



МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО КАНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

И.К. Насыров, В.В. Андреев

Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казань.
Россия
nasyrovik@mail.ru

Резюме: В работе исследуются псевдослучайные сигналы нелинейных динамических систем, анализируется возможность их применения в информационных системах. Рассматриваются непрерывные и дискретные динамические системы: система Лоренца, отображения Бернулли и Энона. Поскольку параметры динамических систем входят в уравнения линейно, показана принципиальная возможность линейного управления состоянием нелинейной ДС.

Проводится сравнительный анализ корреляционных свойств сигналов этих динамических систем. Анализ корреляционных характеристик показал, что применение хаотических сигналов в системах связи и радиолокации позволяет значительно увеличить их разрешающую способность по дальности и, с учетом специфических свойств хаотических сигналов, позволяет обеспечить их скрытность.

Представление уравнений нелинейных динамических систем в виде стохастических дифференциальных уравнений позволило получить выражение для функционала правдоподобия, с помощью которого решаются многие задачи оптимального приема сигналов. Показано, что основным этапом при обработке принятого сообщения, обеспечивающий максимум функционалов правдоподобия состоит в вычислении корреляционных интегралов между компонентами и рассматриваемых систем. Это позволило положить в основу алгоритма обнаружения корреляционный прием между компонентами сигналов. Синтезирован корреляционный приемник обнаружения и найдены рабочие характеристики приемника.

Ключевые слова: псевдослучайные сигналы, нелинейные динамические системы, система Лоренца, отображения Энона, Бернулли, функционал правдоподобия, корреляционные функции; системы связи, корреляционный приемник, рабочие характеристики.

Для цитирования: И.К. Насыров, В.В. Андреев. Моделирование информационного канала с использованием хаотических сигналов нелинейных динамических систем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. № 4.С. 79-87. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-79-87.

MODELING OF INFORMATION CHANNEL BY USING OF PSEUDORANDOM SIGNALS OF NONLINEAR DYNAMICAL SYSTEMS

IK. Nasyrov, VV. Andreev

Kazan Power Engineering University, Kazan, Russia
nasyrovik@mail.ru

Abstract: Pseudorandom signals of nonlinear dynamical systems are studied and the possibility of their application in information systems analyzed. Continuous and discrete dynamical systems are considered: Lorenz System, Bernoulli and Henon maps. Since the parameters of dynamical systems (DS) are included in the equations linearly, the principal possibility of the state linear control of a nonlinear DS is shown.

The correlation properties comparative analysis of these DSs signals is carried out.. Analysis of correlation characteristics has shown that the use of chaotic signals in communication and radar systems can significantly increase their resolution over the range and taking into account the specific properties of chaotic signals, it allows them to be hidden.

The representation of nonlinear dynamical systems equations in the form of stochastic differential equations allowed us to obtain an expression for the likelihood functional, with the help of which many problems of optimal signal reception are solved. It is shown that the main step in processing the received message, which provides the maximum likelihood functionals, is to calculate the correlation integrals between the components and the systems under consideration. This made it possible to base the detection algorithm on the correlation reception between signal components. A correlation detection receiver was synthesized and the operating characteristics of the receiver were found.

Keywords: *pseudorandom signals, nonlinear dynamical systems, optimal receiver, stochastic differential equations, Lorenz system, Henon's map, correlation functions.*

For citation: Nasyrov IK, Andreev VV. Modeling of information channel by using of pseudorandom signals of nonlinear dynamical system. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(4):79-87. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-79-87.

Введение

Шумоподобные сигналы (ШПС) в настоящее время получили применение в различных информационных системах [1], в том числе в системах широкополосной связи и передачи информации, так как обеспечивают высокую помехозащищенность информационных систем, обеспечивают совместимость передачи информации с измерением параметров движения объекта в системах подвижной связи [2-4].

В последние годы особое внимание исследователей в области информационных процессов и реальных систем различной физической природы, включая радиофизические и биологические системы, привлекают свойства динамического хаоса и связанные с ним бифуркационные явления [5-6].

