



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2023. Т. 31, № 4
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2023;31(4)

Научная статья
УДК 530.182

DOI: 10.18500/0869-6632-003048
EDN: VASLIL

Введение в статистическую теорию относительной передачи информации на основе хаотических сигналов

А. С. Дмитриев, А. И. Рыжов[✉], К. М. Сьерра-Теран

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

E-mail: chaos@cplire.ru, ✉mef.box@gmail.com, serra@phystech.edu

Поступила в редакцию 10.02.2023, принята к публикации 24.04.2023,

опубликована онлайн 3.07.2023, опубликована 31.07.2023

Аннотация. Целью данной работы является анализ статистических характеристик системы относительной передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов в канале связи с аддитивным белым гауссовским шумом, где хаотический сигнал задаётся различными распределениями мгновенных значений. **Методы.** Для достижения этой цели в работе проводится численное моделирование помехоустойчивости прямохаотической системы относительной передачи информации и его сопоставление с результатами аналитического исследования. **Результаты.** Изучены закономерности, связанные с использованием хаотических сигналов с различными статистическими распределениями мгновенных значений. Получены минимальные значения отношения средней энергии хаотического радиоимпульса к спектральной плотности белого гауссовского шума, обеспечивающие заданные вероятности ошибок. **Заключение.** Показано, что предложенная система работает эффективно при больших значениях коэффициента процессинга, и с увеличением коэффициента процессинга нивелируется зависимость помехоустойчивости от конкретного вида статистического распределения хаотического сигнала.

Ключевые слова: хаотические радиоимпульсы, относительная передача, численное моделирование, статистические характеристики, вероятность ошибки на бит.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00070).

Для цитирования: Дмитриев А. С., Рыжов А. И., Сьерра-Теран К. М. Введение в статистическую теорию относительной передачи информации на основе хаотических сигналов // Известия вузов. ПНД. 2023. Т. 31, № 4. С. 421–438. DOI: 10.18500/0869-6632-003048. EDN: VASLIL

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

Introduction to the statistical theory of differential communication based on chaotic signals

A. S. Dmitriev, A. I. Ryzhov✉, C. M. Sierra-Teran

Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia

E-mail: chaos@cplire.ru, ✉mef.box@gmail.com, serra@phystech.edu

Received 10.02.2023, accepted 24.04.2023, available online 3.07.2023, published 31.07.2023

Abstract. The *purpose* of this paper is to analyse the statistical characteristics of a Direct Chaotic Differentially Coherent communication scheme based on chaotic radio pulses in a communication channel with additive white Gaussian noise, where the chaotic signal is given by different instantaneous distributions. *Methods.* To achieve this goal, numerical modelling of the noise immunity of Direct Chaotic Differentially Coherent communication is conducted and compared with the results of analytical research. *Results.* The regularities associated with the use of chaotic signals with various statistical distributions of instantaneous values were studied. The minimum values of energy per bit to white Gaussian noise power spectral density ratio were obtained, providing the required error probabilities. *Conclusion.* It is shown that the proposed system works efficiently at high values of processing gain, and as the processing gain increases, the dependence of noise immunity on the specific statistical distribution of the chaotic signal is levelled out.

Keywords: chaotic radio pulses, differential communication scheme, numerical simulation, statistic characteristics, bit-error probability.

Acknowledgements. The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-29-00070).

For citation: Dmitriev AS, Ryzhov AI, Sierra-Teran CM. Introduction to the statistical theory of differential communication based on chaotic signals. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2023;31(4):421–438. DOI: 10.18500/0869-6632-003048

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

Введение

Явление динамического хаоса (ДХ) было открыто и активно исследовалось, начиная с середины 60-х годов XX века. За первые 20 лет этот феномен был изучен детально с примерами в различных областях естествознания. Многие свойства ДХ оказались удивительными, к ним, безусловно, относится и возможность синхронизации двух и более систем с динамическим хаосом. Именно это свойство вызвало первоначальный интерес к хаосу, как к потенциальному носителю информации. И, хотя первые схемы передачи информации, предложенные на основе хаотической синхронизации, оказались недостаточно эффективными с точки зрения помехоустойчивости [1–12], начало использования динамического хаоса для передачи и обработки информации было положено.

Следует отметить, что задача передачи информации очень сильно зависит от физических условий, в которых она осуществляется. Реально сейчас имеется значительное число примеров использования ДХ для передачи информации в радиодиапазоне электромагнитных волн (по кабелю и через свободное пространство) [7–9, 13–15], оптических системах связи (по волоконно-оптическим кабелям) [10, 11, 16–18], в водной среде (ультразвуковой хаос) [12, 13, 19, 20] и др.

Хотя результаты, представленные в данной статье, могут иметь отношение к любой из упомянутых областей применения ДХ к передаче и обработке информации, прежде всего она посвящена беспроводной передаче информации с помощью высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных сигналов (радиоволн). Эти результаты также могут быть использованы при создании средств для наблюдения окружающей среды с помощью ламп радиосвета —

миниатюрных источников широкополосного некогерентного микроволнового излучения на основе динамического хаоса [21, 22].

Специфика применения хаотических сигналов для беспроводных средств связи определяется двумя факторами: 1) нужно обеспечить определенное отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума на требуемой дальности передачи, что в условиях ограничений на спектральную плотность излучаемой мощности регулируется процессингом (базой) сигнала; 2) необходимо принять меры защиты от многолучевой интерференции, например, за счет использования импульсных режимов и защитных интервалов.

Хотя попытки применения ДХ в качестве сигналов, несущих информацию, начинались, в первую очередь, с идей, связанных с синхронизацией, на самом деле он обладает и целым рядом других свойств, привлекательных с точки зрения передачи данных. Поэтому после относительных неудач по использованию хаотической синхронизации было обращено внимание на другие возможности.

Среди них — относительные методы передачи и использование энергетического приема. Здесь речь пойдет об относительной передаче: совокупности методов передачи, в которых сигнал сравнения передается вместе с информационным сигналом по каналу связи [14–16, 23, 24]. Однако, прежде чем переходить к анализу этих систем, обозначим, в каких ситуациях представляет интерес использование хаотических сигналов для передачи информации.

Эти ситуации являются прямыми следствиями следующих двух свойств самих хаотических сигналов.

Во-первых, для передачи символа используется фрагмент хаотического сигнала, достаточный по длительности для того, чтобы его можно было охарактеризовать как отрезок шумоподобного процесса.

Во-вторых, хаотический сигнал, как правило, характеризуется достаточно широким спектром.

Совокупность этих двух свойств приводит к тому, что использование хаоса для передачи информации производится широкополосными сигналами с базой, значительно превосходящей единицу или, другими словами, сигналами со значительным расширением спектра.

1. Сигналы, расширяющие спектр

В отличие от узкополосного сигнала, мощность которого сконцентрирована внутри полосы, численно примерно равной скорости передачи данных, сигнал с расширенным спектром «размазывает» свою мощность на значительно большую полосу частот [17, 25] и, при равной с узкополосным сигналом мощности, имеет более низкую спектральную плотность мощности. Как следствие, в зоне уверенного приема спектральная плотность мощности принимаемого сигнала может быть близка к спектральной плотности мощности фонового шума и даже может быть значительно ниже нее. Однако без предварительного (априорного) знания структуры и параметров коммуникационной системы не так-то просто зафиксировать даже само наличие сигнала. Но даже если присутствие сигнала обнаружено, без наличия соответствующей дополнительной информации сообщение сложно извлечь.

Основные требования для систем связи с расширением спектра можно суммировать в следующем виде.

1. Передаваемый сигнал занимает полосу частот значительно более широкую, чем скорость передачи информации.
2. Полоса частот передаваемого сигнала не зависит от скорости передачи данных.
3. Демодуляция может быть осуществлена, в частности, путем корреляции принятого сигнала с репликой (копией) сигнала, использованного в передатчике для расширения данных.

