



Кодовое разделение сигналов в прямохаотической схеме передачи информации

A. С. Дмитриев[✉], А. И. Рыжов, В. В. Ицков, В. А. Лазарев

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия
E-mail: [✉chaos@cplire.ru](mailto:chaos@cplire.ru), mefbox@gmail.com, vadim.itskov@phystech.edu, dilvishya@gmail.com

*Поступила в редакцию 10.04.2025, принята к публикации 21.05.2025,
опубликована онлайн 14.07.2025, опубликована 30.09.2025*

Аннотация. Важным направлением в научной деятельности Ю. В. Гуляева являются исследования и разработки в области нелинейной динамики и динамического хаоса. Что касается нелинейной динамики в целом, то в той или иной степени к ней относятся все основные направления научной деятельности Юрия Васильевича, начиная с классических работ в области акустоэлектроники. Здесь, безусловно, нужно упомянуть исследования в области собственных физических полей биологических объектов, работы в области медицинской электроники, а также собственно исследования и разработки в области динамического хаоса и его приложений. Об одной такой разработке, положившей, по существу, начало разработке прямохаотических приемопередатчиков, в постановке и проведении которой Юрий Васильевич сыграл важную роль, рассказывается во введении к той статье. Эта работа в значительной степени явилась прологом к развитию работ по передаче информации с помощью динамического хаоса, проводимых в ИРЭ РАН, начиная с 90-х годов. В основной части статьи предлагается и исследуется новый вариант прямохаотической схемы передачи информации, в которой в качестве несущего информации сигнала используются кодовые последовательности хаотических радиоимпульсов. **Цели.** Разработка нового метода введения информации в хаотических сигнал, обеспечивающий расширение возможностей по разделению каналов и множественному доступу. **Методы.** Компьютерное моделирование процесса передачи и теоретические оценки помехоустойчивости схемы в канале с белым шумом. **Результаты.** Предложен и исследован метод модуляции/демодуляции кодовых последовательностей хаотических радиоимпульсов, обеспечивающий увеличение базы передаваемого двоичного символа и разделение каналов на основе корреляционной обработки, прошедшего сигнала через детектор огибающей. Показано, что предложенная схема модуляции/демодуляции эффективна также для организации множественного доступа в сети не синхронизованных друг с другом приемопередатчиков. **Заключение.** Предложенная схема ввода информации в прямохаотический сигнал передатчика и его извлечения на стороне приемника, судя по теоретическим расчетам и результатам компьютерного моделирования, существенно повышает возможности прямохаотических средств связи и расширяет области их применения.

Ключевые слова: прямохаотическая передача информации, хаотические радиоимпульсы, кодовое разделение каналов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ РАН, тема «Эфир-3».

Для цитирования: Дмитриев А. С., Рыжов А. И., Ицков В. В., Лазарев В. А. Кодовое разделение сигналов в прямохаотической схеме передачи информации // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 5. С. 674–690. DOI: 10.18500/0869-6632-003190. EDN: GRITIG

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Code division of signals in a direct chaotic scheme of information transmission

A. S. Dmitriev[✉], A. I. Ryzhov, V. V. Itsakov, V. A. Lazarev

Kotelnikov Institute of Radioelectronics and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: [✉chaos@cplire.ru](mailto:chaos@cplire.ru), mefbox@gmail.com, vadim.itskov@phystech.edu, dilvishya@gmail.com

Received 10.04.2025, accepted 21.05.2025, available online 14.07.2025, published 30.09.2025

Abstract. An important direction in the scientific activity of Yu. V. Gulyaev is research and development in the field of nonlinear dynamics and dynamic chaos. As for nonlinear dynamics in general, all the main areas of Yuri Vasilyevich's scientific activity relate to it to one degree or another, starting with classical works in the field of acoustoelectronics. Here, of course, it is necessary to mention research in the field of proper physical fields of biological objects, work in the field of medical electronics, as well as research and development in the field of dynamic chaos and its applications. One such development, which essentially laid the foundation for the development of direct-chaotic transceivers, in the formulation and implementation of which Yuri Vasilyevich played an important role, is described in the introduction to that article. This work was largely a prologue to the development of work on information transmission using dynamic chaos, carried out at IRE RAS since the 90s. The main part of the article proposes and examines a new version of a direct-chaotic information transmission scheme, in which code sequences of chaotic radio pulses are used as an information-carrying signal. *Purpose.* Development of a new method for introducing information into a chaotic signal, providing expanded capabilities for channel separation and multiple access. *Methods.* Computer simulation of the transmission process and theoretical estimates of the noise immunity of the scheme in a channel with white noise. *Results.* A method for modulation/demodulation of code sequences of chaotic radio pulses is proposed and investigated, which provides an increase in the base of the transmitted binary symbol and channel division based on correlation processing of the signal passed through the envelope detector. It is shown that the proposed modulation/demodulation scheme is also effective for organizing multiple access in a network of transceivers that are not synchronized with each other. *Conclusion.* The proposed scheme for inputting information into a direct chaotic signal of the transmitter and its extraction on the receiver side, judging by theoretical calculations and the results of computer simulation, significantly increases the capabilities of direct chaotic communication facilities and expands the areas of their application.

Keywords: direct chaotic information transmission, chaotic radio pulses, code division multiplexing.

Acknowledgements. This work was carried out within the framework of the State Assignment of IRE RAS, theme "Ether-3".

For citation: Dmitriev AS, Ryzhov AI, Itsakov VV, Lazarev VA. Code division of signals in a direct chaotic scheme of information transmission. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(5):674–690. DOI: 10.18500/0869-6632-003190

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

В середине 80-х годов под руководством Владимира Яковлевича Кислова в ИРЭ АН СССР активно шли работы по созданию источников динамического хаоса в радио- и СВЧ-диапазонах. В стиле того времени и лично В. Я. Кислова была практическая направленность этих исследований. Той же точки зрения придерживалось и руководство института. После успешного решения 16-м отделом одной из важных задач в этом направлении В. А. Котельников, директор института, предложил сосредоточить свои силы на одной из актуальных задач радиоэлектронного противодействия [1–3]. Речь шла о системе АВАКС, созданной американцами, которая занимается разведкой, по существу — летающий локатор. И с ним нужно было как-то бороться. В нашей стране к этому времени была разработана система противодействия, подавляющая эту систему путем воздействия по боковым лепесткам диаграммы направленности обзорного локатора. Но это был монстр, который имел размеры железнодорожного вагона. И эта задача требовала нового решения: нужны были компактные устройства радиоэлектронного противодействия.

1. Прямохаотические передатчики сверхвысокочастотного диапазона. Пролог

Владимир Яковлевич схватился за идею создания таких устройств. И лаборатория через некоторое время представила прототип на основе вакуумного генератора шумоподобных хаотических колебаний. Но Котельников его не принял. По его мысли, во-первых, должен быть не вакуумный прибор, а полупроводниковый. Во-вторых, это должна быть приемопередающая антennaя решетка. Ушли думать. К лету – осени 1986 года облик системы стал прорисовываться. И тут произошло знаковое событие.

В президиуме Академии наук, в предбаннике, состоялась встреча Юрия Васильевича Гуляева, тогда заместителя директора ИРЭ АН СССР, директора профильного научно-исследовательского института «Градиент» в Ростове-на-Дону Ю. М. Перунова – будущего генерального конструктора Радиопрома СССР, В. Я. Кислова и одного из авторов этой статьи – А. С. Дмитриева. Мы рассказали Перунову о задаче и о состоянии ее проработки, а он говорит: «Если у вас все более или менее готово и в декабре вы передаете свои эскизы экспериментального образца мне, то «Градиент» до февраля выпустит свою документацию. В феврале изготавливаются опытные экземпляры. В марте начнем совместные испытания в НИИ «Градиент» и в мае выходим на полигонные испытания».

Я сидел и думал: человек говорит, что на основе экспериментальных макетов мы сделаем за три месяца «железо». И «железо» компактное по сравнению с железнодорожным вагоном. В то время такие темпы представлялись уже практически нереальными, работа с промышленными предприятиями растягивалась на годы. Похоже, «свистит». Но мы разошлись, и работа понеслась.

