

Научная статья

УДК 519.872

DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-6-16

 CC BY 4.0

Хаотические системы связи с модуляцией сигнала на основе управляемой симметрии полужавных конечно-разностных моделей

 Вячеслав Геннадьевич Рыбин, vgrybin@etu.ru

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация

Аннотация: Статья посвящена разработке модели когерентной хаотической системы связи, реализующей новый способ модуляции сигнала на основе управляемой симметрии конечно-разностных схем с последующим экспериментальным анализом эффективности различных методов модуляции. Целью работы является проектирование и исследование имитационной компьютерной модели хаотической системы связи с модуляцией сигнала на основе управляемой симметрии полужавных конечно-разностных схем. Элементами научной новизны обладают конечно-разностные модели приемников/передатчиков, позволяющие реализовать новый способ модуляции хаотических сигналов. Результат: получение имитационной модели когерентных хаотических систем связи с инструментами анализа скрытности и помехоустойчивости. Практическая значимость: имитационная модель хаотической системы связи является необходимым инструментом для анализа работоспособности системы перед ее физической реализацией.

Ключевые слова: нелинейная динамика, конечно-разностная модель, полужавные методы интегрирования, хаотические системы связи

Источник финансирования: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 10-79-10334).

Ссылка для цитирования: Рыбин В.Г. Хаотические системы связи с модуляцией сигнала на основе управляемой симметрии полужавных конечно-разностных моделей // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 1. С. 6–16. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-6-16. EDN:PRUEAO

Chaotic Communication Systems with Signal Modulation Based on Controlled Symmetry of Semi-Implicit Finite-Difference Models

 Vyacheslav Rybin, vgrybin@etu.ru

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
St. Petersburg, 197022, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to investigation coherent communication system model with a new method of signal modulation based on variable symmetry of finite-difference schemes with subsequent experimental analysis of the effectiveness of different modulation techniques. The aim of the study is to investigate a computer model of chaotic communication system with signal modulation based on variable symmetry of semi-implicit finite-difference schemes. Novelty: elements of scientific novelty have finite-difference models of receivers/transmitters, allowing to realize a

new method of modulation of chaotic signals. Result: obtaining a simulation model of coherent chaotic communication systems with tools for covertness and noise immunity analyses. Practical relevance: The simulation model of chaotic communication system is a necessary tool for analyzing the performance of the system before its physical implementation.

Keywords: *nonlinear dynamics, finite-difference models, semi-explicit integration methods, chaotic communication systems*

Funding: This study was supported by the grant of the Russian Science Foundation (RSF), project 20-79-10334.

For citation: Rybin V. Chaotic Communication Systems with Signal Modulation Based on Controlled Symmetry of Semi-Implicit Finite-Difference Models. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2024;10(1):6–16. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-6-16. EDN:PRUEAO

Введение

Одной из наиболее интересных особенностей дискретных хаотических систем является их чувствительность к свойствам оператора численного интегрирования, который используется для перехода от непрерывной модели, представленной, как правило, в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), к конечно-разностной схеме, пригодной для численных экспериментов и реализации на ЭВМ. Недавние исследования показали, что выбор дискретного оператора может существенно изменять динамику конечно-разностных моделей, вызывая как потерю, так и появление некоторых особенностей по сравнению с непрерывным прототипом [1]. Хотя этот эффект обычно считается нежелательным, он может также привести к появлению новых полезных свойств, которые отсутствовали в непрерывной системе и имеют множество применений, например, в программах шифрования данных или защищенных системах связи.

Сегодня различные системы связи являются неотъемлемой и важнейшей частью повседневной жизни людей. В то же время надежность, безопасность и качество связи постоянно находятся под угрозой из-за различных факторов, таких как помехи, искажения в канале передачи данных, шум и несанкционированное вмешательство. Для решения этих проблем ученые и инженеры разрабатывают новое поколение защищенных систем связи, основанных на свойствах широкополосных сигналов.

Одной из быстро развивающихся областей науки, связанных с созданием таких устройств, является передача данных с использованием хаотических широкополосных сигналов. Хаотический сигнал по своим статистическим и спектральным свойствам напоминает шум, при этом являясь детерминированным и, следовательно, обладающим высокой повторяемостью. Используя хаотические сигналы, можно создавать надежные, безопасные и скрытые системы [2] связи. Однако ряд проблем не позволяет широко использовать хаотические системы для решения коммуникационных задач.

Одной из главных сложностей при проектировании хаотических систем связи (ХСС) является то, что генерация, передача и очистка хаотических сигналов – комплексные задачи, требующие специального математического аппарата и высокочувствительных к ограниченной точности вычислителей. Это объясняется самой природой хаотических систем, когда свойства применяемого оператора дискретного интегрирования и тип данных могут существенно повлиять на свойства получаемой конечно-разностной модели. Представляет интерес, что не только некоторые известные свойства непрерывного прототипа могут отсутствовать в его дискретном аналоге, но и могут появиться новые свойства, отсутствовавшие в исходной системе [3].

Вторая проблема проектирования ХСС заключается в отсутствии эффективных специализированных методов модуляции хаотических сигналов. Ключевыми требованиями к способу модуляции хаотических сигналов являются высокая устойчивость к изменению параметров модуляции с сохранением режима хаотических колебаний, а также хорошая устойчивость к шумам в канале связи.

Тем не менее, в современной литературе обсуждается множество методов реализации защищенных систем связи на основе хаоса. В работе [4] была представлена новая хаотическая система дробного порядка и ее реализация в виде электронной схемы для создания защищенной системы связи. В работе [5] авторы продемонстрировали управляемую электронную схему на основе новой трехмерной ХСС и ее применение для безопасной передачи данных. Другая реализация ХСС с использованием микроконтроллеров описана в работе [6].

Исследования в области ХСС обычно охватывают такие способы модуляции, как хаотическая маскировка, хаотическая модуляция, квадратурная хаотическая фазовая манипуляция [7] и переключение хаотических режимов [8]. Хаотическая модуляция потенциально может обеспечить более высокие показатели безопасности, чем подход с хаотической маскировкой, но для этого требуется более высокое соотношение сигнал/шум (SNR, аббр. от англ.

Signal-to-Noise Ratio) в канале [9]. Отметим, что особый интерес для исследований и практической реализации представляют именно когерентные ХСС, поскольку они могут обеспечить наиболее защищенную передачу информации при малых изменениях модулируемых параметров. Когерентные ХСС представляют собой класс систем, в которых происходит синхронизация одного или нескольких осцилляторов на стороне приемника с сигналом в канале связи. Анализируя поведение ошибки синхронизации, можно произвести демодуляцию сигнала и получить исходное сообщение.

Постановка задачи

В настоящей работе описана реализация и проведен анализ эффективности модели ХСС, использующей перспективный способ модуляции на основе управляемой симметрии конечно-разностных схем. Для решения поставленной задачи разобьем ее на следующие подзадачи:

- описание методов интегрирования с управляемой симметрией, как способа синтеза дискретных моделей генераторов хаотических сигналов для реализации приемника и передатчика;
- синтез и анализ конечно-разностной модели хаотической системы с управляемой симметрией;
- реализация моделей приемника и передатчика; оптимизация параметров синхронизации;
- разработка инструментов анализа производительности ХСС; оценка производительности разработанной ХСС с использованием следующих метрик: оценка процента битовых ошибок (BER, аббр. от англ. Bit Error Rate) в различных условиях шумленности, оценка скрытности.