В работах [7-9] обсуждаются общие принципы организации передачи информации с использованием специфических свойств динамического хаоса как колебаний, генерируемых нелинейными динамическими системами. Хаотические колебания используются в качестве сверхширокополосного аналогового шумоподобного сигнала. Динамическая природа этих колебаний используется при создании источника хаоса с заданными спектральными характеристиками и при формировании хаотических радиоимпульсов.

Хаотические колебания характеризуются различными статистическими свойствами и различной степенью чувствительности к воздействию шума. В работе [10] представлен обзор результатов по статистическому описанию динамического хаоса и влиянию шума на хаотические режимы колебаний.

Отличительными особенностями хаотических процессов [11,12], обеспечивающих применение динамического хаоса для передачи информации являются следующие:

- хаотические сигналы непериодичны и обладают непрерывным спектром, занимающим весьма широкую полосу, причем видом спектральной характеристики можно управлять.
- они имеют сложную структуру, нерегулярны и весьма чувствительны к изменению начальных условий, что позволяет генерировать сигналы сложной формы и непредсказуемого поведения.
- автокорреляционная функция этих сигналов обычно весьма быстро затухает, что позволяет считать сигналы от нескольких генераторов некоррелированными и ортогональными: это свойство позволяет применять хаотические сигналы в многопользовательских системах связи.

Особенностью хаотических сигналов нелинейных ДС является то, изменяя параметры и начальные условия, можно управлять видом и качеством генерируемого апериодического шумового сигнала, управлять такими его характеристиками, как спектр, распределение вероятностей, вид автокорреляционной (далее АКФ) и взаимно корреляционной функции (далее ВКФ).

В рамках настоящей работы рассматриваются следующие непрерывные и дискретные динамические системы: система Лоренца, отображения Бернулли и Энона. Проводится сравнительный анализ корреляционных свойств сигналов сформированного на основе этих динамических систем, представление уравнений нелинейных динамических систем в виде стохастических дифференциальных уравнений позволило получить выражение

для функционала правдоподобия, с помощью которого можно решать многие задачи оптимального приема сигналов. На основе взаимно корреляционных функций XY -компонент системы Лоренца и отображения Энона рассмотрен корреляционный приемник обнаружения и найдены рабочие характеристики приемника.

Анализ корреляционных свойств хаотических сигналов

При визуальном, спектральном и корреляционном анализе хаотический сигнал не отличим от белого шума. Огибающая автокорреляционной функции шумоподобных сигналов имеет один основной лепесток (выброс), длительность которого обратно пропорциональна ширине спектра сигнала. Представляет интерес провести сравнительный анализ корреляционных характеристик сигналов нелинейных ДС, наиболее часто используемых в информационных технологиях. Свойства АКФ и ВКФ рассмотрим на примере ДС Лоренца, отображения Энона и сдвига Бернулли.

Система Лоренца имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= \sigma(Y - X), \\ \dot{Y} &= rX - Y - XZ, \\ \dot{Z} &= -bZ + XY,\end{aligned}\tag{1}$$

отображение Энона имеет вид:

$$\begin{aligned}X_{n+1} &= Y_n + 1 - aX_n^2, \\ Y_{n+1} &= bX_n,\end{aligned}\tag{2}$$

сдвиг Бернулли имеет вид:

$$X_{n+1} = 2X_n \bmod 1,\tag{3}$$

где X, Y, Z – фазовые переменные систем; параметры r, σ и b образуют вектор параметров $\lambda_L(r, \sigma, b)$ системы Лоренца, a, b – компоненты вектора параметров $\lambda_E(a, b)$ отображения Энона; точка над переменной означает дифференцирование по времени, n – номер итерации (дискретное время), $2X \bmod 1$ – означает взятие дробной части от числа X .

Следует отметить, что параметры в системе уравнений Лоренца, отображения Энона и сдвига Бернулли входят в уравнения линейно, и, таким образом, открывается принципиальная возможность линейного управления состоянием нелинейной ДС.