В марте станции в количестве около 20 штук стали приходить с производства, а мы уже собрали бригаду, поехали в «Градиент» и начали настраивать эти станции. Вначале они вообще не настраивались никак. Потом процесс прошел. Ездили туда двумя бригадами, работали по 12 часов. К концу марта – началу апреля все было готово. Каждая машинка, мы называли их «девочками», весила килограмм восемьдесят, но не тонны, как предыдущее решение. Устройство стало переносным. Сначала провели испытания на базе около Ростова-на-Дону, в Матвеевом Кургане, а в начале июня – в оренбургских степях с настоящими самолетами. Вот такой был уровень организации. Иногда происходящее казалось сумбурным. Но все хотели получить результат, а некоторые еще и знали, как получить его вовремя.

Испытания прошли в 1987 году. А в 1989 году коллективу, основу которого составляли сотрудники ИРЭ АН СССР: В. А. Бурыкин, Ю. В. Гуляев, А. С. Дмитриев, Н. Н. Залогин, В. П. Иванов, В. Я. Кислов, В. А. Котельников, М. Н. Лебедев, Н. А. Максимов, М. П. Удов, Б. А. Хаджи, была присуждена премия Совета Министров Советского Союза. Премию вручали в президиуме Академии наук. Погода в тот день стояла хорошая. Мы шли по Ленинскому проспекту компании в 5–6 человек с только что полученными медалями лауреатов. Увидев нас, водитель остановившегося грузовика приоткрыл дверь и, показав на нас, сказал окружающим: «Вот кого надо выбирать в Верховный Совет, а не тех баламутов, которые там сидят». Это был наш звездный час.

Устройства, которые были созданы, представляли собой приемопередатчики с антенными решетками, излучающие хаотические сигналы [1–3]. Сегодня, почти сорок лет спустя, можно констатировать, что это были первые приемопередающие системы с направленным излучением хаотических сигналов – пролог к будущим разработкам в области применения динамического хаоса для передачи информации, активное участие в которых принимает Ю. В. Гуляев [4, 5].

2. Прямохаотическая схема беспроводной связи

Следующие шаги в направлении создания радиосистем с использованием динамического хаоса были предприняты уже почти через 10 лет. Это были исследования и разработки в области сверхширокополосных (СШП) систем связи малого радиуса действия, в которых в качестве носителя информации использовались хаотические радиоимпульсы.

Отметим, что работы по использованию динамического хаоса для передачи информации, в частности беспроводной связи, ведутся во всем мире широким фронтом с 90-х годов двадцатого века. Кроме общего и давнего интереса к системам связи с использованием шумовых и шумоподобных сигналов [6–9], интерес к ним связан с простотой реализации источников широкополосных и сверхширокополосных аналоговых шумоподобных сигналов, возможностью гибкого управления спектра путем изменения параметров системы и другими свойствами, характерными для нелинейных динамических систем со сложной динамикой.

Следует отметить, что техника генерации хаоса в микроволновом диапазоне, а также ряд других критических элементов, необходимых для создания беспроводных средств коммуникаций радио- и сверхвысокочастотного диапазонов, были уже в значительной степени готовы к появлению практически реализуемых схем [10].

Такая схема была предложена в 2000 году [11–13]. Это была прямохаотическая схема связи (ПХСС), использующая в качестве носителя информации хаотические радиоимпульсы. В последующие годы она успешно развивалась: на ее основе удалось создать малогабаритные сверхширокополосные приемопередатчики и сети на их основе. Она также была принята в качестве опционального решения в стандарт сверхширокополосной персональной беспроводной связи IEEE 802.15.4a. На сегодняшний день ПХСС является единственной практически реализованной и используемой схемой беспроводной связи на основе динамического хаоса.

Вместе с тем современные требования к беспроводным средствам коммуникаций бросают новые вызовы. В первую очередь это относится к массовому применению беспроводных, малопотребляющих, достаточно высокоскоростных средств связи для Интернета вещей, для робототехники и сенсорных сетей. Эти задачи стимулируют интерес к расширению возможностей использования хаотических сигналов в области беспроводной передачи данных.

В данной работе предлагается и анализируется новый вариант прямохаотической схемы, использующей в качестве носителя информации не одиночные хаотические радиоимпульсы, а кодовые последовательности из таких импульсов. Способ ввода данных, используемый в новом варианте схемы, расширяет возможности исходной схемы в части разделения каналов, увеличения пропускной способности и реализации множественного доступа.

3. Схема передачи информации с использованием кодовых последовательностей из хаотических радиоимпульсов

В исходной прямохаотической схеме связи [11–13] в качестве носителя информации используются хаотические импульсы, находящиеся на определенных временных позициях внутри битовых интервалов. Наличие хаотического радиоимпульса на такой позиции означает передачу «1», а его отсутствие — передачу «0». Оставшаяся часть битового интервала используется как защитная пауза, например, при наличии многолучевого распространения.

В предлагаемой ниже схеме для передачи информации также использован поток хаотических радиоимпульсов с защитными паузами между ними. Однако при этом используется другой вид модуляция импульсов информационными сигналами.

Схемы передачи информации условно можно разделить на когерентные и некогерентные. Теоретически когерентные схемы в канале с белым шумом эффективнее некогерентных систем и энергетически выигрывают у последних, при прочих равных условиях, несколько децибел в отношении сигнал/шум для одной и той же вероятности ошибки на бит (BER — Bit Error Ratio). Однако при этом требуется иметь копию несущего сигнала на приемной стороне. В случае хаотического несущего сигнала это трудно реализуемая задача, и попытки создать системы связи с хаотической синхронизацией, в которых она теоретически решается, показали,

что такие системы очень чувствительны к шумам и возмущениям в канале связи и малопригодны на практике [14–25].

С другой стороны, некогерентная система связи на хаотических радиоимпульсах требует своего развития в плане расширения возможностей по методам модуляции и множественного доступа. Для разрешения этих противоречий в данной работе предлагается и исследуется идея использования когерентного приема применительно не к самим сигналам, передаваемым в эфир, а к выделенным из них на приемной стороне сигналам огибающей, по существу, прямым аналогам сигналов в Baseband для классических узкополосных средств связи.

Структура предлагаемой системы передачи показана на рис. 1. Передатчик системы (рис. 1, a) состоит: из цифровой платы (1), на которую поступает исходная информация; источника хаоса (2); модулятора (3), управляемого сигналом, сформированным в цифровой плате; усилителя (4) и передающей антенны (5). В цифровой плате (рис. 1, c) реализованы кодер источника (8), формирующий двоичную последовательность с длиной бита T_b ; и кодер канала (9), формирующий кодовую последовательность с длиной чипа T_b/N , где N – число элементов в кодовой последовательности. Каждый чип последовательности, отвечающий «1», состоит из двух частей: хаотического радиоимпульса и защитной паузы, для простоты равных по длительности друг другу; чип последовательности отвечающий «0» состоит из пустой позиции и защитной паузы.

Передача осуществляется с помощью двоичных символов «0» и «1», каждый из которых представляется в виде «своей» кодовой бинарной последовательности длиной N , которые ортогональны друг другу. Сначала формируется сам двоичный сигнал $m(t)$ с длиной T_b , затем двоичные элементы перемножаются каждый в кодере канала на «свою» бинарную кодовую последовательность, увеличивающую базу (процессинг). После этого полученный сигнал, состоящий из коротких видеоимпульсов, перемножается с хаотическим несущим сигналом. Возникающая в результате этой операции последовательность хаотических радиоимпульсов усиливается и с помощью антенны излучается в эфир.

Приемник системы (рис. 1, b) состоит из антенны (5), детектора огибающей (6) и цифровой платы (1).

