

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 621.391

DOI 10.52575/2687-0932-2026-53-1-203-215

EDN QHNLHB

Применение опорного клиппированного сигнала в когерентной системе радиосвязи на основе многоуровневых хаотических сигналов

¹Гавришев А.А., ²Осипов Д.Л.

¹ Московский государственный лингвистический университет,
Россия, 119034, г. Москва, ул. Остоженка, д. 38/1

² Северо-Кавказский федеральный университет,
Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1
alexxx.2008@inbox.ru

Аннотация. Основное внимание в работе уделяется вопросу совершенствования технической конструкции когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых хаотических сигналов (ХС) на основе клиппирования. Проведен анализ преимуществ и недостатков когерентных систем радиосвязи на основе ХС, в том числе и многоуровневых. Выделена задача рационального хранения опорного ХС, в том числе и многоуровневого, на приемной стороне. Отмечены преимущества многоуровневых ХС по скрытности передачи данных перед бинарными. Проведен анализ решения задачи рационального хранения опорного многоуровневого ХС на приемной стороне, заключающегося в использовании на приемной стороне клиппированной копии многоуровневого ХС в виде последовательности прямоугольных импульсов с амплитудой $+1$ и -1 , полученной из исходного ХС. Приведено математическое описание, отмечены достоинства и недостатки указанного подхода. Указано, что такое решение в перспективе поможет снизить требования к вычислительным и иным ресурсам, используемым на приемной стороне. На основе проведенных исследований разработан вариант когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС с опорным клиппированным сигналом. Приведено описание принципов ее работы. С помощью моделирования экспериментально обоснована возможность практического использования разработанного варианта когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС с опорным клиппированным сигналом, который позволяет передавать информационные сигналы по каналам радиосвязи и восстанавливать их на приемной стороне с определенной достоверностью. Отмечено, что клиппированные ХС, представленные в простейшем случае в формате ASCII, занимают в несколько раз меньший объем памяти, чем многоуровневые ХС с аналогичным способом хранения. Это позволяет сократить объем памяти, занимаемой опорным сигналом в варианте когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС. Проведенные исследования могут быть полезны разработчикам и производителям соответствующих систем радиосвязи, в том числе используемых в системах Интернета вещей.

Ключевые слова: многоуровневые хаотические сигналы, когерентные системы радиосвязи, клиппированный опорный сигнал, вычислительные ресурсы, сокращение

Для цитирования: Гавришев А.А., Осипов Д.Л. 2026. Применение опорного клиппированного сигнала в когерентной системе радиосвязи на основе многоуровневых хаотических сигналов. *Экономика. Информатика*, 53(1): 203–215. DOI 10.52575/2687-0932-2026-53-1-203-215. EDN QHNLHB

Application of a Clipped Reference Signal in a Coherent Radio Communication System Based on Multilevel Chaotic Signals

¹Aleksey A. Gavrishev, ²Dmitrij L. Osipov

¹Moscow State Linguistic University,
38/1 Ostozhenka St., Moscow 119034, Russia

²North-Caucasus Federal University,
1 Pushkin St., Stavropol 355017, Russia
alexxx.2008@inbox.ru

Abstract. The paper is mainly focused on the issue of improving the technical design of a coherent radio communication system working on multilevel chaotic signals (CSs) based on clipping. The advantages and disadvantages of CS-based coherent radio communication systems, including multilevel ones, are analyzed. The authors highlight the task of rational storage of a reference CS, including multilevel storage, on the receiving side. The advantages of multilevel CSs in terms of data transmission secrecy over binary ones are described. The analysis of the solution to the problem of rational storage of the reference multilevel CS on the receiving side is carried out, which consists in using a clipped copy of the multilevel CS on the receiving side in the form of a sequence of rectangular pulses with an amplitude of +1 and -1 obtained from the original CS. A mathematical description is given, and the advantages and disadvantages of this approach are noted. The paper indicates that such a solution in the future will help reduce the requirements for computing and other resources used on the receiving side. The research findings have enabled us to develop a variant of a coherent radio communication system based on multilevel CSs with a clipped reference signal. The principles of its operation are described. Using modeling, the authors have experimentally substantiated the possibility to use the proposed variant of a coherent radio communication system based on multilevel CSs with a clipped reference signal, which allows transmitting information signals over radio communication channels and restoring them on the receiving side with a certain reliability. It is noted that clipped CSs presented, in the simplest case, in ASCII format occupy several times less memory than multilevel ones with a similar storage method. This makes it possible to reduce the amount of memory occupied by the reference signal in a variant of a coherent radio communication system based on multilevel CSs. The research may be beneficial to developers and manufacturers of relevant radio communication systems, including those used in Internet of Things.

Keywords: multilevel chaotic signals, coherent radio communication systems, clipped reference signal, computing resources, reduction

For citation: Gavrishev A.A., Osipov D.L. 2026. Application of a Clipped Reference Signal in a Coherent Radio Communication System Based on Multilevel Chaotic Signals. *Economics. Information technologies*, 53(1): 203–215 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2026-53-1-203-215. EDN QHNLHB

Введение

Хаотические сигналы (ХС) с начала 90-х годов прошлого века привлекают внимание исследователей в области систем радиосвязи. Несмотря на многолетние исследования, показавшие принципиальную возможность использования явления динамического хаоса в системах радиосвязи, например, с помощью схем передачи данных на основе хаотической маскировки, переключения хаотических режимов, нелинейного подмешивания и др., до конца не была решена задача низкой устойчивости таких систем радиосвязи к различным возмущающим факторам [Дмитриев, Панас, 2002; Kehui Sun, 2016; Дмитриев, 2023]. Развитие систем радиосвязи, использующих динамический хаос, привело к созданию устойчивых к возмущениям схем передачи данных, например, дифференциальное переключение, прямохаотическая система связи и некоторые другие [Дмитриев, Панас, 2002; Kehui Sun, 2016; Дмитриев, 2023]. Вместе с тем в настоящее время остается открытым вопрос о когерентном приеме ХС в системах радиосвязи. Ранее проведенные исследования показывают [Мохсени, Кикот, 2015; Осипов, Жук, Гавришев, 2015; Kehui Sun, 2016; Gao, Wu, Zhang, 2023; Guangkai

Liu, et al., 2024; Ruopeng Liu, et al., 2024], что когерентный прием ХС способен обеспечивать большую помехоустойчивость по сравнению с некогерентным приемом. Вместе с тем одной из главных проблем при создании когерентных систем радиосвязи на основе ХС является сложность в построении идентичных хаотических систем на передающей и приемной стороне, а также их синхронизация между собой [Мохсени, Кикот, 2015; Осипов, Жук, Гавришев, 2015; Kehui Sun, 2016; Gao, Wu, Zhang, 2023; Guangkai Liu, et al., 2024; Ruopeng Liu, et al., 2024; Tihomorskis, Ahrens, Aboltins, 2024].