На Рис. 1 и 2 приведены графики изменения координат со временем системы Лоренца и от номера итерации N отображения Энона.

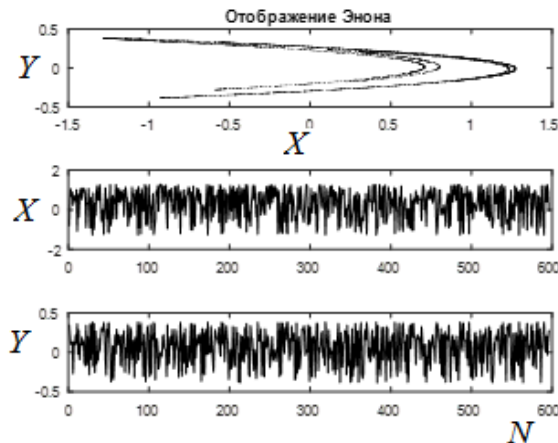


Рис. 1. Отображение Энона и зависимость координат X и Y от номера итерации N

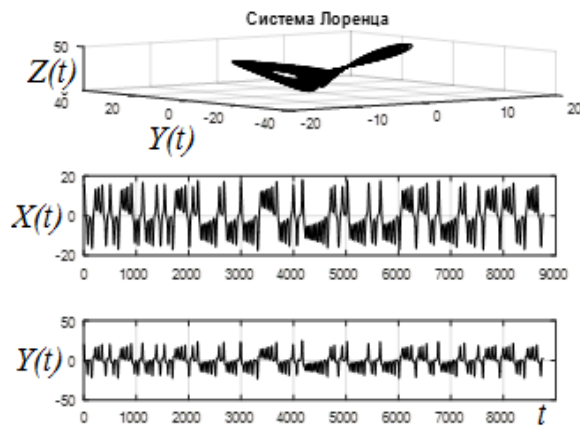


Рис. 2. Система Лоренца и зависимость координат X и Y от времени t

На Рис.3 показаны графики автокорреляционных функций R_x системы Лоренца, отображения Энона и сдвига Бернулли. Параметры системы Лоренца: $\sigma = 10$, $r = 28$, $b = 8/3$. Параметры отображения Энона: $a = 1,4$, $b = 0,3$.

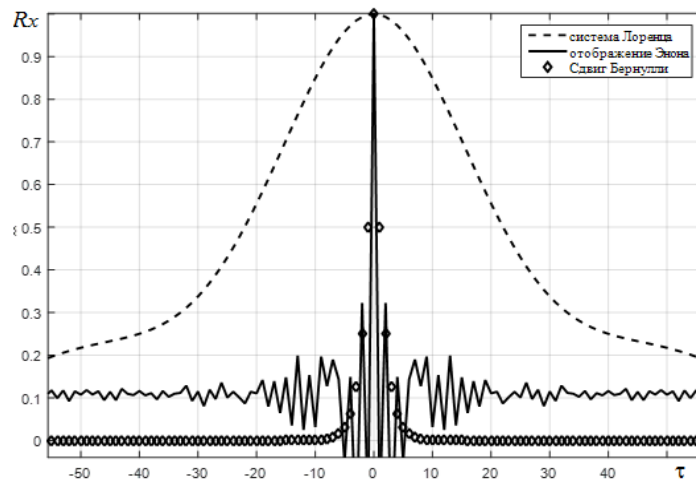


Рис. 3. Автокорреляционные функции X -компонент системы Лоренца, отображения Энона и сдвига Бернулли

Чем уже АКФ, более высокую разрешающую способность по дальности можно обеспечить при использовании хаотических радиоимпульсов в РЛС. Анализ автокорреляционных функций системы Лоренца, отображения Энона и сдвига Бернулли показывает, что рассматриваемые ДС с различной степенью приближения моделируют характеристики белого шума. Таким образом, применение хаотических сигналов в системах связи и радиолокации позволяет значительно увеличить их разрешающую способность по дальности и с учетом специфических свойств хаотических сигналов позволит обеспечить их скрытность.

