

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

УДК 621.396

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-16-26>

Экспериментальное исследование системы передачи на основе FBMC/OQAM

Р. Р. Абенов[✉], Е. В. Рогожников, Я. В. Крюков, Д. А. Покаместов, П. А. Абенова

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

✉ abenov.rr@gmail.com

Аннотация

Введение. Данная работа посвящена исследованию системы передачи на основе мультиплексирования FBMC/OQAM. Актуальность исследования связана с высокой спектральной эффективностью данной системы, благодаря которой она рассматривается как альтернативный метод передачи в будущих стандартах беспроводной мобильной связи. Однако недостатком системы является высокая сложность обработки сигналов. Среди отечественных и зарубежных публикаций встречается множество работ с теоретическим исследованием системы FBMC/OQAM. В данной статье представлены результаты экспериментального исследования системы передачи на ее основе.

Цель работы. Верификация модели системы передачи данных на основе FBMC/OQAM в беспроводном канале связи.

Материалы и методы. В работе используется метод имитационного компьютерного моделирования в среде Matlab и экспериментальное исследование с использованием сертифицированного измерительного оборудования Keysight и Rohde & Schwarz.

Результаты. Была разработана модель формирования и обработки сигнала, а также предложена структура кадра. Покадровая обработка выполнялась с учетом временной и частотной синхронизации, поскольку исследование проводилось в беспроводном канале с частотно-временным рассеянием. Временная синхронизация обеспечивалась корреляционным методом во временной области. Для компенсации рассогласования опорных генераторов применялась оценка с помощью преамбулы, состоящей из двух символов. В работе использовалась оценка канала методом Zero Forcing, а также эквалайзер с линейным интерполятором. Для корректной оценки канала в FBMC/OQAM использовались пилотные символы, распределенные по всей частотно-временной сетке, а также метод с дополнительным пилотом для компенсации межканальной интерференции. В результате работы получены зависимости коэффициента битовых ошибок от отношения энергии, приходящейся на бит информации, к энергии шума в различных каналах. Достигнут коэффициент ошибок 10^{-4} при отношениях энергии, приходящейся на бит информации, к мощности шума, равных 13.4 дБ в первом канале, 15.3 дБ во втором и 20.9 дБ в третьем.

Заключение. Система передачи на основе FBMC/OQAM с линейным эквалайзером может работать без циклического префикса в беспроводном канале связи с многолучевостью, обеспечивая сравнимую с OFDM-CP помехоустойчивость. Для получения большей спектральной эффективности необходимо использовать длинные кадры, поскольку в начале и конце кадра FBMC/OQAM имеется переходная зона.

Ключевые слова: FBMC/OQAM, оценка канала, дополнительный пилот, вероятность битовой ошибки, эксперимент

Для цитирования: Экспериментальное исследование системы передачи на основе FBMC/OQAM / Р. Р. Абенов, Е. В. Рогожников, Я. В. Крюков, Д. А. Покаместов, П. А. Абенова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 6. С. 16–26. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-6-16-26

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.09.2021; принята к публикации после рецензирования 26.10.2021; опубликована онлайн 29.12.2021



Experimental Study of a Transmission System Based on FBMC/OQAM

Renat R. Abenov✉, Evgeny V. Rogozhnikov, Yakov V. Kryukov,
Dmitriy A. Pokamestov, Perizat A. Abenova

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

✉ abenov.rr@gmail.com

Abstract

Introduction. This paper investigates a transmission system based on FBMC/OQAM multiplexing. This system is characterized by a high spectral efficiency, thereby attracting interest as an alternative transmission method in future wireless mobile communication standards. However, a disadvantage of the system is the high complexity of signal processing. There are numerous publications that study the FBMC/OQAM system from a theoretical perspective. This paper presents an experimental study of a transmission system based on FBMC/OQAM.

Aim. Verification of a transmission system based on FBMC/OQAM multiplexing in a wireless channel.

Materials and methods. Computer simulation modeling in Matlab and experimental research using Keysight and Rohde & Schwarz certified measuring instruments.

Results. A model of synthesis and signal processing was developed, and a frame structure was proposed. The processing included synchronization, since the study was carried out in a wireless double-dispersive channel. Time synchronization was provided by the method of time-domain correlation. A preamble consisting of two symbols was used for CFO compensation. Channel estimation in FBMC/OQAM was conducted by pilot symbols spread over the time-frequency domain, a method with an auxiliary pilot to compensate for intrinsic interference, as well as Zero Forcing and a linear interpolator. As a result, dependences of the bit error rate on the E_b/N_0 in various channels were obtained. An error rate of 10^{-4} was achieved under the E_b/N_0 equal to 13.4 dB, 15.3 dB and 20.9 dB in the first, second and third channel, respectively.

Conclusion. A FBMC/OQAM-based transmission system with a linear equalizer can operate without a cyclic prefix in a multipath wireless channel, providing comparable noise immunity to OFDM-CP. Long frames should be used to obtain greater spectral efficiency, due to the presence of a transition zone at the beginning and end of the FBMC/OQAM frame.

Keywords: FBMC-OQAM, channel estimation, auxiliary pilot, bit error rate, experiment

For citation: Abenov R. R., Rogozhnikov E. V., Kryukov Ya. V., Pokamestov D. A., Abenova P. A. Experimental Study of a Transmission System Based on FBMC/OQAM. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 6, pp. 16–26. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-6-16-26

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 12.09.2021; accepted 26.10.2021; published online 29.12.2021

Введение. Метод передачи FBMC/OQAM (Filter Bank Multicarrier/Offset Quadrature Amplitude Modulation, частотное мультиплексирование с использованием банка фильтров/квадратурная амплитудная модуляция со смещением), который также назывался OFDM/OQAM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing/Offset Quadrature Amplitude Modulation, ортогональное частотное мультиплексирование/квадратурная амплитудная модуляция со смещением), относится к фильтровым методам мультиплексирования и является альтернативой физического уровня беспроводных широкополосных систем связи [1–6]. Иссле-

дование данной системы направлено на увеличение спектральной эффективности современных беспроводных широкополосных систем связи, поскольку низкое внеполосное излучение вместе с отсутствием циклического префикса могут значительно ее повысить.