Вопрос об «идентичности» ХС на передающей и приемной сторонах может быть решен при программной реализации хаотического передатчика и хаотического приемника. При этом используемые ХС могут быть как бинарными, так и многоуровневыми [Мохсени, Кикот, 2015; Осипов, Жук, Гавришев, 2015; Kehui Sun, 2016; Gao, Wu, Zhang, 2023; Guangkai Liu, et al., 2024; Ruopeng Liu, et al., 2024; Tihomorskis, Ahrens, Aboltins, 2024]. Благодаря преимуществам многоуровневых ХС над бинарными по показателю скрытности [Мохсени, Кикот, 2015; Осипов, Жук, Гавришев, 2015; Kehui Sun, 2016; Gao, Wu, Zhang, 2023; Гавришев, 2024; Guangkai Liu, et al., 2024; Ruopeng Liu, et al., 2024; Tihomorskis, Ahrens, Aboltins, 2024], они представляют особый интерес для исследования.

Подход, заключающийся в программной реализации хаотического передатчика и хаотического приемника, был положен в основу ряда когерентных систем радиосвязи на основе многоуровневых ХС. В общем виде их возможно разделить на два больших класса:

- когерентные системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС, в которых на передающей и приемной сторонах используются одинаковые генераторы хаотических сигналов (ГХС), например, как в работах [Kehui Sun, 2016; Guangkai Liu, Guo Jie, Cheng Cheng et al., 2024; Ruopeng Liu, Pengyi Wang, Xiduo Wang, 2024; Tihomorskis, Ahrens, Aboltins, 2024];
- когерентные системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС, в которых на передающей и приемной сторонах используются одинаковые копии многоуровневых ХС, заранее записанные в блоки памяти, например, как в работах [Мохсени, Кикот, 2015; Осипов, Жук, Гавришев, 2015].

Первый описанный класс систем обладает широко известным недостатком, заключающимся в сложности построения идентичных хаотических систем на передающей и приемной стороне, а также их синхронизация между собой, даже при программной реализации хаотического передатчика и хаотического приемника. Второй описанный класс систем отличается от первого тем, что в таких когерентных системах радиосвязи используются на передающей и приемной сторонах одинаковые копии многоуровневых ХС, записанные в блоки памяти, и синхронизация этих копий во времени с помощью внешних средств. В этом случае введение информации на передающей стороне осуществляется стандартными методами модуляции, применяемыми в системах радиосвязи, использующих когерентный прием, например, с помощью BPSK-модуляции. Таким образом, второй класс когерентных систем радиосвязи на основе многоуровневых ХС выглядит более предпочтительным, чем первый.

Несмотря на достоинства когерентных систем радиосвязи на основе многоуровневых ХС по показателям помехоустойчивости и скрытности по сравнению с другими системами радиосвязи на основе ХС, они не лишены недостатков. Помимо сложности построения идентичных хаотических систем на передающей и приемной стороне, а также их синхронизации, выделяется задача рационального хранения опорного многоуровневого ХС на приемной стороне, что также затрудняет построение таких систем радиосвязи, в особенности в условиях развития Интернета вещей, предполагающего миниатюризацию аппаратных платформ и сокращение потребления вычислительных и иных ресурсов.

И если для двух первых задач предложены некоторые решения [Дмитриев, Панас, 2002; Мохсени, Кикот, 2015; Осипов, Жук, Гавришев, 2015; Kehui Sun, 2016; Дмитриев, 2023; Gao, Wu, Zhang, 2023; Guangkai et al., 2024; Ruopeng Liu, Pengyi Wang, Xiduo Wang, 2024; Tihomorskis, Ahrens, Aboltins, 2024], то последняя из описанных задач не нашла широкого отражения в научной литературе. Между тем, в условиях развития Интернета вещей,

приемопередающие устройства которого обладают малыми вычислительными и энергетическими мощностями, решение задачи рационального хранения опорного многоуровневого сигнала на приемной стороне может иметь множество положительных сторон, в частности, уменьшение массогабаритных характеристик устройства, уменьшение энергопотребления и тепловыделения без существенного снижения помехоустойчивости и скрытности. Поэтому указанная задача является актуальной и требует дальнейшей проработки.

Цель и задачи исследования

Целью статьи является совершенствование технической конструкции когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС на основе клиппирования.

Задачами статьи являются:

- 1) разработка упрощенной модели представленного варианта когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС с опорным клиппированным сигналом.
- 2) сокращение объема памяти, занимаемого опорным сигналом в варианте когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС.

Анализ предметной области

Анализ источников показал [Курьянов, 1965; Лукин, 2008], что одним из возможных путей сокращения объема памяти, занимаемого опорным сигналом в когерентной системе радиосвязи на основе многоуровневых ХС, может быть использование на приемной стороне клиппированной копии многоуровневого ХС, полученной из исходного ХС. В данном случае под клиппированием понимается преобразование исходного многоуровневого ХС в последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой $+1$ и -1 в зависимости от знака исходного сигнала.

Так, в работе [Курьянов, 1965] указано, что если $S(t)$ – случайный сигнал с автокорреляционной функцией (АКФ) $R_i(\tau)$, то его спектр $G(\omega)$ определяется следующим образом:

$$G(\omega) = E\left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi T} \left[\left(\int_0^T S(t) \cos \omega t dt \right)^2 + \left(\int_0^T S(t) \sin \omega t dt \right)^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

где E – знак математического ожидания.

