

УДК 681.51

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-4-18-30>

## Выбор и использование программной архитектуры действующего протокола передачи данных программно-конфигурируемого радиоканала

О. В. Воробьев, А. И. Рыбаков✉

Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
пр. Большевиков, 22, корп. 1, Санкт-Петербург, 193232, Россия

✉ [lexeus.r1@gmail.com](mailto:lexeus.r1@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Помехозащищенное кодирование используется во многих системах связи для обеспечения приемлемого уровня производительности. Особенность использования – во включении избыточных символов в закодированный пакет, что требует большего времени передачи и существенно большую пропускную способность канала, чем при передаче некодированного пакета. Перспективным здесь является программное изменение конфигурации системы радиосвязи и разработка протоколов связи для обеспечения максимального коэффициента загрузки канала при обеспечении приемлемого уровня производительности.

**Цель работы.** Повышение производительности радиосистемы путём совершенствования протоколов связи, решение вопроса обеспечения максимальной загрузки канала при формировании и приеме сигналов.

**Материалы и методы.** В работе приводится описание и структура протокола, разработанного авторами и примененного в части программного обеспечения (ПО) управления приемопередающего модуля системы ионосферной радиосвязи. ПО разрабатывается в кроссплатформенной программной среде LabView на языке VHDL и проходит исследования на имитационной модели радиоинтерфейса.

**Результаты.** Исследована корректирующая способность кодов, для случая аддитивного гауссовского канала с двоичной фазовой модуляцией (OFDM-модуляция совместно с абсолютной фазовой манипуляцией 2PSK и 4PSK) для выбора энергоэффективного подхода к проектированию системы ионосферной радиосвязи. Разработана структура и функциональное описание протокола, используемого в ПО для имитационной модели программно-конфигурируемого радиоканала. Работа ПО осуществляется в ОС Windows 7 и более поздних версиях с разрядностью x32/x64 под управлением пакета MS VisualC++. Показано, что разработанное ПО может задействовать аппаратные и программные средства управления приемопередающего модуля, включающего трансивер SunSDR2 и антенный усилитель.

**Заключение.** Полученные результаты позволяют заменить отдельно настраиваемые радиоприемники и трансиверы, построенные по сложной супергетеродинной схеме, на ограниченное число аппаратных блоков, работающих под управлением разработанного ПО. В дальнейшем планируется провести исследования по оценке прохождения сигналов OFDM через многолучевые каналы связи с замираниями Релея и Райса. Получаемая модель позволит оценить помехоустойчивость при различной длине циклического префикса OFDM символа и пронаблюдать за поведением сигнального созвездия при воздействии различных нестабильностей.

**Ключевые слова:** схемы кодирования, схемы декодирования, система связи, канал передачи, программное обеспечение, сигнально-кодовые конструкции, широковещательный протокол, полудуплексный протокол

**Для цитирования:** Воробьев О. В., Рыбаков А. И. Выбор и использование программной архитектуры действующего протокола передачи данных программно-конфигурируемого радиоканала // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 4. С. 18–30. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-18-30

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.04.2019; принята к публикации после рецензирования 24.05.2019; опубликована онлайн 27.09.2019

© Воробьев О. В., Рыбаков А. И., 2019



## Selection and Application of the Data Transfer Operating Protocol Software Architecture for the Software-Defined Radio

Oleg V. Vorobyov, Alexey I. Rybakov✉

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications  
22/1, Pr. Bolshhevikov, St Petersburg, 193232, Russia

✉ lexus.r1@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Noise-proof coding is used in many communication systems to provide an acceptable level of performance. A particular feature of its use is the inclusion of redundant characters in a coded packet. It demands more transfer time and essentially better throughput of the channel than in the case of an uncoded packet transferring. A promising development is a software change in the configuration of radio communication system and the development of communication protocols. This is done to ensure the maximum load factor of the channel while ensuring an acceptable level of performance.

**Objective.** To improve radio system performance by updating communication protocols, in order to solve the problem of ensuring maximum channel load during signal formation and reception.

**Materials and methods.** The paper describes the structure of the protocol developed by the authors. It is applicable in software to control ionospheric radio communication system transceiver modules. The software was developed in LabView (VHDL language) cross-platform software environment and was studied by means of a radio interface simulation model.

**Results.** The study examined the corrective ability of codes in the case of a supplementary Gaussian channel with binary phase modulation (OFDM-modulation, 2PSK and 4PSK absolute phase manipulation) in the selection of an energy-efficient approach to the design of ionospheric radio communication system. The study developed the structure and the functional description of the protocol used in the software for the simulation model of software-configurable radio channel. The software operation can be carried out in Windows 7 and in later versions with bit depth x32/x64 under the MS VisualC++package. It was shown that the software thus developed can use the hardware and software controls of the transceiver module. SunSDR2 transceiver and antenna amplifier were included in the module.

**Conclusion.** The results obtained allow for the replacement of separately adjusted radio receivers and transceivers built on a complex super-heterodyne scheme. A limited number of hardware units operate under the control of the developed software. Further studies will be carried out to assess the passage of OFDM signals through multipath communication channels with Rician and Rayleigh fading. The resulting model will allow for the assessment of noise immunity at different lengths of the cyclic prefix OFDM symbol and for observation of signal constellation behaviour under the influence of various instabilities.

**Key words:** coding schemes, decoding schemes, communication system, transmission channel, software, signal-code structures, broadcast protocol, half-duplex protocol

**For citation:** Vorobyov O. V., Rybakov A. I. Selection and Application of the Data Transfer Operating Protocol Software Architecture for the Software-Defined Radio. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 4, pp. 18–30. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-18-30

**Conflict of interest.** The author declares no conflict of interest.

Submitted 21.04.2019; accepted 24.05.2019; published online 27.09.2019

**Введение.** Тот факт, что ионизированные следы метеоров, входящих в земную атмосферу, могут отражать радиосигналы, был известен с начала 30-х гг. XX в., когда Пикард (Pickard) заметил, что вспышки высокочастотного излучения происходят во время метеоритных дождей [1]. В 1935 г.

Скеллет (Skellet) обнаружил, что ионизированный след, оставляемый метеором при сгорании в земной атмосфере, может быть использован для отражения радиосигналов в направлении на землю [2].