Полуявные методы интегрирования с управляемой симметрией

Основы концепции диагонально-неявных методов численного интегрирования (Д-методов) изложены Д.Н. Бутусовым в работах [10–12]. Подобные методы обладают вычислительной эффективностью явных методов при лучшей численной устойчивости и точности, а также сохраняют некоторые геометрические свойства решения при моделировании консервативных систем. Упомянутые геометрические особенности были впервые отмечены в полуявных алгоритмах Эйлера – Кромера [13] и Штормера – Верле [14], традиционно используемых при моделировании гамильтоновых систем. В свою очередь, Д-методы являются обобщением полуявных симплектических алгоритмов интегрирования на весь класс динамических систем, описываемых ОДУ, которые могут быть записаны в нормальной форме Коши. Отметим, что Д-методы существуют только для систем размерности $N \geq 2$, вырождаясь для систем первого порядка в явный или неявный метод Эйлера.

Композиционный метод (КД-метод), известный как самосопряженный полуявный метод интегрирования, является частным случаем Д-методов. КД-метод хорошо подходит для моделирования хаотических систем, поскольку он предотвращает смещение хаотических траекторий дискретной системы на периодические или квазихаотические орбиты во время длительного моделирования при ограниченной длине разрядной сетки [15]. В контексте разработки ХСС это означает большую устойчивость к хаотической деградации, что является актуальным при аппаратной реализации генераторов хаоса на платформах с малой разрядной сеткой. Более того, в отличие от полностью неявных полуявные методы не подавляют хаотические режимы за счет избыточной диссипации при моделировании как консервативных, так и диссипативных систем [12].

КД-метод с размером шага интегрирования h может быть описан как:

$$\Psi_h = \Phi_{h/2} \cdot \Phi_{h/2}^* \quad (1)$$

Это композиция пары опорных сопряженных Д-методов $\Phi_{h/2}$ и $\Phi_{h/2}^*$, взятых с половинным шагом $h/2$. В дискретный момент времени t_n , когда решение x_n уже известно, можно применить пару методов $\Phi_{h/2}$, чтобы получить x_{n+1} .

Рассмотрим динамическую систему порядка $N \geq 2$ с разделяемой правой частью:

$$\dot{x} = f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T \quad (2)$$

Нормальная форма Коши для случая $N = 2$ имеет вид:

$$\dot{u} = f_u(u, w), \quad \dot{w} = f_w(u, w) \quad (3)$$

Тогда первый сопряженный метод может быть записан, как:

$$\begin{aligned} u_{n+\frac{1}{2}} &= u_n + \frac{h}{2} f_u(u_n, w_n), \\ w_{n+\frac{1}{2}} &= w_n + \frac{h}{2} f_w(u_{n+\frac{1}{2}}, w_n). \end{aligned} \quad (4)$$

Второй сопряженный метод описывается следующим конечно-разностным уравнением:

$$\begin{aligned} w_{n+1} &= w_{n+\frac{1}{2}} + \frac{h}{2} f_w(u_{n+\frac{1}{2}}, w_{n+\frac{1}{2}}), \\ u_{n+1} &= u_{n+\frac{1}{2}} + \frac{h}{2} f_u(u_{n+\frac{1}{2}}, w_{n+1}). \end{aligned} \quad (5)$$

Первый сопряженный метод является полностью явным, а второй сопряженный метод содержит неявность в диагональных элементах матрицы системы. Одним из полезных свойств КД-метода является то, что одномерная диагональная неявность может быть разрешена аналитически или с помощью метода простых итераций, что позволяет обойтись без вычислительно-затратных итераций метода Ньютона [12]. При этом сходимость гарантируется за счет одномерности задачи.

Деление шага по времени h на два в уравнении (1) – частный случай более обобщенной формулы адаптивного интегратора. Введем коэффициент симметрии s и применим его к размеру шага h , чтобы разбить его на две произвольные части:

$$\begin{aligned} h_1 &= h \cdot s, \\ h_2 &= h \cdot (1 - s). \end{aligned} \tag{6}$$

Таким образом, можно сформулировать семейство сопряженных полуявных методов с переменной симметрией (КДПС):

$$\Psi_{h,s} = \Phi_{h_1} \cdot \Phi_{h_2}^* \tag{7}$$

Подобные численные методы сохраняют некоторые из основных свойств КД-метода и обеспечивают аффинное преобразование фазового пространства дискретной системы без смены режима колебаний. Графическая интерпретация метода КДПС представлена на рисунке 1.

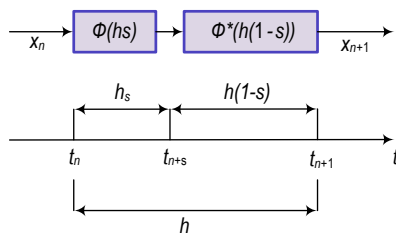


Рис. 1. Один шаг интегрирования полуявного метода с переменной симметрией [16]

Fig. 1. One Integration Step of Semi-Explicit Integration Method with Variable Symmetry [16]

В работе [17] было продемонстрировано, что полная синхронизация двух дискретных моделей хаоти-

ческих систем не может наблюдаться, если коэффициенты симметрии конечно-разностной схемы ведущего и ведомого осцилляторов не совпадают. Также в работе была показана возможность адаптивного управления коэффициентами симметрии, что делает методы интеграции семейства КДПС пригодными для применения при проектировании цифровых систем связи на основе хаоса. Стоит отметить, что изменение коэффициента симметрии меняет лишь геометрию фазового пространства и, в некоторой степени численную устойчивость конечно-разностной схемы, в отличие от параметра бифуркации, способного изменять тип генерируемых колебаний. Поэтому модуляция коэффициента симметрии может оказаться более защищенным способом передачи сообщений, чем модуляция параметра. В этом и заключается гипотеза настоящего исследования.

Выбор и анализ хаотической системы как основы для генератора/приемника в составе ХСС

В данной работе в качестве основы генератора/приемника хаотических сигналов выбрана следующая система ОДУ третьего порядка [18]:

$$\begin{cases} \dot{x} = ax - y \\ \dot{y} = b(z - y) \\ \dot{z} = (c - b)y + cz + xy \end{cases}, \tag{8}$$

где x, y, z – переменные состояния; a, b, c – параметры системы. Система (8) демонстрирует хаотическое поведение при значении параметров $a = -10, b = 55, c = 37$. Фазовые портреты системы (8) показаны на рисунке 2.