Первоначально технологии расширения спектра создавались вокруг двух главных схем: прямой последовательности (Direct Sequence — DS) и перескоков частоты (Frequency Hopping — FH) [1–3, 14–17].

Позднее к этим двум технологиям расширения спектра добавилась технология «chirp» — импульсная частотная модуляция, при которой носитель свипирует частоту по некоторой широкой полосе в данном импульсном интервале. Она используется, например, в малопотребляющих сетях большого радиуса действия типа LoRaWAN [26].

Ширина полосы несущего сигнала сама по себе не характеризует сигнал с точки зрения расширения спектра. Например, сверхширокополосный ультракороткий импульс как носитель информации имеет процессинг (или базу) сигнала порядка единицы, то есть он сверхширокополосный, но при этом не является сигналом с расширением спектра, поскольку ширина спектра совпадает со скоростью передачи. Но пачка N ультракоротких импульсов псевдослучайной полярности, с помощью которой передается один бит информации, имеет процессинг N , поскольку для этого сигнала $K = \Delta T \Delta F = N$, и представляет собой сигнал с расширением спектра.

Идея технологии расширения спектра следует из соотношения К. Шеннона для пропускной способности канала

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (1)$$

где C — пропускная способность канала в битах в секунду, W — полоса частот в герцах, N — мощность шума, S — мощность сигнала. Уравнение (1) показывает связь между возможностью канала передавать информацию без ошибок в зависимости от отношения сигнал/шум, имеющего место в канале, и полосы частот, используемой для передачи информации.

Итак, пусть C — желаемая скорость передачи информации, тогда, переходя от двоичного логарифма к натуральному, получаем

$$\frac{C}{W} = 1.44 \cdot \log_e \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2)$$

и для малых значений отношения $\frac{S}{N}$, скажем, меньше 0.1 (поскольку мы хотим использовать их в помехоустойчивой системе), разлагая логарифм в ряд и используя первый член разложения, имеем

$$\frac{C}{W} = 1.44 \cdot \frac{S}{N}. \quad (3)$$

Откуда следует, что

$$W = \frac{C \cdot N}{1.44 \cdot S}. \quad (4)$$

То есть для любого заданного отношения шума к сигналу можно обеспечить низкий поток информационных ошибок, увеличивая полосу, используемую для передачи информации: например, если мы хотим иметь связь, в которой шум интерференции (воздействие шума) в 100 раз (на 20 дБ) больше чем сигнал, и поток составляет 10 кбит/с, то 10 кбит информации должны передаваться в канале с полосой частот

$$W = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 10^2}{1.44} = 6.7 \cdot 10^5 \text{ Гц}. \quad (5)$$

На практике сама информация может быть введена в сигнал с расширенным спектром несколькими методами. Наиболее общий заключается в добавлении информации в расширенный спектр путем использования расширяющей модуляции. Эта технология применима к любой системе, расширяющей спектр, которая использует кодовую последовательность для определения радиочастотной полосы (и системы прямой расширяющей последовательности, и системы с перескоком частоты являются хорошими кандидатами).

2. Связь на хаотических сигналах

Хаотические сигналы с присущей им широкополосностью являются естественными кандидатами для расширения полосы частотного спектра исходного информационного сигнала. Поскольку при использовании хаотических сигналов для кодирования информации результирующие сигналы являются сигналами с расширенным спектром, имеющими более широкую по сравнению с исходными информационными сигналами полосу и более низкую спектральную плотность, они обладают всеми преимуществами сигналов с расширением спектра, такими как сложность детектирования без дополнительной информации о системе, устойчивость к многолучевым замираниям, к воздействию помех и т. д. Более того, как следствие высокой чувствительной зависимости от начальных условий и вариации параметров, легко может быть воспроизведено большое число разных расширяющих сигналов (wave forms). Поэтому динамический хаос представляет собой недорогое и универсальное решение для систем связи с расширением спектра.

С начала 1990-х годов был предложен ряд схем модуляции и демодуляции с расширением спектра на основе динамического хаоса. При этом практическое значение имеют в первую очередь те из них, которые не используют хаотическую синхронизацию.

Среди них DCC — Direct Chaotic Communications [5, 10, 13–15, 19, 20], а также идеологически близкая к DCC схема COOK — Chaos on-off Keying [6, 11] относятся к первому типу (энергетический прием), а DCSK — Differential Chaotic Shift Keying [6, 11, 23, 24, 27, 28] и CDSK — Correlation Delay Shift Keying [6, 11, 25, 29] — к относительным методам.

По своим статистическим характеристикам упомянутые системы были близки к классическим узкополосным системам связи. Но экспериментально из них, вплоть до сегодняшнего дня, реализована только схема DCC. Что касается относительных хаотических систем связи, то даже у лучшей из них на то время — DCSK — возникли проблемы с практической реализацией.

Формально как DCC, так и DCSK принадлежат к системам связи с расширением спектра, однако из-за отсутствия копий формы сигнала на приемной стороне, в них используется зашумленная форма сигнала, передаваемая по эфиру, что приводит к ухудшению их статистических характеристик по сравнению с «истинно» когерентным приемом. Особенно это заметно при использовании сигналов с большими и очень большими коэффициентами процессинга. Вместе с тем эффект накопления сигнала в них все же работает, что позволяет извлекать полезный сигнал даже при уровне сигнал/шум меньше нуля.

2.1. Структура сигнала и метод модуляции. В настоящей работе рассматривается схема прямохаотической относительной передачи информации (DC^2 — Direct Chaotic Differentially Coherent), где используются в качестве носителя информации хаотические радиоимпульсы [30–33]. Относительная передача информации на основе хаотических радиоимпульсов DC^2 с точки зрения практической реализации отличается от схемы передачи DCSK [11, 27, 28] тем, что задержки в ней имеют существенно меньшую длительность.

В упомянутых работах [30–33] была показана работоспособность схемы связи DC^2 и ее эффективность при средних и больших отношениях сигнал/шум, проведены аналитические исследования влияния наличия белого шума в канале на вероятность возникновения ошибок при передаче цифровых данных.

В данной работе проведены исследования статистических характеристик системы DC^2 методами численного моделирования для различных распределений мгновенных значений хаотического сигнала, которые в совокупности с ранее полученными аналитическими оценками позволяют сформулировать основные теоретические положения статистической теории схемы прямохаотической относительной передачи информации DC^2 .

3. Относительная передача информации на основе хаотических радиоимпульсов

Так же, как и в прямохаотической системе связи с энергетическим приемом [5, 7–10, 13–15, 19, 20], носителем информации в DC^2 системе связи являются хаотические радиоимпульсы. Хаотический сигнал имеет шумоподобную реализацию и быстро спадающую функцию автокорреляции. Эти ключевые свойства используются в рассматриваемой схеме относительной передачи информации. Полоса частот хаотического радиоимпульса определяется полосой частот исходного хаотического сигнала и в широких пределах изменения длины импульса не зависит от длительности импульса.

Если длительность хаотического радиоимпульса $\Delta T \gg 1/(2\Delta F)$, то спектр мощности потока хаотических радиоимпульсов практически не будет отличаться от спектра мощности исходного хаотического сигнала. Поскольку величина $K = \Delta T \Delta F$ представляет собой коэффициент процессинга сигнала, то увеличение длины хаотического радиоимпульса приводит к увеличению его коэффициента процессинга.

Для схемы DC^2 важной характеристикой является время автокорреляции хаотического радиоимпульса, которое обратно пропорционально полосе частот хаотического сигнала $\Delta\tau \sim 1/\Delta F$. Если хаотический радиоимпульс сместить на время большее, чем время автокорреляции, то можно эти два радиоимпульса рассматривать как некоррелированные. Эта особенность лежит в основе схемы DC^2 для модуляции и передачи данных.