Ранее способа обнаружить и использовать ионизированный (метеорный) след прежде, чем

он рассеется, не существовало, поэтому метеорная связь была редкостью, иногда используемой радиолюбителями и имевшей очень малое практическое применение. Появление современных недорогих технологий и высокоскоростного цифрового оборудования привело к резким изменениям технологии метеорной связи, которая стала коммерчески доступна. В отличие от других средств передачи она может предоставлять связь "за пределы прямой видимости" (Extend Line Of Site).

Обычно сеть приемопередатчиков метеорной связи состоит из одной или нескольких базовых станций и некоторого числа удаленных терминалов. Базовые станции поддерживают связь с удаленными терминалами и другими базовыми станциями. Терминалы поддерживают связь только с базовыми станциями. Связь одного терминала с другим может быть осуществлена через базовую станцию. Когда соответствующий след обнаружен и его "качество" определено, часть оцифрованных данных передается коротким импульсом. Существование следа определяется приемом тестового сигнала, переданного базовой станцией или другим терминалом сети. Когда терминал принимает тестовый сигнал, он передает подтверждение базовой станции, показывая, что след существует и терминал готов к обмену данными. Время на этот обмен жертвуется в пользу надежности системы [3, 4].

Для поддержания связи в обстановке существенного изменения условий распространения сигнала, связанного с быстрым изменением параметров метеорного следа, параметры и форматы кодирования передаваемых сигналов должны оперативно изменяться. Для этой цели в рассматриваемых радиосистемах предусмотрено программное изменение конфигурации, поэтому они относятся к программно-определяемым радиосистемам.

Целью исследовательской работы, результаты которой представлены в настоящей статье, явилось исследование существующих методов модуляции/демодуляции и последующей цифровой обработки сигналов, накладывающих требования на аппаратуру станций сети и алгоритмы работы системы, для определения наиболее целесообразного и энергоэффективного пути разработки технических средств (в том числе создания программного обеспечения (ПО)), способных удовлетворить максимальному числу возможных применений каналов радиодоступа.

Авторами настоящей статьи сделана ставка на использование OFDM-модуляции совместно с абсолютной фазовой манипуляцией (2PSK и 4PSK) в подканалах. Помимо [5] на выбор такого способа модуляции повлияло изучение работы популярного стандарта цифровой сетевой связи IEEE 802.11a, входящего в состав коммерческого стандарта "Wi-Fi". Несмотря на различающиеся на несколько порядков диапазоны, при соответствующем масштабировании выясняется, что условия работы обеих систем очень похожи. Кроме того, были приняты во внимание уже существующие стандарты [6], любительские системы типа WinLink и морские цифровые и аналоговые информационные системы в части, касающейся "физического" и "канального" уровней. Кроме того, использованы и другие научно-технические публикации [3].

Перейдем к рассмотрению описываемого варианта построения программно-конфигурируемого радиоканала, начав с представления об используемой схеме модуляции.

**Схема модуляции.** Для передачи информации по радиоканалу используются частотно-манипулированные (frequency shift keying – FSK) сигналы. К проектируемому программно-конфигурируемому каналу связи, работающему в режиме передачи "поточковой" информации, предъявлялись следующие требования:

- значение пик-фактора равно 1, что позволяет максимально использовать усилители сигналов;
- помехоустойчивость приема является приемлемой для предполагаемых значений отношения сигнал/шум;
- реализация имеет невысокую сложность.

Схема модулятора FSK-сигналов представлена на рис. 1, она же с применением узлов z-преоб-

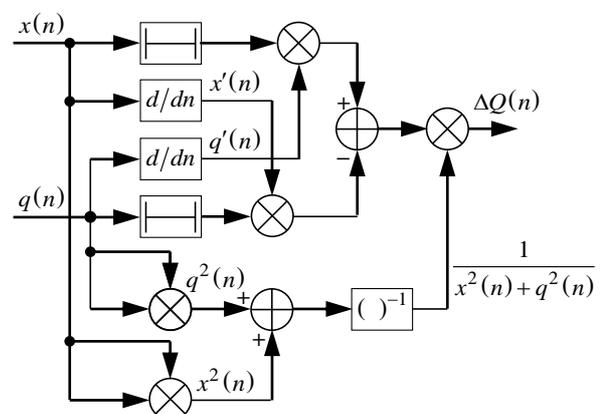


Рис. 1. Схема модулятора FSK-сигналов

Fig. 1. FSK signals modulation circuit

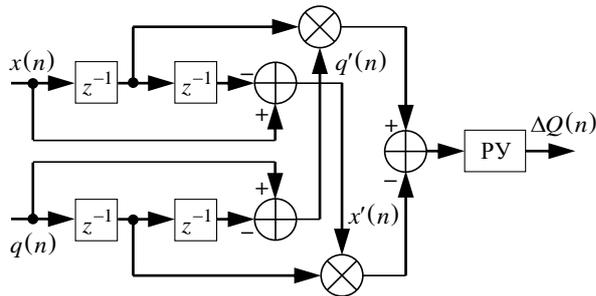


Рис. 2. Схема модулятора FSK-сигналов с применением узлов  $z$ -преобразования

Fig. 2. FSK signals modulation circuit with  $z$ -wave nodes

разования – на рис. 2. Скорость передачи информации находится в пределах  $10^2 \dots 10^4$  бит/с. Полоса занимаемых частот (в герцах) численно равна удвоенному значению этого параметра.

Потоки квадратурных составляющих  $x(n)$  и  $q(n)$  ( $n$  – порядковый номер временного дискрета) поступают на блоки сложения, задержки и перемножения. На завершающем этапе результат передается на решающее устройство ПУ [6].

В демодуляторе канала связи обработка сигнала реализуется по алгоритму, оптимальному для принятых методов модуляции и кодирования.