В данной статье рассматривается схема формирования и обработки, предложенная в [7]. На практике помимо частотной селективности канала и наличия аддитивного белого гауссовского шума на качество передачи влияет множество факторов, в числе которых наибольшее влияние имеют нестабильность опорных генераторов передатчика и

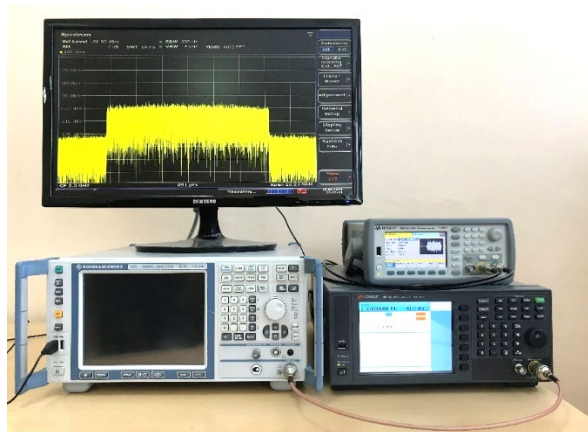


Рис. 1. Экспериментальный стенд

Fig. 1. Experimental stand

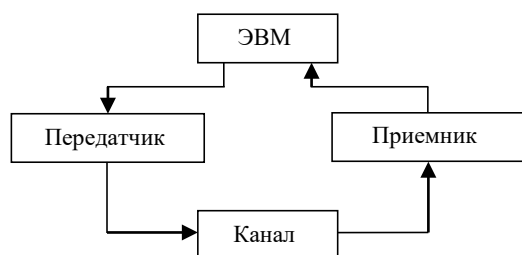


Рис. 2. Структурная схема экспериментального стенда

Fig. 2. Block diagram of the experimental stand

приемника, тепловой и фазовый шум, а также эффекты квантования и джиттер. Совокупное влияние данных факторов на качество фильтрации и передачу в целом невозможно предсказать в процессе моделирования, поэтому требуется проведение экспериментального исследования.

Целью экспериментального исследования является подтверждение работоспособности схемы формирования и обработки, предложенной в [7]. Для проведения эксперимента был использован стенд (рис. 1). Структурная схема экспериментального стенда представлена на рис. 2.

В качестве приемника использовался анализатор спектра Rohde & Schwarz FSV3. Для генерации сигнала использовался генератор сигналов произвольной формы Keysight 33600A, для переноса сигнала на несущую – генератор Keysight N9310A.

Для синхронизации работы генераторов использовался один опорный сигнал частотой 10 МГц, источником которого являлся генератор Keysight 33600A. Такое подключение позволило добиться стабильной работы передатчика и генерации модулированного сигнала на несущей частоте 2.48 ГГц. В качестве антенн использовались TL-ANT2408CL.

Временная и частотная синхронизация. Системы FBMC/OQAM, как и OFDM, очень чувствительны к качеству синхронизации. Для обеспечения качественного приема сигнала в системах OFDM предусмотрен двухэтапный механизм синхронизации, работающий как во временной, так и в частотной областях. Поскольку аппаратная синхронизация передатчика и приемника в процессе проведения эксперимента отсутствовала, для синхронизации приема и обработки сигнала использовалась преамбула, генерируемая перед каждым кадром. Для обеспечения детектирования сигнала среди шумов преамбула должна иметь высокий пик-фактор автокорреляционной функции.

При разработке преамбулы для FBMC/OQAM и OFDM используются разные подходы. В случае FBMC/OQAM необходимо учитывать накладываемые модуляцией OQAM ограничения. Самым простым в реализации решением является преамбула, формируемая по принципу метода приближения помех (Interference Approximation Method [8–10]). Суть данного метода заключается в периодическом повторении двух одинаковых символов с положительным и отрицательным знаком. При этом каждая ячейка частотно-временного ресурса подвергается влиянию символов, соответствующих соседним поднесущим, поэтому суммарная интерференция синфазной или квадратурной составляющей при таком расположении обращается в ноль. Данная преамбула может быть применена для частотной синхронизации, однако ее автокорреляционная функция не позволяет проводить синхронизацию по времени. Поэтому в преамбуле были использованы только нечетные подканалы, содержащие псевдослучайную последовательность.

Временная синхронизация. В системах FBMC, как и во многих других цифровых системах связи, можно использовать временную синхронизацию

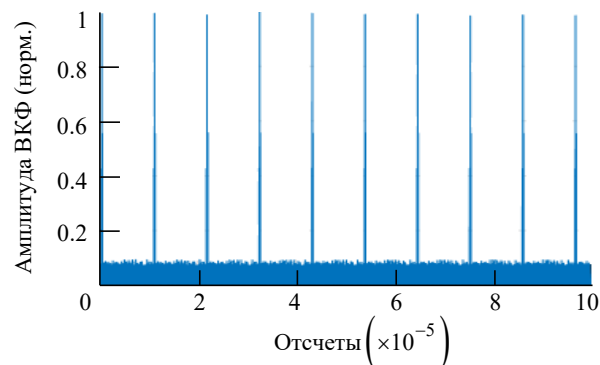


Рис. 3. ВКФ преамбулы и принимаемого сигнала OFDM

Fig. 3. Cross-correlation function of the preamble and the received OFDM signal

цию корреляционным методом.

Преамбула, состоящая из двух одинаковых символов, служит триггером для начала обработки кадра. Для этого она содержит псевдослучайную последовательность. На рис. 3 представлен модуль нормированной взаимно-корреляционной функции (ВКФ) принимаемого сигнала и преамбулы.