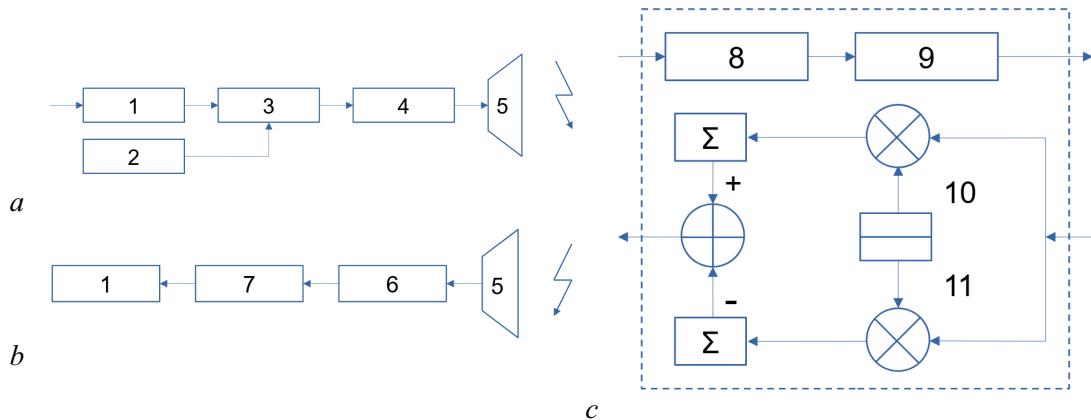


Рис. 1. Структура системы прямохаотической связи с кодовым разделением сигналов: a — передатчик; b — приемник; c — цифровая плата. 1 — цифровая плата; 2 — источник хаоса; 3 — модулятор; 4 — усилитель; 5 — антenna; 6 — детектор огибающей; 7 — аналого-цифровой преобразователь; 8 — кодер источника информации; 9 — кодер канала, формирующий сигнал с расширяющей кодовой последовательностью; 10 и 11 — опорные кодовые последовательности

Fig. 1. Structure of the direct chaotic communication system with code division of signals: a — transmitter; b — receiver; c — digital board. 1 — digital board, 2 — chaos source; 3 — modulator; 4 — amplifier; 5 — antenna; 6 — envelope detector; 7 — analog-to-digital converter; 8 — information source encoder; 9 — channel encoder that generates a signal with a spreading code sequence; 10 and 11 — reference code sequences

Обработка принимаемого сигнала производится в два этапа. На первом этапе сигнал, поступивший в антенну, подается в детектор огибающей (6), состоящий из собственно детектора сигнала (например, квадратичного или логарифмического детектора) и фильтра низких частот, параметры которого согласованы с длительностью хаотических радиоимпульсов и интервалов между ними. В результате на выходе детектора появляется сигнал огибающей, соответствующий кодовой последовательности передаваемого символа («0» или «1»). Этот сигнал поступает в цифровую плату (рис. 1, с), где его перемножают с копией каждой из двух опорных кодовых последовательностей (10 И 11), генерируемых в приемнике. Результаты перемножения суммируют, получая при этом коэффициенты корреляции между сигналом огибающей и опорной последовательностью. Коэффициенты корреляции сравнивают между собой и в качестве переданного символа принимают символ, коэффициент корреляции для которого оказался выше.

Таким образом, в предлагаемой модификации схемы каждый бит представляется в виде одной из двух последовательностей «коротких» импульсов, образующихся с помощью ортогональных последовательностей (кодов) видеомпульсов длиной N , одна из которых соответствует «0», а другая — «1». В качестве кодовых последовательностей символов могут использоваться любые две ортогональные друг другу или близкие к ортогональным друг другу последовательности. Передаваемый в эфир бит представляет собой последовательность хаотических радиоимпульсов с расположением вдоль временной оси, соответствующим расположению нулей и единиц в кодовой последовательности, соответствующей данному биту.

4. Расширяющие кодовые последовательности

Для реализации этой идеи необходимо использовать кодовые последовательности, обладающие специальными корреляционными и автокорреляционными свойствами. Сначала обсудим передачу и прием между двумя приемопередатчиками в режиме «точка–точка». При передаче информации с помощью двоичных сигналов «0» и «1» на передающей стороне нужно закодировать поток этих сигналов с помощью двух кодовых последовательностей, а на приемной стороне распознавать их с малой (заранее определенной) вероятностью ошибки. Из теории когерентного приема известно, что лучше всего для этой цели подходят коды, у которых отношение N главного пика функции автокорреляции (АКФ) к боковым наибольшее.

Такими кодами являются двоичные последовательности (коды) Баркера [26]. Кодов Баркера всего 7. Самый длинный из них состоит из 13 символов (например, «-1» и «+1») и имеет отношение высоты главного пика АКФ к боковым $N = 13$. Это свойство позволяет надежно обнаруживать такой сигнал даже при отношениях сигнал/помеха (SNR) < 1 .

Ниже, в компьютерном моделировании, используется код Баркера из 11 символов:

$$+1 + 1 + 1 - 1 - 1 + 1 - 1 - 1 + 1 - 1. \quad (1)$$

В форме двоичных элементов «0» и «1»

$$1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0, \quad (2)$$

которая не меняет его нормированную автоковариационную функцию (см., например, [27]). Для передачи «1» будет использоваться прямой код (2), а для передачи «0» — инверсный к нему, то есть

$$0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1. \quad (3)$$

5. Моделирование

Для демонстрации принципиальной возможности работы описанной схемы модуляции рассмотрим простой пример ее реализации.

Моделирование проводилось на примере передачи информационных битов «0» и «1». Передаваемые биты кодировались последовательностями (2) и (3). На рис. 2 показано расположение видеоимпульсов, соответствующее этим последовательностям. Результаты проведённого моделирования представлены ниже на примере передачи одного информационного бита. В битовую позицию, соответствующую передаче «1» или «0», вставляется последовательность хаотических радиоимпульсов, сформированная на основе кодов (2) или (3). База «чипика» (короткий хаотический радиоимпульс плюс защитный интервал) в примере равна $B_c = 19.2$ (около 13 дБ), база всего сигнала для передачи бита — $B_b = 201$ (около 23 дБ).

Короткие хаотические радиоимпульсы в кодовой последовательности моделируются при помощи полосового случайного сигнала.

На рис. 3 приведены результаты моделирования передачи «1» с применением кода Баркера через коммуникационный канал с белым шумом при разном уровне шума: a, b — передача «1», сигнал в канале без шума и после детектора огибающей; c, d — передача «0», сигнал в канале и после детектора при $E_b/N_0 = 20$ дБ (SNR = -3 дБ); e, f — передача «0», сигнал в канале и после детектора при $E_b/N_0 = 10$ дБ (SNR = -13 дБ).

В первых двух приведенных на рис. 3 случаях информационные биты передаются без ошибок. Однако при дальнейшем уменьшении отношения E_b/N_0 вероятность ошибочного приема битов нарастает. Так, на рис. 3 e, f показана передача «0» при $E_b/N_0 = 10$ дБ. В этих условиях был принят бит с ошибкой.

Зависимости вероятности ошибок при передаче представленных с помощью последовательности хаотических радиоимпульсов в соответствии с кодом Баркера от SNR и E_b/N_0 представлены на рис. 4. Сравнение результатов, представленных на рис. 4, с зависимостями для вероятности ошибок с единственным импульсом и той же базой сигнала показывает, что вероятности ошибок 10^{-3} и 10^{-5} в обоих случаях достигаются примерно при одних и тех же значениях и E_b/N_0 .

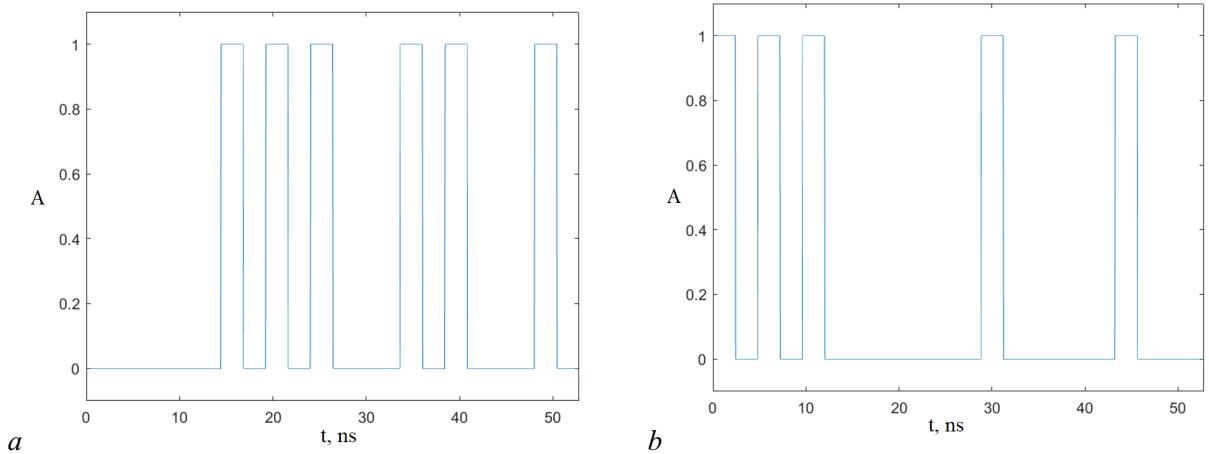


Рис. 2. Кодирование «0» и «1» кодом-последовательностью Баркера: a — «0» — инверсная последовательность; b — «1» — прямая последовательность

Fig. 2. Coding of “0” and “1” by Barker code sequence: a — “0” — inverse sequence; b — “1” — direct sequence