**Схема кодирования. Кодовая конструкция.** В [3] показано, что симметричный по выходу канал без памяти с двоичным входом, характеризующийся условной плотностью распределения  $W(y|c)$  принятого сигнала  $y$  при переданном символе  $c$ , в сочетании с преобразованием, описываемым матрицей  $G_N$ , задает семейство из  $N$  подканалов передачи, характеризующихся условными распределениями:

$$W(\mathbf{y}_0^{N-1}, \mathbf{u}_0^{i-1} | u_i) = \frac{1}{2^{N-1}} \sum_{u_j \in \{0, 1\}} W[y_s | (\mathbf{u}_0^{N-1} G_N)_s], \quad (1)$$

$$0 \leq i < N, \quad i < j < N,$$

где  $\mathbf{y}_0^{N-1} = (y_0, K, y_{N-1})$  – входной вектор принятого сигнала;  $\mathbf{u}_0^{N-1} = (u_0, K, u_{N-1})$  – входной вектор поляризующего преобразования;  $u_i, u_j$  – информационные символы;  $i$  – номер канала;  $j$  – фаза декодирования; нижний индекс  $s$  обозначает принимаемый сигнал.

Далее рассмотрим указанное преобразование на примере кодовой конструкции с использовани-

ем полярных кодов. Полярные коды [5] представляют собой коды с порождающей матрицей, состоящей из строк матрицы

$$G_N = B_N F^{\otimes m} = F^{\otimes m} B_N,$$

где  $N = 2^m$ ;  $m$  – логарифм по основанию 2 длины неукороченного полярного кода с динамически замороженными символами;  $B_N$  – перестановочная матрица обращения бит с размерами  $2^m \times 2^m$ ;

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix};$$

$\otimes m$  – символ  $m$ -кратного кронекеровского произведения матрицы с собой. На позициях, соответствующих динамически замороженным символам, вычисляются заданные линейные комбинации входных символов  $u_i$ . Производится перестановка обращения бит, т. е. умножение на матрицу  $B_N$ . Из полученного вектора исключаются неактивные символы.

Кодовое слово такого кода имеет вид  $\mathbf{c}_0^{N-1} = \mathbf{u}_0^{N-1} G_N$ . Информационные биты, предназначенные для передачи, составляют  $k$  элементов вектора, а оставшиеся элементы вычисляются в соответствии с процедурой, приводимой далее. С ростом  $m$  эти подканалы поляризуются, т. е. их параметры Бхаттачарьи\*  $Z_i$  сходятся к 0 и 1.

Будем передавать полезные данные без кодирования по виртуальным подканалам, характеризующимся значениями  $Z_i \approx 0$ , в то время как по подканалам с  $Z_i \approx 1$  будем передавать некоторые predetermined значения. Подканалы с  $Z_i \approx 1$  называются замороженными (как и соответствующие символы  $u_i$ ), и в классических полярных кодах по ним передаются нули ( $u_i = 0$ ). Порождающая матрица классического полярного кода получается вычеркиванием из матрицы  $G_N$  строк, соответствующих замороженным подканалам. Отметим, что если параметр Бхаттачарьи исходного канала передачи информации достаточно

\* Параметр Бхаттачарьи канала с двоичным входом является оценкой сверху для удвоенной вероятности ошибки на бит при передаче по этому каналу данных без кодирования.

мал, то справедлива оценка  $Z_i = 0 \lceil Z^{wt(i)} \rceil$ , где  $wt(i)$  – число ненулевых бит в двоичном представлении числа  $i$ .

Для надежной передачи данных по каналу используем полярные коды с динамически замороженными символами (ПКДЗС) [6], т. е. вместо нулей по замороженным подканалам будем передавать линейные комбинации предыдущих символов. Такие коды имеют большее минимальное расстояние по сравнению с классическими. Выражения для линейных комбинаций называются ограничениями динамической заморозки [6]:

$$\mathbf{u}_0^{N-1} G_N H^T Q = \mathbf{u}_0^{N-1} V^T = 0,$$

где  $H$  – некоторая проверочная матрица с размерами  $f \times n$  расширенного примитивного циклического кода Боуза–Чоудхури–Ходвингема (БЧХ);  $Q$  – обратимая матрица, такая, что  $i$ -я строка матрицы  $V$  размещается в столбце  $t_i$ , все  $t_i$  различны и  $V_{i, t_i} = 1$ , причем  $f \leq n - k$  ( $n$  – длина кода (количество кодовых символов));  $k$  – размер кода (количество информационных символов); "Т" – символ транспонирования. Таким образом, символ  $u_{t_i}$  может быть вычислен как линейная комбинация символов с меньшими номерами и потому называется динамически замороженным символом.

Известно [5], что всякий расширенный примитивный код БЧХ в узком смысле является подкодом некоторого кода Рида–Маллера длины  $n = 2^m$  и порядка  $r \leq m$ . Последнее условие может рассматриваться как полярный код, множество индексов замороженных символов которого состоит из всех чисел  $i: wt(i) < m - r$ . Таким образом, замороженными оказываются все подканалы, параметр Бхаттачарьи которых убывает достаточно медленно с уменьшением параметра  $Z$  исходного канала передачи информации. Этого, однако, не достаточно для обеспечения приемлемой вероятности ошибки декодирования. Поэтому оставшиеся  $n - k - f$  битовых подканалов с наибольшей вероятностью ошибки  $P_i$  замораживаются статически, т. е. на них налагаются ограничения  $u_i = 0$ .

Исходя из проведенного рассмотрения, добавим условие: пусть  $F$  – множество статически и дина-

мически замороженных символов, тогда полученный код является подкодом расширенного кода БЧХ.

Описанные полярные коды имеют длину  $2^m$ , что не всегда удовлетворяет практическим требованиям. Поэтому для дальнейшего представления алгоритма будем использовать коды длины  $n \leq 2^m$ . Необходимым условием унификации является укорочение кода – понижение размерности и длины кода введением дополнительных ограничений вида  $c_i = 0$  на некоторые символы исходного кодового слова. Кодовые слова укороченного кода получаются исключением таких ("неактивных") символов.

Рассмотрим описание используемых кодов, представляющее собой текстовый файл следующего формата. В первой строке через пробел указываются параметры  $m, k, d, n$  ( $d$  – минимальное расстояние кода).

Если  $n = 2^m$  (код не укорочен), то следующая строка опускается. В противном случае в ней перечисляются номера "активных" (т. е. потенциально ненулевых) символов кодового слова.