Частотная синхронизация. Разница в частоте опорных генераторов передатчика и приемника приводит к повороту сигнального созвездия в течение одного символа (рис. 4). Для компенсации данного эффекта применяется алгоритм, аналогичный описанному для OFDM в [11]. ВКФ между двумя символами в преамбуле SS_{rx}^1 и SS_{rx}^2 :

$$R_s = x \cos \left[SS_{rx}^1, SS_{rx}^2 \right].$$

За один период символа OFDM фаза изменяется на угол:

$$\Delta\Phi = \arctg \left(\frac{\operatorname{Im} \left[\max(R_s) \right]}{\operatorname{Re} \left[\max(R_s) \right]} \right).$$

Таким образом, один отсчет символа OFDM имеет следующий набег фазы:

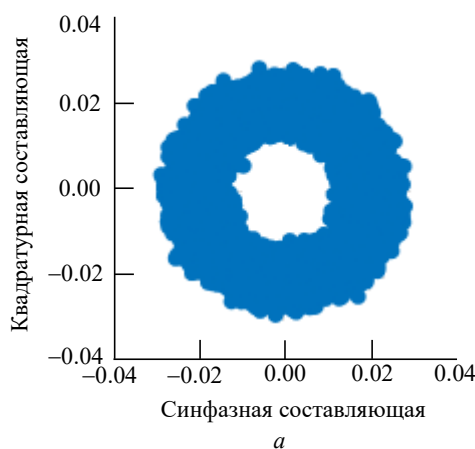
$$\Delta\Phi = \frac{\Delta\Phi}{N_{NFFT} + N_{CP}},$$

где N_{NFFT} и N_{CP} – длина символа OFDM и циклического префикса в отсчетах.

Компенсация смещения частоты опорных генераторов осуществляется следующим образом:

$$S_q(n) = S_{rx}(n) e^{in\Delta\Phi},$$

где S_q – сигнал после компенсации; S_{rx} – сигнал до компенсации; n – индекс отсчета сигнала.



В случае FBMC оценка смещения частоты во временной области не может быть применена, поскольку символы SS_{rx}^1 и SS_{rx}^2 перекрываются по времени. Поэтому расчет коэффициента R_s выполняется в частотной области после фильтрации и преобразования Фурье:

$$R_s = \frac{1}{N_{NFFT}} \sum_{m=1}^M \frac{rs_{rx}^2(m)}{rs_{rx}^1(m)},$$

где M – количество подканалов в преамбуле; m – индексы подканалов; rs_{rx}^1 и rs_{rx}^2 – первый и второй символы принятой преамбулы.

Формирование кадров FBMC/OQAM. Кадр FBMC/OQAM, разработанный для эксперимента, представлен на рис. 5, 6. Он состоит из двух символов преамбулы, пятнадцати слотов по 12 символов в каждом, а также двух символов после. Количество отсчетов в кадре составляет

$$N = (2N_{SS} + N_{SL} 12 + 2) \frac{N_{OFDM}}{2} + (2K - 1) \frac{N_{OFDM}}{2} = 98816,$$

где N_{SS} – длина преамбулы; N_{SL} – количество слотов; N_{OFDM} – длина исходного символа OFDM.

Рядом с каждым пилотным символом расположен так называемый дополнительный пилот (Auxiliary Pilot), необходимый для защиты от межканальной интерференции [12, 13].

При таких параметрах сигнала выигрыш в спектральной эффективности FBMC/OQAM (рис. 7) относительно системы LTE составляет $\frac{66.7 + 4.76}{66.7} \approx 1.07$ для короткого префикса,

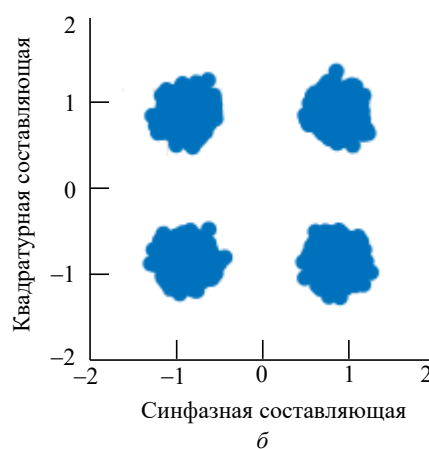


Рис. 4. Созвездие сигнала после прохождения через канал распространения радиоволн: а – без компенсации смещения частоты несущей; б – после компенсации смещения частоты несущей и эквалайзирования

Fig. 4. Constellation of the signal after passing through the radio propagation channel: а – without compensation of the carrier frequency offset; б – after compensation of the carrier frequency offset and equalization

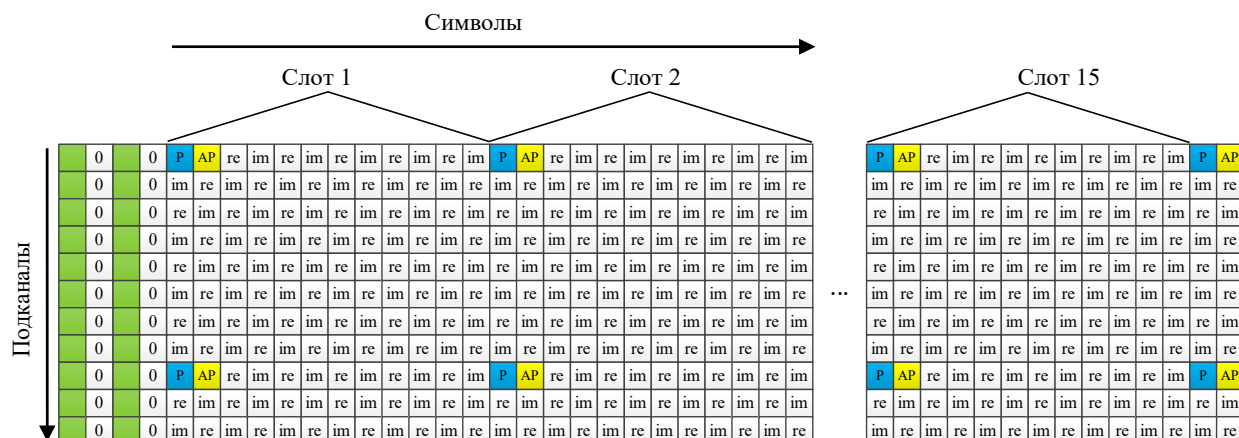


Рис. 5. Структура кадра FBMC/OQAM. Зеленая ячейка – символ преамбулы, 0 – защитный интервал между преамбулой и кадром, re/im – символ с данными, синяя/желтая – пилотный символ и дополнительный пилот