Спектр сигнала $G(\omega)$ связан с его АКФ $R_i(\tau)$ формулой Винера – Хинчина:

$$G(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_i(\tau) \cos \omega \tau d\tau. \quad (2)$$

Для получения спектра сигнала $G(\omega)$ обычно либо измеряют его АКФ $R_i(\tau)$ и используют соотношение (2), либо измеряют величину, называемую текущей периодограммой процесса [Курьянов, 1965], и описываемую следующим выражением:

$$SP_T(\omega, t) = \frac{1}{\pi T} \left[\left(\int_{t-T}^t S(t) \cos \omega t dt \right)^2 + \left(\int_{t-T}^t S(t) \sin \omega t dt \right)^2 \right] \quad (3)$$

Основной операцией, которую необходимо выполнить для получения (3), является перемножение функции $S(t)$ на $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$, и их последующее интегрирование, то есть нахождение АКФ. Согласно [Курьянов, 1965], рассмотрим другой способ перемножения указанных величин: «произведение» будет считаться равным $+1$, если сомножители имеют одинаковые знаки, и -1 , если знаки разные. Радиотехнически это достигается клиппированием сигналов.

Используя такую модификацию при определении спектра, по аналогии с выражением (1), получим следующее выражение [Курьянов, 1965]:

$$G(\omega) = E\left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi T} \left[\left(\int_0^T S(t) \cos \omega t dt \right)^2 + \left(\int_0^T S(t) \sin \omega t dt \right)^2 \right] \right\}, \quad (4)$$

где $G(\omega)$ – нормированный спектр сигнала, полученного клиппированием исходного сигнала $S(t)$, знак « \wedge » над некоторой функцией – операция клиппирования.

Продемонстрируем связь между нормированным спектром клиппированного сигнала и АКФ исходного сигнала, аналогичную выражению (2). Опуская математические выкладки, приведенные в [Курьянов, 1965], указанную связь возможно вычислить с помощью следующего выражения:

$$G(\omega) = \frac{8}{\pi^2} \int_0^{\infty} \arcsin R_n(\tau) g(\omega\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $R_n(\tau)$ – нормированная АКФ.

Выражение (5) является аналогом формулы Винера – Хинчина, описываемой выражением (2). Поскольку нормированная АКФ $R_n(\tau)$ целиком определяется спектром $G(\omega)$ то выражение (5) дает связь между спектром клиппированного сигнала $G(\omega)$ и спектром исходного сигнала $G(\omega)$.

В качестве примера на рис. 1 приведен пример временной диаграммы многоуровневого шумоподобного сигнала из работы [Гавришев, Жук, 2018] и соответствующий ему клиппированный сигнал.

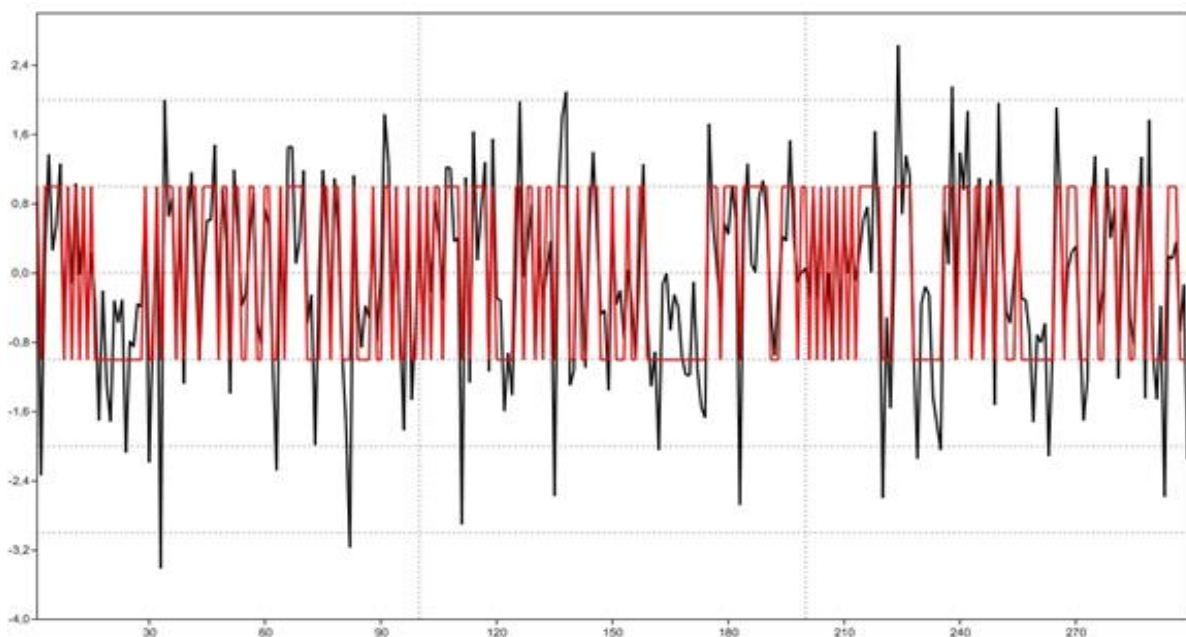


Рис. 1. График, поясняющий процесс клиппирования многоуровневого шумоподобного сигнала $S(t)$
Fig. 1. Graph, explaining the process of clipping a multilevel noise-like signal $S(t)$

На рис. 2. представлены АКФ многоуровневого шумоподобного сигнала и соответствующего ему клиппированного сигнала, изображенных на рис. 1.

Как видно из рис. 1–2, процесс клиппирования позволяет преобразовать исходный многоуровневый сигнал в последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой +1 и –1 в зависимости от знака исходного сигнала. При этом их АКФ имеют схожий вид, что совпадает с отмеченными в [Курьянов, 1965; Лукин, 2008] результатами.

