Ural Radio Engineering Journal. 2024;8(3):371–388 ISSN 2588-0454

Оригинальная статья / Original Article

DOI 10.15826/urej.2024.8.3.005
УДК 621.391.1

Модель системы передачи видеоданных с техническими наземными объектами малой степени подвижности

А. А. Прасолов✉, **А. С. Федоров**
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22
✉ prasolov.alex@gmail.com

Аннотация. В настоящее время технические объекты различной степени подвижности могут применяться в широком спектре задач, имея как гражданское, так и военное назначение. Эксплуатация таких объектов невозможна без использования надежных каналов передачи видеоинформации и управления. Однако требования к таким каналам связи существенно усугубляются различием условий эксплуатации данных систем. Имеющиеся на данный момент решения, позволяющие передавать видеопоток с камеры беспилотных летательный аппаратов (БпЛА), как правило, не могут обеспечить такое же качество связи для управления наземными технические объекты малой степени подвижности различного назначения. Целью данного исследования является анализ технологий передачи видеоинформации и оценка эффективности их применения в каналах связи с техническими объектами различной степени подвижности.

В рамках данной статьи была разработана имитационная модель приемника и передатчика, осуществляющих обработку сигнала в основной полосе частот, исследовано влияние параметров кодеков с малой плотностью проверок на четность (LDPC) и Боуза — Чоудхури — Хоквингема (БЧХ) на качество приема видеоинформации. Проведенное исследование позволило определить параметры кодеков, обеспечивающих наилучшее качество приема сигнала видеоинформации при разных отношениях сигнал/шум. Автором выполнена оценка влияния многолучевого распространения радиоволн, что позволило предложить модель приемника, обеспечивающего передачу видеоинформации для наземных технических объектов с малой степенью подвижности.

Ключевые слова: имитационная модель, передача видеоданных, объекты малой степени подвижности, согласованный фильтр, детектор преамбулы.

© Прасолов А. А., Федоров А. С., 2024

Для цитирования: Прасолов А. А., Федоров А. С. Модель системы передачи видеоданных с техническими наземными объектами малой степени подвижности. *Ural Radio Engineering Journal*. 2024;8(3):371–388. DOI: 10.15826/urej.2024.8.3.005.

Model of the Video Data Transmission System with Technical Ground Objects of Low Mobility

A. A. Prasolov✉, A. S. Fedorov

Federal State Budget-Financed Educational Institution of Higher Education Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22, Bolshevikov prospect, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

✉ prasolov.alex@gmail.com

Abstract. Nowadays, technical objects of various degrees of mobility can be used in a wide range of tasks both civil and military purposes. The operation of such objects is impossible without the use of reliable video information and control transmission channels. However, the requirements to such communication channels are significantly aggravated by different operating conditions of these systems. Currently available solutions that allow the transmission of video stream from the camera of unmanned aerial vehicles (UAVs), as a rule, cannot provide the same quality of communication for control of ground technical objects of small mobility of various purposes for their control. The purpose of this study is to analyze the technologies of video information transmission and evaluate the effectiveness of their application in communication channels with technical objects of different degrees of mobility.

The simulation model of the receiver and transmitter, carrying out signal processing in the main frequency band is developed, the influence of the parameters of codecs with low density Parity check (LDPS) and Bowes — Chowdhury — Hockingham (BCH) on the quality of video information reception is investigated. The conducted research allows to determine the parameters of codecs that provide the best quality of video information signal reception in different signal-to-noise ratios. The author evaluates the impact of multipath propagation of radio waves, what allows the creation of the model of the receiver that provides video information transmission to ground technical objects with a small degree of mobility.

Keywords: simulation model, video data transmission, low mobility objects, matched filter, preamble detector

For citation: Prasolov A. A., Fedorov A. S. A Molel of a video data transmission system with technical ground objects of low mobility. *Ural Radio Engineering Journal.* 2024;8(3):371–388 (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2024.8.3.005

Введение

Технические объекты различной степени подвижности (ТОРСП) широко используются как в гражданских, так и в военных сферах. К таким применениям относятся подземная добыча полезных ископаемых, эксплуатация атомных станций, исследование планет, разведка, наблюдение и рекогносцировка, а также аварийно-спасательные операции. Разработка и применение современных ТОРСП различного назначения требует использования надежных каналов для передачи видеоинформации и управления. Требования к каналам связи значительно повышаются в условиях эксплуатации этих систем. Как отмечается в источниках [1–2], существующие технологии передачи видеопотока с беспилотных летательных аппаратов (БпЛА), указанные в [3], часто не способны обеспечить аналогичное качество связи при управлении наземными ТОРСП различного назначения, как показывают исследования [4–5].

Следует отметить, что в большинстве своем видеопередатчики, которые представлены сегодня на рынке, функционируют в диапазоне частот 5,8 ГГц, что соответствует диапазону сети Wi-Fi. Несмотря на современные разработки, не все агрегаты подходят для указанных условий работы. При этом наиболее доступные по цене решения используют для видеопередачи Wi-Fi-соединение, что сопровождается существенными задержками и лишает возможности совершать полеты от первого лица. Традиционно в диапазоне 5,8 ГГц находит применение аналоговая передача данных в стандартном телевизионном сигнале — форматы AL, NTSC, AHD (Analog High Definition) с модуляциями QAM или QPSK.