Fig. 5. FBMC/OQAM frame structure. Green cell – preamble symbol, 0 – guard interval between the preamble and the frame, re/im – data symbol, blue/yellow – pilot symbol and auxiliary pilot

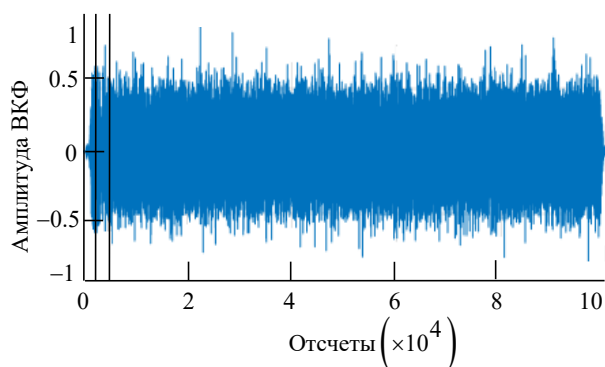


Рис. 6. Кадр FBMC/OQAM. Линиями выделена область перекрытия преамбулы и информационных символов

Fig. 6. FBMC/OQAM frame. The lines highlight the overlap area of the preamble and information symbols

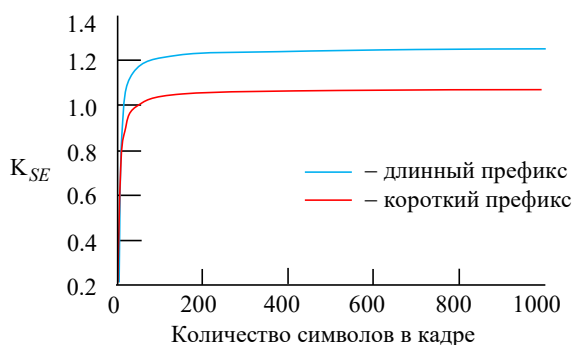


Рис. 7. Выигрыш в спектральной эффективности относительно системы LTE

Fig. 7. Spectral efficiency gain relative to LTE system

$$\frac{66.7 + 16.67}{66.7} \approx 1.25 \text{ – для длинного префикса.}$$

Параметры передаваемого сигнала. Сигнальные отсчеты FBMC/OQAM загружались в генератор Keysight 33600A по интерфейсу USB. Параметры формируемых сигналов FBMC/OQAM сведены в таблицу.

Оценка канала в кадре. В процессе проведения экспериментального исследования для оценки канала использовались встраиваемые пилотные символы [14], расположенные в первом символе каждого слота. Для оценки канала был использован метод Zero Forcing [15, 16], а также линейная интерполяция [17, 18]. Оценка канала проводилась в три этапа.

1. Оценка канала в пилотных ячейках методом Zero Forcing. На данном этапе создается нулевой вектор канальных коэффициентов для пилотных символов каждого слота (рис. 8). После этого вычисляется канальный коэффициент в ячейках, которые содержат пилотный символ ($H_{1.1}, H_{1.9}, \dots$).

2. Линейная интерполяция канальных коэффициентов в пилотных символах каждого слота ($H_{1.2} \dots H_{1.8}, H_{1.10} \dots H_{1.17}$ и т. д.).

Параметры сигналов
Signal parameters

Параметр	Значение
Количество точек преобразования Фурье	1024
Полоса сигнала, МГц	10.24
Тип манипуляции	OQAM-4
Циклический префикс	–
Коэффициент перекрытия	4
Длительность символа, отсчетов	4096
Шаг расположения пилотов по частоте (поднесущие)	8
Шаг расположения пилотов по времени (символы)	12
Количество информационных поднесущих (общее), из них пилотных поднесущих	641, пилотных 81
Количество бит в кадре	120750
Длительность кадра, мс	9.7

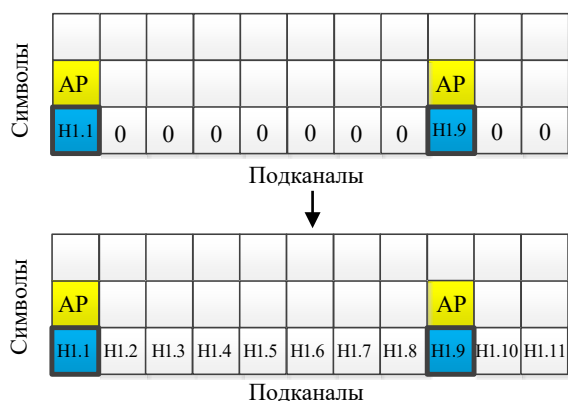


Рис. 8. Оценка канальных коэффициентов методом Zero Forcing и интерполяция по пилотным ячейкам

Fig. 8. Estimation of channel coefficients by the Zero Forcing method and interpolation by pilot cells

3. Линейная интерполяция канальных коэффициентов в каждой ячейке частотно-временной сетки (рис. 9). Полученная в результате вычислений канальная матрица подается на эквалайзер и применяется ко всему кадру.