Таким образом, с учетом представленных данных, использование на приемной стороне когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС их клипированных копий, полученных из исходных ХС, потенциально может помочь в решении задачи уменьшения вычислительных и иных ресурсов, которые необходимы для их использования.

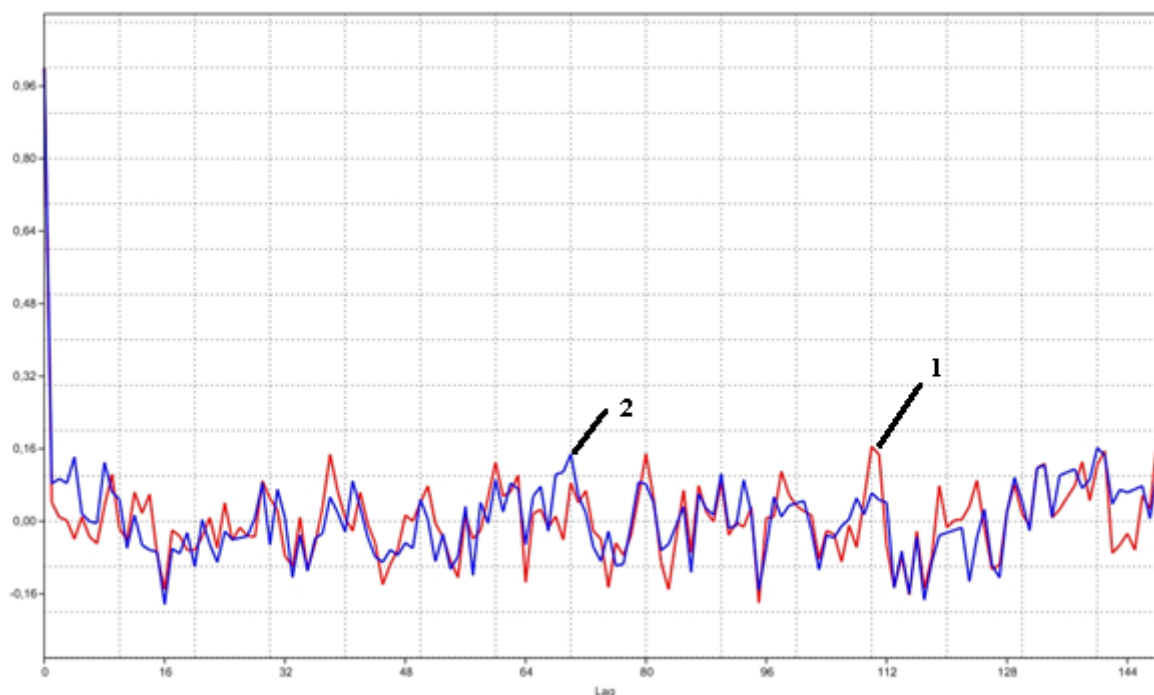


Рис. 2. АКФ исходного многоуровневого шумоподобного сигнала (1) и соответствующего ему клипированного сигнала (2)

Fig. 2. ACF of the initial multilevel noise-like signal (1) and the corresponding clipped signal (2)

В работе [Лукин, 2008] описанный выше принцип был положен в основу варианта шумового радара. Работа указанного устройства заключается в том, что реализация многоуровневого ХС в опорном канале заменяется его клипированной копией, которая сохраняет информацию о знаке и временах смены знака амплитуды ХС. Из источника [Лукин, 2008] известно, что взаимокорреляционная функция (ВКФ) $R_{ij}(\tau)$ между исходным многоуровневым ХС и его копией на приемной стороне, а также ВКФ $R_{ij}(\tau)$ между принятым многоуровневым ХС и клипированным ХС прямо пропорциональны друг другу с некоторым незначительным уменьшением ВКФ. Проведенные авторами работы [Лукин, 2008] расчеты показали, что при использовании указанного подхода, несмотря на незначительное снижение помехоустойчивости, существенно упрощается аппаратная реализация корреляционного приемника, в котором используются многоуровневые ХС.

Так как такой подход не нашел широкого применения в когерентных системах радиосвязи на основе многоуровневых ХС, то он может быть применен для решения поставленной задачи.

Вариант когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС с опорным клипированным сигналом

На рис. 3 приведен вариант структурной схемы когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС с опорным клипированным сигналом, в основу которой положены результаты из работ [Лукин, 2008; Мохсени, Кикот, 2015; Осипов, Жук, Гавришев, 2015; Гавришев, Жук, 2018].

На рис. 3 введены следующие обозначения: ИИ – источник информации, НМХС – накопитель многоуровневого ХС, МП – модулятор-передатчик, ПФ – полосовой

фильтр, U_c – усилитель, $U_{мн1}$ – первый умножитель, $U_{мн2}$ – второй умножитель, Инв – инвертор, НОКХС – накопитель опорного клиппированного ХС, Инт1 – первый интегратор, Инт2 – второй интегратор, ВУ – вычитающее устройство, РУ – решающее устройство, ПИ – получатель информации.

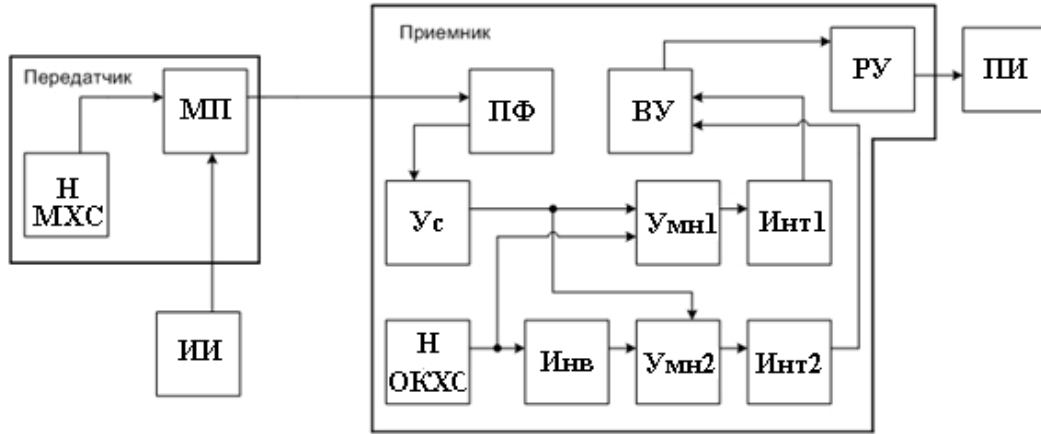


Рис. 3. Вариант структурной схемы когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС с опорным клиппированным сигналом