В последующих строках приводятся ограничения динамической заморозки, задающие код. В начале каждой строки указано количество символов  $w$ , входящих в ограничение. Далее следует список индексов  $i_0, i_0, K, i_{w-1}$  символов, участвующих в ограничении:

$$\sum_{j=0}^{w-1} u_{i_j} = 0.$$

Символ с наибольшим номером  $i_j$  считается (динамически) замороженным. Биты, предназначенные для передачи, распределяются по входному вектору поляризующего преобразования  $\mathbf{u}_0^{N-1}$ . На позициях, соответствующих динамически замороженным символам, вычисляются заданные линейные комбинации входных символов  $u_i$ . Умножением на матрицу  $B_N$  выполняется перестановка обращения бит. Полученный вектор умножается на матрицу  $F^{\otimes m}$ . Из полученного вектора исключаются неактивные символы.

Рис. 3 иллюстрирует корректирующую способность (возможность кода обнаруживать и/или исправлять ошибку максимальной кратности) ПКДЗС (256, 180, 14), построенного в соответ-

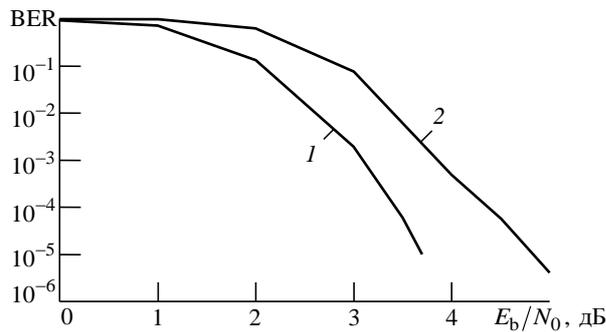


Рис. 3. Корректирующая способность кодов

Fig. 3. Codes error correction capability: 1 – polar code with dynamic frozen symbols (256, 180, 14); 2 – low-density parity-check code

ствии с методом, описанным в [3] (кривая 1), в сравнении с кодом с малой плотностью проверок на четность [7] (кривая 2) для случая аддитивного гауссовского канала с двоичной фазовой модуляцией. Видно, что полярный код обеспечивает энергетический выигрыш около 1 дБ, что достигается за счет большего минимального расстояния ПКДЗС.

**Алгоритм декодирования.** Разберем вариант реализации радиоканала, для чего рассмотрим алгоритм декодирования на приемной стороне.

В канале ионосферной связи мощность принимаемого сигнала существенно изменяется во времени. В связи с этим возникает необходимость адаптации параметров передачи, таких, как соотношение информационных символов (бит) и дополнительных бит в случае избыточного помехозащищенного кодирования, или скорости передачи, требующая выполнения следующих условий:

1) быстрой и точной оценки характеристик канала;

2) допустимых затрат на адаптивность.

Для задания кода  $\mathbf{u}$ , следовательно, для вычисления контрольных символов по известным информационным можно использовать один из способов задания подпространства размера  $k$  в пространстве размера  $n$ . Напомним, что задание пространства предполагает и задание поля, откуда берутся коэффициенты разложения вектора по базису (координаты вектора). Рассмотренные ранее коды, кроме кода Рида–Соломона, заданы над двоичным полем, а последний – над расширением двоичного поля, имеющим количество элементов, совпадающее с размером вектора  $\mathbf{y}_0^{N-1}$ .

Пусть на приемной стороне принят вектор  $\mathbf{y}_0^{N-1}$ , характеризующий информационное сообщение. Для точного распознавания принятого информационного сообщения необходимо и достаточно использовать последовательный алгоритм декодирования, состоящий из следующих шагов:

Шаг 1. В приоритетную очередь\* добавляется путь нулевой длины и вероятности  $\Omega(0)$ . Функция

$$\Omega(i) \approx \prod_{\substack{j < i, \\ j \in F}} (1 - P_j)$$

характеризует вероятность неправильного принятия решения относительно символа  $u_i$  при известных значениях ранее принятых символов ( $P_j$  – вероятность ошибки при приеме ранее переданного  $j$ -го символа ( $j < i, j \in F$ )). Значения  $P_j$  вычисляются с помощью метода гауссовской аппроксимации [5].

Шаг 2. Из приоритетной очереди выбирается путь в кодовом дереве  $\mathbf{u}_0^{N-1}$  с наибольшей оценкой вероятности  $W(\mathbf{u}_0^{i-1} | \mathbf{y}_0^{N-1})$ . Если длина этого пути равна  $N$ , то соответствующее кодовое слово считается сформированным и декодер завершает работу.

Если символ  $u_i$  является (динамически) замороженным, вычисляется его значение согласно (1). В противном случае далее отдельно рассматриваются случаи  $u_i = 0$ ,  $u_i = 1$ . Вычисляются оценки вероятности наиболее правдоподобного кодового слова  $\mathbf{u} B_m G_N$  полярного кода, задаваемого вектором  $\mathbf{u}$  с префиксом  $\mathbf{u}_0^i$ :

$$W(\mathbf{u}_0^{i-1} | \mathbf{y}_0^{N-1}) = P(\mathbf{u}_0^{i-1} | \mathbf{y}_0^{N-1}) \Omega(i).$$

Векторы  $\mathbf{u}_0^i$  помещаются в приоритетную очередь.

Шаг 3. Если количество путей  $\mathbf{u}_0^{i-1}$  длины  $i$ , когда-либо извлеченных декодером, превышает заданный порог  $L$ , из приоритетной очереди удаляются все пути длины  $i$  и менее. Если количество путей в приоритетной очереди превышает некоторый параметр  $\Theta$ , пути с наименьшими значениями  $W(\mathbf{u}_0^{i-1} | \mathbf{y}_0^{N-1})$  удаляются, после чего происходит возврат на шаг 2.

\* Приоритетная очередь – структура данных типа очереди, в которой каждому элементу присвоен приоритет.

При увеличении значений параметров  $L$  и  $\Theta$  вероятности ошибки уменьшаются с одновременным увеличением сложности декодирования. При достаточно больших значениях этих параметров реализуется декодирование почти по максимуму правдоподобия.