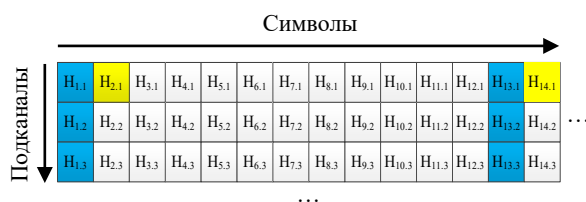


Рис. 9. Расчет канальной матрицы на основе интерполяции по пилотным символам в кадре

Fig. 9. Calculation of the channel matrix based on interpolation by the pilot symbol in the frame

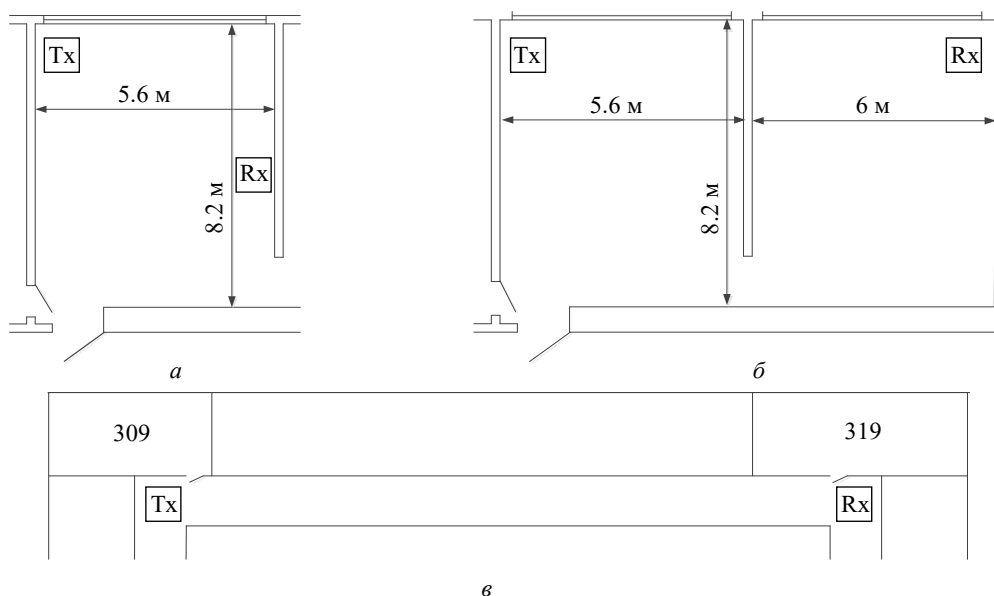


Рис. 10. Трасса канала: а – канал № 1; б – канал № 2; в – канал № 3. Tx – передатчик, Rx – приемник

Fig. 10. The route of the channel: а – channel № 1; б – channel № 2; в – channel № 3. Tx – transmitter, Rx – receiver

Передача данных в беспроводном канале.

Эксперимент проводился в стенах радиотехнического корпуса Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Измерения были проведены в трех различных сценариях: передача в пределах одной аудитории (канал № 1), передача в соседнюю аудиторию при отсутствии прямой видимости (канал № 2), передача в коридоре корпуса (канал № 3, расстояние между передатчиком и приемником ≈ 30 м). Трасса перечисленных радиоканалов представлена на рис. 10, модули канальной матрицы – на рис. 11.

Для получения зависимостей коэффициента битовых ошибок от отношения сигнал/шум на передатчике изменялся уровень выходной мощности с шагом 1 дБм. Для каждого сценария уровень выбирался таким образом, чтобы обеспечить коэффициент ошибок после приема и обработки сигнала в диапазоне $0.5 \dots 10^{-5}$.

Обработка результатов. Данные, полученные с анализатора спектра, сохранялись в памяти компьютера в виде файлов I и Q. Затем эти файлы были загружены в среду Matlab, где выполнялась покадровая обработка данных. Последовательность обработки выглядит следующим образом:

1. Обнаружение начала кадра с помощью корреляционной обработки по преамбуле и выделение одного кадра из потока.

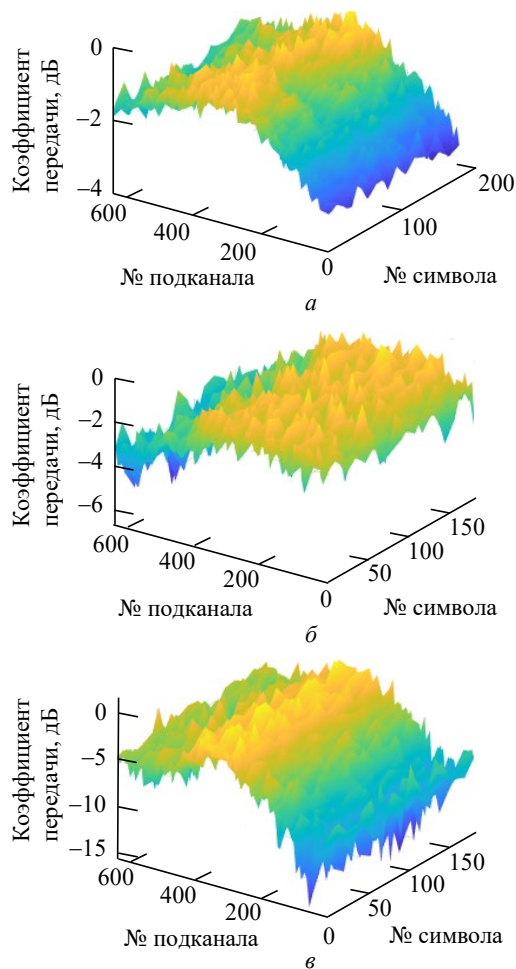


Рис. 11. Модуль канальной матрицы: a – канал № 1; b – канал № 2; c – канал № 3

Fig. 11. Modulus of the channel matrix: a – channel № 1; b – channel № 2; c – channel № 3

2. Оценка рассогласования опорных генераторов передатчика и приемника.
3. Компенсация рассогласования опорных генераторов передатчика и приемника в кадре.
4. Выделение информационных символов в кадре.
5. Фильтрация.
6. Быстрое преобразование Фурье.
7. Оценка канала.
8. Эквалайзирование.
9. Демодуляция OQAM.
10. Декодирование синфазной и квадратурной составляющих.

11. Оценка коэффициента битовых ошибок.

На рис. 12 показана нормированная оценка канала для каждого сценария.