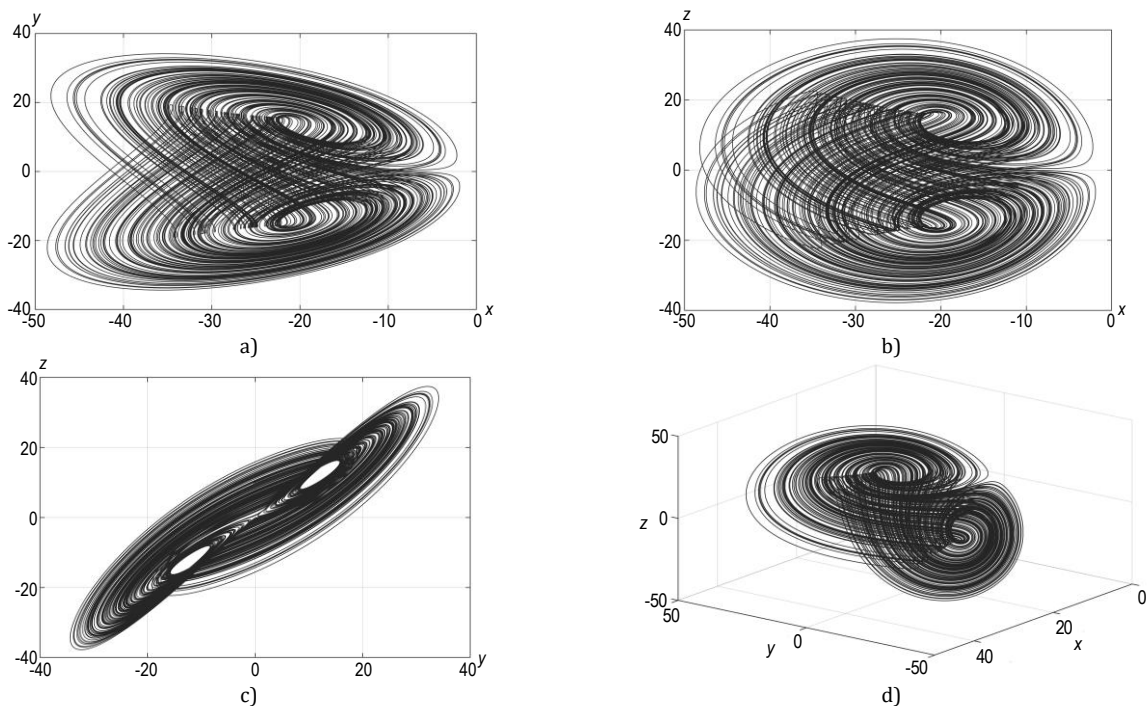


Рис. 2. Фазовые портреты системы (8) в проекции XY (a), XZ (b), YZ (c) и в трехмерном виде (d)

Fig. 2. Phase Portraits of System (8): a) XY-Plane; b) XZ-plane; c) YZ-Plane; d) in Three Dimensions

Система (8) имеет три нестабильные точки равновесия: одну типа седло и две симметричные точки типа седло-фокус [18]:

$$\begin{cases} E_1 = [0,0,0]^T \\ E_2 = [-(2c - b), \sqrt{a(b - 2c)}, \sqrt{a(b - 2c)}]^T \\ E_3 = [-(2c - b), -\sqrt{a(b - 2c)}, -\sqrt{a(b - 2c)}]^T \end{cases} \quad (9)$$

Рассмотрим дискретную модель системы (8), полученную с помощью численного метода интегрирования КДПС:

$$\begin{aligned} x_{n+s} &= x_n + h_1(ax_n - y_n^2), \\ y_{n+s} &= y_n + h_1b(z_n - y_n), \\ z_{n+s} &= z_n + h_1((c - b)y_{n+s} + cz_n + x_{n+s}y_{n+s}), \\ z_{n+1} &= z_{n+s} + h_2 \times \\ &\times ((c - b)y_{n+s} + cz_{n+1} + x_{n+s}y_{n+s}), \\ y_{n+1} &= y_{n+s} + h_2b(z_{n+1} - y_{n+1}), \\ x_{n+1} &= x_{n+s} + h_2(ax_{n+1} - y_{n+1}^2). \end{aligned} \quad (10)$$

Разрешим диагональную неявность аналитически:

$$\begin{aligned} x_{n+s} &= x_n + h_1(ax_n - y_n^2), \\ y_{n+s} &= y_n + h_1b(z_n - y_n), \\ z_{n+s} &= z_n + h_1((c - b)y_{n+s} + cz_n + x_{n+s}y_{n+s}), \\ z_{n+1} &= \frac{z_{n+s} + h_2((c - b)y_{n+s} + x_{n+s}y_{n+s})}{(1 - ch_2)}, \\ y_{n+1} &= \frac{(y_{n+s} + h_2bz_{n+1})}{(1 + bh_2)}, \\ x_{n+1} &= \frac{(x_{n+s} - h_2y_{n+1}^2)}{(1 - ah_2)}. \end{aligned} \quad (11)$$

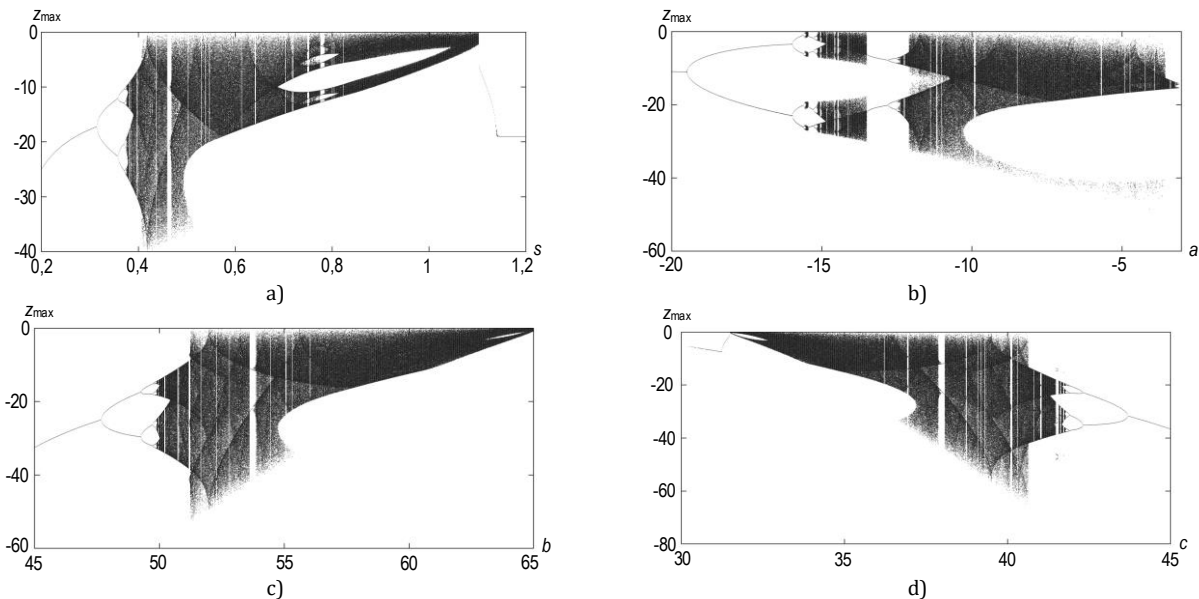


Рис. 3. Бифуркационные диаграммы на основе локальных максимумов для системы (8) при варьировании коэффициента симметрии (а) и параметров а (b), b (c), c (d)

Fig. 3. Bifurcation Diagrams Based on Estimation of Local Maxima for Systems (8) with Respect to Symmetry Coefficient (a), to Parameters a (b), b (c) and c (d)

Классическими инструментами для анализа динамики хаотических систем являются построение бифуркационных диаграмм и показателей Ляпунова. Бифуркационная диаграмма может быть построена путем нанесения значений локальных экстремумов переменных состояния на вертикаль, соответствующую значению исследуемого параметра. Однако такой подход позволяет оценить только амплитудные изменения динамики хаотической системы. В данной работе мы также рассматриваем бифуркационные диаграммы, построенные с помощью оценки временного интервала между соседними локальными максимумами.