При выборе стандарта для видеопередач большее внимание уделяется качеству изображения, передаваемого камерой, чем характеристикам передатчика. Основное преимущество использования аналоговых стандартов заключается в минимальной задержке сигнала и стабильности аналогового изображения даже при наличии помех. Это обеспечивает хорошее сохранение картинки и позволяет уменьшить риск потери управления, несмотря на возможные незначительные искажения звука в сложных условиях вещания.

Для достижения удобства и надежности в сложных условиях, таких как лесные насаждения и зоны с высокими конструкциями, оптимальным

выбором является использование систем DJI. Эти системы показывают высокую эффективность даже при ограниченных условиях трансляции. Благодаря их способности к точной калибровке и управлению передачей видеоданных при выполнении сложных маневров в ограниченных пространствах [6].

В разработке технологий и передовых технических решений ключевую роль играет использование мультичастотных импульсных методов, таких как ортогональное частотно-разделительное мультиплексирование (OFDM) и его варианты, включая кодируемое OFDM (COFDM) [7]. По аналогии с OFDM-сигналами, применение N-OFDM [8] используется с квадратурной амплитудной (QAM) или фазовой (PSK) модуляциями поднесущих.

Литературный обзор

Анализ научно-технической литературы по теме исследования наглядно демонстрирует, что существуют готовые имитационные модели стандартов DVB в среде MATLAB, которые обладают определенной спецификой и некоторыми ограничениями. Помехоустойчивость когерентного поэлементного приема неортогональных многочастотных сигналов с ФМ-4 была проанализирована в работе [9]. В рамках работы [10] автором был предложен вариант реализации на FPGA блока передачи видеоинформации с борта БпЛА с использованием канального кодирования и модуляции в соответствии со стандартом DVB-T. В работе [11] предложена имитационная модель стандарта DVB-T для MATLAB Simulink. В исследовании [12] автором рассмотрена эффективность кодов LDPC и БЧХ в готовой модели DVB-S2 Link Simulink, реализованной в MATLAB Simulink.

Исследование [13] привлекает внимание использованием имитационной модели системы цифрового видеовещания (DVB-S), разработанной в среде MATLAB Simulink. Другое значимое исследование [14] оценивает эффективность DVB-T2, демонстрируя, что применение техник деления потоков и межкадрового обмена данных способствует улучшению качества приема сигнала DVB-T2. Скорость передачи данных в этих системах зависит от характеристик используемого первичного кодера, подробности которого представлены в табл. 1.

Одним из ключевых показателей, используемых для оценки скорости качества передачи, является коэффициент битовых ошибок BER (Bit Error Rate). Этот показатель определяет точность передачи данных по каналу связи. BER определяется как отношение количества ошибочных битов к общему их количеству, переданных за определенный промежуток времени.

Таблица 1. Скорости передачи на выходе первичного кодека видеоданных
Table 1. Transmission rates at the output of the primary video data codec

Стандарт	SD	HD	4K
MPEG-2	6–8 Мбит/с	18–20 Мбит/с	—
H.264 (MPEG-4 часть 10)	2,8–3 Мбит/с	8–12 Мбит/с	30 Мбит/с
H.265	1 Мбит/с	4 Мбит/с	15 Мбит/с

Этот параметр служит важным показателем производительности системы, влияя не только на надежность передачи данных, но и на эффективность и пропускную способность системы связи. Параметры качества приема приведены в рекомендациях МСЭ-Т G.811 и G.826. В контексте спектрального анализа критические ситуации определяются, когда BER превышает значение 10^{-3} в течение 10 и более секунд, что считается активным циклом для данной полосы частот.

В частности, в европейском стандарте эфирного цифрового телевидения DVB-T2 (из группы стандартов DVB) параметры кодера БЧХ задаются на основании скорости внутреннего кодека [15]. При этом применение БЧХ в качестве внешнего кода с предложенными параметрами допускает выполнение изменения до 12 ошибок. В [16] отмечено, что для кодов БЧХ максимальная эффективность кодирования достигается при степенях кодирования между 1/3 и 3/4. Внутренний код LDPC (Low Density Parity Check Codes) принимает лимитный диапазон, вследствие чего большинство недостатков искажаются при тональности последовательной разблокировки.

В обзоре техник передачи сигналов используется защитная схема с тактовым смещением, разработанная на основе последовательного соединения кодеров BCH, LDPC и интерливера. Эта конструкция позволяет достигнуть технических характеристик передачи данных, которые приближаются к теоретическому пределу Шеннона, что подтверждено исследованиями [17–18]. В исследовании [19] показано преимущество в работоспособности набора LDPC. Положение наблюдалось в случаях 16-QAM при $R = 3/4$, 64-QAM при $R = \{3/4, 5/6\}$ и 256-QAM при $R = 3/4$.

Как показано в [20], если плотность ошибки на входе декодера DVB-приемника выше, чем 10^{-4}, то картинка разваливается. Причина в таких требованиях связана с ограничениями первичного кодека (табл. 1), что достаточно сильно ограничивает возможности качества передачи в сложных условиях распространения радиоволн при работе в ТОРСП. Соответственно, при построении имитационной модели в качестве источника сигнала будем использовать не компрессированный RGB-сигнал.