Для построения зависимости коэффициента ошибок от отношения энергии бита/шум сначала

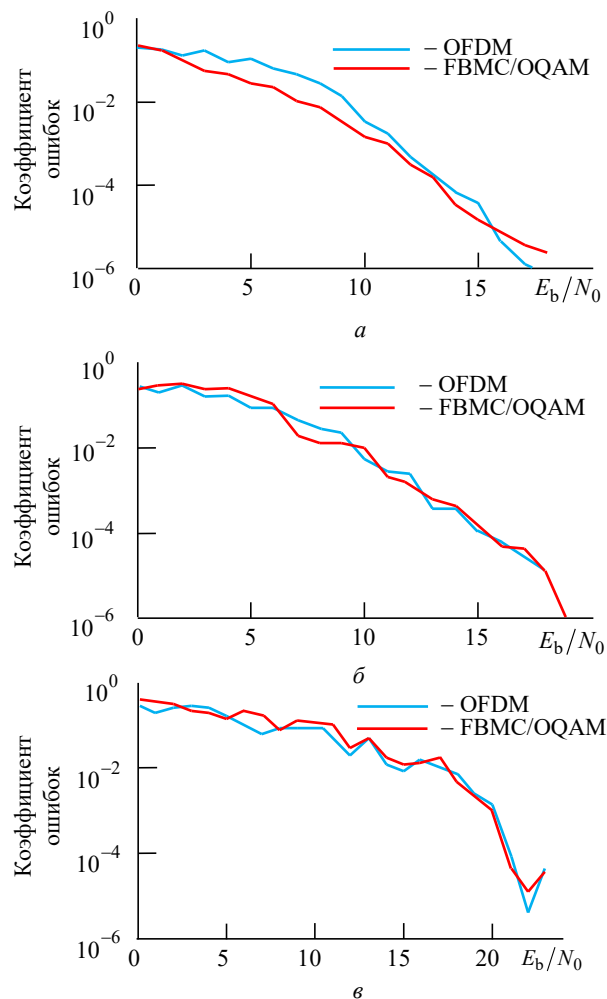


Рис. 12. Зависимость коэффициента ошибок от отношения энергии, приходящейся на бит информации, к мощности шума: a – канал № 1; b – канал № 2; c – канал № 3

Fig. 12. Bit error rate against E_b/N_0 : a – channel № 1; b – channel № 2; c – channel № 3

было рассчитано отношение сигнал/шум в следующем виде:

$$\text{SNR} = \frac{\sum_{n=1}^N x_n^2}{N} \bigg/ \frac{\sum_{n=1}^N (x_n - y_n)^2}{N} = \frac{\sum_{n=1}^N x_n^2}{\sum_{n=1}^N (x_n - y_n)^2},$$

где SNR – отношение сигнал/шум; N – общее число символов; x_n и y_n – переданные и эквалайзированные символы. Отношение энергии бита, приходящейся на один бит информации в символе, к мощности шума равно:

$$E_b/N_0 = \text{SNR} - 10 \lg[\log_2 M] + \\ + 10 \lg_{10}(NFFT/N_{\text{sym}}),$$

где M – индекс модуляции (количество точек в созвездии); $NFFT$ – размерность преобразования Фурье; N_{sym} – количество информационных поднесущих.

Полученные в результате эксперимента зависимости коэффициента ошибок от отношения энергия бита/шум показаны на рис. 12. На графиках также представлены результаты экспериментального исследования системы OFDM-CP с аналогичными параметрами (полоса, индекс модуляции, количество информационных поднесущих, шаг расположения пилотов и тип интерполяции). Разница в энергоэффективности обусловлена характером канала распространения радиоволн рассмотренных сценариев.

Закключение. Результаты эксперимента показали, что система передачи на основе FBMC/OQAM может работать в условиях многолучевого распространения радиоволн. Коэффициент ошибок системы сопоставим с широко используемой в настоящее время OFDM с цикличе-

ским префиксом. При этом FBMC/OQAM обеспечивает большую спектральную эффективность по двум причинам. Во-первых, в ней отсутствует временной защитный интервал в виде циклического префикса. Во-вторых, очень низкое внеполосное излучение позволяет повысить количество используемых поднесущих в полосе. Используемый в эксперименте кадр FBMC/OQAM с обеих сторон имеет переходную зону, поэтому малая длина кадра ухудшает спектральную эффективность. Поскольку спектральная эффективность растет с увеличением кадра, в системах связи на основе FBMC/OQAM целесообразно использовать кадры максимально возможной длины при передаче. Моделирование показало, что при текущих параметрах сигнала и длине кадра 200 символов выигрыш в спектральной эффективности относительно LTE составит около 5 % для короткого префикса и около 20 % для длинного. Можно достичь большего значения, если уменьшить защитные полосы в спектре в соответствии с требованиями спектральной маски ACLR (Adjacent Channel Leakage Ratio, коэффициент утечки в соседний канал).

Авторский вклад

Абенов Ренат Рамазанович – постановка задачи, проведение компьютерного моделирования, подготовка и проведение эксперимента, обработка и анализ результатов.

Рогожников Евгений Васильевич – обеспечение возможности проведения эксперимента, обсуждение результатов.

Крюков Яков Владимирович – планирование эксперимента, обсуждение результатов.

Покаместов Дмитрий Алексеевич – планирование эксперимента, обсуждение результатов.

Абенова Перизат Аяновна – проведение эксперимента, подготовка и оформление текста публикации.

Author's contribution

Renat R. Abenov, statement of the problem, computer simulation, carrying out of experiment, processing and analysis of the results.

Evgeny V. Rogozhnikov, assistance in organizing the experiment and discussion of the results.

Yakov V. Kryukov, experiment planning and discussing of the results.

Dmitriy A. Pokamestov, experiment planning and discussing of the results.

Perizat A. Abenova, carrying out of experiment, preparation of the paper text.