Бифуркационные диаграммы на основе локальных максимумов и временного интервала между соседними локальными максимумами при варьировании коэффициента симметрии и параметров бифуркации показаны на рисунках 3 и 4, соответственно. Отметим, что во всех численных экспериментах используется шаг интегрирования $h = 0,01$; начальные условия (x, y, z) приняты равными $(1, 1, 0)$.

Зависимость показателей Ляпунова для системы (8) от коэффициента симметрии и параметров a, b и c показаны на рисунке 5.

Из полученных результатов моделирования можно сделать вывод о том, что система (8) демонстрирует хаотическое поведение на большей части диапазонов изменения параметров и коэффициента симметрии, что делает ее хорошим кандидатом для создания системы защищенной передачи данных.

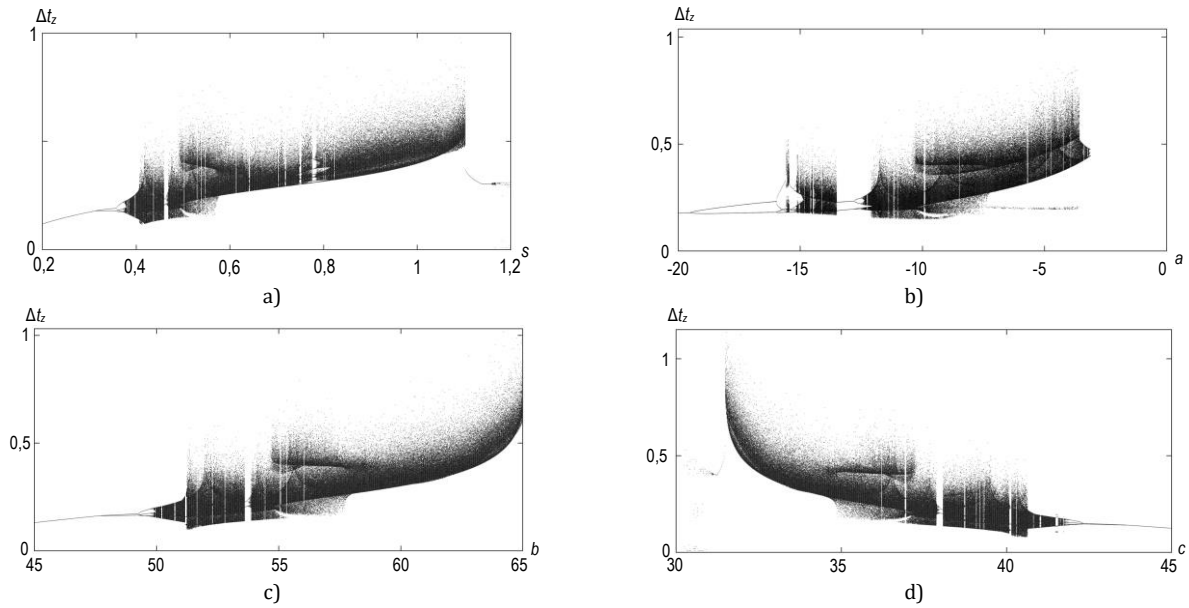


Рис. 4. Бифуркационные диаграммы для системы (8), построенные с помощью значений интервалов между локальными максимумами при варьировании коэффициента симметрии (а) и параметров a (b), b (c), c (d)

Fig. 4. Bifurcation Diagrams Based on Estimation of the Intervals between Local Maxima with Respect to Symmetry Coefficient (a), to Parameters a (b), b (c), c (d)

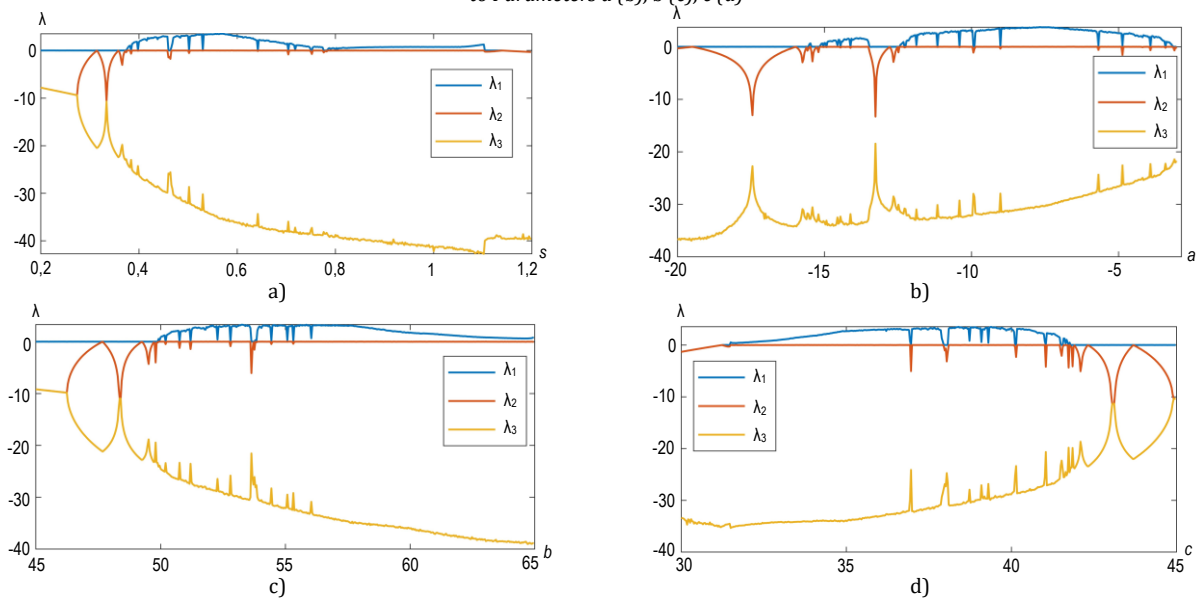


Рис. 5. Зависимость показателей Ляпунова при варьировании коэффициента симметрии (а), и параметров a (b), b (c), c (d)

Fig. 5. Dependence of Lyapunov Exponents with Respect to Symmetry Coefficient (a), to Parameters a (b), b (c), c (d)

Хаотическая система связи на основе управляемой симметрии

В настоящей работе рассматривается перспективная схема построения ХСС на основе управления симметрией дискретных отображений генераторов хаотических сигналов [16]. Данный способ реализации ХСС схож со способом передачи сообщений, использующий модуляцию по параметру бифуркации. Главное отличие предлагаемого способа модуляции состоит в том, что в качестве модулируемого параметра выступает не управляющий параметр хаотической системы, а коэффициент симметрии в дискретном отображении (рисунок 6).

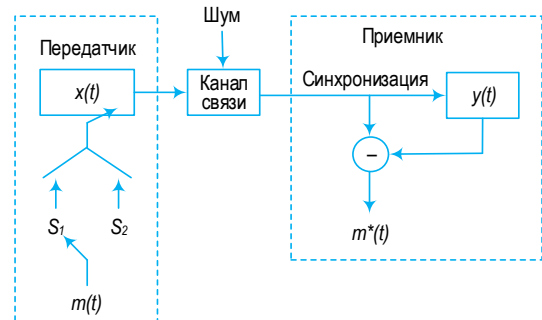


Рис. 6. Архитектура ХСС на основе модуляции коэффициента симметрии

Fig. 6. Architecture of a Chaotic Communication System Based on Symmetry Coefficient Modulation

Процесс передачи тестового сообщения "10101100" показан на рисунке 7.