Fig. 3. A variant of the structural scheme of a coherent radio communication system based on multilevel CS with a clipped reference signal

С учетом рекомендаций из источников [Осипов, Жук, Гавришев, 2015; Гавришев, Жук, 2018], опишем математически, как функционирует схема, изображенная на рис. 3. Исходными данными будут следующие понятия:

- 1) $S_{МХС}(t)$ – произвольный многоуровневый ХС на передающей стороне;
- 2) $S_{КХС}(t)$ – опорный клиппированный ХС на приемной стороне;
- 3) $S_{инф}(t)$ – исходный информационный сигнал;
- 4) $U(t)$ – передаваемый в канале связи сигнал;
- 5) $S_{вых.инф.}(t)$ – восстановленный информационный сигнал.

Информационный сигнал $S_{инф}(t)$ может принимать два значения -1 и $+1$. При этом выходной сигнал модулятора-передатчика представляет собой сигнал $U(t)$, созданный с помощью перемножения в модуляторе-передатчике исходного информационного сигнала $S_{инф}(t)$ с многоуровневым ХС $S_{МХС}(t)$. В канале связи на передаваемый сигнал $U(t)$ действует аддитивная гауссовская помеха, поэтому на вход приемного устройства поступает смесь передаваемого сигнала и помехи $R(t) = U(t) + N(t)$. После вхождения в режим синхронизации в приемном устройстве из полосового фильтра выходит сигнал $Y(t) = U(t) + N(t)$, который затем усиливается. После этого усиленный сигнал $Y_{ус}(t)$ одновременно умножается на опорный клиппированный ХС $S_{КХС}(t)$, полученный из многоуровневого ХС $S_{МХС}(t)$, а также умножается на его инвертированное значение $-S_{КХС}(t)$. В итоге получаются сигналы $S_{П1}(t) = Y_{ус}(t) \times S_{КХС}(t)$ и $S_{П2}(t) = -Y_{ус}(t) \times S_{КХС}(t)$, которые затем проходят через интеграторы и принимают значения $Intg_1(t)$ и $Intg_2(t)$. Далее сигналы $Intg_1(t)$ и $Intg_2(t)$ поступают в вычитающее устройство, где вычисляется их разность. С выхода вычитающего устройства разностный сигнал $Z_{раз}(t)$ поступает в решающее устройство, где происходит сравнение принятых уровней с пороговым значением:



$$\begin{aligned}
 & - S_{\text{вых.инф.}}(t) = 1 \text{ при } Z_{\text{раз}}(t) > 0, \\
 & - S_{\text{вых.инф.}}(t) = -1 \text{ при } Z_{\text{раз}}(t) < 0.
 \end{aligned}$$

После этого восстановленный информационный сигнал $S_{\text{вых.инф.}}(t)$ поступает к получателю, при этом в идеальном случае $S_{\text{инф}}(t) = S_{\text{вых.инф.}}(t)$.

Упрощенное моделирование работы когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС с опорным клипированным сигналом

Проведем моделирование работы когерентной системы радиосвязи, представленной на рис. 3. Для этого выберем ХС, которые будем использовать в ней. В качестве генераторов, вырабатывающих ХС, выберем хорошо описанные в литературе генераторы.

В качестве первого ГХС возьмем аттрактор Ресслера, описываемый следующим выражением [Kehui Sun, 2016; Гавришев, Жук, 2018]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= -y - z, \\
 \dot{y} &= x + ay, \\
 \dot{z} &= b + z(x - c).
 \end{aligned} \tag{6}$$

В качестве второго ГХС возьмем гиперхаотическую систему Лю, описываемую следующим выражением [Kehui Sun, 2016, Гавришев, 2023]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= a(y - x), \\
 \dot{y} &= bx - hxz + \lambda w, \\
 \dot{z} &= cx^2 - dz, \\
 \dot{w} &= -ny.
 \end{aligned} \tag{7}$$

С помощью моделирования многоуровневых ХС, описываемых выражениями (6) и (7), было получено по 100 их реализаций. Для подтверждения положений, приведенных в источниках [Курьянов, 1965; Лукин, 2008], была осуществлена следующая процедура: каждая из реализаций многоуровневого ХС была преобразована в клипированный сигнал, после этого попарно была рассчитана их ВКФ. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Расчеты ВКФ
Calculations of CCF

№	Название ГХС	Усредненная ВКФ $R_{ij}(\tau)$ между использованными многоуровневыми и клипированными ХС
1	Аттрактор Ресслера	0,83
2	Гиперхаотическая система Лю	0,82

Как видно из таблицы, ВКФ $R_{ij}(\tau)$ между многоуровневыми ХС и клипированными ХС обладает положительным значением, близким к 1. Полученный результат указывает на то [Kehui Sun, 2016; Голиков, 2022], что сравниваемые последовательности являются практически идентичными, несмотря на различия во временной области. Исходя из этого, они могут использоваться для дальнейших исследований.

После этого в пакете программ SciCosLab [Гавришев, Жук, 2018; Гавришев, 2023] на основе рис. 3 была собрана предлагаемая когерентная система радиосвязи на основе

многоуровневых ХС с опорным клиппированным сигналом. При моделировании полагалось, что [Фридман, 1983; Дмитриев, Панас, 2002; Kehui Sun, 2016; Голиков, 2022]:

- 1) канал связи является идеальным, и в нем отсутствуют помехи;
- 2) передающая и приемная стороны синхронизированы;
- 3) не учитываются потери, которые неизбежно возникают в процессе клиппирования многоуровневых ХС.