В некоторых случаях возвращаемое алгоритмом кодовое слово не является наиболее правдоподобным. Как правило, это происходит вследствие отбрасывания правильного пути на шаге 3, что сопровождается резким увеличением числа итераций, выполняемых декодером. Это можно использовать для обнаружения ошибки декодирования: декодер возвращает флаг ошибки, если число итераций рассмотренного алгоритма превышает некоторое пороговое значение, зависящее от кода.

Описанный алгоритм обеспечивает принятие решений по качественному использованию канального ресурса с достаточным уровнем правдоподобия и надежности передачи информации, заключенной в описанной кодовой конструкции. Перейдем к рассмотрению ПО, реализующего рассмотренный алгоритм.

**Протоколы передачи.** Рассмотрим действующие протоколы передачи, необходимые для корректной работы проектируемой радиосистемы и программно-конфигурируемого радиоканала. В проектируемой радиосистеме предусмотрено два протокола передачи – вещательный и полудуплексный, описанные далее с точки зрения применения в ПО радиосистемы.

*Вещательный протокол.* Данный протокол предназначен для односторонней связи и осуществления гарантированной доставки сообщений, что реализуется многократным повторением сообщения передатчиком. Он характеризуется периодами приема и передачи информации. В протоколе предусмотрено кодирование сообщения, в связи с чем данные передаются в виде кадров данных, структура которых представлена в табл. 1.

Таблица 1. Структура кадра данных

Table 1. Data frame structure

Заголовок/Header		Кодовое слово/Code word		
Преамбула, байт/ Preamble, byte	ID кода, байт/ Code ID, byte	CRC, байт/ byte	ID пакета, байт/ Package ID, byte	Поле данных/ Data field
6	2	2	1	Переменная длина/ Variable

Таблица 2. Возможные спецификации кодирования и размеры поля данных

Table 2. Possible coding specifications and data field sizes

Спецификация/ Specification	Размер кодированного слова, бит/ Size of the code word, bits	Размер данных для кодирования, бит/ Size of the encoding data, bits	Размер поля данных, бит (байт)/ Size of the data field, bits (bytes)
1024_896_6_4.spec	1024	896	872 (109)
1024_768_12_5.spec	1024	768	744 (93)
1024_512_32_5.spec	1024	512	488 (61)
1024_512_28_5.spec	1024	512	488 (61)
1024_256_44_2.spec	1024	256	232 (29)
256_204_12_4.spec	256	204	180 (22)
256_180_14_4.spec	256	180	156 (19)
128_90_12_4.spec	128	90	66 (8)

Заголовок кадра содержит преамбулу, по приему которой приемник синхронизируется с принимаемыми тактовыми сигналами. Адрес получателя содержится в двухбайтовом поле "ID кода". Кодовое слово состоит из двухбайтового поля контрольной суммы, значение в котором вычисляется по определенному алгоритму (полиному CRC-32), адреса отправителя в однобайтовом поле "ID пакета" и поля данных переменной длины. В зависимости от объема сообщения применяются различные спецификации кодирования, различающиеся размерами поля данных и кодового слова в целом (табл. 2). В спецификации указываются размер кодового слова, объем кодированных данных, скорость передачи и адрес отправителя, разделенные знаком подчеркивания.

При передаче используются кодовые слова стандартной длины, поэтому с учетом переменной длины поля данных его размер может быть несколько уменьшен для соблюдения длины (см. правую колонку табл. 2).

*Полудуплексный протокол.* Данный протокол может быть использован в программно-конфигурируемом радиоканале. В нем предусмотрен обмен информацией между передатчиком и приемником в формате кадров данных.

Рассмотрим структуру и данные кадра (рис. 4). В начальный момент времени базовой станцией отправляются зонд-сигналы 3, предназначенные для определения начала ионизированного следа [6]. Длительность зонд-сигналов 0.8 мс, задержка между ними составляет 50 мс, что обусловлено минимально возможной задержкой переключения



Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов  
Radio electronic facilities for signal transmission, reception and processing

ORIGINAL ARTICLE

Таблица 5. Структура кадра данных с несколькими кодовыми словами

Table 5. Data frame structure with several code words

Поле кадра: Заголовок кадра / Frame field: Frame header	
Название / Name	Размер, байт / Size, bytes
Преамбула / Preamble	6
ID кода / Code ID	2
Поле кадра: Кодовые слова / Frame field: Code words	
Название / Name	Размер, байт / size, bytes
CRC	2
ID пакета / Package ID	1
Поле данных кодового слова № 1 / Data field of the code word # 1	Переменная длина / Variable length
...	
Поле данных кодового слова № 7 / Data field of the code word # 7	Переменная длина / Variable length

**Программное обеспечение приема/передачи.**

Для проверки работоспособности предложенных алгоритма и протокола передачи было разработано ПО для приема и передачи информации посредством использования метеорных отражений. ПО поддерживает управление аппаратными и программными средствами приемопередающего модуля, включающего трансивер SunSDR2, обеспечивающий работу аппаратной части в полудуплексном режиме\*, и антенный усилитель [2].

Для устойчивой работы ПО требуются следующие аппаратные средства [10]:

- ЭВМ, имеющая процессор архитектуры x86, оперативную память не менее 2 Гбайт, емкость жесткого диска не менее 100 Гбайт, монитор с разрешением экрана не ниже 1024×768 пикселей;
- антенно-фидерные устройства;
- трансивер SunSDR2.

Работа ПО осуществляется в ОС Windows 7 (и более новые версии) с разрядностью x32/x64 под управлением программного пакета Microsoft Visual C++ 2010.

Структурная схема разработанного ПО приведена на рис. 5. ПО построено на основе клиент-серверной архитектуры [11]. Клиентская часть (расположенная на рисунке над "Клиентом") выполняет функции индикации, настройки и управления комплексом, передачи данных, отображения пересылаемой/принимаемой информации на

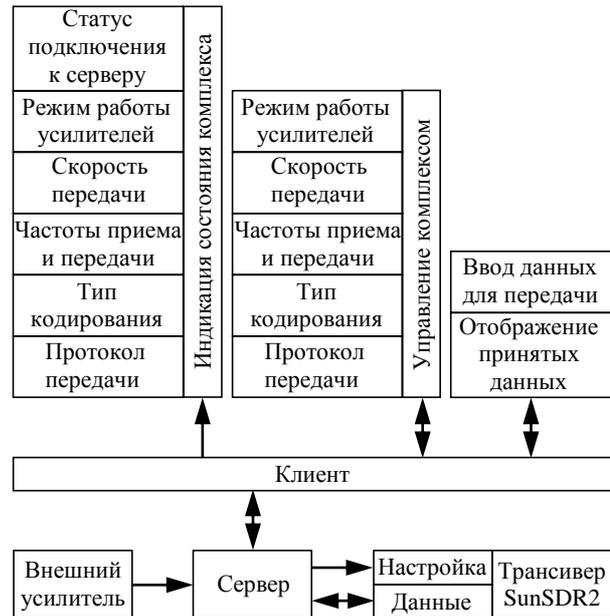


Рис. 5. Структурная схема программного обеспечения приема/передачи

Fig. 5. Block diagram of the receive/transmit software

дисплейном модуле. Результирующие параметры и данные клиентской части передаются на серверную часть для управления трансивером SunSDR2 и передачи данных [12].

На рис. 6 представлен интерфейс ПО при запуске серверной части с настройками адресной и протокольной информации комплекта базовой станции [13]. Согласно рис. 6, входными данными ПО (в зависимости от полуккомплекта станции) являются:

- порт серверной части\*;
- трасса радиоканала 2;
- IP-адрес и порт трансивера 3;
- мощность передатчика трансивера\*;
- скорость передачи 5;
- частота настройки передатчика 6;
- частота настройки приемника 7;
- тип протокола 8;
- тип кодирования (спецификация) 9;
- управление усилителями 10;
- сообщения для передачи 11;
- количество повторений сообщения для передачи по вещательному протоколу 12.

Входные данные имеют буквенно-цифровой формат и вводятся в диалоговом режиме.

Выходные данные имеют буквенно-цифровой или цифровой вид; они выводятся на экран монитора или сохраняются в файлах.

\* SunSDR2 поддерживает также и полный дуплексный режим, однако в рассматриваемой системе он не используется.

\* Указан на другой странице интерфейса.

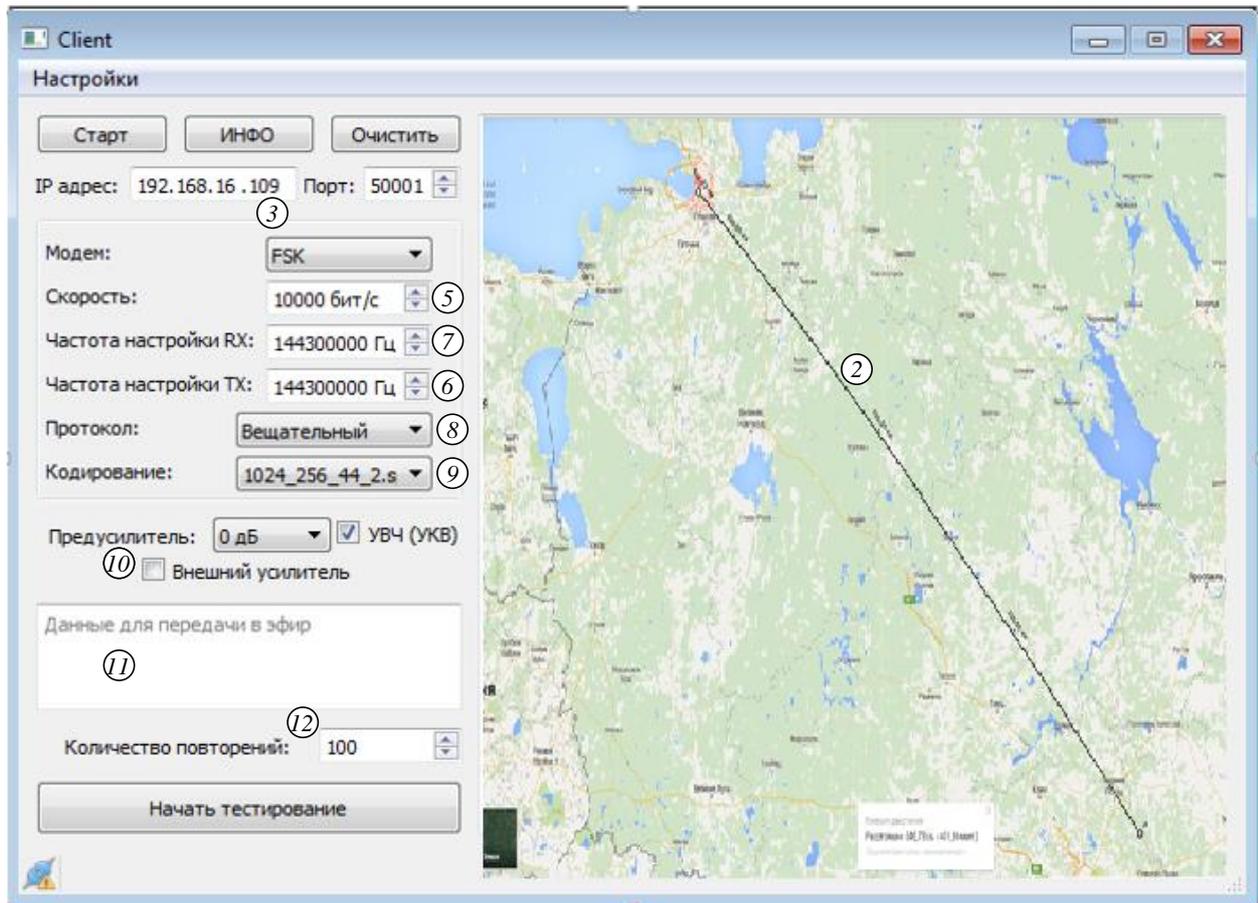


Рис. 6. Интерфейс программы при запуске серверной части канала передачи

Fig. 6. The program interface when running the server part of the transmission channel

**Заключение.** В настоящее время программно-определяемые радиосистемы представляют большой интерес как в теоретической, так и в практической сфере: они выполняют значительную часть цифровой обработки сигналов на обычном персональном компьютере или на ПЛИС. Цель такой схемы – радиоприемник или радиопередатчик радиосистемы, изменяемый посредством программной реконфигурации. Традиционный аналоговый приемник, где АЦП преобразуют сигналы с выхода аналоговых квадратурных каналов, имеет следующие недостатки: необходимость точной настройки; чувствительность к температуре и к разбросу параметров компонентов; нелинейные искажения; сложность построения перестраиваемых фильтров и фильтров с подавлением более 60 дБ. Но благодаря развитию современной полупроводниковой элементной базы, в первую очередь – АЦП и ЦАП, теперь можно преобразовывать сигнал непосредственно с выхода промежуточной частоты [14].

Указанная технология позволяет заменить разнообразные существующие и разрабатываемые радиоприемники и трансиверы, как серийные, так и, прежде всего, любительские, построенные по сложной супергетеродинной схеме, на ограниченное число доступных аппаратных блоков, работающих под управлением разработанного ПО. Это приведет к упрощению и удешевлению конструкций, существенному улучшению характеристик, поддержке любых видов модуляции, появлению большого количества сервисных функций, а также ускорит разработку, поскольку ПО может совершенствоваться одновременно всем сообществом [15]. Такое стало возможно с появлением доступных быстрых ЦАП и АЦП и удешевлением ПЭВМ и DSP-процессоров.

Анализируя такую важную техническую характеристику радиосистем, как помехоустойчивость, можно сделать вывод, что радиосистемы с двухсторонним протоколом обмена имеют ряд неоспоримых технических преимуществ по срав-

нению с радиосистемами с односторонним протоколом обмена и в настоящий момент являются единственно надежной альтернативой проводным системам. Если связь не может быть восстановлена даже после таких действий, как смена частотных каналов, изменение мощности излучения, изменение периода выхода в радиоэфир, то в данном случае наблюдается преднамеренное технически подготовленное саботирование работы системы: постановка широкополосной помехи во всем разрешенном диапазоне частот.

В настоящей статье приведена структура и функциональное описание разработанного программно-конфигурируемого радиоканала и исследована имитационная модель радиоинтерфейса. В результате рассмотрения структуры и функционального описания разработанного ПО можно сделать вывод, что разработанное для исследова-

ния достоверности и работоспособности предложенного алгоритма и протокола передачи ПО может быть использовано для приема и передачи информации посредством использования ионосферных отражений. В дальнейшем планируется провести обзор и анализ архитектуры программно-определяемой радиосистемы в среде LabView [16], оценить устойчивость работы при передаче информации в условиях многолучевости.

В дальнейшем планируется также провести исследования прохождения сигналов OFDM через многолучевые каналы связи с замираниями Рэлея и Райса. Полученная модель позволит оценить помехоустойчивость при различной длине циклического префикса OFDM-символа, мощности основного луча в модели Райса и наблюдать за поведением сигнального созвездия при воздействии различных нестабильностей.

#### Список литературы

1. Галкин В. А. Основы программно-конфигурируемого радио. М.: Горячая линия–Телеком, 2013. 372 с.
2. Трусов В. А., Горячев Н. В., Баннов В. Я. Программно-определяемые приемопередатчики и их применение // Молодой ученый. 2014. № 21. С. 234–236.
3. Воробьев О. В., Рыбаков А. И. Вариант реализации двунаправленной связи в СМС (системе метеорной связи). Описание программно-аппаратного комплекса СМС // Материалы VII Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. "Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании", СПб., 1–2 марта 2017 г. / СПбГУТ. СПб., 2017. Т. 1. С. 128–133.
4. Качнов А. В., Рыбаков А. И. Разработка мобильной системы информационного обеспечения с использованием каналов метеорной связи // Материалы V Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. "Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании", СПб., 10–11 марта 2016 г. / СПбГУТ. СПб., 2016. С. 177–181.
5. Горелкин Г. А., Горшков А. В., Тулемисов У. М. Модель проектирования информационных систем в условиях потока новых информационных технологий // Системы высокой доступности. 2011. № 1. С. 62–64.
6. Arian E. Channel Polarization: a Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels // IEEE Trans. on Information Theory. 2009. Vol. IT-55, iss. 7. P. 3051–3073. doi: 10.1109/TIT.2009.2021379
7. Trifonov P. Efficient Design and Decoding of Polar Codes // IEEE Trans. on Communications. 2012. Vol. 60, iss. Com-11. P. 3221–3227. doi: 10.1109/TCOMM.2012.081512.110872
8. Горячев Н. В., Танатов М. К., Юрков Н. К. Исследование и разработка средств и методик анализа и автоматизированного выбора систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 3. С. 70–75.
9. Солонина А. И., Клионский Д. М. Цифровая обработка сигналов и Matlab. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 512 с.
10. Петров С. А., Нефедьев А. И. Микроконтроллеры измерительных систем / ВолгГТУ. Волгоград, 2015. 112 с.
11. Мэй Х., Го Я. Повсеместные операционные системы // Открытые системы. СУБД. 2018. № 1. URL: <https://www.osp.ru/os/2018/01/13053933/> (дата обращения: 19.06.19)
12. Рыбаков А. И. Программное обеспечение с многокритериальными алгоритмами обработки информации / Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № 2018615443; опубл. 08.05.2018. Бюл. № 5.
13. Trifonov P., Miloslavskaya V. Polar Codes with Dynamic Frozen Symbols and their Decoding by Directed Search // Proc. of IEEE Information Theory Workshop, Sevilla, Spain, 9–13 Sept. 2013. doi: 10.1109/ITW.2013.6691213
14. Василевский В. В., Панюшкин В. А., Пузырев П. И. Оптимизация схемы тактовой синхронизации программно-конфигурируемого цифрового приемника на процессоре TMS320VC55XX // Ползуновский вестн. 2010. № 2. С. 196–199.
15. Смелянский Р. Технологии реализации программно конфигурируемых сетей: overlay vs openflow // Журн. сетевых решений LAN. 2014. № 4. С. 53–55.

16. MacKay D. J. C. Encyclopedia of Sparse Graph Codes. URL: <http://www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/codes/data.html> (дата обращения: 13.05.2019)

## Информация об авторах

**Воробьев Олег Владимирович** – кандидат технических наук (1983), профессор (2001), заведующий кафедрой радиопередающих устройств и средств подвижной связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор более 70 научных публикаций. Сфера научных интересов – современные радиопередающие и радиоприемные устройства; теоретические и практические вопросы, связанные с цифровой обработкой радио- и аудиосигналов; технологии наземных и спутниковых систем цифрового радиовещания.

E-mail: vorobievov@bk.ru

<http://orcid.org/0000-0003-3546-2929>

**Рыбаков Алексей Игоревич** – инженер по специальности "Средства связи с подвижными объектами" (2014, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича), аспирант, ассистент кафедры радиопередающих устройств и средств подвижной связи названного университета. Автор 21 научной публикации. Сфера научных интересов – современные радиопередающие и радиоприемные устройства; теоретические и практические вопросы, связанные с цифровой обработкой радио- и аудиосигналов; системы стационарной и мобильной радиосвязи.

E-mail: lexeus.r1@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-0147-4462>

## References

- Galkin V. A. *Osnovy programmno-konfiguriruemogo radio* [Basics of Software Configurable Radio]. Moscow, *Goryachaya liniya-Telekom*, 2013, 372 p. (In Russ.)
- Trusov V. A., Goryachev N. V., Bannov V. Ya. Software-defined Transceivers and Their Application. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist]. 2014, no. 21, pp. 234–236. (In Russ.)
- Vorob'ev O. V., Rybakov A. I. *Variant realizatsii dvunapravlennoi svyazi v SMS (sisteme meteornoi svyazi). Opisaniye programmno-apparatnogo kompleksa SMS* [Variant of Bidirectional Communication in SMS (Meteor Communication System). Description of the Hardware-Software Complex SMS]. Materials VII International scientific and technical and scientific method. conf. "Actual problems of infocommunications in science and education". March 1–2, 2017, St. Petersburg. SPb, *SPbGUT*, 2017, vol. 1, pp. 128–133. (In Russ.)
- Kachnov A. V., Rybakov A. I. *Razrabotka mobil'noi sistemy informatsionnogo obespecheniya s ispol'zovaniem kanalov meteornoi svyazi* [Development of a Mobile Information Support System Using Meteor Communication Channels]. Mater. V Int. scientific and technical and scientific method. conf. "Actual problems of infocommunications in science and education." March 10–11, 2016, St. Petersburg, SPb, *SPbGUT*, 2016, pp. 177–181. (In Russ.)
- Gorelkin G. A., Gorshkov A. V., Tulemisov U. M. A Model for Designing Information Systems in a Flow of New Information Technologies. *Journal Highly available systems*. 2011, no. 1, pp. 62–64. (In Russ.)
- Arikan E. Channel Polarization: a Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels. *IEEE Trans. on Information Theory*. 2009, vol. IT-55, iss. 7, pp. 3051–3073. doi: 10.1109/TIT.2009.2021379
- Trifonov P. Efficient Design and Decoding of Polar Codes. *IEEE Trans. on Communications*. 2012, vol. 60, iss. Com-11, pp. 3221–3227. doi: 10.1109/TCOMM.2012.081512.110872
- Goryachev N. V., Tanatov M. K., Yurkov N. K. Research and Development of Tools and Techniques for Analysis and Automated Selection of Cooling Systems for Electronic Equipment. *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2013, no. 3, pp. 70–75. (In Russ.)
- Solonina A. I., Klionskii D. M. *Tsifrovaya obrabotka signalov i Matlab* [Digital Signal Processing and Matlab]. SPb, *BKhV-Peterburg*, 2013, 512 p. (In Russ.)
- Petrov S. A., Nefed'ev A. I. *Mikrokontrollery izmeritel'nykh sistem* [Microcontrollers of Measuring Systems]. Volgograd, *VolgGTU*, 2015, 112 p. (In Russ.)
- Mei Kh., Go Ya. Ubiquitous Operating Systems. *Open Systems.DBMS*. 2018, no. 1. Available at: <https://www.osp.ru/os/2018/01/13053933/> (accessed 19.06.19).
- Rybakov A. I. *Programmnoye obespechenie s mnogokriterial'nymi algoritmami obrabotki informatsii* [Software with Multicriteria Information Processing Algorithms]. Certificate of state registration of the computer program of the Russian Federation no. 2018615443. Publ. 08.05.2018. Bull, no. 5. (In Russ.)
- Trifonov P., Miloslavskaya V. Polar Codes with Dynamic Frozen Symbols and their Decoding by Directed Search. *Proc. of IEEE Information Theory Workshop*. Sevilla, Spain, 9–13 Sept. 2013. doi: 10.1109/ITW.2013.6691213

14. Vasilevskii V. V., Panyushkin V. A., Puzyrev P. I. Optimization of the Clock Synchronization Scheme of a Software-Configurable Digital Receiver on the TMS320VC55XX Processor. *Polzunovsky vestnik*. 2010, no. 2, pp. 196–199. (In Russ.)

15. Smelyanskii R. Technologies for Implementing Software-Configured Networks: overlay vs openflow. *Zhurnal setevykh reshenii LAN*. 2014, no. 4, pp. 53–55. (In Russ.)

16. MacKay D. J. C. Encyclopedia of Sparse Graph Codes. Available at: <http://www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/codes/data.html> (accessed 13.05.2019)

### Information about the authors

**Oleg V. Vorobyov** – Cand. Sci. (Engineering) (1983), Professor (2001), Head of the Department of Radio Transmitters and Mobile Communications of Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications. The author of more than 70 scientific publications. Area of expertise: modern radio transmitters and receivers; theoretical and practical issues related to digital processing of radio and audio signals; terrestrial and satellite digital broadcasting systems.

E-mail: vorobievov@bk.ru

<http://orcid.org/0000-0003-3546-2929>

**Alexey I. Rybakov** – Dipl.-engineer on "Means of communication with mobile objects" (2014, Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications), Postgraduate student, assistant of the Department of Radio Transmitters and Mobile Communications of named university. The author of 21 scientific publications. Area of expertise: modern radio transmitters and receivers; theoretical and practical issues related to digital processing of radio and audio signals; fixed and mobile radio systems.

E-mail: lexeus.r1@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-0147-4462>