Список литературы

1. Siohan P., Siclet C., Lacaille N. Analysis and design of OFDM/OQAM systems based on filterbank theory // IEEE transactions on signal processing. 2002. Vol. 50, № 5. P. 1170–1183. doi: 10.1109/78.995073

2. Bolcskei H., Duhamel P., Hleiss R. Design of pulse shaping OFDM/OQAM systems for high data-rate transmis-

sion over wireless channels // 1999 IEEE Intern. Conf. on Communications. Vancouver, Canada, 6–10 June 1999. Vol. 1. P. 559–564. doi: 10.1109/ICC.1999.768001

3. FBMC physical layer: a primer / M. Bellanger, D. LeRuyet, D. Roviras et al. // PHYDYAS. 2010. Vol. 25, no. 4. P. 7–10.

4. Hidalgo Stitz T. Filter Bank Techniques for the Physical Layer in Wireless Communications. Tampere: Tampere University of Technology, 2010. 178 p.
5. A survey: Several technologies of non-orthogonal transmission for 5G / T. Yunzheng, L. Long, L. Shang, Zh. Zhi // China communications. 2015. Vol. 12, № 10. P. 1–15. doi: 10.1109/CC.2015.7315054
6. Schaich F., Wild T. Waveform contenders for 5G – OFDM vs. FBMC vs. UFMC // 2014 6th Intern. Symp. on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP). Athens, Greece, 21–23 May 2014. IEEE, 2014. P. 457–460. doi: 10.1109/ISCCSP.2014.6877912
7. FBMC/OQAM Equalization Scheme with Linear Interpolation / R. R. Abenov, D. A. Pokamestov, E. V. Rogozhnikov, Ya. A. Demidov, Ya. V. Kryukov // 2019 Intern. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Novosibirsk, 2019. P. 0130–0133. doi: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958090
8. Preamble-based channel estimation techniques for OFDM/OQAM over the powerline / C. Lele, P. Siohan, R. Legouable, J.-P. Javardin // 2007 IEEE Intern. Symp. on Power Line Communications and Its Applications. Pisa, Italy, 26–28 March 2007. IEEE, 2007. P. 59–64. doi: 10.1109/ISPLC.2007.371098
9. Channel estimation methods for preamble-based OFDM/OQAM modulations / C. Lele, J.-P. Javardin, R. Legouable, A. Skrzypczak, P. Siohan // European Transactions on Telecommunications. 2008. Vol. 19, № 7. P. 741–750. doi: 10.1002/ett.1332
10. Preamble-based channel estimation in OFDM/OQAM systems: A review / E. Kofidis, D. Katselis, A. Rontogiannis, S. Theodoridis // Signal processing. 2013. Vol. 93, № 7. P. 2038–2054. doi: 10.1016/j.sigpro.2013.01.013
11. Калашников К. С., Шахтарин Б. И. Синхронизация OFDM-сигналов во временной и частотной областях // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2011. № 1. С. 18–27.
12. He X., Zhao Z., Zhang H. A pilot-aided channel estimation method for FBMC/OQAM communications system // 2012 Intern. Symp. on Communications and Information Technologies (ISCIT). Gold Coast, Australia, 2–5 Oct. 2012. IEEE, 2012. P. 175–180. doi: 10.1109/ISCIT.2012.6380885.
13. Проблемы оценки канала в системе с частотным мультиплексированием с использованием банка фильтров / Р. Р. Абенов, Е. В. Рогожников, Д. А. Покаместов, Я. В. Крюков, А. Я. Демидов // Вестн. СибГУТИ. 2018. № 1. С. 72–78.
14. Бочечка Г. С. Методы оценки канала, основанные на встраиваемых пилот сигналах, в системах OFDM // T-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2009. № 3. С. 38–42.
15. Farrukh F., Baig S., Mughal M. J. Performance comparison of DFT-OFDM and wavelet-OFDM with zero-forcing equalizer for FIR channel equalization // 2007 Intern. Conf. on Electrical Engineering. Lahore, Pakistan, 11–12 Apr. 2007. IEEE, 2007. P. 1–5. doi: 10.1109/ICEE.2007.4287350
16. Minimum BER block precoders for zero-forcing equalization / Y. Ding, T. N. Davidson, Z.-Q. Luo, K. M. Wong // IEEE Transactions on Signal Processing. 2003. Vol. 51, № 9. P. 2410–2423. doi: 10.1109/TSP.2003.815387
17. Исследование методов эквалайзирования для систем связи с использованием OFDM-сигналов / Р. Р. Абенов, А. С. Вершинин, Е. П. Ворошилин, Е. В. Рогожников // Вестн. СибГУТИ. 2013. № 1. С. 50–56.
18. Andrews J. G., Ghosh A., Muhamed R. Fundamentals of WiMax: understanding broadband wireless networking. Westford: Prentice Hall, 2007. 449 p.

Информация об авторах

Абенов Ренат Рамазанович – кандидат технических наук (2021), доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов, информационные и телекоммуникационные системы, цифровая связь.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: abenov.rr@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6688-289X>

Рогожников Евгений Васильевич – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 91 научной работы. Сфера научных интересов – телекоммуникации, системы беспроводной связи, интернет вещей.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: udzhon@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7599-0393>

Крюков Яков Владимирович – кандидат технических наук (2018), доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – беспроводная многоканальная связь, неортогональный множественный доступ.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: kryukov.tusur@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4115-9080>

Покаместов Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук (2018), доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 40 научных работ. Сфера научных интересов – методы множественного доступа, помехоустойчивое кодирование, цифровая обработка сигналов.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: dmaltomsk@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9405-4573>

Абеннова Перизат Аяновна – магистр техники и технологий по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2018), аспирант кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 3 научных работ. Сфера научных интересов – информационные и телекоммуникационные системы, цифровая связь, цифровая обработка сигналов.