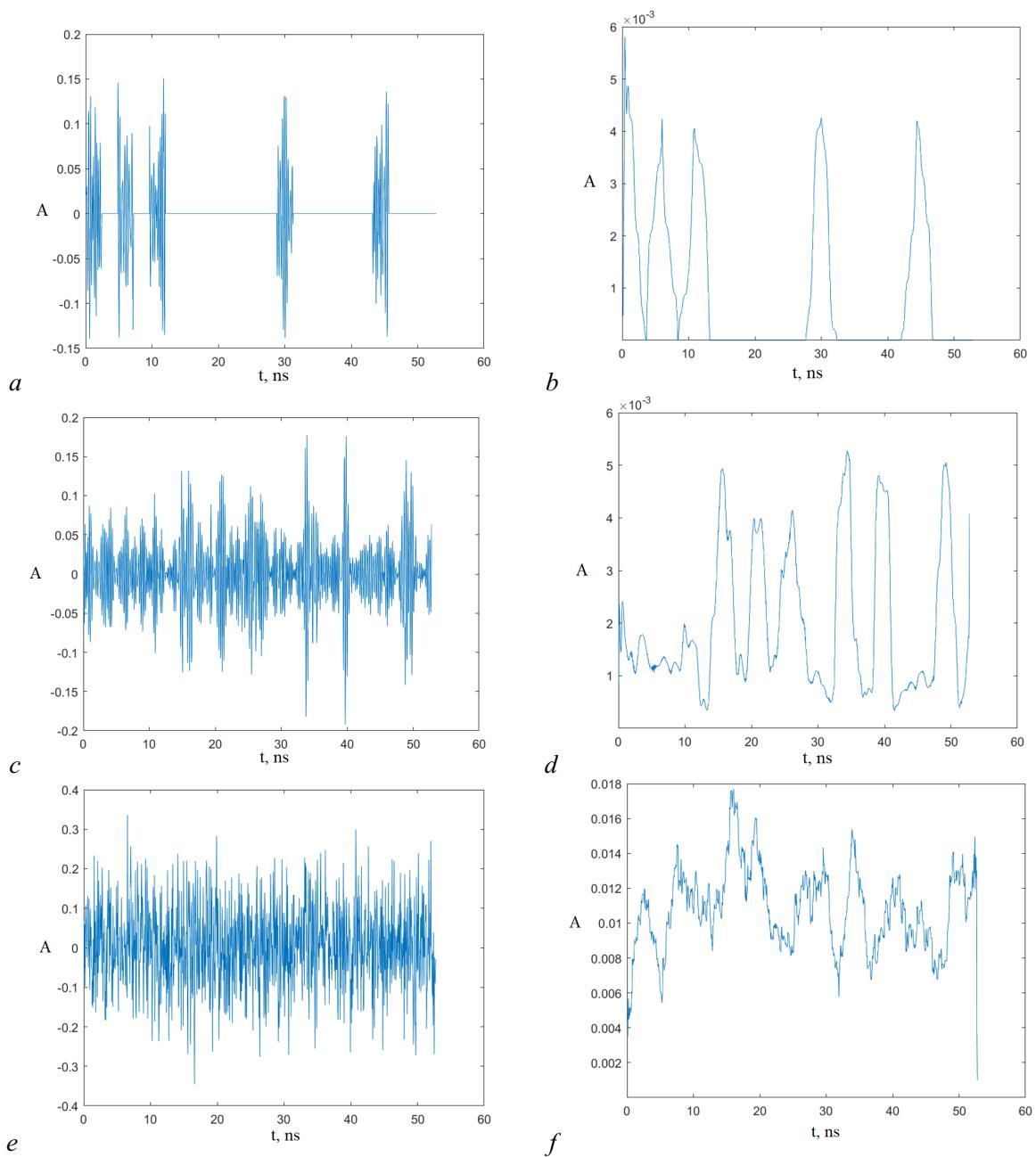


Рис. 3. Примеры сигналов с применением кода Баркера: *a* — передача «1», сигнал в канале без шума; *b* — передача «1», сигнал в приемнике после детектора огибающей; *c*, *d* — передача «0», сигнал в канале и после детектора при $E_b/N_0 = 20$ дБ (SNR = -3 дБ); *e*, *f* — передача «0», сигнал в канале и после детектора при $E_b/N_0 = 10$ дБ (SNR = -13 дБ)

Fig. 3. Examples of signals using the Barker code: *a*, *b* — transmission of “1”, signal in the channel without noise and after the envelope detector; *c*, *d* — transmission of “0”, signal in the channel and after the detector at $E_b/N_0 = 20$ dB (SNR = -3 dB); *e*, *f* — transmission of “0”, signal in the channel and after the detector at $E_b/N_0 = 10$ dB (SNR = -13 dB)

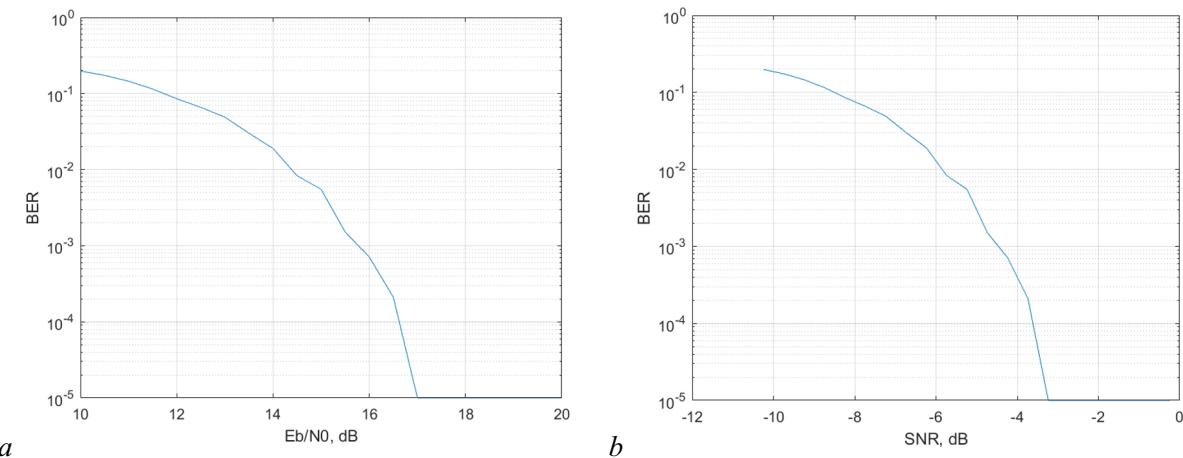


Рис. 4. Вероятность ошибок для представления бита в виде последовательности хаотических импульсов в соответствии с кодом Баркера: *a* — от средней энергии бита на импульс; *b* — от отношения сигнал/шум

Fig. 4. Probability of errors for representing a bit as a sequence of chaotic pulses in accordance with the Barker code: *a* — from the average energy of a bit per pulse; *b* — from the signal-to-noise ratio

На финальном этапе обработки осуществляется корреляция принятой последовательности импульсов с известными последовательностями для бита «1» и бита «0». То значение, корреляция для которого выше, принимается за принятый информационный бит.

6. Множественный доступ с использованием кодовых последовательностей

Расчеты по применению кодовых последовательностей в схеме прямого хаотической передачи были проведены с использованием кодов Баркера, которые обладают наилучшими для этой цели автокорреляционными свойствами (боковые лепестки автокорреляционной функции $1/N$). Дополнительной причиной использования кода Баркера является его «хорошая репутация» в связи с использованием в стандарте IEEE 802.11.

Для оценки возможностей данной схемы в интересах множественного доступа более подходящими являются кодовые последовательности «массового характера», хотя и с несколько худшими характеристиками по уровню боковых лепестков автокорреляционных функций. Естественными кандидатами здесь являются M-последовательности и производные от них коды.

M-последовательности или последовательности максимальной длины (MSL — Maximum Length Sequence) — это битовые последовательности, генерируемые с использованием регистров сдвига с максимальной линейной обратной связью, и они так называются, потому что они периодические и воспроизводят каждую двоичную последовательность (кроме нулевого вектора), которая может быть представлена регистрами сдвига (то есть для регистров длины m они производят последовательность длиной $2^m - 1$).

M-последовательностям свойственен достаточно низкий уровень лепестков автокорреляционной функции, спадающий по закону $1/\sqrt{N}$, где N — длина последовательности. Поэтому они часто используются в качестве основы для получения псевдослучайных последовательностей в цифровых системах связи с расширенным спектром прямой последовательности и системы передачи с расширенным спектром со скачкообразной перестройкой частоты.