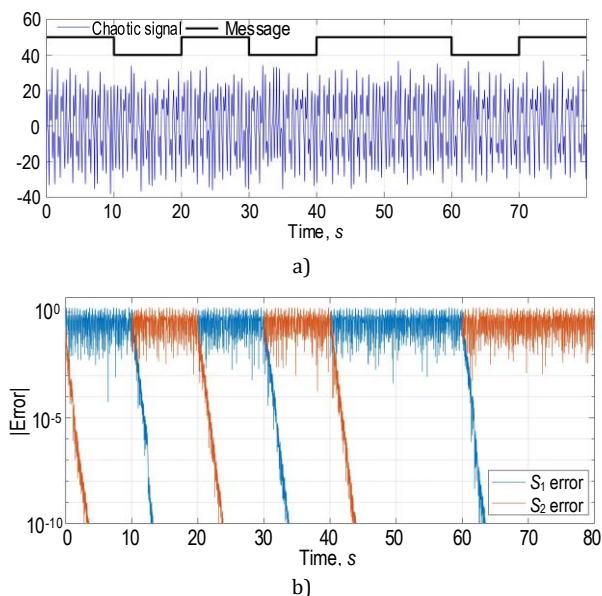


Рис. 7. Динамика сигнала (а) и ошибки синхронизации (б) на стороне приемника при передаче текстового сообщения "10101100"

Fig. 7. Signal Dynamics (a) and Synchronization Errors (b) on the Receive Side when Transmitting the Text Message "10101100"

Оптимизация параметров синхронизации

Разработка ХСС является задачей с многими неизвестными параметрами. При этом для достижения требуемого быстродействия системы при минимальном влиянии ошибок округления и шума на генерируемый сигнал необходимо выбрать оптимальный коэффициент синхронизации, т. е. такой, при котором скорость синхронизации является максимальной при минимальном проценте BER. Используя подход, описанный в работе [19], было определено, что для задачи передачи данных оптимально использовать переменную z системы (8) с коэффициентом синхронизации $K = 60$.

Рисунок 8 демонстрирует зависимость процента BER от значения коэффициента синхронизации при различном SNR в канале связи. Черно-белая линия соответствует оптимальному значению коэффициента синхронизации для заданного SNR.

Используя экспериментальные данные, полученные для построения рисунка 8, можно вывести формулу зависимости SNR для заданного коэффициента синхронизации:

$$SNR(K) = p_1 K^5 + p_2 K^4 + p_3 K^3 + p_4 K^2 + p_5 K + p_6, \quad (12)$$

где SNR – уровень шума в канале связи в дБ; K – коэффициент синхронизации; $p_1 = -0,001869$; $p_2 = 0,1865$; $p_3 = -7,374$; $p_4 = 144,4$; $p_5 = -1400$; $p_6 = 5386$.

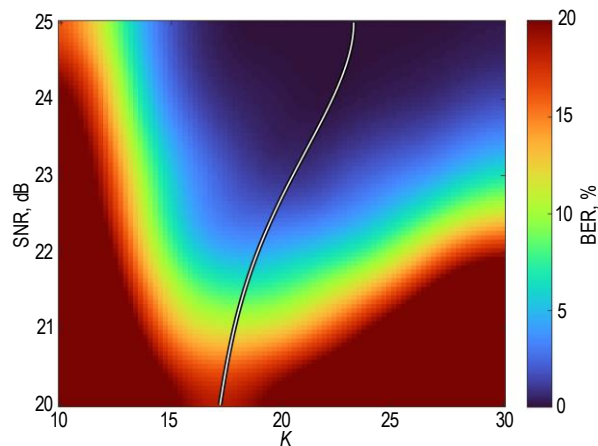


Рис. 8. Зависимость процента BER от значения коэффициента синхронизации и уровня шума в канале связи

Fig. 8. Dependence of Bit-Errors-Rate on the Synchronization Coefficient and Signal-to-Noise Ratio of Communication Channel

Оценка производительности хаотических систем связи (возвратные преобразования)

В работе [20] приведен анализ инструментов оценки скрытности когерентных ХСС. В настоящем исследовании предлагается эффективный способ для численной оценки разницы между сигналами на основе возвратных преобразований. Амплитудное возвратное преобразование (ARM, аббр. от англ. Amplitude Return Map) – разновидность такого вида анализа, нашедшая широкое применение в качестве способа атаки на ХСС. Впервые данный метод был описан в работах [21, 22]. Суть ARM-анализа состоит в нахождении разности, а также среднего значения локальных экстремумов сигнала:

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{X_m + Y_m}{2}, & B_m &= X_m - Y_m, \\ C_m &= \frac{X_{m+1} + Y_m}{2}, & D_m &= Y_m - X_{m+1}, \end{aligned} \quad (13)$$

где X_m и Y_m – m -е максимумы и минимумы сигнала, соответственно [20].

В работе [23] метод возвратного преобразования успешно использован для атаки на ХСС, основанные на методах хаотической маскировки, модуляции управляющих параметров, включения и переключения хаотических режимов.

Однако данный подход учитывает только амплитудные изменения сигнала. Для того, чтобы учитывать и фазовые изменения сигнала, в данной работе также предлагается использовать амплитудно-фазовые возвратные преобразования (APRM, аббр. от англ. Amplitude and Phase Return Map), получаемые на основе локальных максимумов и временных интервалов между соседними локальными максимумами. Иными словами, на ось абсцисс диаграммы наносятся значение интервалов, а на ось ординат соответствующее значение локальных

максимумов. Таким образом полученная диаграмма отражает как амплитудные, так и фазовые изменения в динамике сигнала.

Пример возвратных преобразований для системы (8) при модуляции коэффициента симметрии (значения параметров: $s_1 = 0,525$ и $s_2 = 0,475$) показаны на рисунках 9а и 9с, а при модуляции бифуркационных параметров (значения параметров: $b_1 = 55,4$ и $b_2 = 54,6$) – на рисунке 9b и 9d.

Для оценки разницы диаграмм используется подход на основе двумерных гистограмм [20], работающий следующим образом. Графики, полученные в ходе возвратных преобразований, разбиваются на ячейки заданных размеров, в результате чего получают два псевдоизображения, интенсивность цвета в которых зависит от количества точек, которые попали в отдельную ячейку на графике.

Далее находится разница между полученными псевдоизображениями с использованием следующих формул:

$$\theta(x) = \begin{cases} x, & \text{если } x \geq \varepsilon \\ 0, & \text{если } x < \varepsilon \end{cases} \quad \varepsilon \in N,$$

$$\Delta_{i,j} = |X_{i,j} - Y_{i,j}| \cdot |\theta(X_{i,j}) - \theta(Y_{i,j})|, \quad i, j \in [1, N], \quad (14)$$

$$D = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\theta(\Delta_{i,j})}{\theta(X_{i,j}) + \theta(Y_{i,j})},$$

где θ – ступенчатая функция Хевисайда; N ($N \times N$) – разрешение двумерной гистограммы; ε – порог отсека редких точек, влияющих на вычисление разницы между двумерными гистограммами. Использование порога снижает чувствительность количественного расчета разницы к наличию случайных выборок, шума или преднамеренного размытия сигнала [20].