В результате проведенных экспериментов, при изменениях параметров ГХС, описываемых выражениями (6) и (7), было установлено, что фрагменты восстановленных информационных сигналов на приемной стороне имеют вид, достаточно схожий с видом исходного информационного сигнала (рис. 4 и рис. 5).

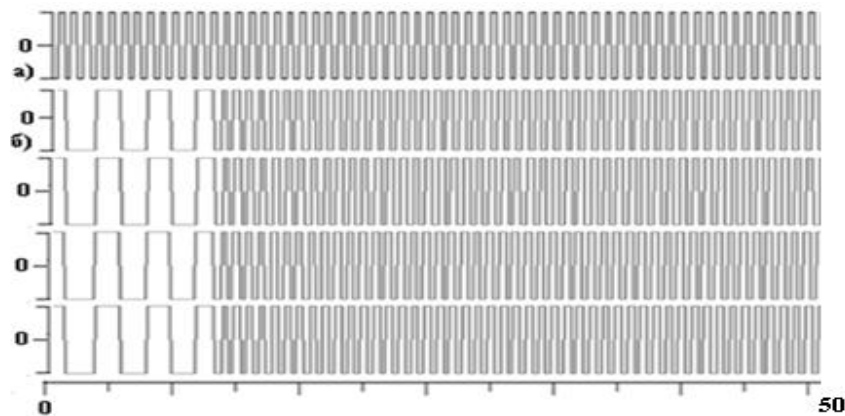


Рис. 4. Фрагменты исходной информационной последовательности (а) и восстановленных информационных последовательностей на приемной стороне (б) при использовании в качестве ГХС аттрактора Ресслера

Fig. 4. Fragments of the original information sequence (a) and reconstructed information sequences on the receiving side (b) when used Rossler attractor

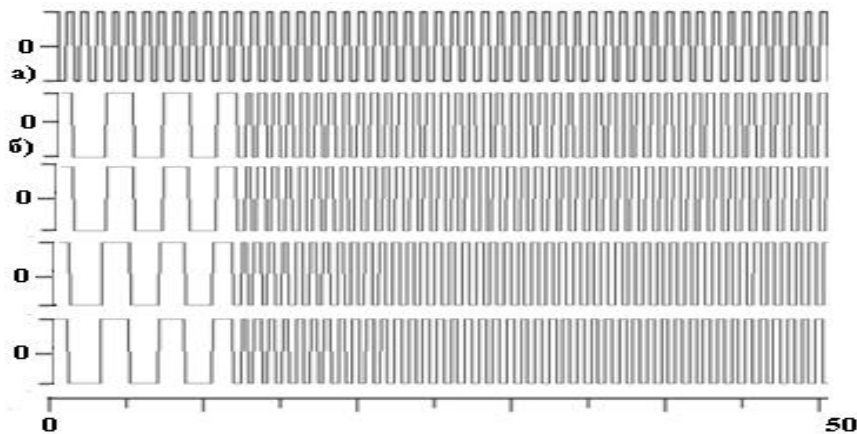


Рис. 5. Фрагменты исходной информационной последовательности (а) и восстановленных информационных последовательностей на приемной стороне (б) при использовании в качестве ГХС гиперхаотической системы Лю

Fig. 5. Fragments of the original information sequence (a) and reconstructed information sequences on the receiving side (b) when used hyperchaotic Liu system

Результаты моделирования подтверждают потенциальную возможность практического использования разработанной системы радиосвязи на основе ХС с опорным клиппированным сигналом, которая позволяет передавать информационные сигналы по каналам радиосвязи и восстанавливать их на приемной стороне с определенной достоверностью.

Преимущества использования клипированных ХС

В свете проведенных исследований определенный интерес представляет оценка выигрыша от использования клипированных ХС на приемной стороне по сравнению с многоуровневыми ХС.

Для этого воспользуемся подходом, предложенным в [Бобровский, Ильичев, Лапин, 2021; Булатов, и др., 2022]. Для упрощения расчетов воспользуемся наиболее простым способом представления сложных сигналов – в формате ASCII. Естественно, что данное представление сигналов является неоптимизированным и используется исключительно как наглядный пример. Исследования аппаратной реализации систем радиосвязи на основе ХС являются отдельной нетривиальной задачей и выходят за рамки представленной статьи, поэтому в дальнейшем рассматриваться не будет.

Положим, что требуемое количество сигналов, необходимое для использования в беспроводной системе передачи данных, составляет 10^5 сигналов. С помощью моделирования представим многоуровневые ХС, описываемые выражениями (6) и (7) и их клипированное представление в формате ASCII. Проведем оценку затраченной памяти для хранения такого количества сигналов в формате ASCII. Также для сравнения определим размер памяти, занимаемой многоуровневыми ХС, при их сжатии с помощью алгоритмов архивирования. Полученные расчеты приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, клипированные ХС занимают в 2 раза меньший объем памяти, чем многоуровневые ХС с использованием архивирования, и в 5 раз меньший объем памяти, чем многоуровневые ХС без использования архивирования.

Таблица 2
Table 2

Расчеты затраченной памяти для хранения сигналов
Calculations of the used memory for storing signals

№	Название ГХС	Размер памяти, занимаемой многоуровневыми ХС (без архивирования)	Размер памяти, занимаемой многоуровневыми ХС (с архивированием)	Размер памяти, занимаемой клипированными ХС
1	Аттрактор Ресслера	3,0 Гб	1,4 Гб	0,6 Гб
2	Гиперхаотическая система Лю	2,5 Гб	1,1 Гб	

Таким образом, проведенные расчеты, представленные в табл. 2, наглядно показывают, что клипированные ХС занимают значительно меньший объем памяти, чем многоуровневые ХС. Это подтверждает перспективность их использования в качестве опорных сигналов в когерентных системах радиосвязи на основе многоуровневых ХС, в особенности в условиях развития Интернета вещей.