Адрес: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, д. 40, Томск, 634050, Россия

E-mail: abenova.pa@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3560-0842>

References

1. Siohan P., Siclet C., Lacaille N. Analysis and design of OFDM/OQAM systems based on filterbank theory. *IEEE transactions on signal processing*. 2002, vol. 50, no. 5, pp. 1170–1183. doi: 10.1109/78.995073
2. Bolcskei H., Duhamel P., Hleiss R. Design of pulse shaping OFDM/OQAM systems for high data-rate transmission over wireless channels. 1999 IEEE Intern. Conf. on Communications. Vancouver, Canada, 6–10 June 1999, vol. 1, pp. 559–564. doi: 10.1109/ICC.1999.768001
3. Bellanger M., LeRuyet D., Roviras D. et al. FBMC physical layer: a primer. *PHYDYAS*. 2010, vol. 25, no. 4, pp. 7–10.
4. Hidalgo Stitz T. Filter Bank Techniques for the Physical Layer in Wireless Communications. Tampere, Tampere University of Technology, 2010, 178 p.
5. Yunzheng T., Long L., Shang L., Zhi Zh. A survey: Several technologies of non-orthogonal transmission for 5G. *China communications*. 2015, vol. 12, no. 10, pp. 1–15. doi: 10.1109/CC.2015.7315054
6. Schaich F., Wild T. Waveform contenders for 5G – OFDM vs. FBMC vs. U-FMC. 2014 6th Intern. Symp. on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP). Athens, Greece, 21–23 May 2014. IEEE, 2014, pp. 457–460. doi: 10.1109/ISCCSP.2014.6877912
7. Abenov R. R., Pokamestov D. A., Rogozhnikov E. V., Demidov Ya. A., Kryukov Ya. V. FBMC/OQAM Equalization Scheme with Linear Interpolation. 2019 Intern. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). Novosibirsk, Russia, 2019, pp. 0130–0133. doi: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958090
8. Lele C., Siohan P., Legouable R., Javaudin J.-P. Preamble-based channel estimation techniques for OFDM/OQAM over the powerline. 2007 IEEE Intern. Symp. on Power Line Communications and Its Applications. Pisa, Italy, 26–28 March 2007. IEEE, 2007, pp. 59–64. doi: 10.1109/ISPLC.2007.371098
9. Lele C., Javaudin J.-P., Legouable R., Skrzypczak A., Siohan P. Channel estimation methods for preamble-based OFDM/OQAM modulations. *European Transactions on Telecommunications*. 2008, vol. 19, no. 7, pp. 741–750. doi: 10.1002/ett.1332
10. Kofidis E., Katselis D., Rontogiannis A., Theodoridis S. Preamble-based channel estimation in OFDM/OQAM systems: A review. *Signal processing*. 2013, vol. 93, no. 7, pp. 2038–2054. doi: 10.1016/j.sigpro.2013.01.013
11. Kalashnikov K. S., Shakhtarin B. I. Synchronization of OFDM Signals in Time and Frequency Domains. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering*. 2011, no. 1, pp. 18–27. (In Russ.)
12. He X., Zhao Z., Zhang H. A pilot-aided channel estimation method for FBMC/OQAM communications system. 2012 International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). Gold Coast, Australia, 2–5 Oct. 2012. IEEE, 2012, pp. 175–180. doi: 10.1109/ISCIT.2012.6380885.
13. Abenov R. R., Rogozhnikov E. V., Pokamestov D. A., Kryukov Ya. V., Demidov A. Ya. Channel estimation problems in FBMC systems. *Vestnik SibGUTI*. 2018, no. 1, pp. 72–78. (In Russ.)

14. Bochechka G. S. Embedded Pilot Channel Estimation Techniques in OFDM Systems // T-Comm – Telecommunications and Transport. 2009, no. 3, pp. 38–42. (In Russ.)

15. Farrukh F., Baig S., Mughal M. J. Performance comparison of DFT-OFDM and wavelet-OFDM with zero-forcing equalizer for FIR channel equalization. 2007 International Conf. on Electrical Engineering. Lahore, Pakistan, 11–12 April 2007. IEEE, 2007, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICEE.2007.4287350

16. Ding Y., Davidson T. N., Luo Z.-Q., Wong K. M. Minimum BER block precoders for zero-forcing equalization. IEEE

Transactions on Signal Processing. 2003, vol. 51, no. 9, pp. 2410–2423. doi: 10.1109/TSP.2003.815387

17. Abenov R. R., Rogozhnikov E. V., Vershinin A. S., Voroshilin E. P. Research of equalization methods for the communication systems using OFDM signals. *Vestnik SibGUTI*. 2013, no. 1, pp. 50–56.

18. Andrews J. G., Ghosh A., Mueyamed R. Fundamentals of WiMax: understanding broadband wireless networking. Westford, USA, Prentice Hall, 2007, 449 p.

Information about the authors

Renat R. Abenov, Can. Sci. (Eng.) (2021), Associate Professor at the Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering Department of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 20 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing, information and telecommunication systems, digital communication.

Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina pr., Tomsk 634050, Russia

E-mail: abenov.rr@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6688-289X>

Evgeny V. Rogozhnikov, Can. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor at the Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering Department of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 91 scientific publications. Area of expertise: telecommunication, wireless communication system, internet of things.

Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina pr., Tomsk 634050, Russia

E-mail: udzhon@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7599-0393>

Yakov V. Kryukov, Can. Sci. (Eng.) (2018), Associate Professor at the Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering Department of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: wireless mesh networks, non-orthogonal multiple access.

Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina pr., Tomsk 634050, Russia

E-mail: kryukov.tusur@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4115-9080>

Dmitriy A. Pokamestov, Can. Sci. (Eng.) (2018), Associate Professor at the Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering Department of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 40 scientific publications. Area of expertise: multiple access techniques, noiseless coding, digital signal processing.

Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina pr., Tomsk 634050, Russia

E-mail: dmaltomsk@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9405-4573>

Perizat A. Abenova, Master of Engineering (2018), Post-Graduate Student at the Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering Department of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: information and telecommunication systems, digital communication, digital signal processing.

Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina pr., Tomsk 634050, Russia

E-mail: abenova.pa@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3560-0842>