Рассматриваемая схема передачи данных относится к относительному когерентному приему, где, в отличие от классической схемы когерентного приема, копия передаваемого сигнала не хранится в приемнике, а пересылается по радиоканалу.

Для передачи данных в DC^2 в канал передается промодулированный хаотический радиоимпульс и его не промодулированная копия с задержкой между ними больше, чем время автокорреляции. При приеме производится корреляция (когерентный прием) между промодулированным радиоимпульсом и его задержанной не промодулированной копией. При модуляции для передачи логической единицы хаотический радиоимпульс передается без изменений, для передачи логического нуля хаотический радиоимпульс умножается на -1 . Таким образом, после относительного когерентного приема в приемнике возникают импульсы с положительными и отрицательными значениями.

Рассмотрим более подробно функциональные структуры передатчика и приемника предложенной схемы DC^2 . Передатчик системы (рис. 1, а) состоит из источника хаотических радиоимпульсов; делителя; модулятора, управляемого внешним информационным сигналом; задержки на время τ , превышающее время автокорреляции сигнала; сумматора и передающей антенны. Источник хаотических радиоимпульсов формирует импульсы длительностью T_p ; промежутки между импульсами — защитные интервалы — имеют длительность T_{gi} . Суммарная длительность импульса и защитного интервала представляет собой длительность передаваемого бита T_b . Каждый импульс поступает в делитель, после которого попадает в два канала. В первом канале его модулируют информационным сигналом путем умножения на 1, а во втором канале задерживают на время τ . Умножение на $+1$ соответствует передаче «1», умножение на -1 — передаче «0». После этого сигналы суммируют, суммарный сигнал усиливают, он поступает в антенну и излучается. При этом длина излучаемого суммарного импульса равна $T_r = T_p + \tau$.

Приемник системы (рис. 1, б) состоит из антенны, малошумящего усилителя, делителя, задержки на время τ , перемножителя, интегратора и порогового устройства. Принятый антенной сигнал усиливают до нужного уровня в малошумящем усилителе, делят пополам и подают в два канала. В первом канале никаких действий с сигналом не производят, и он поступает на перемножитель. Во втором канале сигнал задерживают на время τ , после чего он также поступает

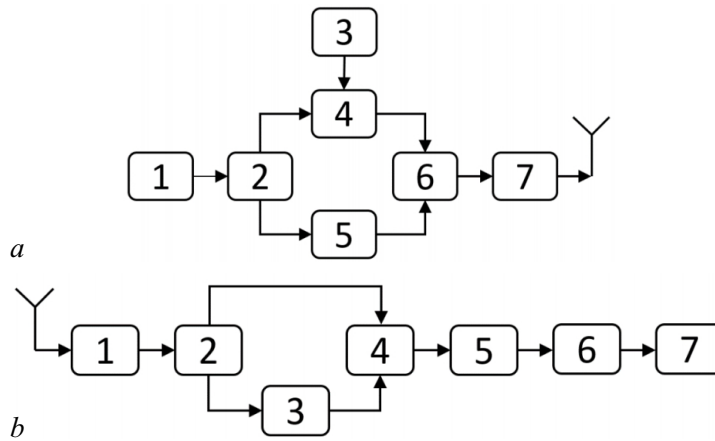


Рис. 1. *a* – Структура передатчика: 1 – источник хаотических радиоимпульсов, 2 – делитель, 3 – информационная последовательность, 4 – модулятор, 5 – задержка, 6 – сумматор, 7 – усилитель; *b* – структура приемника: 1 – малозумящий усилитель, 2 – делитель, 3 – задержка, 4 – перемножитель, 5 – интегратор, 6 – пороговое устройство, 7 – информационная последовательность

Fig. 1. *a* – Transmitter structure: 1 – source of chaotic pulses, 2 – divider, 3 – information data, 4 – modulator, 5 – time delay, 6 – combiner, 7 – amplifier; *b* – receiver structure: 1 – low-noise amplifier, 2 – divider, 3 – time delay, 4 – multiplier, 5 – integrator, 6 – threshold device, 7 – information data

на перемножитель. Заметим, что длительность импульса, полученного путем перемножения импульсов, поступивших на перемножитель, равна T_p . Импульс, полученный с выхода перемножителя, интегрируется в течение времени T_p . Затем сигнал поступает на пороговое устройство с нулевым порогом. Если поступивший сигнал больше нуля, то пороговое устройство фиксирует прием «1», если же он меньше нуля, то фиксируется прием «0».

3.1. Демодуляция сигнала. При исследовании процесса приема схемы DC² рассматривается следующая модель ее функционирования [30–33].

Пусть $S_k(t)$ – k -й хаотический импульс в потоке, формируемом источником хаотических радиоимпульсов (их необходимо индексировать, поскольку, в силу хаотичности, они все разные); $\alpha_k \in \{-1, 1\}$ – значение информационного модулирующего сигнала. При передаче k -го двоичного информационного символа сигнал на выходе передатчика будет выглядеть следующим образом:

$$Y_k(t) = (\alpha_k S_k(t) + S_k(t - \tau)) / 2, \quad (6)$$

В приемнике, при отсутствии шумов, импульс на выходе блока перемножения, соответствующий k -му информационному символу, поступает на интегратор, после которого приобретает вид:

$$Z_k(t) = \left[\int_{\tau}^{T_p + \tau} \alpha_k S_k(t - \tau) S_k(t - \tau) dt \right] / 4 + \theta_k(t), \quad (7)$$

где

$$\theta_k(t) = \left[\int_{\tau}^{T_p + \tau} \alpha_k S_k(t) S_k(t - \tau) dt + \int_{\tau}^{T_p + \tau} \alpha_k S_k(t) S_k(t - 2\tau) dt + \int_{\tau}^{T_p + \tau} \alpha_k S_k(t - \tau) S_k(t - 2\tau) dt \right] / 4. \quad (8)$$

Составляющая $\theta_k(t)$ сигнала (8) представляет собой шум, создаваемый самой схемой. Поскольку время задержки τ превышает время автокорреляции, все компоненты $\theta_k(t)$ будут существенно меньшими по сравнению с первым членом в выражении (7), являющимся полезным сигналом. Таким образом, знак α_k («+» или «-») определяет и знак $Z_k(t)$. Сигнал с выхода интегратора поступает на блок принятия решения, где осуществляется его сравнение с нулевым порогом. По знаку определяется значение выходного двоичного информационного символа.

4. Аналитические оценки помехоустойчивости в канале с белым шумом

Аналитические оценки помехоустойчивости для относительной схемы передачи DC² получены в работе [30] в предположении, что к сигналу k -го на входе приемника добавляется флуктуационный шум с гауссовским распределением мгновенных значений и постоянной спектральной плотностью:

$$V_k(t) = Y_k(t) + \eta_k(t). \quad (9)$$

Вероятность ошибки при приеме каждого битового сообщения можно представить в виде:

$$P_{\text{err}} = f \left(N_c \Delta F T_p / \sqrt{N_c N_0 \Delta F T_p \left(2 + \frac{N_0}{2N_c} + \frac{5N_c}{2N_0} \right)} \right), \quad (10)$$

где

$$f(x) = \left[1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right]. \quad (11)$$

Здесь N_c — спектральная плотность хаотического сигнала, ΔF — полоса хаотического сигнала, N_0 — спектральная плотность шума.

При анализе аналитической формы для вероятности ошибки было выяснено, что она обладает интересным асимптотическим свойством, а именно, при стремлении отношения сигнал/шум к бесконечности вероятность ошибки стремится не к нулю, а к некоторому пределу:

$$P_{\text{err lim}} = f \left(\sqrt{\frac{2\Delta F T_p}{5}} \right). \quad (12)$$

Аналитические оценки помехоустойчивости дают надёжную основу для практических расчетов при проектировании средств сверхширокополосной относительной связи на основе хаотических радиоимпульсов. Однако им свойственны определенные ограничения, которые могут быть преодолены путем статистического моделирования для тех случаев, когда необходимо выяснить, например, границы применимости аналитических оценок.

К таким случаям относятся вопросы влияния статистических характеристик хаотического сигнала на помехоустойчивость. Дело в том, что приведенные выше аналитические оценки произведены для случая, когда вероятностное распределение мгновенных значений хаотического сигнала является гауссовским. То есть, в принципе, для такого сигнала существуют выбросы со сколь угодно большой амплитудой. Реальные же хаотические сигналы являются ограниченными по амплитуде. Влияние ограниченности значений сигнала по сравнению с сигналами, имеющими Гауссово распределение, удобно рассматривать путем прямого статистического моделирования, используя сигналы с соответствующими вероятностными распределениями мгновенных значений.

5. Статистическое моделирование помехоустойчивости

Ниже для численного анализа помехоустойчивости относительной передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов используется дискретная модель сигнала во времени. Дискретный во времени хаотический сигнал формируется псевдослучайными отсчетами, соответствующими трём различным распределениям (нормальному, равномерному и телеграфному), покрывающим типичные случаи распределения мгновенных значений сигналов.

Другими словами, для анализа помехоустойчивости схемы связи DC^2 осуществляется дискретизация сигнала по времени, в результате чего сигналы $S_k(t)$ и $Y_k(t)$ заменяются на сигналы $S_k(i)$ и $Y_k(i)$, а шум $\eta(t)$ — на шумовые отсчеты $\eta(i)$, где i — номер отсчета, $S_k(i) = S_k(iT/B)$, $Y_k(i) = Y_k(iT/B)$, $\eta(i) = \eta(iT/B)$, где B — база сигнала, $B = 2K$.

Как и в непрерывном случае, если на выходе интегрирующего устройства (в данном случае сумматора) сигнал отрицательный, то принимается решение о том, что принят символ «0», если положительный, то — «1».

Число отсчетов случайного сигнала, моделирующего хаотический сигнал, составляет $KS+1$, где K — коэффициент процессинга, S — скважность. Для вычисления вероятности ошибки сравниваются исходный информационный сигнал и сигнал на выходе детектора при разных значениях отношения энергии на бит к спектральной плотности шума.

Зная значение отношения энергии бита к спектральной плотности шума, коэффициент процессинга и измеряя уровень мощности на выходе передатчика, можно рассчитать необходимое значение уровня мощности шумового сигнала для различных случаев

$$\frac{P_S}{P_N} \text{ дБ} + 10 \log_{10} K = \frac{E_b}{N_0} \text{ дБ}, \quad (13)$$

где P_S — уровень мощности сигнала на выходе передатчика, P_N — уровень мощности шумового сигнала на входе приемника, K — коэффициент процессинга.

Белый гауссовский шум в канале связи моделировался отсчетами псевдослучайных чисел с нормальным распределением, генерируемых при помощи стандартной библиотечной функции «randi()» в пакете MATLAB.

Полоса шумового сигнала согласуется с полосой хаотического сигнала ввиду того, что в процессе математического моделирования оба сигнала формируются дискретным образом с одной и той же частотой дискретизации.

5.1. Моделирование для канала без шума. Схема связи DC^2 моделировалась в соответствии с моделью, описанной выше. В результате была получена зависимость вероятности ошибки на бит от значений коэффициента процессинга (рис. 2). По данному графику видно, что система связи начинает работать при уровнях ошибок $P = 10^{-3}$ при высоких

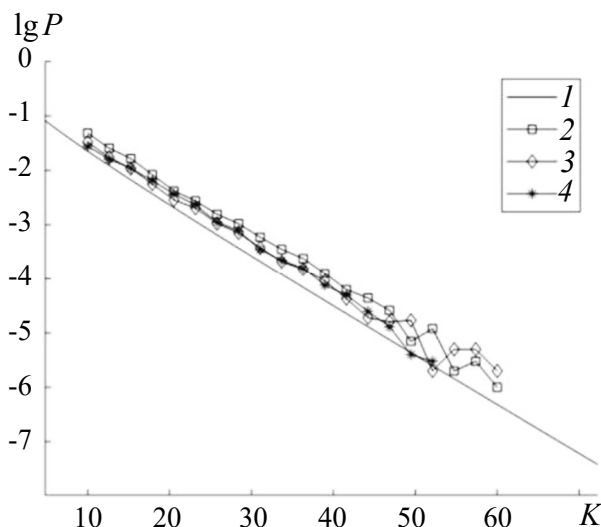


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки от коэффициента процессинга сигнала при отсутствии флуктуационных помех. Линия 1 соответствует аналитической оценке, 2 — компьютерному расчету с гауссовским распределением, 3 — с равномерным распределением, а кривая 4 — с телеграфным распределением

Fig. 2. Error probability versus processing coefficient graph without fluctuation noise. Line 1 corresponds to analytical estimate, 2 — to computer modeling with gaussian distribution, 3 — to uniform distribution, and 4 — to telegraph distribution

значениях коэффициента процессинга (начиная с $K \sim 25$), и при его повышении можно рассчитывать на более низкие значения вероятности ошибки на бит.

Аналитическая оценка для этой зависимости в соответствии с формулой (10) и результаты моделирования находятся в хорошем соответствии.

5.2. Моделирование для канала с гауссовским шумом. Перейдём к статистическому моделированию схемы связи DC^2 при наличии шума в канале связи и сравнению полученных результатов с аналитическими оценками по формулам (8)–(10) из работ [30–33].

Статистическое численное моделирование, при помощи которого была рассчитана помехоустойчивость относительной схемы передачи информации DC^2 , осуществлялось для следующих значений коэффициента процессинга: $K = 5, 10, 15, 20, 50, 100, 200, 300, 500, 10000$. Сначала проводились расчеты для случая модели хаотического сигнала в виде потока значений с гауссовским распределением. Его результаты для небольших значений коэффициента процессинга $K = 5, 10$ и 20 представлены на рис. 3. Видно, что при $K = 5, 10$ и 20 невозможно достичь вероятности ошибки $P < 10^{-3}$ при любых отношениях энергии хаотического радиоимпульса E_b к спектральной плотности гауссовского полосового шума N_0 .

Эксперименты, проведенные с другими типами распределений моделей хаотического сигнала, а именно равномерным и телеграфным распределением показывают, что и при этих распределениях сигнала вероятность ошибки P меньше 10^{-3} не достигается при малых значениях K . При этом следует отметить, что при малых коэффициентах процессинга K модели хаотического сигнала с телеграфным и равномерным распределениями более помехоустойчивы по отношению к модели с гауссовским распределением (рис. 4).

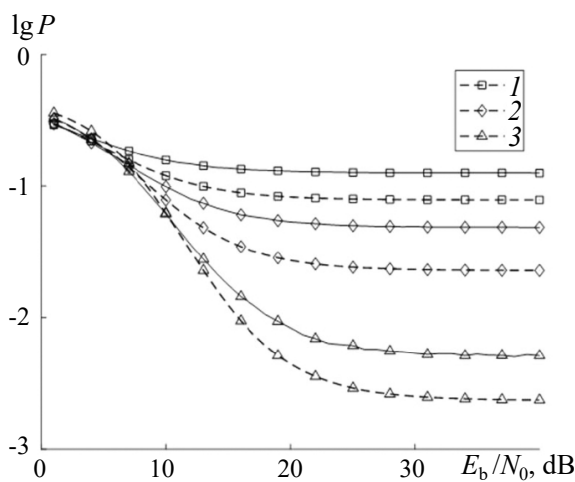


Рис. 3. Зависимости вероятности ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности шума при малых значениях коэффициента процессинга K (гауссовское распределение). Кривые 1, 2, 3 соответствуют значениям $K = 5; 10; 20$ (сплошная линия — экспериментальные результаты, пунктирная — аналитическая оценка)

Fig. 3. Bit error probability as a function of E_b/N_0 obtained for the low values of the processing coefficient K (gaussian distribution). Dashed series 1, 2, 3 correspond to the simulation results for $K = 5; 10; 20$ and solid curves 1, 2, 3 — to the analytical estimates for $K = 5; 10; 20$ respectively

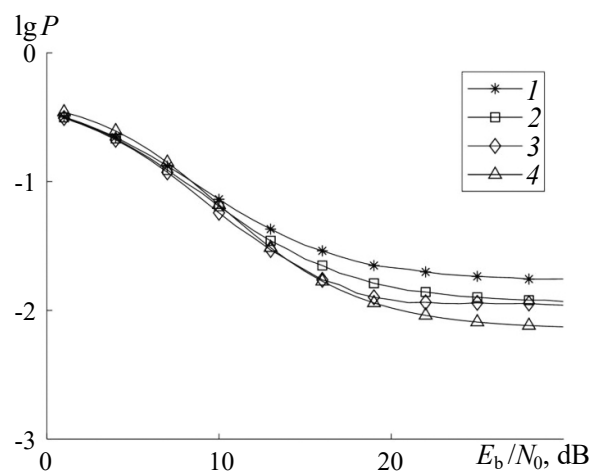


Рис. 4. Зависимости вероятности ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности шума при значении коэффициента процессинга $K = 15$. Кривая 1 соответствует компьютерному расчету для сигнала с гауссовским распределением, 2 — с равномерным распределением, 3 — с телеграфным распределением, а кривая 4 — аналитической оценке

Fig. 4. Bit error probability as a function of E_b/N_0 obtained for $K = 15$. Line 1 corresponds to computer modeling with gaussian distribution, 2 — to uniform distribution, 3 — to telegraph distribution, and 4 — to analytical estimate

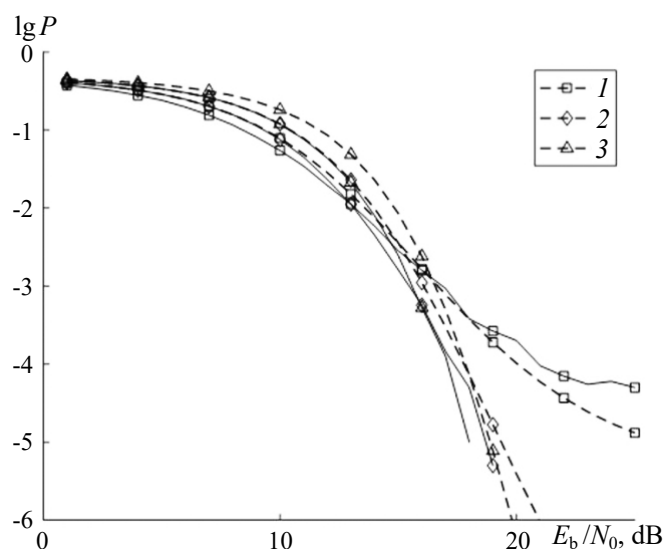


Рис. 5. Зависимости вероятности ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности шума при значениях $K = 50; 100; 200$ (соответствуют кривым 1, 2, 3), сплошные линии соответствуют экспериментальным результатам, а пунктирные — аналитической оценке

Fig. 5. Bit error probability as a function of E_b/N_0 obtained for $K = 15; 100; 200$ (corresponding to curves 1, 2, 3), solid lines correspond to experimental results and dashed ones — to analytical estimate

Реальные хаотические сигналы имеют ограниченную амплитуду и не имеют длинных хвостов, как при гауссовском распределении. Поэтому для них более справедливыми являются оценки, относящиеся к равномерно распределенному сигналу и к случайному телеграфному сигналу.

Расчеты показывают, что с увеличением коэффициента процессинга зависимость результатов моделирования от типа распределения модели хаотического сигнала нивелируется, и при оценке характеристик можно ограничиться каким-то одним типом сигнала, например, моделью сигнала с гауссовским распределением.

При увеличении коэффициента процессинга до $K = 50$ минимальное значение E_b/N_0 , обеспечивающее вероятность ошибки $P < 10^{-3}$, составляет 15.3 дБ (рис. 5).

Хаотический сигнал моделируется случайным сигналом с гауссовским распределением. При увеличении K значения вероятности ошибки на бит в зависимости от уровня внешнего шума для различных распределений становятся близки друг к другу и ложатся на одну и ту же кривую (рис. 6).

Отдельный интерес представляет исследование возможностей системы связи при очень больших коэффициентах процессинга. Так, на рис. 7 приведены результаты расчетов для коэффициента процессинга $K = 10000$. Они показывают, что система связи в этом случае может работать с вероятностью ошибки на бит 10^{-3} при уровне отношения $E_b/N_0 = 22.2$ дБ. Однако, если перейти непосредственно к зависимости от отношения сигнал/шум (С/Ш — SNR) (рис. 7, b), то можно видеть, что благодаря высокому коэффициенту процессинга необходимый уровень С/Ш (SNR) в этом случае составляет менее -10 дБ, что говорит о том, что система связи работоспособна при уровне сигнала намного ниже уровня шумов в канале связи.

Далее дополнительно было проведено компьютерное моделирование с целью выявления оптимального значения коэффициента процессинга, которое позволяет обеспечить заданную вероятность ошибки на бит (в данном случае, $P = 10^{-3}$) при минимальном значении отношения средней энергии хаотического сигнала хаотического радиоимпульса E_b к спектральной плотности гауссовского полосового шума N_0 (рис. 8).

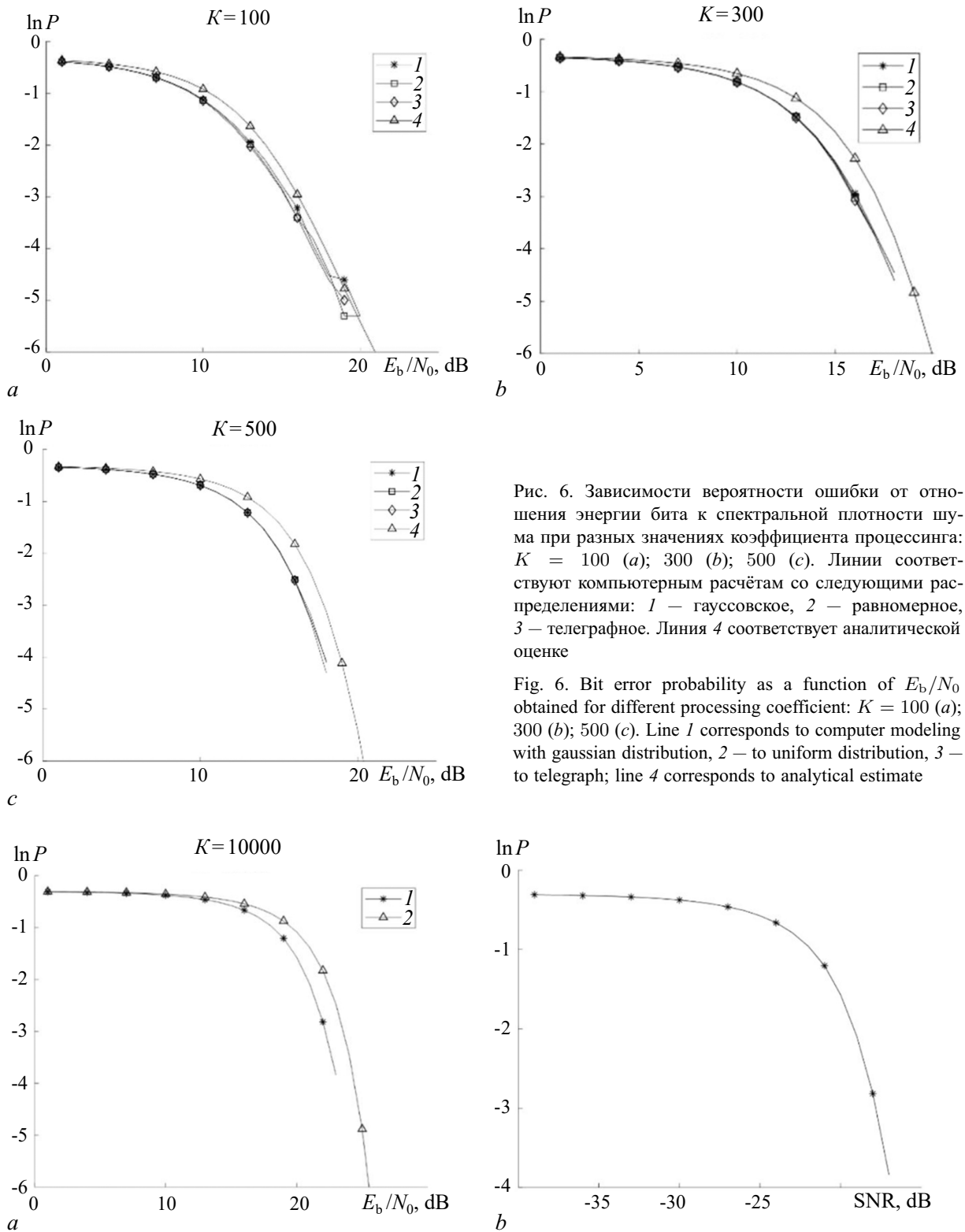


Рис. 6. Зависимости вероятности ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности шума при разных значениях коэффициента процессинга: $K = 100$ (a); 300 (b); 500 (c). Линии соответствуют компьютерным расчётам со следующими распределениями: 1 – гауссовское, 2 – равномерное, 3 – телеграфное. Линия 4 соответствует аналитической оценке

Fig. 6. Bit error probability as a function of E_b/N_0 obtained for different processing coefficient: $K = 100$ (a); 300 (b); 500 (c). Line 1 corresponds to computer modeling with gaussian distribution, 2 – to uniform distribution, 3 – to telegraph; line 4 corresponds to analytical estimate

Рис. 7. Зависимости вероятности ошибки при $K = 10000$ от: a – отношения энергии бита к спектральной плотности шума; b – отношения уровня сигнала к уровню шума (SNR). На рис. a линия 1 – компьютерный расчет для гауссовского распределения, 2 – аналитическая оценка

Fig. 7. Error probability as a function of: a – E_b/N_0 with $K = 10000$; b – signal to noise ratio (SNR). Figure a shows line 1 corresponding to computer modeling for gaussian distribution, and line 2 corresponding to analytical estimate

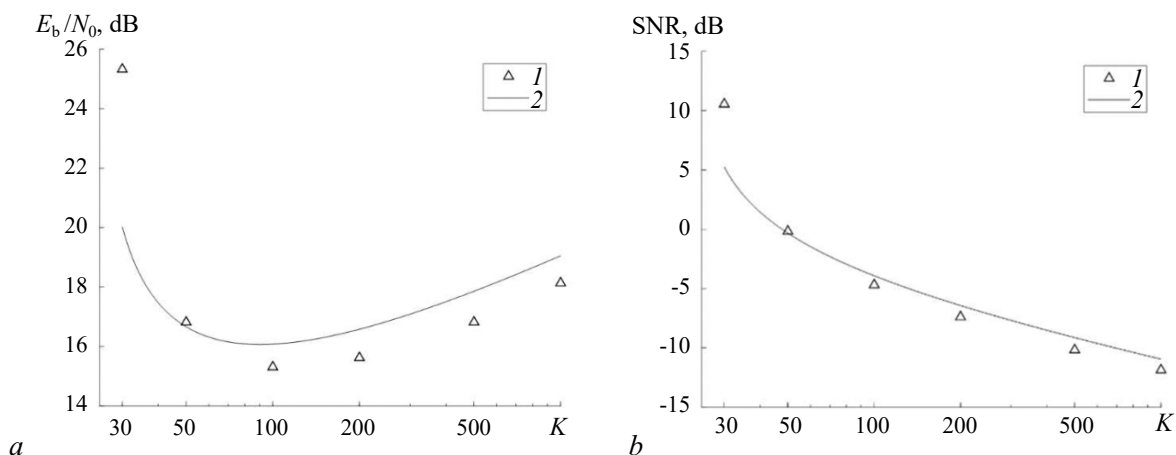


Рис. 8. *a* — График зависимости E_b/N_0 от коэффициента процессинга, когда достигается вероятность ошибки $P = 10^{-3}$; *b* — график зависимости SNR от коэффициента процессинга, когда достигается вероятность ошибки $P = 10^{-3}$. Кривая 1 соответствует компьютерному эксперименту (гауссовское распределение), 2 — аналитической оценке

Fig. 8. *a* — E_b/N_0 versus processing coefficient graph, where error probability $P = 10^{-3}$ is reached; *b* — SNR versus processing coefficient graph, where error probability $P = 10^{-3}$ is reached. Line 1 corresponds to computer modeling for gaussian distribution, and line 2 corresponds to analytical estimate

Результаты, представленные на рис. 8, показывают, что у графика зависимости E_b/N_0 от K имеется экстремум при $K = 100$, в котором достигается минимальное значение $E_b/N_0 = 15.3$ дБ. Далее, при повышении K увеличивается значение E_b/N_0 , обеспечивающее вероятности ошибки $P = 10^{-3}$ в системе связи, что делает её работу с такими параметрами менее энергетически выгодной. Однако, несмотря на это, необходимо отметить, что, согласно рис. 8, *b*, с ростом значения коэффициента процессинга уменьшается необходимое отношение SNR, обеспечивающее в системе связи вероятность ошибки $P = 10^{-3}$, что делает выгодным использование сигналов с большой базой в прямохаотической относительной схеме передачи информации с точки зрения скрытности и работы ниже уровня шумов.

Заключение

В работе исследованы статистические характеристики новой схемы относительной передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов, в которой используются задержки с длительностью, определяемой временем затухания автокорреляционной функции хаотического сигнала. В этом — принципиальное отличие рассматриваемой схемы от классической относительной схемы DCSK, в которой время задержки определяется длиной передаваемого бита. Проведено численное моделирование и его сопоставление с ранее полученными аналитическими оценками, касающимися зависимости вероятностей ошибки на бит от отношения энергии на бит к спектральной плотности белого гауссовского полосового шума. Изучены закономерности, связанные с использованием хаотических сигналов с различными статистическими распределениями мгновенных значений.

Показано, что при больших значениях процессинга ($K > 30$) рассматриваемая схема связи работает эффективно как в канале без внешних флуктуационных помех, так и в канале с белым гауссовским шумом. При этом с увеличением коэффициента процессинга нивелируется зависимость помехоустойчивости от конкретного вида статистического распределения хаотического сигнала. Эта закономерность в значительной степени связана с тем, что при малых значениях процессинга для хаотических сигналов с гауссовским или равномерным распределением вариабельность принимаемой энергии от импульса к импульсу значительна, и это ухудшает вероятность

правильного приема. В то же время при телеграфном распределении, соответствующем в исходной системе хаотическому сигналу с постоянной амплитудой (например, фазовый хаос) энергия импульсов в потоке одинакова даже при небольших процессингах. При больших процессингах при всех трех типах распределений вариабельность энергии от импульса к импульсу стремится к нулю.

Совокупность полученных результатов представляет собой основу статистической теории схемы относительной прямохаотической передачи. Дальнейшее развитие этой теории возможно при использовании методов измерения и оценки параметров шумоподобных сигналов на фоне шумов и помех [34].

Список литературы

1. *Kocarev L., Halle K. S., Eckert K., Chua L. O., 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.
2. *Parlitz U., Chua L. O., Kocarev L., Halle K. S., 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.
3. *Cuomo K. M., Oppenheim A. V.* 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.
4. *Бельский Ю. Л., Дмитриев А. С.* Передача информации с использованием детерминированного хаоса // *Радиотехника и электроника.* 1993. Т. 38, № 7. С. 1310–1315.
5. *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.
6. *Dedieu H., Kennedy M. P., Hasler M.* Chaos shift keying: modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing Chua's circuits // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing.* 1993. Vol. 40, no. 10. P. 634–642. DOI: 10.1109/82.246164.
7. *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.
8. *Dmitriev A. S., Panas A., Starkov S. O.* Transmission of complex analog signals by means of dynamical chaos // In: *Proceedings of the 3rd International Specialist Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems.* Dublin, Ireland, 28–29 July 1995. Dublin: NDES, 1995. P. 241–244.
9. *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. 4. P. 1249–1254. DOI: 10.1142/S0218127495000910.
10. *Дмитриев А. С., Панас А. И.* Динамический хаос: Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. 252 с.
11. *Lau F. C. M., Tse C. K.* Chaos-Based Digital Communication Systems: Operating Principles, Analysis Methods, and Performance Evaluation. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 228 p. DOI: 10.1007/978-3-662-05183-2.
12. *Kaddoum G.* Wireless chaos-based communication systems: A comprehensive survey // *IEEE Access.* 2016. Vol. 4. P. 2621–2648. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2572730.
13. *Дмитриев А. С., Панас А. И., Старков С. О., Андреев Ю. В., Кузьмин Л. В., Кяргинский Б. Е., Макисмов Н. А.* Способ передачи информации с помощью хаотических сигналов // Патент № 2185032 С2 Российская Федерация, МПК Н04К 1/00, Н04В 1/02, Н04J 13/00: заявл. 06.10.2000; опубл. 10.07.2002. 20 с.
14. *Дмитриев А. С., Кяргинский Б. Е., Панас А. И., Старков С. О.* Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // *Радиотехника и электроника.* 2001. Т. 46, № 2. С. 224–233.
15. *Dmitriev A. S., Kyarginsky B. Y., Panas A. I., Starkov S. O.* Experiments on direct chaotic communi-

- cations in microwave band // *Int. J. Bifurc. Chaos*. 2003. Vol. 13, no. 6. P. 1495–1507. DOI: 10.1142/S0218127403007345.
16. *VanWiggeren G. D., Roy R.* Optical communication with chaotic waveforms // *Phys. Rev. Lett.* 1998. Vol. 81, no. 16. P. 3547–3550. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.3547.
 17. *Ke J., Yi L., Hou T., Hu W.* Key technologies in chaotic optical communications // *Front. Optoelectron.* 2016. Vol 9, no. 3. P. 508–517. DOI: 10.1007/s12200-016-0570-y.
 18. *Kingni S. T., Ainamon C., Tamba V. K., Chabi Orou J. B.* Directly modulated semiconductor ring lasers: Chaos synchronization and applications to cryptography communications // *Chaos. Theory and Applications*. 2020. Vol. 2, no. 1. P. 31–39.
 19. *Bai C., Ren H.-P., Grebogi C., Baptista M. S.* Chaos-based underwater communication with arbitrary transducers and bandwidth // *Appl. Sci.* 2018. Vol. 8, no. 2. P. 162–172. DOI: 10.3390/app8020162.
 20. *Chen M., Xu W., Wang D., Wang L.* Multi-carrier chaotic communication scheme for underwater acoustic communications // *IET Communications*. 2019. Vol. 13, no. 14. P. 2097–2105. DOI: 10.1049/iet-com.2018.5524.
 21. *Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Герасимов М. Ю., Ицков В. В.* Радиоосвещение на основе сверхширокополосных генераторов динамического хаоса // *Радиотехника и электроника*. 2016. Т. 61, № 11. С. 1073–1083. DOI: 10.7868/S0033849416110024.
 22. *Dmitriev A. S., Efremova E. V., Ryzhov A. I., Petrosyan M. M., Itskov V. V.* Artificial radio lighting with sources of microwave dynamic chaos // *Chaos*. 2021. Vol. 31, no. 6. P. 063135. DOI: 10.1063/5.0053504.
 23. *Петрович Н. Т., Размахнин М. К.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Советское радио, 1969. 233 с.
 24. *Варакин Л. Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
 25. *Dixon R. C.* Spread Spectrum Systems with Commercial Applications. 3rd Edition. New York: Wiley, 1994. 592 p.
 26. *Almuhaya M. A. M., Jabbar W. A., Sulaiman N., Abdulmalek S.* A survey on LoRaWAN technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions // *Electronics*. 2022. Vol. 11, no. 1. P. 164–195. DOI: 10.3390/electronics11010164.
 27. *Kolumbán G., Kennedy M. P., Chua L. O.* The role of synchronization in digital communications using chaos. I. Fundamentals of digital communications // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1997. Vol. 44, no. 10. P. 927–936. DOI: 10.1109/81.633882.
 28. *Kolumbán G., Vizvári B., Schwarz W., Abel A.* Differential chaos shift keying: A robust coding for chaos communication // In: *Proceedings of the 4th International Specialist Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems*. Seville, Spain, 27–28 June 1996. Seville: NDES, 1996. P. 87–92.
 29. *Sushchik M., Tsimring L. S., Volkovskii A. R.* Performance analysis of correlation-based communication schemes utilizing chaos // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 2000. Vol. 47, no. 12. P. 1684–1691. DOI: 10.1109/81.899920.
 30. *Дмитриев А. С., Мохсени Т. И., Сьерра-Теран К. М.* Относительная передача информации на основе хаотических радиоимпульсов // *Радиотехника и электроника*. 2018. Т. 63, № 10. С. 1074–1082. DOI: 10.1134/S0033849418100078.
 31. *Дмитриев А. С., Мохсени Т. И., Сьерра-Теран К. М.* Сверх- и гиперширокополосная относительная передача информации на основе хаотических радиоимпульсов // *Известия вузов. ПНД*. 2018. Т. 26, № 4. С. 59–74. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-4-59-74.
 32. *Dmitriev A. S., Mokhseni T. I., Sierra-Terant C. M.* Differentially coherent communication scheme based on chaotic radio pulses // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2018. Vol. 21, no. 3. P. 237–246.

33. *Дмитриев А. С., Мохсени Т. И., Сьерра-Теран К. М.* Моделирование системы относительной передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов в среде ADS // Известия вузов. ПНД. 2019. Т. 27, № 5. С. 72–86. DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-5-72-86.
34. *Клюев В. Ф., Самарин В. П., Клюев А. В.* Нелинейные алгоритмы измерения мощности шумового сигнала на фоне помех // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2013. Т. 56, № 6. С. 48–55.

References

1. Kocarev L, Halle KS, Eckert K, Chua LO, Parlitz U. Experimental demonstration of secure communications via chaotic synchronization. *Int. J. Bifurc. Chaos.* 1992;2(3):709–713. DOI: 10.1142/S0218127492000823.
2. Parlitz U, Chua LO, Kocarev L, Halle KS, Shang A. Transmission of digital signals by chaotic synchronization. *Int. J. Bifurc. Chaos.* 1992;2(4):973–977. DOI: 10.1142/S0218127492000562.
3. Cuomo KM, Oppenheim AV. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications. *Phys. Rev. Lett.* 1993;71(1):65–68. DOI: 10.1103/PhysRevLett.71.65.
4. Belskii YL, Dmitriev AS. Information transmission using deterministic chaos. *J. Commun. Technol. Electron.* 1993;38(7):1310–1315 (in Russian).
5. Volkovskii AR, Rul'kov NF. Synchronous chaotic response of a nonlinear oscillator system as a principle for the detection of the information component of chaos. *Tech. Phys. Lett.* 1993;19(2): 97–99.
6. Dedieu H, Kennedy MP, Hasler M. Chaos shift keying: modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing Chua's circuits. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing.* 1993;40(10):634–642. DOI: 10.1109/82.246164.
7. 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.
8. Dmitriev AS, Panas A, Starkov SO. Transmission of complex analog signals by means of dynamical chaos. In: *Proceedings of the 3rd International Specialist Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems.* Dublin, Ireland, 28-29 July 1995. Dublin: NDES; 1995. P. 241–244.
9. Dmitriev AS, Panas AI, Starkov SO. Experiments on speech and music signals transmission using chaos. *Int. J. Bifurc. Chaos.* 1995;5(4):1249–1254. DOI: 10.1142/S0218127495000910.
10. Dmitriev AS, Panas AI. *Dynamic Chaos: Novel Type of Information Carrier for Communication Systems.* Moscow: Fizmatlit; 2002. 252 p. (in Russian).
11. Lau FCM, Tse CK. *Chaos-Based Digital Communication Systems: Operating Principles, Analysis Methods, and Performance Evaluation.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2003. 228 p. DOI: 10.1007/978-3-662-05183-2.
12. Kaddoum G. Wireless chaos-based communication systems: A comprehensive survey. *IEEE Access.* 2016;4:2621–2648. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2572730.
13. Dmitriev AS, Panas AI, Starkov SO, Andreev JV, Kuz'min LV, Kjarginskij BE, Maksimov NA. Method for data transmission by means of chaotic signals. Patent No. 2185032 C2 Russian Federation, IPC H04K 1/00, H04B 1/02, H04J 13/00: appl. 06.10.2000: publ. 10.07.2002. 20 p. (in Russian).
14. Dmitriev AS, Kyarginskii BE, Panas AI, Starkov SO. Plain scheme of chaotic-carrier data communications at microwave frequencies. *J. Commun. Technol. Electron.* 2001;46:207–214.
15. Dmitriev AS, Kyarginsky BY, 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.
16. VanWiggeren GD, Roy R. Optical communication with chaotic waveforms. *Phys. Rev. Lett.* 1998;81(16):3547–3550. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.3547.

17. Ke J, Yi L, Hou T, Hu W. Key technologies in chaotic optical communications. *Front. Optoelectron.* 2016;9(3):508–517. DOI: 10.1007/s12200-016-0570-y.
18. Kingni ST, Ainamon C, Tamba VK, Chabi Orou JB. Directly modulated semiconductor ring lasers: Chaos synchronization and applications to cryptography communications. *Chaos. Theory and Applications.* 2020;2(1):31–39.
19. Bai C, Ren HP, Grebogi C, Baptista MS. Chaos-based underwater communication with arbitrary transducers and bandwidth. *Appl. Sci.* 2018;8(2):162–172. DOI: 10.3390/app8020162.
20. Chen M, Xu W, Wang D, Wang L. Multi-carrier chaotic communication scheme for underwater acoustic communications. *IET Communications.* 2019;13(14):2097–2105. DOI: 10.1049/iet-com.2018.5524.
21. Dmitriev AS, Efremova EV, Gerasimov MY, Itskov VV. Radio lighting based on ultrawideband dynamic chaos generators. *J. Commun. Technol. Electron.* 2016;61(11):1259–1268. DOI: 10.1134/S1064226916110024.
22. Dmitriev AS, Efremova EV, Ryzhov AI, Petrosyan MM, Itskov VV. Artificial radio lighting with sources of microwave dynamic chaos. *Chaos.* 2021;31(6):063135. DOI: 10.1063/5.0053504.
23. Petrovich NT, Razmahnin MK. *Communications With Noise Like Signals.* Moscow: Sovetskoe Radio; 1969. 233 p. (in Russian).
24. Varakin LE. *Communication Systems With Noise Like Signals.* Moscow: Radio i Svyaz; 1985. 384 p. (in Russian).
25. Dixon RC. *Spread Spectrum Systems with Commercial Applications.* 3rd Edition. New York: Wiley; 1994. 592 p.
26. Almuhaya MAM, Jabbar WA, Sulaiman N, Abdulmalek S. A survey on LoRaWAN technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions. *Electronics.* 2022;11(1): 164–195. DOI: 10.3390/electronics11010164.
27. Kolumbán G, Kennedy MP, Chua LO. The role of synchronization in digital communications using chaos. I. Fundamentals of digital communications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications.* 1997;44(10):927–936. DOI: 10.1109/81.633882.
28. Kolumbán G, Vizvári B, Schwarz W, Abel A. Differential chaos shift keying: A robust coding for chaos communication. In: *Proceedings of the 4th International Specialist Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems.* Seville, Spain, 27–28 June 1996. Seville: NDES; 1996. P. 87–92.
29. Sushchik M, Tsimring LS, Volkovskii AR. Performance analysis of correlation-based communication schemes utilizing chaos. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications.* 2000;47(12):1684–1691. DOI: 10.1109/81.899920.
30. Dmitriev AS, Mokhseni TI, Sierra-Teran KM. Differentially coherent information transmission based on chaotic radio pulses. *J. Commun. Technol. Electron.* 2018;63(10):1183–1190. DOI: 10.1134/S1064226918100078.
31. Dmitriev AS, Mokhseni TI, Sierra-Teran CM. Ultra- and hyper-wideband differentially coherent information transmission based on chaotic radio pulses. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2018;26(4):59–74. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-4-59-74.
32. Dmitriev AS, Mokhseni TI, Sierra-Terant CM. Differentially coherent communication scheme based on chaotic radio pulses. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems.* 2018;21(3):237–246.
33. Dmitriev AS, Mokhseni TI, Sierra-Teran CM. Simulation of differentially coherent information transmission system based on chaotic radio pulses in ADS environment. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2019;27(5):72–86 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-5-72-86.
34. Klyuev VF, Samarin VP, Klyuev AV. Nonlinear algorithms for measuring the noise signal power against the background of interferences. *Radioelectronics and Communications Systems.* 2013;56(6):304–311. DOI: 10.3103/S073527271306006X.



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 (с 1995). Заведующий отделом статистической радиофизики в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Профессор Московского физико-технического института. Область научных исследований и разработок: информационные и коммуникационные технологии на основе динамического хаоса. Автор и соавтор более 230 статей в журналах, 9 монографий, более 25 патентов и авторских свидетельств. Дважды Лауреат Премии Совета Министров СССР. Заслуженный радист Российской Федерации.

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: chaos@cplire.ru
ORCID: 0000-0003-2079-3020
AuthorID (eLibrary.Ru): 5128



Рыжов Антон Игоревич — родился в Москве (1986). 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. Автор более 40 публикаций (в соавторстве).

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, д. 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



Сьерра-Теран Кристиан Маурисио — родился в Картахене, Колумбия (1990). Окончил радиотехнический факультет Московского физико-технического института (2014). Аспирант МФТИ. Область научных интересов — применение динамического хаоса в информационных системах связи. Имеет более 10 научных публикаций.

Россия, 141701 Долгопрудный, Институтский переулок, 9
Московский физико-технический институт
E-mail: serra@phystech.edu