В исследовании [21] описаны требования к каналу связи с мобильными робототехническими комплексами наземного базирования:

— дальность связи — от 300…500 м (городская застройка) до 1500 м (прямая радиовидимость);

— высокое качество передаваемого видеоизображения, вплоть до HD;

— задержка передачи и отображения видеоинформации на экране оператора — не более 250…300 мс;

— задержка команд дистанционного управления — не более 100 мс.

Разработка имитационной модели

Основываясь на ключевых параметрах создания систем наземного телевизионного вещания, построим имитационную модель приемной и передающей частей с некоторыми ограничениями. На рис. 1 приведена структурная схема имитационной модели системы приема и передачи блока видеоданных.

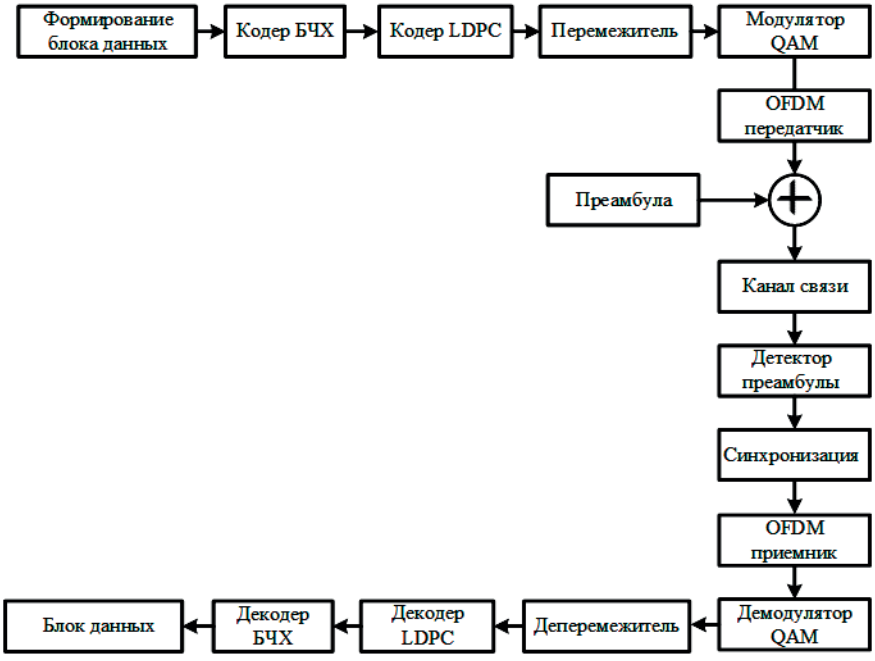

Рис. 1. Структурная схема имитационной модели системы приема и передачи блока видеоданных

Fig. 1. Block diagram of the simulation model of the system for receiving and transmitting the video data block.

Блок формирования данных делит входной поток на составляющие фиксированной длины. При этом длина каждой составляющей определяется скоростью кодера LDPC. В имитационной модели реализованы все варианты скоростей кода (для европейского стандарта DVB-T2) [15].

При конфигурировании LDPC кодера и декодера используется матрица проверки четкости H из кода LDPC со скоростью кода r из стандарта цифрового телевидения DVB-T2. Кроме этого есть возможность кодирования нескольких блоков на выходе кодера БЧХ одним общим блоком LDPC. Блок перемежителя функционирует в соответствии с алгоритмом, описание которого дано в исследовании [15].

Модулятор QAM используется для передачи данных, позволяя выбирать 16-позиционную или 64-позиционную модуляцию. При этом входные битовые последовательности кодируются с использованием кода Грея. В передатчике OFDM-сигнал состоит из информационных пакетов, а количество элементов в левой и правой защитных полосах регулируется для оптимизации передачи. Длина циклического префикса стандартно установлена в 8 единиц, но может быть адаптирована в зависимости от специфических требований. Для обеспечения синхронизации в каждый передаваемый кадр вставляется OFDM-символ преамбулы.

На приемной стороне реализован детектор преамбулы, основанный на фильтре, характеризующимся следующим алгоритмом функционирования. Первоначально рассчитывается уровень корреляции (1):

$$R = \frac{\max(|y|)}{2}, \tag{1}$$

где y — это выходные значения согласованного фильтра, описываемого выражением (2).

$$y(i) = \sum_{p=1}^{L} x(i-p) \cdot k(L-p-1), \tag{2}$$

где L — длительность символа преамбулы, x — входной сигнал, k — опорный сигнал преамбулы.

На втором этапе осуществляется поиск первого отсчета на выходе фильтра, соответствующего неравенству $|y(i)| > R$. Найденный отсчет является точкой окончания символа преамбулы. В соответствии с основной задачей (моделирование системы передачи видеоданных с техническими наземными объектами малой степени подвижности) в имитационной модели содержатся только основные узлы подсистемы SS3 [15] и отсутствует транспортный уровень. С целью оценки качества передачи изображения

создается модель формирования кадра из файла в формате jpg с преобразованием в 24-битный RGB поток данных.

Чтобы проанализировать эффективность работы физического уровня приемопередатчиков видеоданных, необходимо определить количественные характеристики для формирования оценки. Первая характеристика — расчет вероятности ошибки (BER) по формуле (3):

$$BER = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left| D_r(i) - D_t(i) \right|}{N} \cdot 100\ \%, \quad (3)$$

где D_r — принятый бит, D_t — переданный бит, N — всего переданных бит.

Вторая характеристика — визуальная оценка качественных показателей принятого изображения. Как показано в исследовании [22], для приема цифрового сигнала во всех режимах модуляции требования к соотношению сигнал/шум различаются:

— для канала Рэлея — максимально строгие;

— для канала Гаусса — минимально строгие.

Также показано, что в зоне городской застройки практически всегда образуется канал Рэлея, а в пригородах — каналы Райса или Гаусса (редко). В табл. 2 и 3 приведены данные битовой ошибки при различных значениях соотношения сигнал/шум и скорости кода, модуляции 16-QAM (табл. 2) и 64-QAM (табл. 3). Визуальные искажения кадра при различных значениях битовой ошибки продемонстрированы на рис. 2.

Таблица 2. Параметры BER при различных значениях отношения сигнал/шум и модуляции 16-QAM, в процентах
Table 2. BER parameters in % for various signal-to-noise ratios and 16-QAM modulation

Скорость кода	Длина блока	SNR, дБ				
		0	5	10	15	20
1/4	16200	24,3	0,5	0	0	0
1/2	16200	27,2	15,2	5,0	0	0
3/5	16200	27,1	15,1	5,2	0,3	0
2/3	16200	27,1	15,1	5,2	0,3	0
3/4	16200	27,9	15,7	5,3	0,35	0
4/5	16200	28,0	15,7	5,3	0,35	0
5/6	16200	27,6	15,4	5,2	0,34	0
1/2	64800	28,2	18,8	5,3	0,34	0

Окончание табл. 2

Скорость кода	Длина блока	SNR, дБ				
		0	5	10	15	20
3/5	64800	26,9	14,9	5,0	0,32	0
2/3	64800	27,1	15,1	5,1	0,33	0
3/4	64800	28,1	15,7	5,3	0,33	0
4/5	64800	27,6	15,4	5,1	0,33	0
5/6	64800	27,3	15,2	5,1	0,32	0

Таблица 3. Параметры BER при различных значениях отношения сигнал/шум и модуляции 64-QAM, в процентах
Table 3. BER parameters in % for various signal-to-noise ratios and 64-QAM modulation

Скорость кода	Длина блока	SNR, дБ				
		0	5	10	15	20
1/4	16200	33,1	16,5	2,4	0	0
1/2	16200	33,9	23,5	13,2	5,3	0
3/5	16200	33,8	23,9	13,6	5,5	0,65
2/3	16200	34,1	23,8	13,4	5,4	0,64
3/4	16200	35,3	25,1	14,3	5,7	0,6
4/5	16200	35,4	25,4	14,5	5,8	0,68
5/6	16200	34,6	24,6	14,0	5,7	0,66
1/2	64800	35,2	25,4	14,6	6,0	0,74
3/5	64800	33,4	23,6	13,5	5,5	0,68
2/3	64800	33,8	23,6	13,4	5,5	0,67
3/4	64800	35,3	25,5	14,7	6,1	0,76
4/5	64800	34,5	24,8	14,2	5,9	0,74
5/6	64800	33,9	24,3	13,9	5,7	0,72

Таким образом, из данных таблиц видно, что скорости кода дают примерно одинаковый результат. Исключение представляет собой скорость кода 1/4, формирующая существенный приоритет при отношениях сигнал/шум больше 5 дБ. Преимущество по отношению сигнал/шум при использовании модуляции 16-QAM составляет порядка 5 дБ, а при модуляции 64-QAM — около 10,5 дБ. В целом модуляция 64-QAM показала результат ниже. Поэтому при дальнейшем рассмотрении остановимся на модуляции 16-QAM.

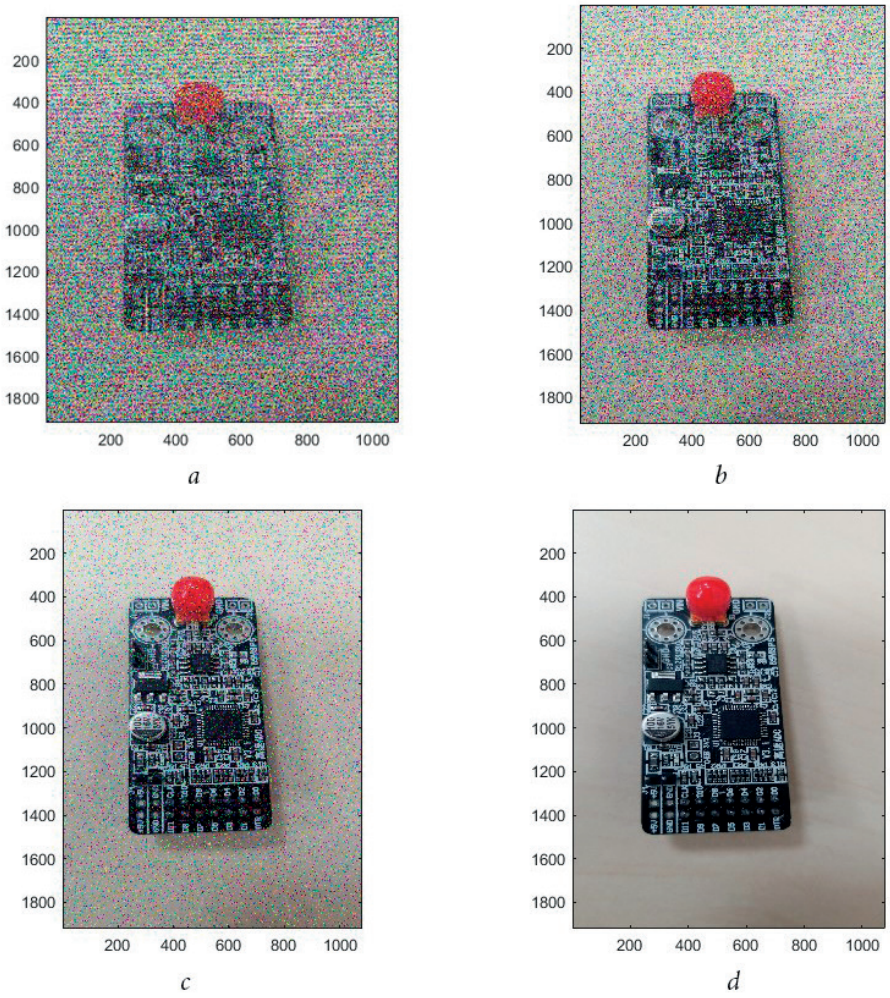

Рис. 2. Визуальные искажения кадра
при различных значениях битовой ошибки:
a — BER = 25 %, *b* — BER = 13 %, *c* — BER = 3,5 %, *d* — BER = 0 %

Fig. 2. Visual frame distortions for different bit error values:
a — BER = 25 %, *b* — BER = 13 %, *c* — BER = 3.5 %, *d* — BER = 0 %

Одной из особенности алгоритма формирования блока видеоданных является повышенная защищенность при многолучевом распространении радиосигнала. Поэтому необходимо рассмотреть, как будет влиять многолучевое распространите при разном значении отношения сигнал/шум в канале связи.

Для этого воспользуемся двухлучевой моделью канала связи, описанного в [22], со следующими параметрами: высота антенны передатчика

(наземный объект малой степени подвижности) 1,5 м, высота подъема антенны приемника (пункт управления) 3 м, максимальная дальность 2,5 км. С учетом этих параметров получим, что разница в пути прямого и отраженного луча составит $3{,}6 \cdot 10^{-3}$ м для расстояния 2,5 км и 2,23 м при нахождении приемника и передатчика в одном месте. Соответственно, задержка отраженного луча составит $1{,}2 \cdot 10^{-10}$ с и $7{,}44 \cdot 10^{-9}$ с.

Оценим длительность символа OFDM при разных скоростях кода и с учетом того, что передаче подвергается некомпрессированный поток в формате Full HD. Таким образом, скорость входного потока с учетом передачи 60 кадров в секунду составит 2,986 Гбит/с (табл. 4). Если взять компрессированный поток в формате Full HD и взять среднюю скорость в 8 Мбит/с, то получим еще большие длительности символа (табл. 5).

Таблица 4. Скорости передачи (Мбит/с) в разных частях тракта при разных скоростях кода при некомпрессированном потоке в формате Full HD
Table 4. Transmission rates (Mbit/s) in different parts of the path at different code rates with the uncompressed stream in Full HD

Скорость кода	1/4	1/2	3/5	2/3	3/4	5/6
БЧХ	3149	3057	3038	3033	3029	3026
LDPC	15746	6879	5064	4549	4130	3891
QAM-16	3937	1719	1266	1137	1032	973
Длительность символа после OFDM (1350), с	$3{,}43 \cdot 10^{-7}$	$7{,}85 \cdot 10^{-7}$	$1{,}06 \cdot 10^{-6}$	$1{,}19 \cdot 10^{-6}$	$1{,}31 \cdot 10^{-6}$	$1{,}39 \cdot 10^{-6}$

Таблица 5. Скорости передачи (Мбит/с) в разных частях тракта при разных скоростях кода при компрессированном потоке в формате Full HD
Table 5. Transmission rates (Mbit/s) in different parts of the path at different code rates with the compressed stream in Full HD

Скорость кода	1/4	1/2	3/5	2/3	3/4	5/6
БЧХ	8,4376	8,1912	8,1407	8,1264	8,1148	8,1081
LDPC	42,183	18,430	13,568	12,189	11,065	10,425
QAM-16	10,547	4,6075	3,392	3,047	2,7664	2,6062
Длительность символа после OFDM (1350), с	$1{,}28 \cdot 10^{-4}$	$2{,}93 \cdot 10^{-4}$	$3{,}98 \cdot 10^{-4}$	$4{,}43 \cdot 10^{-4}$	$4{,}88 \cdot 10^{-4}$	$5{,}18 \cdot 10^{-4}$

Из анализа данных табл. 4 и 5 следует, что длительность символа OFDM обычно превышает время задержки основного сигнала. Это приводит к тому, что отраженные лучи накладываются на прямой сигнал при определенных условиях. Однако такая ситуация с наложением радиоволн не всегда

наблюдается в реальной среде. Например, объекты с ограниченной подвижностью, работающие внутри зданий с различной планировкой, могут не иметь доступа к прямому сигналу. В таких случаях на входе устройства фиксируются исключительно многократно отраженные лучи, амплитуды которых могут значительно различаться.

В табл. 6 приведены результаты имитационного моделирования в среде Matlab (работа системы передачи видеоданных при различных отношениях сигнал/шум и двухлучевом распространении). При этом второй луч приходит позже на один OFDM символ с амплитудой в два раза меньшей первого.

Таблица 6. Параметры BER в % при различных значениях отношения сигнал/шум, модуляции 16-QAM и двухлучевом распространении
Table 6. BER parameters in % for various signal-to-noise ratios, 16-QAM modulation and two-path propagation

Скорость кода	Длинна блока	SNR, дБ				
		0	5	10	15	20
1/4	16200	30,1	11,8	5,6	$1{,}2\ 10^{-4}$	$1{,}15\ 10^{-4}$
1/2	16200	31,1	21,1	13,9	10,5	10,1
3/5	16200	31,1	21,3	14,5	11,5	11,1
2/3	16200	31,1	21,2	14,2	11,1	10,6
3/4	16200	31,2	22,1	15,0	11,9	11,5
4/5	16200	32,1	22,2	15,2	12,1	11,7
5/6	16200	31,6	21,7	14,8	11,7	11,3
1/2	64800	33,7	24,7	18,9	17,2	16,9
3/5	64800	32,4	23,5	17,9	16,3	16,1
2/3	64800	32,6	23,7	18,1	16,3	16,1
3/4	64800	33,6	24,6	18,9	17,2	16,9
4/5	64800	33,1	24,2	18,6	16,8	16,6
5/6	64800	32,8	23,9	18,3	16,6	16,4

На основании информации, представленной в табл. 6, можно сделать вывод, что качество приема сигнала снижается в среднем примерно на 5 %. Примечательно, что при использовании кодовой частоты 1/4 ухудшение качества сигнала значительно снижается, демонстрируя улучшение на 10–15 %, которое варьируется в зависимости от изменения соотношения сигнал или шум.

Далее проанализируем оценку влияния вероятности ошибки в сценарии двухлучевого распространения. В частности, анализируем условие, при котором сигнал второго луча испытывает задержку, равную половине

длительности символа ортогонального мультиплексирования с частотным разделением (OFDM). Этот анализ проводится при сохранении кодовой скорости на уровне 1/4, а его результаты приведены в табл. 7.

Таблица 7. Параметры BER при различных значениях отношения сигнал/шум, модуляции 16-QAM и двухлучевом распространении, в процентах
Table 7. BER parameters in % for various signal-to-noise ratios, 16-QAM modulation and two-path propagation.

Уровень сигнала второго луча	SNR, дБ				
	0	10	20	30	40
1	33,5	27,9	26,7	26,1	25,6
0,8	33,2	20,1	16,6	16,3	16,1
0,67	31,1	9,7	4,2	4,2	4,2
0,57	29,2	3,3	0,8	0,8	0,6
0,5	27,8	0,8	0	0	0
0,44	25,5	0	0	0	0
0,4	24,6	0	0	0	0
0,33	22,7	0	0	0	0
0,28	21,5	0	0	0	0
0,25	22,7	0	0	0	0
0,22	20,2	0	0	0	0
0,2	20,1	0	0	0	0

Данные табл. 4 и 5 наглядно демонстрируют, что кодер LDPC вносит существенное увеличение скорости цифрового потока. Таким образом, вполне можно увеличить блок кодирования кодеком LDPC и оценить влияние на помехоустойчивость. В табл. 8 приведены данные битовой ошибки при кодировании кодером LDPC нескольких блоков кода БЧХ.

Таблица 8. Параметры BER при кодировании кодером LDPC нескольких блоков кода БЧХ
Table 8. BER parameters when encoding several blocks of BCH code with the LDPC encoder

Скорость кода	Число блоков БЧХ	SNR, дБ				
		0	5	10	15	20
1/4	5	27,8	3,3	0	0	0
1/2	10	28,2	15,8	5,36	1,9	0
3/5	4	26,8	14,9	5,1	0,3	0
2/3	4	27,1	15,1	5,1	0,3	0

Исходя из анализа данных, представленных в табл. 2 и 8, становится очевидно, что использование одного блока LDPC для кодирования нескольких блоков кода BCH не приводит к значительному увеличению ошибок на уровне битов. При передаче данных в видеоформате с объектами, обладающими разной степенью подвижности, оптимальные результаты достигаются при использовании 16-QAM модуляции с кодовой скоростью 1/4. В ситуациях, когда сигнал подвержен многолучевому распространению, качество передачи данных ухудшается, и уровень битовых ошибок достигает 8 %. Однако применение LDPC для кодирования нескольких блоков кода BCH позволяет снизить скорость передачи без существенного увеличения ошибок.

Заключение

В области передачи видеоинформации с системами различной мобильности оптимальные результаты были достигнуты при использовании модуляции 16-QAM с коэффициентом кодирования 1/4. Учитывая влияние многопутевого распространения, наблюдается заметное ухудшение производительности, с увеличением коэффициента битовых ошибок (BER) на 8 %. Для снижения скорости передачи без существенного ухудшения BER была применена техника кодирования нескольких блоков кодов Бозе — Чаудхури — Хоккенгема (BCH) одним блоком кодов с низкой плотностью проверок на четность (LDPC).

Результаты работы предложенной модели передачи видеоданных соответствуют требуемым параметрам системы DVB-T, но расходятся в использовании рекомендуемых параметров. Кроме того, требования к параметрам передаваемой видеоинформации ниже, чем указанные в модели, что, как ожидается, повысит качество приема. В планах на будущее — проведение полевых испытаний предложенной имитационной модели с использованием приемопередатчиков программно-определяемого радио (SDR). Эти испытания призваны подтвердить эффективность модели в реальных условиях эксплуатации и продолжить доработку системы на основе эмпирических данных.

Список литературы / References

1. Гугалов К. Г. Оборудование беспроводной передачи информации для наземных робототехнических комплексов. *Технологии и средства связи.* 2013;(3):14–15.

Gugalov K. G. Wireless information transmission equipment for ground-based robotic complexes. *Tekhnologii i sredstva svyazi.* 2013;(3):14–15. (in Russ.)

2. Ожмегов И. С., Хазанский Р. Р. Сжатие потокового видео с камеры наземного робота для каналов связи с низкой пропускной способностью. *Экстремальная робототехника.* 2018;1(29):432–441.

Ozhmegov I. S., Khazanskii R. R. Compression of streaming video from a ground robot's camera for communication channels with low bandwidth. *Extreme robotics.* 2018;1(29):432–441. (in Russ.)

3. 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, сигнального и частотного сетевых ресурсов. Часть 1. Модели и методика повышения скорости передачи данных. *Системы управления, связи и безопасности.* 2023;(1):125–219.

Ivanov M. S., Shushkov A. V., Makarenko S. I. Increasing the data transmission rate in the air radio network of aircrafts controlling due to adaptive use of energy, signal and frequency resources of network. Part 1. Models and method of the data transmission rate increasing. *Systems of Control, Communication and Security*. 2023;(1):125–219. (in Russ.)

4. Лопота А. В., Спасский Б. А. Мобильные наземные робототехнические комплексы профессионального назначения. *Робототехника и техническая кибернетика.* 2020;8(1):5–17.

Lopota A. V., Spassky B. A. Mobile ground-based robot systems for professional use. *Robotics and technical cybernetics.* 2020;8(1):5–17. (in Russ.)

5. Куркин А. А., Тюгин Д. Ю., Зезюлин Д. В., Беляков В. В., Береснев П. О., Филатов В. И., и др. Разработка группы мобильных роботов для комплексного исследования волнового климата в прибрежной зоне. *Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики».* Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018 г. Санкт-Петербург; 2018. С. 573–576.

Kurkin A. A., Tyugin D. Yu., Zezyulin D. V., Belyakov V. V., Beresnev P. O., Filatov V. I., et al. Development of mobile robots group for comprehensive study of the wave climate in the coastal zone. In: *Proceedings of XIV All-Russian Conference «Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics».* St. Petersburg, May 23–25, 2018. Saint-Petersburg; 2018. Pp. 573–576. (in Russ.)

6. Симонов М. В., Закиров А. А., Шишаков К. В. Модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы для управления мобильным наземным роботом в сложных условиях. *Приборостроение в XXI веке — 2018. Интеграция*

науки, образования и производства. Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции. Ижевск, 12–14 декабря 2018 г. Ижевск: Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова; 2018. С. 310–317.

Simonov M. V., Zakirov A. A., Shishakov K. V. Model of strapdown inertial navigation systems for controlling a mobile land robot in difficult conditions. In: *Instrumentation in the XXI century — 2018. Integration of science, education and production.* Collection of materials of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference. Izhevsk, December 12–14, 2018. Izhevsk: Izhevskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. M. T. Kalashnikova; 2018. Pp. 310–317. (in Russ.)

7. Пантенков Д. Г., Загнетко М. А., Литвиненко В. П. Сравнительный анализ результатов летных испытаний передачи высокоскоростной целевой информации с модуляцией QAM и OFDM. *Вестник Воронежского государственного технического университета.* 2022;18(2):31–46.

Pantenkov D. G., Zagnetko M. A., Litvinenko V. P. Comparative analysis of the results of flight tests of transmission of high-speed target information with QAM and OFDM modulation. *Bulletin of Voronezh State Technical University.* 2022;18(2):31–46. (in Russ.)

8. Слюсар В. И. Неортогональное частотное мультиплексирование (N-OFDM) сигналов. Часть 1. *Технологии и средства связи.* 2013;(5):61–65.

Slyusar V. I. The non-orthogonal frequency division multiplexing (N-OFDM) signals. Part 1. *Tekhnologii i sredstva svyazi.* 2022;18(2):31–46. (in Russ.)

9. Макаров С. Б., Завьялов С. В. Повышение помехоустойчивости когерентного приема неортогональных многочастотных сигналов. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление.* 2014;2(193):45–54.

Makarov S. B., Zavyalov S. V. Improving ber performance for coherent detection of non-orthogonal multifrequency signals. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer science. Telecommunications and Control Systems.* 2014;2(193):45–54. (in Russ.)

10. Kurek K., Keller T., Modelski J., Yashchyshyn Y., Piasecki M., Pastuszak G., et al. Integrated Communications System for the Remote Operation of Unmanned Aerial Vehicle. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation.* 2013;7(2):235–242.

11. Elsharief M., Zekry A. H., Abouelatta M. Implementing a standard DVB-T system using MATLAB simulink. *International Journal of Computer Applications.* 2014;98(5):27–32.

12. Ghouri S. S. U., Saleem S., Zaidi S. S. H. Enactment of LDPC code over DVB-S2 link system for BER analysis using MATLAB. In: Bhatia S., Tiwari S., Mishra K., Trive-

di M. (eds) *Advances in Computer Communication and Computational Sciences. Proceedings of IC4S 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 924.* Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd.; 2019. Pp. 743–750.

13. Al-dayyeni W. S., Kadhim A. M., Alzuabidi O. H. A. A., Naghmash M. S. Design and Simulation of DVB Channel Coding and Modulation Using MATLAB. In: Al-Sharafi M. A., Al-Emran M., Al-Kabi M. N., Shaalan K. (eds.) *Proceedings of the 2nd International Conference on Emerging Technologies and Intelligent Systems. ICETIS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 584.* Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2023. Pp. 428–437.
14. Yudha R. G. P., Astawa I. G. P., Sudarsono A. Performance Analysis of CP-Based and CAZAC Training Sequence-Based Synchronization in OFDM System. *EMITTER International Journal of Engineering Technology.* 2016;4(2):221–236.
15. ГОСТ Р 58912–2020. *Телевидение вещательное цифровое. Система эфирного наземного цифрового телевизионного вещания второго поколения DVB-T2. Общие технические требования.* М.: Стандартинформ; 2020. 77 с.

State Standard R 58912–2020. *Digital video broadcasting. Second generation of digital terrestrial television broadcasting system DVB-T2. General technical requirements.* Moscow: Standartinform; 2020. 77 p. (in Russ.)

16. Jang M., Lee H., Kim S. H., Myung S., Jeong H., Kim J. Design of LDPC Coded BICM in DVB Broadcasting Systems With Block Permutations. *IEEE Transactions on Broadcasting.* 2015;61(2):327–322.
17. Vangelista L., Benvenuto N., Tomasin S., Nokes C., Stott J., Filippi A., et al. Key technologies for next-generation terrestrial digital television standard DVB-T2. *IEEE Communications Magazine.* 2009;47(10):146–153.
18. ETSI TS 102 831 V1.2.1. *Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second-generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2).* European Standard, Aug. 2012. European Telecommunications Standards Institute, European Broadcasting Union; 2012. 244 p.
19. Бителева А. Г. Цифровое кабельное ТВ. Часть 4. Сигнал DVB в распределительной сети. Использование альтернативных стандартов. *Телеспутник.* 2008;1(147):86–91.

Biteleva A. G. Digital cable TV. Part 4. DVB signal in the distribution network. Using alternative standards. *Telesputnik.* 2008;1(147):86–91. (in Russ.)

20. Попов Д. С., Шмаков О. А. Особенности применения каналов управления и передачи данных в составе мобильных робототехнических комплексов наземного базирования. *Экстремальная робототехника.* 2020;1(1):302–309.

Popov D. S., Shmakov O. A. Features of application of control and data transmission channels as part of ground-based mobile robotic systems. *Extreme robotics.* 2020;1(1):302–309. (in Russ.)

21. Серов А. Резервация для вещателей. *MediaVision.* 2010;(9):45–47.
22. *Двухлучевое многолучевое распространение.* URL: https://docs.exponenta.ru/R2021a_nmtnew/phased/ug/two-ray-multipath-propagation.html (дата обращения: 16.08.2023).
Two-beam multipath propagation: Matlab documentation. URL: https://docs.exponenta.ru/R2021a_nmtnew/phased/ug/two-ray-multipath-propagation.html (accessed: 16.08.2023). (in Russ.)

Информация об авторах

Прасолов Александр Александрович, к. т. н., доцент кафедры радиосвязи и вещания, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация, prasolov.alex@gmail.com

Федоров Андрей Сергеевич, ассистент кафедры радиосвязи и вещания, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация, as.fdrv@bk.ru

Information about the authors

Alexander A. Prasolov, Ph.D., Associate Professor, Department of Radio Communications and Broadcasting, St. Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M. A. Bonch-Bruevich, St. Petersburg, Russian Federation, prasolov.alex@gmail.com

Andrey S. Fedorov, assistant, Department of Radio Communications and Broadcasting, St. Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M. A. Bonch-Bruevich, St. Petersburg, Russian Federation, as.fdrv@bk.ru

Поступила / Received: 25.11.2023
Принята в печать / Accepted: 19.11.2024