Заключение

В данной статье предложено направление совершенствования технической конструкции когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС. Анализ источников [Мохсени, Кикот, 2015; Осипов, Жук, Гавришев, 2015; Kehui Sun, 2016; Gao et al., 2024; Ruopeng Liu, Pengyi Wang, Xiduo Wang, 2024; Tihomorskis, Ahrens, Aboltins, 2024] показал, что когерентный прием ХС способен обеспечивать большую помехоустойчивость по сравнению с некогерентным приемом. Указано, что одной из главных проблем при создании когерентных систем радиосвязи на основе ХС, в том числе и многоуровневых, является сложность в построении идентичных хаотических систем на передающей и приемной стороне, а также их синхронизация между собой. Отмечено, что одним из перспективных подходов по реализации ряда когерентных систем радиосвязи на основе

ХС, в том числе и многоуровневых, является программная реализация хаотического передатчика и хаотического приемника [Мохсени, Кикот, 2015; Осипов, Жук, Гавришев, 2015; Kehui Sun, 2016; Gao, Wu, Zhang, 2023; Guangkai Liu, et al., 2024; Ruopeng Liu, Pengyi Wang, Xiduo Wang, 2024; Tihomorskis, Ahrens, Aboltins, 2024]. Указаны некоторые недостатки таких систем радиосвязи, например, сложности в построении идентичных хаотических систем на передающей и приемной стороне, а также их синхронизации и пр. Отмечено, что некоторым из таких недостатков уделяется недостаточно внимания, например, задаче рационального хранения опорного ХС, в том числе и многоуровневого, на приемной стороне (в особенности в условиях развития Интернета вещей, предполагающего миниатюризацию аппаратных платформ и сокращение потребления вычислительных и иных ресурсов). Для дальнейших исследований решено сосредоточиться на многоуровневых ХС, которые обладают преимуществами по скрытности передачи данных перед бинарными [Мохсени, Кикот, 2015; Осипов, Жук, Гавришев, 2015; Kehui Sun, 2016; Gao, Wu, Zhang, 2023; Гавришев, 2024; Guangkai Liu, et al., 2024; Ruopeng Liu, Pengyi Wang, Xiduo Wang, 2024; Tihomorskis, Ahrens, Aboltins, 2024;].

Рассмотрен один из подходов решения указанной задачи [Курьянов, 1965; Лукин, 2008], заключающийся в использовании на приемной стороне клиппированной копии многоуровневого ХС, полученной из исходного ХС. В данном случае под клиппированием понимается преобразование исходного многоуровневого ХС в последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой +1 и –1 в зависимости от знака исходного сигнала. Приведено математическое описание указанного подхода. Описаны его достоинства и недостатки. Описан вариант шумового радара из источника [Лукин, 2008], в основу работы которого положен описанный выше принцип. Указано, что такой подход не нашел широкого применения в когерентных системах радиосвязи на основе многоуровневых ХС и потенциально может помочь в решении задачи уменьшения вычислительных и иных ресурсов, используемых на приемной стороне.

На основе проведенных исследований разработан вариант когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС с опорным клиппированным сигналом. Приведено описание принципов ее работы. С помощью моделирования экспериментально обоснована возможность практического использования разработанного варианта когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС с опорным клиппированным сигналом, который позволяет передавать информационные сигналы по каналам радиосвязи и восстанавливать их на приемной стороне с определенной достоверностью.

Проведен анализ преимуществ от использования клиппированных ХС на приемной стороне по сравнению с многоуровневыми ХС. С учетом введенных упрощений и ограничений показано, что клиппированные ХС, представленные в простейшем случае в формате ASCII, занимают в 2 раза меньший объем памяти, чем многоуровневые ХС с использованием архивирования, и в 5 раз меньший объем памяти, чем многоуровневые ХС без использования архивирования в формате ASCII. Таким образом, проведенные расчеты наглядно показывают, что клиппированные ХС занимают значительно меньший объем памяти, чем многоуровневые ХС, и позволяют сократить объем памяти, занимаемый опорным сигналом в варианте когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС.

Дальнейшее направление исследований по данной тематике авторы планируют сконцентрировать на оценке помехоустойчивости предложенного варианта когерентной системы радиосвязи на основе многоуровневых ХС с опорным клиппированным сигналом в присутствии различных типов помех (белый шум, узкополосная помеха и пр.).

Список литературы

- Бобровский В.В., Ильичев П.В., Лашин О.А. 2021. Широкополосный измерительный комплекс с шумоподобными сигналами для электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах. *Сейсмические приборы*, (1): 29–48. DOI: 10.21455/si2021.1-3

- Булатов В.Н., Сильвашко С.А., Тимонов Е.С., Худорожков О.В. 2022. Повышение точности цифрового спектрального анализа дискретных сигналов. *Датчики и системы*, (2): 28–34. DOI 10.25728/datsys.2022.2.4
- Гавришев А.А. 2023. К вопросу об использовании гиперхаотических сигналов для передачи данных в системах радиосвязи. *Научное приборостроение*, (2): 62–74.
- Гавришев А.А. 2024. Подходы к повышению скрытности передачи данных в системах радиосвязи. Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Вопросы обеспечения безопасности в киберпространстве». Махачкала: Типография ФОРМАТ: 23–26.
- Гавришев А.А., Жук А.П. 2018. Применение методов нелинейной динамики для исследования хаотичности сигналов-переносчиков защищенных систем связи на основе динамического хаоса. *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*, (1): 50–60. DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-1-50-60.
- Голиков А.М. 2022. Системы цифровой радиосвязи. М.: Ай Пи Ар Медиа: 340 с.
- Дмитриев А.С. 2023. Сверхширокополосные прямохаотические средства связи. Сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн». Йошкар-Ола: ПГТУ: 14–21.
- Дмитриев А.С., Панас А.И. 2002. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Издательство Физико-математической литературы: 252 с.
- Курьянов Б.Ф. 1965. «Нормированные» спектры случайных процессов. *Акустический журнал*, (2): 192–196.
- Лукин К.А. 2008. Шумовая радиолокация миллиметрового диапазона. *Радиофизика и электроника*, (13): 344–358.
- Мохсени Т.И., Кикот А.М. 2015. Когерентная передача цифровой информации с двоичной модуляцией хаотического импульса. *Журнал радиоэлектроники*, (6): 1–24.
- Осипов Д.Л., Жук А.П., Гавришев А.А. 2015. Устройство имитозащиты контролируемых объектов с повышенной структурной скрытностью сигналов-переносчиков. Патент РФ 2560824: 15.
- Фридман П.А. 1983. Отношение сигнала к шуму в радиоинтерферометре со сверхдлинной базой. *Астрофизические исследования*, (17): 95–101.
- Gao C., Wu Y., Zhang Y. 2023. Secure Communication Using WFRFT-DSSS Based on Chaotic Cyclic Shift. *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*: 1–5. DOI: 10.1109/ICCC57788.2023.10233567.
- Guangkai Liu, Guo Jie, Cheng Cheng et al. 2024. Performance of logistic and tent chaotic sequences in direct spread spectrum communication application. *IET International Radar Conference*, (47): 4132–4136. DOI: 10.1049/icp.2024.1776
- Kehui Sun. 2016. *Chaotic Secure Communication: Principles and Technologies*. Tsinghua University Press and Walter de Gruyter GmbH: 333 p. DOI: 10.1515/9783110434064
- Ruopeng Liu, Pengyi Wang, Xiduo Wang. 2024. Design and simulation of soft decision decoding based on chaotic M-ary spread spectrum system. *Discover Applied Sciences*, (6): 185. DOI: 10.1007/s42452-024-05849-7
- Tihomorskis N., Ahrens A., Aboltins A. 2024. Chaotic Spread-Spectrum Communication: A Comparative Study between Chaotic Synchronization and Matched Filtering. *Chaos Theory and Applications*. (6): 170–179. DOI: 10.51537/chaos.1424487