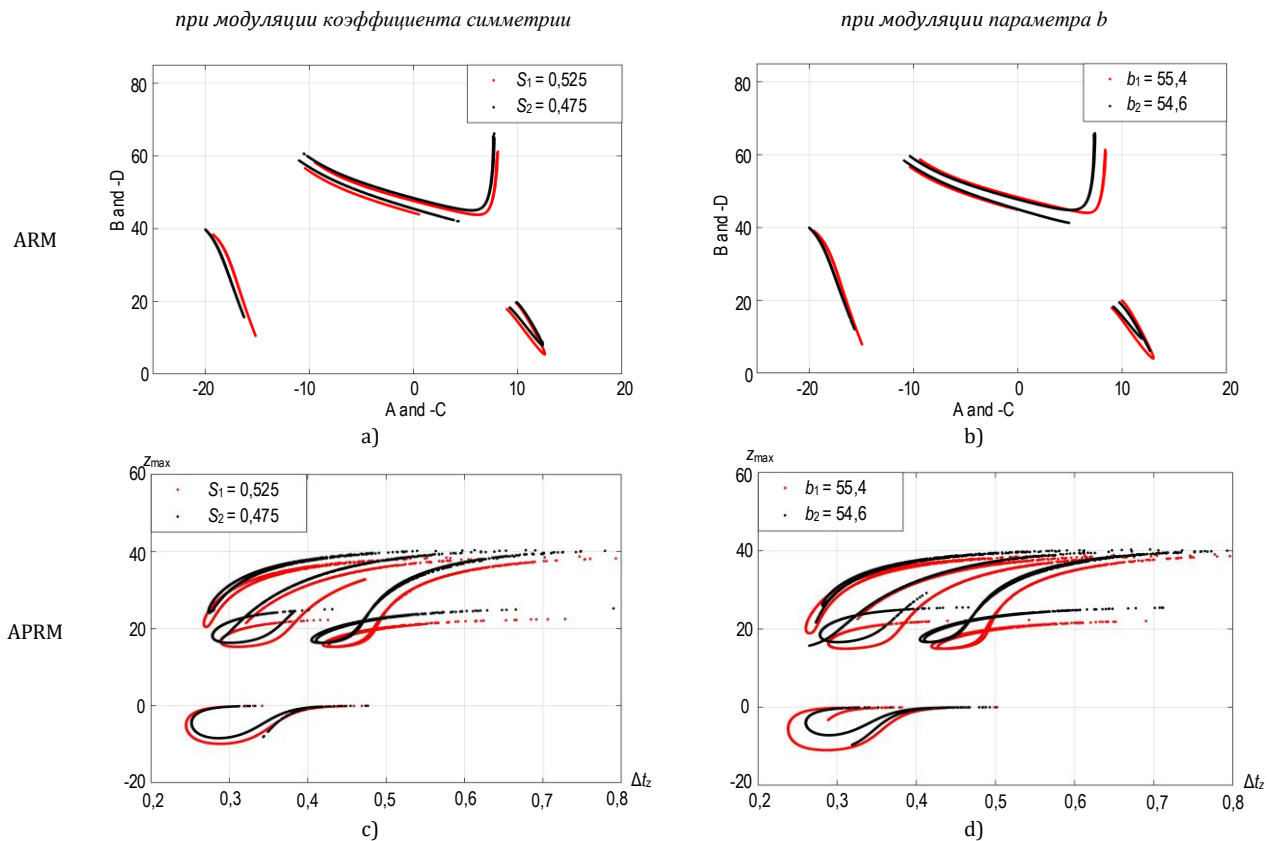


Рис. 9. Возвратные преобразования для системы (8)

Fig. 9. Return Maps for System (8)

Экспериментальная оценка хаотической системы связи

Для передачи сообщений в исследуемой ХСС использовался бинарный алфавит, где каждому символу сообщения соответствует определенное значение параметра или коэффициента симметрии. Экспериментальное исследование включает в себя три набора значений параметров и коэффициентов

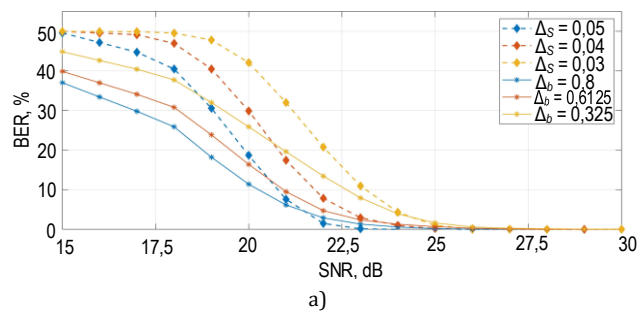
симметрии. Значения соответствующих параметров представлены в таблице 1.

Анализ процента BER при передаче сообщения при различных значениях SNR представлен на рисунке 10а. Для проведения анализа BER использовался прямой подсчет ошибок при передаче сообщения размером 10 000 бит. Оценка скрытности с использованием ARM- и APRM-метрик представлена на рисунках 10b и 10с, соответственно.

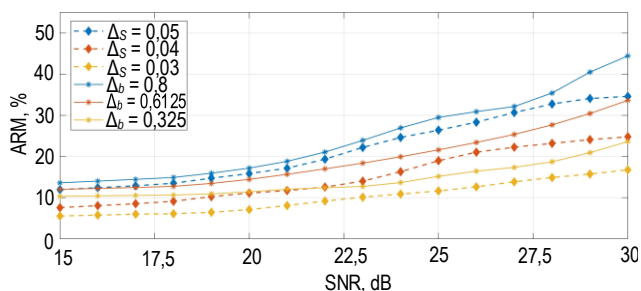
ТАБЛИЦА 1. Значения параметров для экспериментального исследования

TABLE 1. Experimental Setup

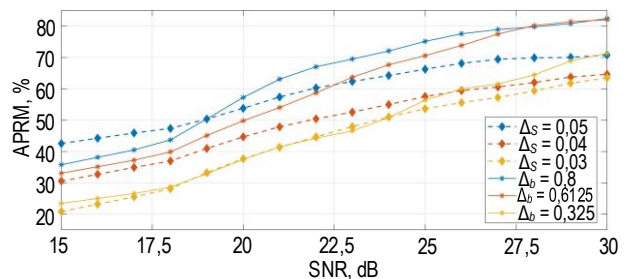
	Параметрическая модуляция			Модуляция коэффициента симметрии		
	b_1	b_2	Δb	s_1	s_2	Δs
1.	55,4	54,6	0,8	0,5025	0,4975	0,05
2.	55,30625	54,69375	0,6125	0,502	0,498	0,04
3.	55,1625	54,375	0,325	0,5015	0,4985	0,03



a)



b)



c)

Рис. 10. Зависимость процента BER (а), ARM-метрики (б) и APRM-метрики (с) от SNR

Fig. 10. The Dependence of Bit-Error-Rate (a), ARM (b) and APRM (c) values on SNR

Следует отметить, что в исследовании использовался относительно небольшой разброс параметров, что привело к относительно низкой помехоустойчивости. Основная причина этого ограничения заключается в том, что исследование было сосредоточено на изучении методов хаотической

связи, которые обладают схожей помехоустойчивостью, чтобы выявить наиболее скрытный метод модуляции.

По экспериментальным результатам, представленным на рисунке 10а, видно, что характер изменения процента BER в условиях различной зашумленности несколько отличается в зависимости от способа модуляции. При модуляции на основе коэффициента симметрии наблюдается довольно резкое ухудшение качества передачи информации при уменьшении SNR с 26 до 20 дБ. При этом, для случаев модуляции параметра бифуркации подобное ухудшение наблюдается при уменьшении SNR с 26 до 15 дБ.

Для всех наборов параметров (см. таблицу 1) модуляция коэффициента симметрии оказалась более скрытной, чем параметрическая модуляция (рисунки 10б и 10с). Также стоит отметить, что использование APRM-метрики оказалось более чувствительным при расчете скрытности, чем ARM-метрики.

Заключение

В данной работе был представлен анализ дискретной модели автономной хаотической системы третьего порядка с использованием метода интегрирования с управляемой симметрией.

Динамика тестовой системы была проанализирована с использованием инструментов бифуркационного анализа, а также с помощью анализа показателей Ляпунова. Описано применение управляемой симметрии как способа модуляции для создания когерентных хаотических систем связи. Анализ производительности представленной хаотической системы связи был проведен с помощью оценки процента битовых ошибок в зависимости от уровня шума в канале связи, а также была проведена оценка скрытности с использованием амплитудных и амплитудно-фазовых возвратных преобразований.

Экспериментальное исследование показало, что модуляция на основе коэффициента симметрии является более скрытной, чем классическая модуляция параметров бифуркации.

Автор выражает благодарность кандидату технических наук профессору Бутусову Денису Николаевичу за плодотворную дискуссию и ценные советы при планировании исследования, а также признательность кандидату технических наук Бобровой Юлии Олеговне за помощь в оформлении работы.

Список источников

- Ostrovskii V.Y., Karimov A.I., Rybin V.G., Kopets E.E., Butusov D.N. Comparing the Finite-Difference Schemes in the Simulation of Shunted Josephson Junctions // Proceedings of the 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT, Bologna, Italy, 13–16 November 2018). IEEE, 2018. PP. 300–305. DOI:10.23919/FRUCT.2018.8588028
- Kaddoum G. Wireless Chaos-Based Communication Systems: A Comprehensive Survey // IEEE Access. 2016. Vol. 4. PP. 2621–2648. DOI:10.1109/ACCESS.2016.2572730

3. Ostrovskii V.Y., Rybin V.G., Karimov A.I., Butusov D.N. Inducing multistability in discrete chaotic systems using numerical integration with variable symmetry // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2022. Vol. 165. Part 1. P. 112794. DOI:10.1016/j.chaos.2022.112794
4. Rahman Z.A.S., Jasim B.H., Al-Yasir Y.I., Hu Y.F., Abd-Alhameed R.A., Alhasnawi B.N. A New Fractional-Order Chaotic System with its Analysis, Synchronization, and Circuit Realization for Secure Communication Applications // *Mathematics*. 2021. Vol. 9. Iss. 20. P. 2593. DOI:10.3390/math9202593
5. Benkouider K., Bouden T., Sambas A., Mohamed M.A., Sulaiman I. M., Mamat M., et al. Dynamics, Control and Secure Transmission Electronic Circuit Implementation of a New 3D Chaotic System in Comparison With 50 Reported Systems // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. PP. 152150–152168. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3126655
6. Gokyildirim A., Kocamaz U.E., Uyaroglu Y., Calgan H. A novel five-term 3D chaotic system with cubic nonlinearity and its microcontroller-based secure communication implementation // *AEU – International Journal of Electronics and Communications*. 2023. Vol. 160. P. 154497. DOI:10.1016/j.aeue.2022.154497
7. Babajans R., Cirjulina D., Capligns F., Kolosovs D., Grizans J., Litvinenko A. Performance Analysis of Vilnius Chaos Oscillator-Based Digital Data Transmission Systems for IoT // *Electronics*. 2023. Vol. 12. Iss. 3. P. 709. DOI:10.3390/electronics12030709
8. Cirjulina D., Babajans R., Kolosovs D., Litvinenko A. Experimental Study on Frequency Modulated Chaos Shift Keying Communication System // *Proceedings of the Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW, Riga, Latvia, 05–07 October 2022)*. IEEE, 2022. DOI:10.1109/MTTW56973.2022.9942593
9. Cui S., Zhang J. Chaotic Secure Communication Based on Single Feedback Phase Modulation and Channel Transmission // *IEEE Photonics Journal*. 2019. Vol. 11. Iss. 5. P. 7905208. DOI:10.1109/JPHOT.2019.2931615
10. Butusov D.N., Karimov A.I., Tutueva A.V. Symmetric extrapolation solvers for ordinary differential equations // *Proceedings of NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW, St. Petersburg, Russia, 02–03 February 2016)*. IEEE, 2016. PP. 162–167. DOI:10.1109/EIconRusNW.2016.7448145
11. Voroshilova A., Wafubwa J. Discrete Competitive Lotka–Volterra Model with Controllable Phase Volume // *Systems*. 2020. Vol. 8. Iss. 2. P. 17. DOI:10.3390/systems8020017
12. Butusov D.N., Ostrovskii V.Y., Karimov A.I., Andreev V.S. Semi-Explicit Composition Methods in Memcapacitor Circuit Simulation // *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS)*. 2019. Vol. 10. Iss. 2. PP. 37–52. DOI:10.4018/IJERTCS.2019040103
13. Terentev A.A., Butusov D.N., Fedoseev P.S. Novel Composition ODE Solver based on Semi-Implicit Integration // *Proceedings of the International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM, St. Petersburg, Russia, 27–29 May 2020)*. IEEE, 2020. PP. 128–132. DOI:10.1109/SCM50615.2020.9198821
14. Reich S. Linearly implicit time stepping methods for numerical weather prediction // *BIT Numerical Mathematics*. 2006. Vol. 46. PP. 607–616. DOI:10.1007/s10543-006-0065-0
15. Tutueva A., Butusov D. Avoiding Dynamical Degradation in Computer Simulation of chaotic Systems Using Semi-Explicit Integration: Rössler Oscillator Case // *Fractal and Fractional*. 2021. Vol. 5. Iss. 4. P. 214. DOI:10.3390/fractalfract5040214
16. Karimov T., Rybin V., Kolev G., Rodionova E., Butusov D. Chaotic Communication System with Symmetry-Based Modulation // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 8. P. 3698. DOI:10.3390/app11083698
17. Tutueva A.V., Karimov T.I., Andreev V.S., Zubarev A.V., Rodionova E.A., Butusov D.N. Synchronization of Chaotic Systems via Adaptive Control of Symmetry Coefficient in Semi-Implicit Models // *Proceedings of the Ural Smart Energy Conference (USEC, Ekaterinburg, Russia, 13–15 November 2020)*. IEEE, 2020. PP. 143–146. DOI:10.1109/USEC50097.2020.9281181
18. Singh P.P. A Novel Chaotic System with Wide Spectrum, its Synchronization, Circuit Design and Application to Secure Communication // *Indian Journal of Science and Technology*. 2021. Vol. 14. Iss. 28. PP. 2351–2367. DOI:10.17485/ijst/v14i28.1035
19. Rybin V., Kolev G., Kopets E., Dautov A., Karimov A., Karimov T. Optimal Synchronization Parameters for Variable Symmetry Discrete Models of Chaotic Systems // *Proceedings of the 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO, Budva, Montenegro, 07–10 June 2022)*. IEEE, 2022. DOI:10.1109/MECO55406.2022.9797125
20. Rybin V., Butusov D., Rodionova E., Karimov T., Ostrovskii V., Tutueva A. Discovering Chaos-Based Communications by Recurrence Quantification and Quantified Return Map Analyses // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2022. Vol. 32. Iss. 9. P. 2250136. DOI:10.1142/S021812742250136X
21. Pérez G., Cerdeira H.A. Extracting messages masked by chaos // *Physical Review Letters*. 1995. Vol. 74. Iss. 11. P. 1970. DOI:10.1103/PhysRevLett.74.1970
22. Li S., Chen G., Alvarez G. Return-map cryptanalysis revisited // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2006. Vol. 16. Iss. 5. PP. 1557–1568. DOI:10.1142/S0218127406015507
23. Yang T., Yang L.B., Yang C.M. Cryptanalyzing chaotic secure communications using return maps // *Physics Letters A*. 1998. Vol. 245. Iss. 6. PP. 495–510. DOI:10.1016/S0375-9601(98)00425-3

References

1. Ostrovskii V.Y., Karimov A.I., Rybin V.G., Kopets E.E., Butusov D.N. Comparing the Finite-Difference Schemes in the Simulation of Shunted Josephson Junctions. *Proceedings of the 23rd Conference of Open Innovations Association, FRUCT, 13–16 November 2018, Bologna, Italy*. IEEE; 2018. p.300–305. DOI:10.23919/FRUCT.2018.8588028
2. Kaddoum G. Wireless Chaos-Based Communication Systems: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*. 2016;4:2621–2648. DOI:10.1109/ACCESS.2016.2572730
3. Ostrovskii V.Y., Rybin V.G., Karimov A.I., Butusov D.N. Inducing multistability in discrete chaotic systems using numerical integration with variable symmetry. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2022;165(1):112794. DOI:10.1016/j.chaos.2022.112794
4. Rahman Z.A.S., Jasim B.H., Al-Yasir Y.I., Hu Y.F., Abd-Alhameed R.A., Alhasnawi B.N. A New Fractional-Order Chaotic System with its Analysis, Synchronization, and Circuit Realization for Secure Communication Applications. *Mathematics*. 2021;9(20):2593. DOI:10.3390/math9202593
5. Benkouider K., Bouden T., Sambas A., Mohamed M.A., Sulaiman I. M., Mamat M., et al. Dynamics, Control and Secure Transmission Electronic Circuit Implementation of a New 3D Chaotic System in Comparison With 50 Reported Systems. *IEEE Access*. 2021;9:152150–152168. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3126655

6. Gokyildirim A., Kocamaz U.E., Uyaroglu Y., Calgan H. A novel five-term 3D chaotic system with cubic nonlinearity and its microcontroller-based secure communication implementation. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*. 2023;160:154497. DOI:10.1016/j.aeue.2022.154497
7. Babajans R., Cirjulina D., Capligins F., Kolosovs D., Grizans J., Litvinenko A. Performance Analysis of Vilnius Chaos Oscillator-Based Digital Data Transmission Systems for IoT. *Electronics*. 2023;12(3):709. DOI:10.3390/electronics12030709
8. Cirjulina D., Babajans R., Kolosovs D., Litvinenko A. Experimental Study on Frequency Modulated Chaos Shift Keying Communication System. *Proceedings of the Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications, MTTW, 05–07 October 2022, Riga, Latvia*. IEEE; 2022. DOI:10.1109/MTTW56973.2022.9942593
9. Cui S., Zhang J. Chaotic Secure Communication Based on Single Feedback Phase Modulation and Channel Transmission. *IEEE Photonics Journal*. 2019;11(5):7905208. DOI:10.1109/JPHOT.2019.2931615
10. Butusov D.N., Karimov A.I., Tutueva A.V. Symmetric extrapolation solvers for ordinary differential equations. *Proceedings of NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIconRusNW, 02–03 February 2016, St. Petersburg, Russia*. IEEE; 2016. p.162–167. DOI:10.1109/EIconRusNW.2016.7448145
11. Voroshilova A., Wafubwa J. Discrete Competitive Lotka–Volterra Model with Controllable Phase Volume. *Systems*. 2020;8(2):17. DOI:10.3390/systems8020017
12. Butusov D.N., Ostrovskii V.Y., Karimov A.I., Andreev V.S. Semi-Explicit Composition Methods in Memcapacitor Circuit Simulation. *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS)*. 2019;10(2):37–52. DOI:10.4018/IJERTCS.2019040103
13. Terentev A.A., Butusov D.N., Fedoseev P.S. Novel Composition ODE Solver based on Semi-Implicit Integration. *Proceedings of the International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM, 27–29 May 2020, St. Petersburg, Russia*. IEEE; 2020. p.128–132. DOI:10.1109/SCM50615.2020.9198821
14. Reich S. Linearly implicit time stepping methods for numerical weather prediction. *BIT Numerical Mathematics*. 2006; 46:607–616. DOI:10.1007/s10543-006-0065-0
15. Tutueva A., Butusov D. Avoiding Dynamical Degradation in Computer Simulation of chaotic Systems Using Semi-Explicit Integration: Rössler Oscillator Case. *Fractal and Fractional*. 2021;5(4):214. DOI:10.3390/fractalfract5040214
16. Karimov T., Rybin V., Kolev G., Rodionova E., Butusov D. Chaotic Communication System with Symmetry-Based Modulation. *Applied Sciences*. 2021;11(8):3698. DOI:10.3390/app11083698
17. Tutueva A.V., Karimov T.I., Andreev V.S., Zubarev A.V., Rodionova E.A., Butusov D.N. Synchronization of Chaotic Systems via Adaptive Control of Symmetry Coefficient in Semi-Implicit Models. *Proceedings of the Ural Smart Energy Conference, USEC, 13–15 November 2020, Ekaterinburg, Russia*. IEEE; 2020. p.143–146. DOI:10.1109/USEC50097.2020.9281181
18. Singh P.P. A Novel Chaotic System with Wide Spectrum, its Synchronization, Circuit Design and Application to Secure Communication. *Indian Journal of Science and Technology*. 2021;14(28):2351–2367. DOI:10.17485/ijst/v14i28.1035
19. Rybin V., Kolev G., Kopets E., Dautov A., Karimov A., Karimov T. Optimal Synchronization Parameters for Variable Symmetry Discrete Models of Chaotic Systems. *Proceedings of the 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO, 07–10 June 2022, Budva, Montenegro*. IEEE; 2022. DOI:10.1109/MECO55406.2022.9797125
20. Rybin V., Butusov D., Rodionova E., Karimov T., Ostrovskii V., Tutueva A. Discovering Chaos-Based Communications by Recurrence Quantification and Quantified Return Map Analyses. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2022;32(9): 2250136. DOI:10.1142/S021812742250136X
21. Pérez G., Cerdeira H.A. Extracting messages masked by chaos. *Physical Review Letters*. 1995;74(11):1970. DOI:10.1103/PhysRevLett.74.1970
22. Li S., Chen G., Alvarez G. Return-map cryptanalysis revisited. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2006;16(5): 1557–1568. DOI:10.1142/S0218127406015507
23. Yang T., Yang L.B., Yang C.M. Cryptanalyzing chaotic secure communications using return maps. *Physics Letters A*. 1998;245(6):495–510. DOI:10.1016/S0375-9601(98)00425-3

Статья поступила в редакцию 07.02.2024; одобрена после рецензирования 12.02.2024; принята к публикации 19.02.2024.

The article was submitted 07.02.2024; approved after reviewing 12.02.2024; accepted for publication 19.02.2024.

Информация об авторе:

РЫБИН
Вячеслав Геннадьевич

ассистент кафедры систем автоматизированного проектирования
Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

 <https://orcid.org/0000-0002-6515-0224>