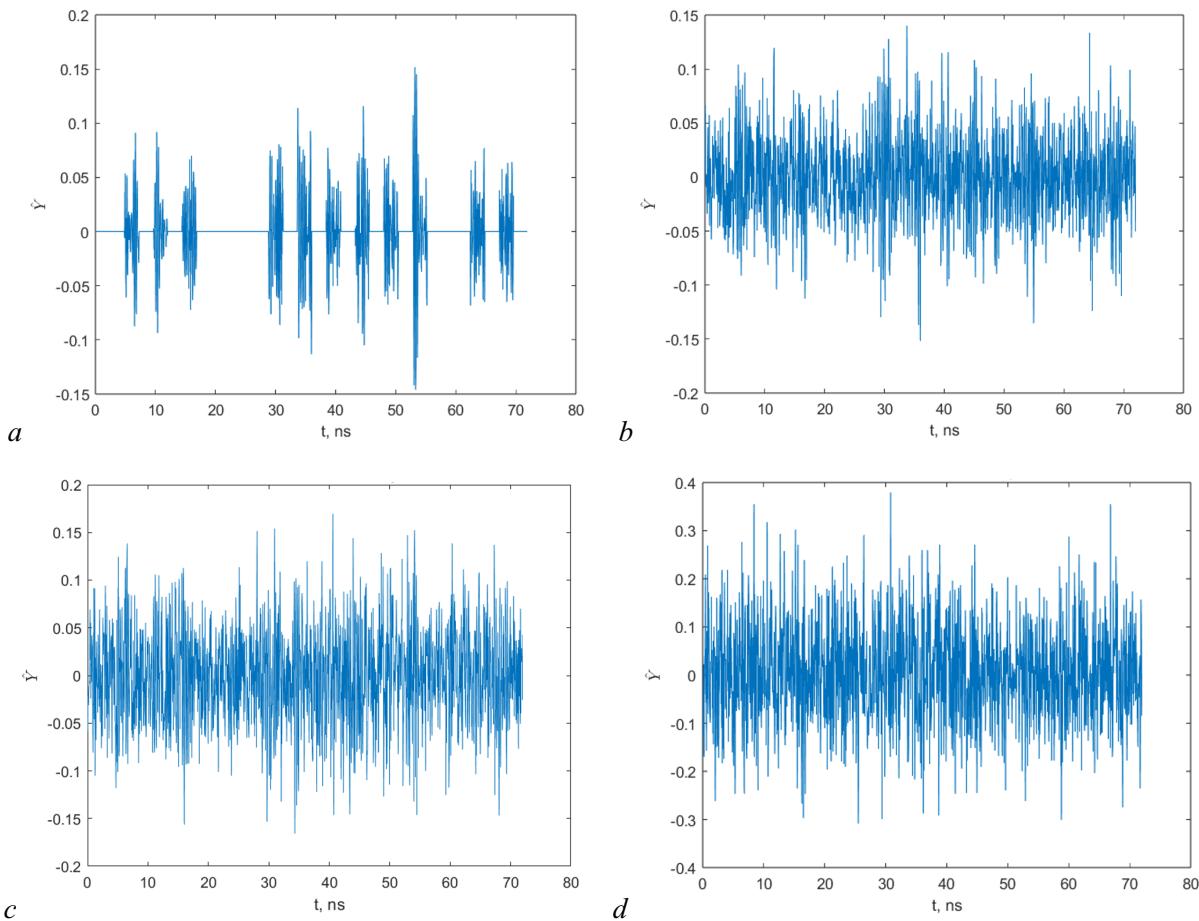


Рис. 5. Суммарный сигнал двух пользователей в канале при разном уровне белого шума: *a* — при отсутствии шума; *b* — SNR = -1.5 dB; *c* — SNR = -4.5 dB; *d* — SNR = -11.5 dB

Fig. 5. Total signal of two users in the channel at different levels of white noise: *a* — no noise; *b* — SNR = -1.5 dB; *c* — SNR = -4.5 dB; *d* — SNR = -11.5 dB

Для системы связи с двумя пользователями исследовались характеристики передачи в зависимости от уровня шума. При моделировании для первого пользователя передавалась последовательность $b_1^1 = 0010001111010111$ (соответствует логической «1») и для второго пользователя последовательность $b_0^2 = 0101001101110000$ (соответствует логическому «0»). На рис. 5 представлен вид суммарного сигнала в канале при разных уровнях внешнего шума в предположении, что: 1) сигналы от двух пользователей имеют одинаковую амплитуду; 2) порождающие М-последовательности при моделировании стартуют одновременно; 3) точка наблюдения равнодалена от пользователей.

На рис. 6–8 приведены результаты по разделению сигналов двух пользователей при нарастании уровня внешнего шума.

На рис. 6 приведены результаты для случая отсутствия шума в канале: *a* — принятая огибающая (красный) с идеальной последовательностью импульсов для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 1; *b* — принятая огибающая (красный) с идеальной последовательностью импульсов для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 2; *c* — уровень корреляции огибающей с идеальной последовательностью для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 1; *d* — уровень корреляции огибающей с идеальной последовательностью для «1» (синий) и для

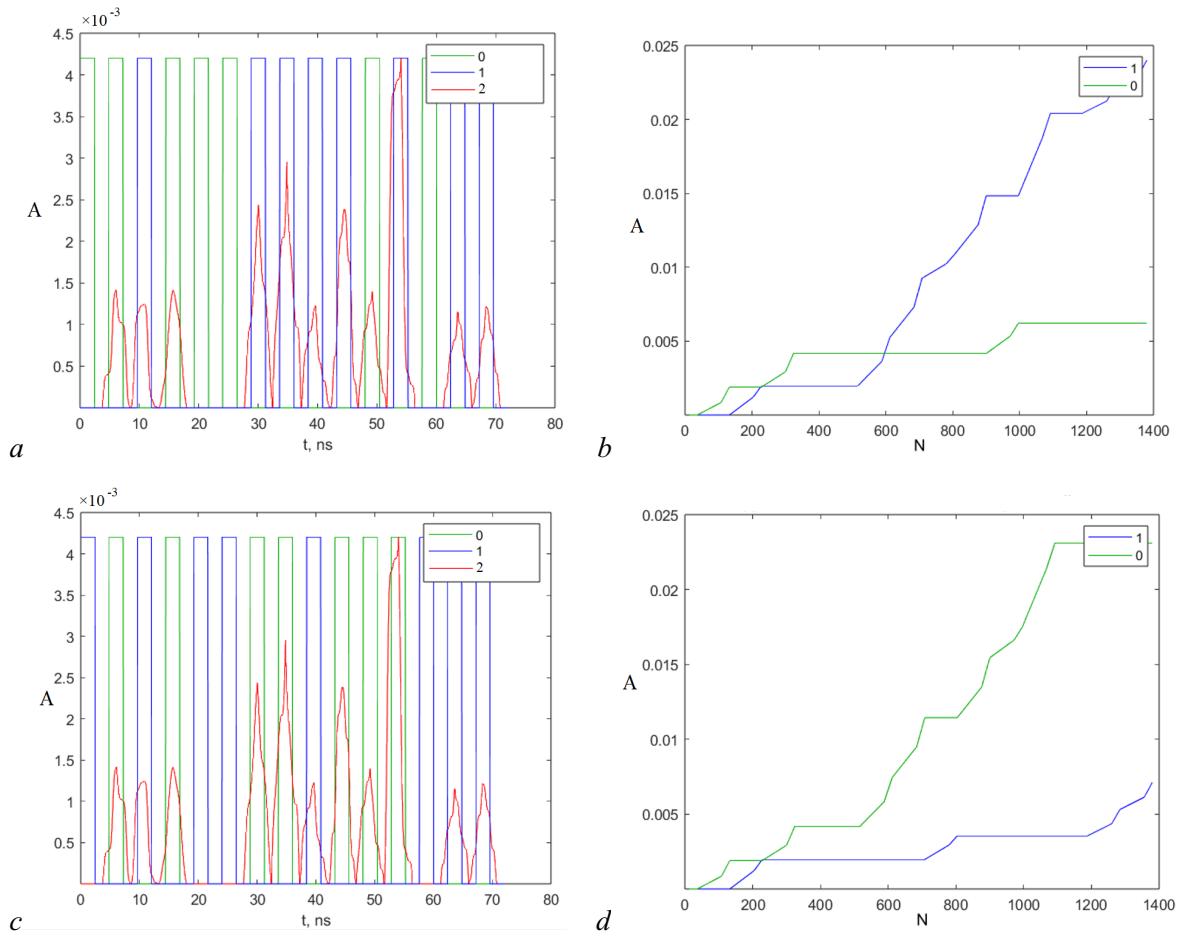


Рис. 6. Разделение сигналов двух пользователей в случае отсутствия шумов: *a* — принятая огибающая (красный) с идеальной последовательностью импульсов для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 1; *b* — принятая огибающая (красный) с идеальной последовательностью импульсов для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 2; *c* — уровень корреляции огибающей с идеальной последовательностью для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 1; *d* — уровень корреляции огибающей с идеальной последовательностью для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 2 (цвет онлайн)

Fig. 6. Separation of signals of two users in the absence of noise: *a* — received envelope (red) with an ideal pulse sequence for “1” (blue) and for “0” (green) for user 1; *b* — received envelope (red) with an 15 ideal pulse sequence for “1” (blue) and for “0” (green) for user 2; *c* — correlation level of the envelope with an ideal sequence for “1” (blue) and for “0” (green) for user 1; *d* — correlation level of the envelope with an ideal sequence for “1” (blue) and for “0” (green) for user 2 (color online)

«0» (зелёный) для пользователя 2. Из анализа рисунка следует, что первым пользователем будет принята логическая «1», а вторым — «0». Разница в уровне корреляции между верным принятым символом и неверным у каждого пользователя составляет более порядка.

Теперь рассмотрим случай с уровнем шума $SNR = -4.5$ дБ (рис. 7). В этом случае принятый сигнал в значительной степени искажен, но все же корреляционная обработка позволяет правильно выделить для обеих пар пользователей переданные двоичные символы.

Наконец, рассмотрим случай с уровнем шума $SNR = -11.5$ дБ (рис. 8). В этом случае принятый сигнал искажен настолько сильно, что корреляционная обработка не позволяет правильно и надежно выделить для пользователей переданные двоичные символы.

Детальные расчеты показывают, что граница уровня шума, при которой удается правильно выделить двоичные символы с $BER = 10^{-3}$, составляет в рассматриваемом случае примерно -5 дБ.

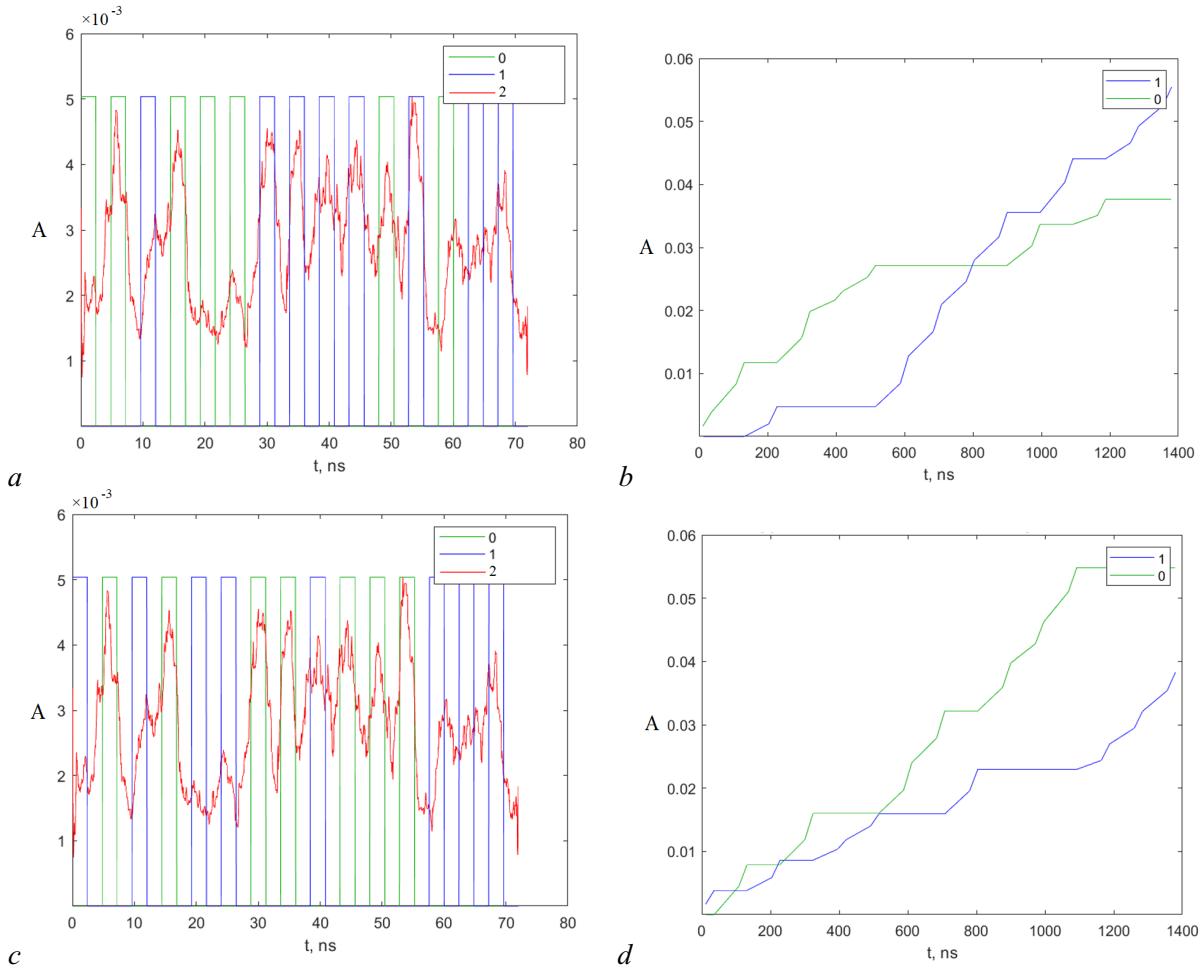


Рис. 7. Разделение сигналов двух пользователей при $\text{SNR} = -4.5$ дБ: *a* — принятая огибающая (красный) с зашумленной последовательностью импульсов для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 1; *b* — принятая огибающая (красный) с зашумленной последовательностью импульсов для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 2; *c* — уровень корреляции огибающей с зашумленной последовательностью для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 1; *d* — уровень корреляции огибающей с зашумленной последовательностью для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 2 (цвет онлайн)

Fig. 7. Separation of signals of two users at $\text{SNR} = -4.5$ dB: *a* — received envelope (red) with a noisy pulse sequence for “1” (blue) and for “0” (green) for user 1; *b* — received envelope (red) with a noisy pulse sequence for “1” (blue) and for “0” (green) for user 2; *c* — correlation level of the envelope with a noisy sequence for “1” (blue) and for “0” (green) for user 1; *d* — correlation level of the envelope with a noisy sequence for “1” (blue) and for “0” (green) for user 2 (color online)

Следует отметить, что как для первого, так и для второго пользователя дополнительный пользователь в канале играет роль дополнительного шума. Грубая оценка, не учитывая степени синхронности каналов и степень их ортогональности при условии одинаковой мощности сигналов в канале и непрерывной передачи сигнала каждым пользователем, говорит о том, что при отсутствии внешних шумов добавление второго пользователя уменьшает отношение сигнал/шум с $\text{SNR} = \infty$ до $\text{SNR} = 0$. При 4 пользователях дополнительный шум составит уже 5 дБ. Поскольку моделирование показало, что система с двумя пользователями остается работоспособной при внешнем дополнительном шуме в 5 дБ, при отсутствии внешних шумов в канале система в нашем примере обеспечивает одновременную работу до 5 пользователей. Дальнейшее увеличение числа пользователей может быть достигнуто за счет дополнительного увеличения базы сигнала.

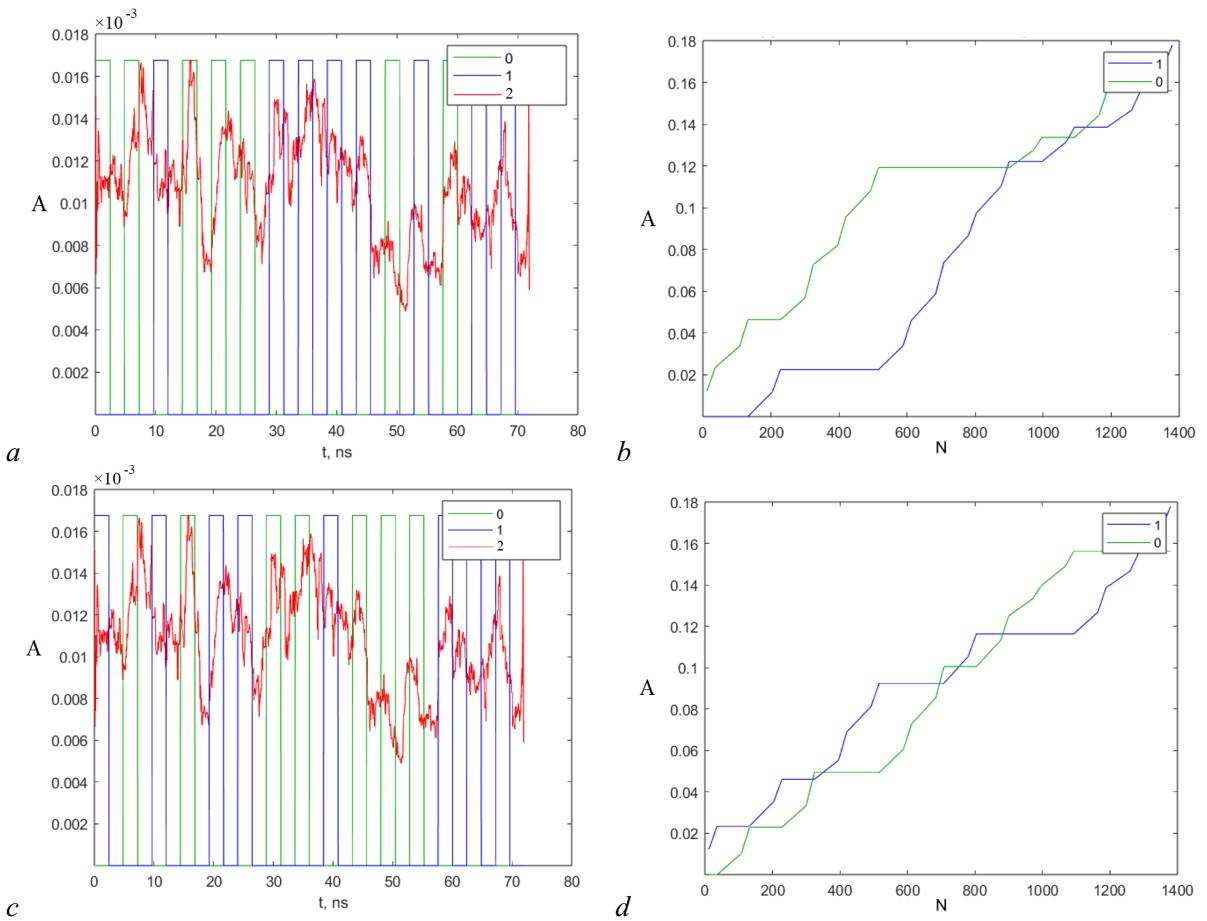


Рис. 8. Разделение сигналов двух пользователей при $\text{SNR} = -11.5 \text{ dB}$: *a* – принятая огибающая (красный) с зашумленной последовательностью импульсов для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 1; *b* – принятая огибающая (красный) с зашумленной последовательностью импульсов для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 2; *c* – уровень корреляции огибающей с зашумленной последовательностью для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 1; *d* – уровень корреляции огибающей с зашумленной последовательностью для «1» (синий) и для «0» (зелёный) для пользователя 2 (цвет онлайн)

Fig. 8. Separation of signals of two users at $\text{SNR} = -11.5 \text{ dB}$: *a* – received envelope (red) with a noisy pulse sequence for “1” (blue) and for “0” (green) for user 1; *b* – received envelope (red) with a noisy pulse sequence for “1” (blue) and for “0” (green) for user 2; *c* – correlation level of the envelope with a noisy sequence for “1” (blue) and for “0” (green) for user 1; *d* – correlation level of the envelope with a noisy sequence for “1” (blue) and for “0” (green) for user 2 (color online)

Заключение

Предложенная в работе схема передачи информации, использующая в качестве носителя информации последовательности хаотических радиоимпульсов, относится к классу прямых хаотических систем. По сравнению с базовой прямых хаотической схемой связи (ПХСС), предложенный вариант ПХСС с использованием последовательностей хаотических радиоимпульсов для представления двоичных символов позволяет использовать для организации многоканальной нескольких каналов передачи не только их временное разделение, но также и кодовое разделение. При этом частично реализуется идея когерентной демодуляции сигнала в приемнике.

Важным свойством схемы является также нулевой порог принятия решения на финальной стадии обработки сигнала.

Список литературы

1. Дмитриев А. С., Залогин Н. Н., Иванов В. П. Страницы нашей истории // Защита информации. ИНСАЙД. 2014. № 4(58). С. 85–89.
2. Залогин Н. Н. Динамический хаос в ИРЭ: возникновение и развитие // РЭНСИТ. 2018. Т. 10, № 2. С. 217–234. DOI: 10.17725/rensit.2018.10.217.
3. Залогин Н. Н. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М: Радиотехника, 2006. 205 с.
4. Гуляев Ю. В., Кислов В. Я., Кислов В. В. Новый класс сигналов для передачи информации — широкополосные хаотические сигналы // ДАН. 1998. Т. 359. № 6. С. 750–754.
5. Гуляев Ю. В., Беляев Р. В., Воронцов Г. М., Залогин Н. Н., Калинин В. И., Кальянов Э. В., Кислов В. В., Кислов В. Я., Колесов В. В., Мясин Е. А., Чигин Е. П. Информационные технологии на основе динамического хаоса для передачи, обработки, хранения и защиты информации // РЭ. 2003. Т. 48. № 10. С. 1157–1185.
6. Котельников В. А. Сигналы с максимальной и минимальной вероятностями обнаружения // РЭ. 1959. Т. 4, № 3. С. 354–358.
7. Харкевич А. А. Передача сигналов модулированных шумом // Электросвязь. 1957. № 11. С. 42–46.
8. Петрович Н. Т., Размахнин М. К. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Советское радио, 1969. 232 с.
9. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
10. Дмитриев А. С., Кяргинский Б. Е., Максимов Н. А., Панас А. И., Старков С. О. Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио и СВЧ диапазонах // Радиотехника. 2000. № 3. С. 9–20.
11. Дмитриев А. С., Панас А. И., Старков С. О., Андреев Ю. В., Кузьмин Л. В., Кяргинский Б. Е., Максимов Н. А. Способ передачи информации с помощью хаотических сигналов // Патент РФ № 2185032 С2 Российская Федерация, МПК H04K1/00, H04L9/00, H04B1/02: заявл. 06.10.2000: опубл. 10.07.2002. Заявитель: Дмитриев А.С. 16 с.
12. Дмитриев А. С., Кяргинский Б. Е., Панас А. И., Старков С. О. Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // РЭ. 2001. Т. 46, № 2. С. 224–233.
13. Dmitriev A. S., Kyarginsky B. Ye., Panas A. I., Starkov S. O. Experiments on direct chaotic communications in microwave band // Int. J. Bifurc. Chaos. 2003. Vol. 13, no. 6. P. 1495–1507. DOI: 10.1142/S0218127403007345.
14. Kocarev L., Halle K. S., Eckert K., Chua L., Parlitz U. Experimental demonstration of secure communications via chaotic synchronization // Int. J. Bifurc. Chaos. 1992. Vol. 2, no. 3. P. 709–713. DOI: 10.1142/S0218127492000823.
15. Parlitz U., Chua L., Kocarev L., Halle K., Shang A. Transmission of digital signals by chaotic synchronization // Int. J. Bifurc. Chaos. 1992. Vol. 2, no. 4. P. 973–977. DOI: 10.1142/S0218127492000562.
16. Cuomo K., Oppenheim A. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71, no. 1. P. 65–68. DOI: 10.1103/PhysRevLett.71.65.
17. Бельский Ю. Л., Дмитриев А. С. Передача информации с использованием детерминированного хаоса // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, № 7. С. 1310–1315.
18. Волковский А. Р., Рульков Н. В. Синхронный хаотический отклик нелинейной системы передачи информации с хаотической несущей // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, № 3. С. 71–75.
19. Dedieu H., Kennedy P., Hasler M. Chaos shift keying: modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing Chua's circuits // IEEE Trans. Circuits and Systems. 1993. Vol. 40, no. 10. P. 534–642. DOI: 10.1109/82.246164.

20. *Halle K. S., Wu C. W., Itoh M., Chua L. O.* Spread spectrum communications through modulation of chaos // *Int. J. Bifurc. Chaos*. 1993. Vol. 3, no. 2. P. 469–477. DOI: 10.1142/S0218127493000374.
21. *Дмитриев А. С., Панас А. И., Старков С. О.* Эксперименты по передаче музыкальных и речевых сигналов с использованием динамического хаоса // Препринт ИРЭ РАН. 1994. № 12(800).
22. *Dmitriev A. S., Panas A. I., Starkov S. O.* Experiments on speech and music signals transmission using chaos // *Int. J. Bifurc. Chaos*. 1995. Vol. 5, no. 3. P. 371–376. DOI: 10.1142/S0218127495000910.
23. *Дмитриев А. С., Панас А. И.* Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. 251 с.
24. *Lau F. C. M., Tse C. K.* Chaos-Based Digital Communication Systems. Berlin: Springer, 2003. 228 p. DOI: 10.1007/978-3-662-05183-2.
25. *Kaddoum G.* Wireless chaos based communication systems: a comprehensive survey // *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 2621–2648. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2572730.
26. *Barker R. H.* Group synchronizing of binary digital system // In: *Communication Theory*. London: Butterworth, 1953. P. 273–287.
27. *Марпл-мл. С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: МИР, 1990. 584 с.

References

1. Dmitriev AS, Zalgin NN, Ivanov VP. Pages of our history. Information protection. INSIDE. 2014;(4(58)):85–89. (in Russian).
2. Zalgin NN. Dynamic chaos in IRE: The emergence and development. RENSIT. 2018;10(2): 217–234. DOI: 10.17725/rensit.2018.10.217.
3. Zalgin NN. Wideband Chaotic Signals in Radio Engineering and Information Systems. M.: Radiotekhnika; 2006. 205 p. (in Russian).
4. Gulyaev YuV, Kislov VY, Kislov VV. New class of signals for information transmission — broadband chaotic signals. Doklady Physics 1998;359(6):750–754.
5. Gulyaev YuV, Belyaev RV, Vorontsov GM, Zalgin NN, Kalinin VI, Kalyanov EV, Kislov VV, Kislov VY, Kolesov VV, Myasin EA, Chigin EP. Information technologies based on dynamic chaos for transmission, processing, storage and protection of information. J. Commun. Technol. Electron. 2003;48(10):1157–1185.
6. Kotel'nikov VA. Signals with maximum and minimum detection probability. Radio Engineering and Electronics. 1959;4(3):354–358.
7. Kharkevich AA. Transmission of signals by modulated noise. Electrocommunication. 1957;(11): 42–46.
8. Petrovich NT, Razmakhnin MK. Communication systems with noise-like signals. Moscow: Sovetskoe Radio; 1969. 232 p.
9. Varakin LE. Communication Systems with Noise-Like Signals. M.: Radio I Svyaz'; 1985. 384 p.
10. Dmitriev AS, Kyarginsky BE, Maksimov NA, Panas AI, Starkov SO. Prospects for the creation of direct chaotic communication systems in radio and microwave ranges. Radio Engineering. 2000;(3):9–20. (in Russian).
11. Dmitriev AS, Panas AI, Starkov SO, Andreev YV, Kuzmin LV, Kyarginsky BE, Maksimov NA. Method of transmitting information using chaotic signals. Patent No. 2185032 C2 Russian Federation, IPC H04K1/00, H04L9/00, H04B1/02: appl. 06.10.2000: publ. 10.07.2002. Assignee: Dmitriev AS. 16 p. (in Russian).
12. Dmitriev AS, Kyarginsky BE, Panas AI, Starkov SO. Directly chaotic schemes of information transmission in the microwave range. J. Commun. Technol. Electron. 2001;46(2):224–233.

13. Dmitriev AS, Kyarginsky BYe, Panas AI, Starkov SO. Experiments on direct chaotic communications in microwave band. *Int. J. Bifurc. Chaos.* 2003;13(6):1495–1507. DOI: 10.1142/S0218127403007345.
14. Kocarev L, Halle KS, Eckert K, Chua L, Parlitz U. Experimental demonstration of secure communications via chaotic synchronization. *Int. J. Bifurc. Chaos.* 1992;2(3):709–713. DOI: 10.1142/S0218127492000823.
15. Parlitz U, Chua L, Kocarev L, Halle K, Shang A. Transmission of digital signals by chaotic synchronization. *Int. J. Bifurc. Chaos.* 1992;2(4):973–977. DOI: 10.1142/S0218127492000562.
16. Cuomo K, Oppenheim A. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications. *Phys. Rev. Lett.* 1993;71(1):65–68. DOI: 10.1103/PhysRevLett.71.65.
17. Belsky YuL, Dmitriev AS. Information transmission using deterministic chaos. *J. Commun. Technol. Electron.* 1993;38(7):1310–1315.
18. Volkovskiy AR, Rulkov NV. Synchronous chaotic response of a nonlinear information transmission system with a chaotic carrier. *Tech. Phys. Lett.* 1993;19(3):71–75.
19. Dedieu H, Kennedy P, Hasler M. Chaos shift keying: modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing Chua's circuits. *IEEE Trans. Circuits and Systems.* 1993;40(10):534–642. DOI: 10.1109/82.246164.
20. Halle KS, Wu CW, Itoh M, Chua LO. Spread spectrum communications through modulation of chaos. *Int. J. Bifurc. Chaos.* 1993;3(2):469–477. DOI: 10.1142/S0218127493000374.
21. Dmitriev AS, Panas AI, Starkov SO. Experiments on the transmission of musical and speech signals using dynamic chaos. Preprint of IRE RAS. 1994. no. 12 (800).
22. Dmitriev AS, Panas AI, Starkov SO. Experiments on speech and music signals transmission using chaos. *Int. J. Bifurc. Chaos.* 1995;5(3):371–376. DOI: 10.1142/S0218127495000910.
23. Dmitriev AS, Panas AI. Dynamic Chaos. New Information Carriers for Communication Systems. M.: Fizmatlit; 2002. 251 p.
24. Lau FCM, Tse CK. Chaos-Based Digital Communication Systems. Berlin: Springer; 2003. 228 p. DOI: 10.1007/978-3-662-05183-2.
25. Kaddoum G. Wireless chaos based communication systems: a comprehensive survey. *IEEE Access.* 2016;4:2621–2648. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2572730.
26. Barker RH. Group synchronizing of binary digital system. In: *Communication Theory.* London: Butterworth; 1953. P. 273–287.
27. Lawrence Marple Jr. *Digital Spectral Analysis.* N.Y.: Dover Publications; 2019. 432 p.



Дмитриев Александр Сергеевич — окончил факультет общей и прикладной физики Московского физико-технического института (1971). Кандидат физико-математических наук по специальности «Радиофизика» (1974), доктор физико-математических наук по специальности «Радиофизика» (1988), профессор (1995). Заведующий отделом статистической радиофизики и главный научный сотрудник в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Область научных исследований и разработок: информационные и коммуникационные технологии на основе динамического хаоса. Автор и соавтор более 250 статей в журналах, 9 монографий, более 25 патентов и авторских свидетельств. Дважды Лауреат Премии Совета Министров СССР. Заслуженный радиотехник Российской Федерации.

Россия, 126009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: chaos@cplire.ru
ORCID: 0000-0002-9187-8016
AuthorID (eLibrary.Ru): 5128



Рыжов Антон Игоревич — родился (1986) в Москве, Россия. Окончил Московский физико-технический институт (2010). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук в области радиофизики (2016). Старший научный сотрудник лаборатории информационных и коммуникационных технологий на основе динамического хаоса в Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва. Автор более 40 публикаций.

Россия, 126009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: mef.box@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6725-7984
AuthorID (eLibrary.Ru): 746678



Ицков Вадим Викторович — родился (1987) в Гомеле, Республика Беларусь. Окончил Московский физико-технический институт (2014) со званием магистр в области прикладной физики и математики. Младший научный сотрудник лаборатории информационных и коммуникационных технологий на основе динамического хаоса в Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. Автор более 20 публикаций.

Россия, 126009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: vadim.itskov@phystech.edu
ORCID: 0000-0001-9154-6401



Лазарев Вадим Анатольевич — родился (1985) в Москве. Окончил Московский физико-технический институт (2009). Защитил диссертацию на соискание кандидата физико-математических наук в области радиофизики (2013). Инженер-электронщик в Яндексе. Автор более 20 публикаций.

Россия, 126009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: dilvishya@gmail.com