References

- Bobrovsky V.V., Ilyichev P.V., Lashin O.A. 2021. Broadband measuring complex with pseudonoise signals for electromagnetic monitoring of modern geodynamic processes in seismoactive zones. *Seismicheskie Pribery*, (1): 29–48. DOI: 10.21455/si2021.1-3 (In Russian)
- Bulatov V.N., Silvashko S.A., Timonov E.S., Khudorozhkov O.V. Improving the accuracy of digital spectral analysis discrete signal. *Sensors and Systems*, (2): 28–34 DOI: 10.25728/datsys.2022.2.4 (In Russian)
- Gavrishev A.A. 2023. On the use of hyperchaotic signals for data transmission in radio communication systems. *Nauchnoe priboroostroenie*, (2): 62–74 (In Russian).
- Gavrishev A.A. 2024. Approaches to increasing the secrecy of data transmission in radio communication systems. Proceedings of the II All-Russian Scientific and Technical Conference “Security issues in Cyberspace”, Makhachkala: FORMAT Printing House: 23–26 (In Russian)
- Gavrishev A.A., Zhuk A.P. 2018. Application of Methods of Nonlinear Dynamics to Study the Chaotic State of the Carrier Signals of Secure Communication Systems Based on Dynamic Chaos. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, (1): 50–60. DOI: 10.25205/1818-7900-2018-16-1-50-60 (In Russian)
- Golikov A.M. Digital radio communication systems, Moscow: IP Media Publ.: 340 p. (In Russian).
- Dmitriev A.S. 2023. Ultra wideband direct chaotic communicationsю Collection of reports of the XXVIII All-

Russian Open Scientific Conference “Radio wave Propagation”, Yoshkar-Ola: PGTU Publ.: 14–21 (In Russian).

- Dmitriev A.S., Panas A.I. 2022. Dynamic chaos: new information carriers for communication systems, Moscow: Publishing House of Physical and Mathematical Literature: 252 p. (In Russian)
- Kuryanov B.F. 1965. “Normalized” spectra of random processes. *Acoustic Journal*, (2): 192–196 (In Russian)
- Lukin K.A. 2008. Millimeter range noise radar. *Radiophysics and electronics*, (13): 344–358 (In Russian).
- Mohseni T.I., Kikotya A.M. 2015. Coherent transmission of digital information with binary modulation of a chaotic pulse. *Journal of Radio Electronics*, (6): 1–24 (In Russian).
- Osipov D.L., Zhuk A.P., Gavrishev A.A. 2015. Apparatus for protection against imitation of controlled objects with high structural security of carrier signals. Patent RF 2560824: 15 (In Russian).
- Fridman P.A. 1983. Signal-to-noise ratio in the long-base interferometer. *Astrophysical Bulletin*, (17): 95–101.
- Gao C., Wu Y., Zhang Y. 2023. Secure Communication Using WFRFT-DSSS Based on Chaotic Cyclic Shift. IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC): 1–5. DOI: 10.1109/ICCC57788.2023.10233567.
- Guangkai Liu, Guo Jie, Cheng Cheng et al. 2024. Performance of logistic and tent chaotic sequences in direct spread spectrum communication application. IET International Radar Conference, (47): 4132–4136. DOI: 10.1049/icp.2024.1776
- Kehui Sun. 2016. Chaotic Secure Communication: Principles and Technologies. Tsinghua University Press and Walter de Gruyter GmbH: 333 p. DOI: 10.1515/9783110434064
- Ruopeng Liu, Pengyi Wang, Xiduo Wang. 2024. Design and simulation of soft decision decoding based on chaotic M-ary spread spectrum system. *Discover Applied Sciences*, (6): 185. DOI: 10.1007/s42452-024-05849-7
- Tihomorskis N., Ahrens A., Aboltins A. 2024. Chaotic Spread-Spectrum Communication: A Comparative Study between Chaotic Synchronization and Matched Filtering. *Chaos Theory and Applications*. (6): 170–179. DOI: 10.51537/chaos.1424487

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported

Поступила в редакцию 03.11.2025

Поступила после рецензирования 27.02.2026

Принята к публикации 02.03.2026

Received November 03, 2025

Revised February 27, 2026

Accepted March 02, 2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гавришев Алексей Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры международной информационной безопасности, Московский государственный лингвистический университет, г. Москва, Россия

Осипов Дмитрий Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики, Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksey A. Gavrishev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Departments of International Information Security, Moscow State Linguistic University, Moscow, Russia

Dmitrij L. Osipov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia