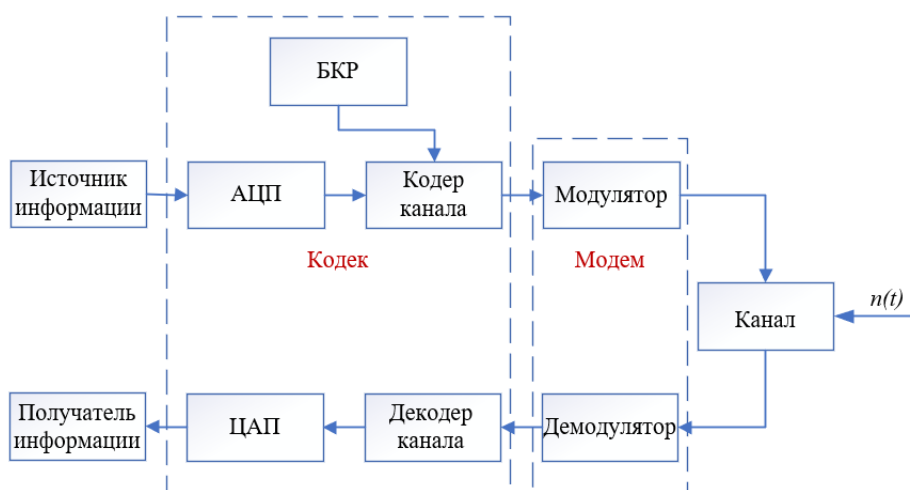


Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы передачи данных

Адаптивная система передачи данных позволяет адаптироваться к изменяющимся условиям сети и оптимизировать передачу данных. Передающая сторона кодирует информационную последовательность некоторым избыточным кодом. Принимающая сторона на основе этой избыточности может исправить возникшие ошибки при прохождении данных по каналу связи [9]. На принимающей стороне могут возникнуть следующие ситуации:

- ошибка исправлена верно;
- ошибка обнаружена, но не исправлена;
- ошибка исправлена до ложной разрешенной комбинации — ошибка второго рода.

Основной проблемой такой системы передачи данных является последний случай. Ошибка второго рода может возникнуть при большем числе ошибок, чем способен обнаружить кодер. Адаптивная система передачи позволяет вести статистику о частоте исправленных и обнаруженных ошибок и

обмениваться ею между узлами сети. На основании данной статистики может быть принято решение об увеличении (уменьшении) избыточности или об изменении метода кодирования [10].

Следует отметить, что контроль корректирующих способностей кодера также связан с нагрузкой на вычислительные ресурсы. Помимо этого имеет значение частота отклика — обратной связи о статистике ошибок. Подобная информация также является служебной, занимает полосу пропускания и увеличивает нагрузку на систему передачи данных. Также важен интервал сбора статистики: постоянный контроль декодера может оказаться слишком затратным.

Модель адаптивной системы передачи данных может быть применена во многих областях, где требуется передача данных в условиях различных помех: в таких, например, как сенсорные и оптических транспортных сети.

Адаптивная реализация FEC может применяться в *сенсорных сетях* для уменьшения числа ошибок между устройствами, расположенными в труднодоступных и удаленных районах [11]. Если устройство получает данные с ошибками, оно должно запросить повторную передачу данных, что может занять много времени. FEC позволяет исправить ошибки без необходимости повторной передачи данных, что уменьшает задержку и повышает скорость передачи.

Применение A-FEC также находит применение в высокоскоростных сетях, таких как *оптические транспортные сети*, где скорость достигает 100 Гбит/с и выше. При использовании FEC можно увеличить расстояние передачи данных без дополнительных инвестиций в инфраструктуру, что позволит снизить общую стоимость эксплуатации сети [12].

Достоинством модели адаптивной передачи данных является ее способность автоматически подстраиваться к изменениям в канале связи, что обеспечивает стабильность передачи данных даже при неблагоприятных условиях [13]. Однако следует учитывать некоторые недостатки данной модели, такие как сложность ее настройки и необходимость выбора оптимальных методов обработки ошибок.

Проблемы реализации адаптивной системы передачи данных

Основной сложностью реализации адаптивной системы передачи данных является логика принятия решения о смене метода FEC. Проблема, главным образом, связана с контролем ошибок второго рода, поскольку для их детектирования на принимающей стороне должна быть известна исходная информационная последовательность, в противном случае ложное исправление уже невозможно будет определить.

Наиболее простым способом контроля состояния канала является остановка передачи информационных данных на некоторое время и последующая передача специальных тестовых последовательностей, заранее известных обеим сторонам. Данная процедура позволит выявить частоту ошибок, в том числе второго рода, и принять соответствующее решение [14]. Очевидно, что описанная процедура контроля теряет актуальность в канале с динамически меняющимся уровнем шума, поскольку имеет низкую скорость реагирования. Еще одним недостатком является отказ системы передачи данных в обслуживании для проведения тестирования канала.

В качестве альтернативного способа контроля состояния канала может быть предложено решение на основе оценки частоты появления запрещенных кодовых комбинаций, принятых декодером. В этом случае процедура контроля не требует остановки передачи информационных данных и (или) передачи служебных последовательностей [15]. Однако сама процедура контроля может быть затратной для системы передачи данных. Так, непрерывный контроль может повысить реакцию системы на изменение состояния канала, однако снизит энергоэффективность устройств и повысит задержку передачи информации за счет реализации дополнительной логики для сбора и обработки статистики.

Таким образом, при выборе оптимального механизма адаптации следует учитывать продолжительность проведения тестирования, величину порогового коэффициента потерянных данных, а также особенности процедуры обмена служебными сообщениями о смене метода FEC. Следует отметить, что время измерения и величина порогового значения также могут быть заданы динамически в зависимости от состояния канала. Процедура обмена служебными сообщениями о смене метода FEC должна быть понятной для устройств — отличимой от информационных последовательностей, а также содержать минимальное число служебных сообщений для поддержания высокой пропускной способности.

Еще одной проблемой здесь является обеспечение целостности данных, которое, как правило, осуществляется протоколом вышестоящего уровня модели OSI (аббр. от англ. Open Systems Interconnection Model, модель взаимодействия открытых систем), при помощи запроса на повторную передачу. Под обеспечением целостности здесь понимается дополнительная проверка информационной последовательности на выходе декодера с целью исключения ошибок второго рода. В зависимости от критичности передаваемых данных ошибка второго рода может стать серьезной проблемой [16].

Одним из решений задачи исключения ложного приема является дополнительная передача контрольной суммы (а в некоторых случаях хеш-суммы) информационной последовательности. Очевидно, что это приведет к увеличению накладных расходов на вычислительные ресурсы приемопередающих устройств, последующему росту задержки передачи информации, и, как следствие, к снижению пропускной способности канала. Однако подобное решение можно сочетать с применением цифровой подписи, что позволит не только проверять целостность, но и аутентифицировать устройства друг перед другом, тем самым избежав атаки «человек посередине», при которой злоумышленник совершает попытку подмены разрешенных кодовых комбинаций.

Заключение

В настоящей статье проведен обзор технологии FEC, в частности ее адаптивной реализации. Ее востребованность растет с появлением новых услуг, базирующихся преимущественно на беспроводных сетях и чувствительных к повторной передаче данных в условиях помех.

Адаптивная реализация технологии FEC призвана оптимизировать систему передачи данных: минимизировать количество повторно переданных блоков данных, снизить нагрузку на вычислительные ресурсы и повысить энергоэффективность приемопередающих устройств, которые во многих случаях предназначены для автономной работы.

В статье рассмотрены проблемы реализации адаптивной системы передачи данных, решение которых может являться предметом дальнейшего исследования с целью повышения надежности канала и минимизации вычислительной нагрузки. Данное направление является перспективным для внедрения новых услуг, в частности при использовании низкопроизводительных устройств, применяемых в сфере интернета вещей.

Литература

1. Макаренко С. И. Помехозащищенность наземных абонентских терминалов системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 81–101. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-81-101
2. Кульбида В. А. Система передачи дискретной информации с адаптивным помехоустойчивым кодированием // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103). С. 284–288.
3. Сащенко Н. Н. Интеллектуальная адаптивная система передачи информации в распределенных автоматизированных системах управления. Дис. ... канд. техн. наук. Серпухов: Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики», 2006. 166 с.
4. Ефанов Д. В. Особые свойства кодов Хэмминга, проявляющиеся при синтезе самопроверяемых цифровых устройств // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 2. С. 85–99. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-85-99
5. Кочетова И. В., Левенец А. В. Имитационное моделирование системы передачи данных с адаптивным выбором помехоустойчивого кода по оценке состояния канала связи // Информатика и системы управления. 2020. № 4 (66). С. 17–24. DOI: 10.22250/isu.2020.66.17-24
6. Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Исследование свойств кодов Хэмминга и их модификаций в системах функционального контроля // Автоматика на транспорте. 2015. Т. 1. № 3. С. 311–337.
7. Юдин А. П. Проблемы обеспечения информационной безопасности телекоммуникационных технологий предприятия // Вестник науки. 2023. Т. 2. № 5 (62). С. 437–443.
8. Иванов М. С., Шушков А. В., Макаренко С. И. Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного использования энергетического, сигналь-

ного и частотного сетевых ресурсов. Часть 1. Модели и методика повышения скорости передачи данных // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 125–219. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-125-219

9. Исаева О. С., Исаев С. В., Кулясов Н. В. Формирование адаптивных рассылок брокера данных интернета вещей // Информационно-управляющие системы. 2022. № 5 (120). С. 23–31. DOI: 10.31799/1684-8853-2022-5-23-31

10. Болодурина И. П., Парфенов Д. И. Оптимизация управления распределением трафика в программно-управляемой инфраструктуре виртуального ЦОД на основе имитационной модели // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 1 (79). С. 99–105. DOI: 10.20914/2310-1202-2017-1-99-105

11. Богомолова Н. Е. Метод адаптивного управления сетью передачи данных // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2012. Т. 12. № 6. С. 48–50.

12. Арбузов В. В., Бережная О. В., Лопатченко Б. К. Особенности построения адаптивных систем передачи информации // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 7–1. С. 41–45.

13. Куприянова О. В., Левенец А. В., Чье Е. У. Моделирование систем передачи данных с адаптацией к состоянию канала связи // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 1 (62). С. 120–132. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-120-132

14. Служивый М. Н. Адаптивные системы радиосвязи // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2012. № 3 (11). С. 38–49.

15. Носов В. И., Ладан А. С., Зиновьев М. В. Определение оптимальной длины кадра в сети наземного цифрового телевизионного вещания // Вестник СибГУТИ. 2022. № 2 (58). С. 40–54. DOI: 10.55648/1998-6920-2022-16-2-40-54

16. Kukunin D., Berezkin A., Zadorozhnyaya A., Karelin E., Shestakov A. Model of Adaptive Data Transmission System // Proceedings of the 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT, Brno, 25–27 October 2021). IEEE, 2021. PP. 200–205. DOI: 10.1109/ICUMT54235.2021.9631637

**Статья поступила 11 октября 2023 г.
Одобрена после рецензирования 3 ноября 2023 г.
Принята к публикации 10 ноября 2023 г.**

Информация об авторах

Баталин Никита Сергеевич — студент института магистратуры (направление подготовки: 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи») Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: batalin.ns@sut.ru

Подайко Светлана Викторовна — студентка факультета ИКСС Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: podaiko.sv@sut.ru

Кукунин Дмитрий Сергеевич — кандидат технических наук, ведущий инженер дирекции по инновационным разработкам компании АО НПП ИСТА-Системс (разработка комплексных систем безопасности), доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: kukunin.ds@sut.ru

Prospects of Data Transmission Systems with Support for Forward Error Correction Technology

N. Batalin ✉, S. Podaiko, D. Kukunin

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

Problem statement: currently, the market of telecommunication services that require reliable data transmission between network nodes is actively developing. **Research subject:** the article discusses the use of forward error correction (FEC) technology in the framework of an adaptive data transmission system. The use of this technology implies the application of noise-resistant coding algorithms to the transmitted information, thereby minimizing the need for retransmission of data and reducing the load on the network. **The purpose of the work:** review of modern methods of optimization of FEC technology in an adaptive data transmission system in order to improve the quality of the communication channel and reduce the load on the transceiver devices. **Method:** analysis of error correction technologies in data transmission systems. **Result:** a review of the FEC technology was carried out. The advantages and disadvantages of its application and the problems of adaptive implementation are considered.

Keywords: FEC, adaptive data transmission model, error correction coding.

Information about Authors

Nikita Batalin – graduate student of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. E-mail: batalin.ns@sut.ru

Svetlana Podaiko – student of the faculty ICSS (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: podaiko.sv@sut.ru

Dmitry Kukunin – Ph. D. of Engineering Sciences. Leading engineer of the Directorate for Innovative Developments of JSC NPP ISTA-Systems (development of integrated security systems), Associate Professor of the Department of Communication Networks and Data Transmission of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. E-mail: kukunin.ds@sut.ru

УДК 53.092:53.096

Водородопроницаемые мембраны из сплавов V-Pd

Передистов Е. Ю.

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

Постановка задачи: одной из важнейших задач микроэлектроники является получение сверхчистого водорода; наиболее распространенный способ — доочистка водорода технической или высокой чистоты при помощи металлических мембран из палладия и его сплавов. **Предмет исследования:** альтернативой палладиевым мембранам являются мембраны на основе металлов пятой группы, в частности из бинарных сплавов V-Pd. **Метод исследования:** исследована растворимость водорода в сплавах замещения Pd-(V-xPd)-Pd ($x = 5; 7,5; 9,8$ ат. %); получены изотермы зависимости давления от равновесной концентрации растворенного водорода в металле в диапазоне температур (350–400 °С), давлений (5×10^{-3} –0,8 МПа) и концентраций растворенного водорода H/Me (4×10^{-4} до 0,6); получены плотности проникающего потока водорода сквозь мембраны при изменении входного давления 0,1 до 0,8 МПа, при давлении равном 0,1 МПа на выходной стороне мембраны и температуре 400 °С. **Результат:** полученные в ходе экспериментов значения проницаемости водорода через мембраны V-Pd наглядно показывают перспективность использования выбранных сплавов (V-7,5Pd, V-9,8Pd) для получения сверхчистого водорода.

Ключевые слова: получение водорода, сверхчистый водород, ванадиевые мембраны, сплавы металлов пятой группы

Введение

Получение сверхчистого водорода является актуальной задачей в различных сферах полупроводниковой промышленности. Один из самых эффективных способов — выделение сверхчистого водорода при помощи металлических мембран. Как правило, для этой цели применяются мембраны из сплавов палладия, способных выделять водород из газовых смесей со 100-процентной селективностью, однако их стоимость чрезвычайно высока.

Перспективной заменой являются мембраны на основе ванадия. Перенос водорода через решетку металлов пятой группы осуществляется гораздо быстрее, чем через решетки любых других металлов [1, 2]; быстрее всего это происходит в решетке ванадия. Ценой этого свойства является высокая растворимость водорода в металле [2], приводящая к охрупчиванию материала. Согласно работам [3–4] концентрация абсорбированного в ванадии водорода, соответствующая переходу в хрупкое состояние, равна приблизительно $H/Me \approx 0,22$ и не зависит от температуры в интересующем нас интервале 350–400 °С. Будем считать, что это также верно и для всех сплавов легирования ванадия.

Вторая проблема для практической применимости мембран из металлов пятой группы — их высокая химическая активность. Одним из решений является покрытие обеих сторон образца мембраны тонким (0,8–1,8 мкм) слоем палладия, который не только защищает основной материал мембран от окисления, но и обеспечивает высокую скорость диссоциативно-ассоциативных процессов на поверхности [5].

Библиографическая ссылка на статью:

Передистов Е. Ю. Водородопроницаемые мембраны из сплавов V-Pd // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 1. С. 6. EDN: IVCHLZ

Reference for citation:

Peredistov E. Hydrogen Permeable V-Pd Alloys Membranes // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss. 1. P. 6. EDN: IVCHLZ

В качестве легирующего элемента выбран палладий, который сильнее, чем какие-либо другие элементы, снижает растворимость водорода в бинарных сплавах ванадия [1–7]. Исследование растворимости и транспорта водорода в сплавах *V-Pd* представляет интерес как для фундаментальной науки, так и для практического применения — для решения задач производства микроэлектроники.

Методика и результаты определения растворимости водорода в сплавах *V-Pd*

В качестве образцов для исследования растворимости водорода использовались трубчатые мембраны с толщиной стенки 120–220 мкм, длиной от 7 до 10 см, диаметром 6 мм, с обеих сторон покрытые слоем палладия толщиной около 2 мкм [6, 7]. Образцы были изготовлены и проверены на соответствие заявленным характеристикам ООО «МЕВОДЭНА». Равновесная растворимость водорода в сплавах определялась стандартным методом Сиверта путем при заданных давлениях (5×10^{-3} –0,8 МПа) и температуры (350–400 °С) [8]. Из-за возможности механического разрушения образца вследствие охрупчивания исследования проводились сериями, с пошаговым увеличением давления в заданном диапазоне (5×10^{-3} –0,8 МПа) при одной температуре. Далее производилось дегазирование образца при помощи откачки турбомолекулярным насосом. После этого, без отключения откачки, производился напуск небольшого количества кислорода в камеру с образцом для окончательной обезводороживания. Затем образец вынимался из камеры для визуального осмотра. После окончания всех перечисленных процедур исследование проводилось при более низкой температуре.

Из экспериментальных данных было получено равновесное содержание водорода в образце, из значения которого вычиталось содержание водорода в палладиевом покрытии с обеих сторон образца. Для того чтобы определить равновесную концентрацию водорода, абсорбированного в палладиевом покрытии, использовались справочные данные по растворимости водорода в палладии [2]. Таким образом определялась концентрация растворенного водорода в сплавах *V-xPd* ($x = 5; 7,5; 9,8$ ат. %).

Зависимости давления от равновесной концентрации растворенного водорода в металле (РС-зависимости) для температур 350–400 °С были получены для образцов сплавов *V-xPd* с содержанием палладия ($x = 5; 7,5; 9,8$ ат. %), а также для чистого ванадия и чистого палладия, полученных на основании расчетов из литературы [2, 7, 8]. Полученные изотермы зависимости давления от равновесной концентрации растворенного водорода в металле (РСТ-зависимости) представлены на рисунке 1. Концентрация растворенного водорода в металле C выражена в виде атомного отношения $C \equiv H/Me$, где $Me = V + Pd$.

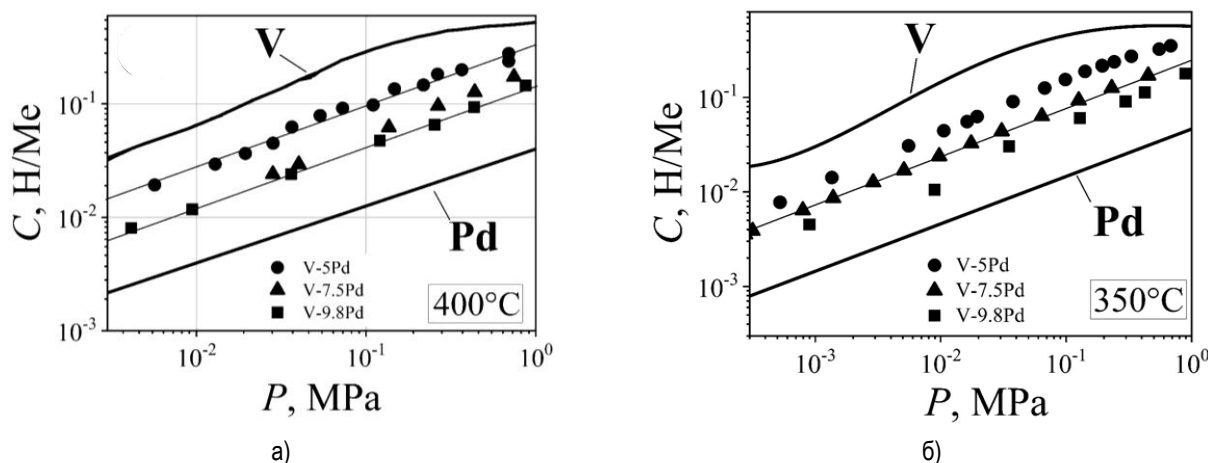


Рис. 1. Изотермы РС-зависимостей, полученные для образцов сплавов *V-xPd* с содержанием палладия, ($x = 5; 7,5; 9,8$ ат. %), а также для чистого ванадия и чистого палладия при температуре 400 °С (а) и 350 °С (б)

После проведения всех испытаний образцы не подверглись разрушению, а величина течи не изменилась относительно значений, полученных до проведения экспериментов по растворимости, и составила $< 10^{-6}$ см³ (н.у.)/сек по изменению давления гелия (*He*) на входной стороне мембраны. В ходе исследования показано, что палладий является выгодным элементом для легирования ванадия, для сильного снижения растворимости в сплаве [7]. Чем выше концентрация легирующего элемента в

сплаве, тем сильнее снижается концентрация растворенного водорода (см. рисунок 1). Также стоит отметить, что в заданном интервале температур и давлений концентрация растворенного в мембране водорода для сплавов $V-7,5Pd$ и $V-9,8Pd$ не превышает критического значения [3, 4], и лишь для сплава $V-5Pd$ выходит за пределы данного диапазона. При этом для всех сплавов РС-зависимость меняется по закону Сиверса во всем измеряемом диапазоне.

Методика и результаты определения транспорта водорода через мембраны из сплавов $V-Pd$

После определения растворимости водорода в сплавах $V-Pd$ были получены данные по влиянию степени легирования ванадия на плотность проникающего потока водорода через полученные мембраны. Для этого были проведены эксперименты по нахождению плотности водорода, проникающего сквозь мембраны из сплавов $V-Pd$, от давления на входной стороне мембраны, при атмосферном давлении на выходной стороне мембраны. В ходе эксперимента давление на входной стороне мембраны менялось от $P_{in} = 0,1$ МПа до $P_{in} = 0,8$ МПа, при постоянном давлении на выходной стороне мембраны равно $P_{out} = 0,1$ МПа (рисунок 2).

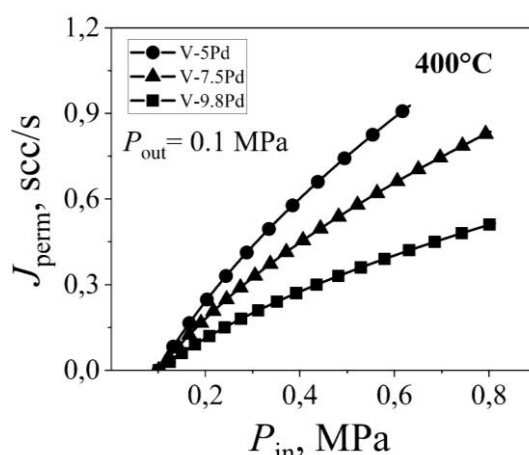


Рис. 2. Зависимость приведенной плотности проникающего через мембрану потока, J_{perm} , от давления водорода на входной стороне мембраны, P_{in} . Выходное давление H_2 постоянно и равно 0,1 МПа

Полученные значения зависимостей аппроксимировались при помощи уравнения [7]:

$$P_{in} = \frac{j}{Z_{H_2}} \times \left[\frac{1}{\alpha_{in}} + \left(\sqrt{\frac{1}{\alpha_{out}} + \frac{Z_{H_2}}{j} \cdot P_{out}} + \sqrt{4 \cdot Z_{H_2} \cdot j \cdot \sum_i \frac{L_i}{K_i \cdot D_i}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где Z_{H_2} — газокINETический коэффициент; α_{in} — вероятность (коэффициент) диссоциативного прилипания молекулы H_2 к входной поверхности мембраны с последующим растворением в кристаллической решетке металла; α_{out} — то же для выходной поверхности; L_i — толщина i -го слоя; K_i и D_i — константы растворимости водорода и коэффициенты диффузии для каждого i -го слоя соответственно.

При этом значения вероятности диссоциативного прилипания молекулы H_2 к входной и выходной поверхности мембраны с последующим растворением в кристаллической решетке металла принимались равными и находились при помощи уравнения:

$$\alpha(T) = 0,6 \cdot e^{\left(-\frac{50200 \text{ Дж/моль}}{R \cdot T} \right)}. \quad (2)$$

Значения константы растворимости водорода в сплавах $V-Pd$, K_{V-Pd} находились из полученных РСТ-зависимостей. Значения коэффициентов диффузии для сплавов $V-Pd$ брались равными $x D_V$, где x — коэффициент, подбираемый наилучшим приближением к экспериментальным данным, $D_V = 3,5 \times 10^{-4} \exp(-20100 \text{ (Дж/моль)} / RT) \text{ см}^2/\text{с}$.

В ходе проведения эксперимента и повышении давления водорода мембрана $V-5Pd$ сломалась при давлении $\approx 0,6$ МПа. Согласно рисунку 1а при этом давлении концентрация растворенного водорода (H/Me) превышает значения 0,22, что и могло привести к охрупчиванию материала и разрушению мембраны [3–4]. Однако, согласно экспериментальным данным, полученным с другими образцами [7], это правило не всегда выполняется, и в некоторых случаях мембраны остаются герметичными даже при превышении предельно допустимых значений концентраций H/Me , что требует дальнейшего изучения.

С мембранами из сплавов $V-7,5Pd$ и $V-9,8Pd$ были получены зависимости приведенной плотности проникающего через мембрану потока от давления водорода на входной стороне мембраны во всем выбранном диапазоне. В пределах давлений (P_{in}) от 0,1 до 0,8 МПа концентрации H/Me не превышают значения 0,2; это позволяет не беспокоиться об охрупчивании материала мембраны.

Выводы

Полученные значения проницаемости водорода через мембраны $V-Pd$ наглядно показывают перспективность использования выбранных сплавов для получения сверхчистого водорода. Протестированные потоки, от 0,6 до 0,9 см³ (н.у.)/сек при входном давлении 0,1 МПа, способны покрыть требуемые объемы получаемого водорода для производства микроэлектроники. Получение сверхчистого водорода может лимитироваться не только значениями входного и выходного давлений водорода, но и степенью легирования материала. При этом стоимость водорода, получаемого при помощи мембран на основе сплавов замещения $V-Pd$, при прочих равных условиях, экономически выгоднее, чем при использовании коммерчески доступных мембран из палладия и его сплавов.

Литература

1. Moss T. S., Peachey N. M., Snow R. C., Dye R. C. Multilayer Metal Membranes for Hydrogen Separation // The International Journal of Hydrogen Energy. 1998. № 23 (2). PP. 99–106. DOI: 10.1016/S0360-3199(97)00030-X
2. Fromm E., Gebhardt E. Gase und Kohlenstoff in Metallen. Berlin: Springer, 1976.
3. Gahr S., Birnbaum H. K. Hydrogen Embrittlement of Niobium-III. High Temperature Behavior // Acta Metall. 1978. № 26. PP. 1781–1788. DOI: 10.1016/0001-6160(78)90089-5
4. Yukawa H., Nambu T., Matsumoto Y. V–W Alloy Membranes for Hydrogen Purification // Journal of Alloys and Compounds. 2011. № 509. PP. 881–884. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.09.161
5. Dolan M. D. Non-Pd BCC Alloy Membranes for Industrial Hydrogen Separation // Journal of Membrane Science. 2010. № 362. PP. 12–28. DOI: 10.1016/j.memsci.2010.06.068
6. Alimov V. N., Bobylev I. V., Busnyuk A. O., Kolgatin S. N., Kuzenov S. R. et al. Extraction of Ultrapure Hydrogen with V-alloy Membranes: From Laboratory Studies to Practical Applications // The International Journal of Hydrogen Energy. 2018. № 43. PP. 13318–13327. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.05.121
7. Передистов Е. Ю. Перенос водорода в сплавах $V-Pd$ и мембранное выделение сверхчистого водорода для технологий микроэлектроники: дисс. ... канд. тех. наук. СПб.: СПбГПУ, 2017.
8. Schober T. Vanadium-, Niobium- and Tantalum-Hydrogen // Solid State Phenomena. 1996. № 49–50. PP. 357–422. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.49-50.357

Статья поступила 25 сентября 2023 г.

Одобрена после рецензирования 16 ноября 2023 г.

Принята к публикации 20 ноября 2023 г.

Информация об авторе

Передистов Евгений Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: peredistov.eu@sut.ru

Hydrogen Permeable V-Pd Alloys Membranes

E. Peredistov

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

Problem statement: one of the most important tasks of microelectronics is the production of ultrapure hydrogen; a common method for its production is the post-purification of technical or high-purity hydrogen using metal membranes made of palladium and its alloys. **Research subject:** as an alternative to palladium membranes are membranes based on group 5 metals, in particular from binary V-Pd alloys. **Method:** the solubility of hydrogen in substitution alloys Pd-(V-xPd)-Pd ($x = 5; 7.5; 9.8$ at.%) was studied. Isotherms of the dependence of pressure on the equilibrium concentration of dissolved hydrogen in the metal were obtained: in the range of temperatures (350–400 °C), pressures (5×10^{-3} –0.8 MPa) and concentrations of dissolved hydrogen H/Me (4×10^{-4} to 0.6); the permeation flux density of hydrogen through the membranes were obtained with variation of the inlet pressure changed from 0.1 to 0.8 MPa, the outlet pressure 0.1 MPa and the temperature 400 °C. **Result:** the values of hydrogen permeability through V-Pd membranes obtained during the experiments clearly show the prospects of using the selected alloys (V-7.5Pd, V-9.8Pd) to produce ultrapure hydrogen.

Keywords: hydrogen production, ultrapure hydrogen, vanadium membranes, Group 5 metal alloys

Information about Author

Evgenii Peredistov — Ph. D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of Physics (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: peredistov.eu@sut.ru

ДАТА ВЫХОДА В СВЕТ 01.12.2023

Ответственный редактор Татарникова И.М.

Выпускающий редактор Берзина Е.В.

Выпускающий редактор Яшугин Д.Н.

Дизайн: Коровин В.М.

Изображение на обложке с сайта <http://www.freepik.com>