Функционал правдоподобия

Важной задачей является выбор способа оптимального приема псевдослучайных сигналов, генерируемых нелинейными ДС. Для обнаружения полезного сигнала на фоне помех используют метод максимального правдоподобия. Предполагая априорно известными некоторые характеристики передаваемого полезного сигнала, канала и помех, а также их функциональное взаимодействие, нужно получить оптимальное приемное или решающее устройство, которое наилучшим образом воспроизводило переданное сообщение или принимало решение с наименьшими ошибками. Оптимальный приемник обнаружения должен вычислять апостериорное распределение вероятностей реализации принимаемого колебания. Вычисление сводится к вычислению отношения правдоподобия, которое производится взаимно корреляционным устройством.

В предыдущих работах авторов [13-17] представление уравнений нелинейных динамических систем в виде стохастических дифференциальных уравнений позволило

получить выражение для функционала правдоподобия, с помощью которого можно решать многие задачи оптимального приема сигналов.

Выражение для функционала правдоподобия получено в виде:

$$L(X, \lambda) = c \exp \left\{ -\frac{1}{N} \int_{t-\tau}^t \left[\sum_{m=1}^k \Gamma_m^2(X, \lambda) \right] dt \right\}, \quad (4)$$

Где $\Gamma(X, \lambda)$ – измеряемые реализации случайного поля когда на ДС воздействует случайная помеха $\Sigma(t)$ вектор-столбец аддитивных шумов; $\lambda(\lambda_X, \lambda_Y, \lambda_Z)$ – вектор параметров системы, значение индекса k определяется числом компонент ДС, для системы Лоренца $k = 3$, c – коэффициент нормировки. Векторная форма выражений (1) и (2) имеет вид:

$$\Gamma(X, \lambda) = \dot{X} - F(X, \lambda) \quad (5)$$

где $F(X, \lambda)$ – функция, описывающая правые части систем (1) и (2).

Для системы Лоренца:

$$\begin{aligned} F_X &= \sigma(Y - X) \\ F_Y &= rX - Y - XZ, \\ F_Z &= -bZ + XY \end{aligned} \quad (6)$$

Для отображения Энона:

$$\begin{aligned} F_{X_{n+1}} &= Y_n + 1 - aX_n^2, \\ F_{Y_{n+1}} &= bX_n. \end{aligned} \quad (7)$$

На основании выражений (5-7), функционал правдоподобия (4) для системы Лоренца запишем в виде

$$\begin{aligned} L_L(X, \lambda) &= \\ &= k_L \exp \left\{ -\frac{1}{N} \int_{t-\tau}^t \left[(\dot{X} + \sigma X - \sigma Y)^2 + (\dot{Y} - rX + Y + XZ)^2 + (\dot{Z} + bZ - XY)^2 \right] dt \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

Пользуясь данными работ [10-13] для дискретного случая, функционал правдоподобия отображения Энона запишется в виде:

$$L_H(X, \lambda) = k_H \exp \left\{ -\frac{1}{N} \sum_{s=1}^m [(X_{s+1} - Y_s - 1 + aX_s^2)^2 + (Y_{s+1} - bX_s)^2] \right\} \quad (9)$$

Таким образом, основной этап при обработке принятого сообщения, обеспечивающий максимум функционалов $L_L(X, \lambda)$ и $L_H(X, \lambda)$ состоит в вычислении корреляционных интегралов между компонентами $X(t)$ и $Y(t)$ рассматриваемых систем. Это позволяет заключить, что в основу алгоритма обнаружения может быть положен корреляционный прием между X и Y компонентами сигналов.

Корреляционный приемник

Как уже упоминалось выше, оптимальный приемник обнаружения должен вычислять отношение правдоподобия, которое производится взаимно корреляционным устройством. В данном случае взаимно корреляционное устройство, вычисляет функцию:

$$R_{XY}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\tau)Y(t - \tau)dt \quad (10)$$

Структура приемника включает высокочастотные фильтры, согласованные со спектром принимаемого сигнала, перемножитель, интегратор и задерживающее устройство на время τ , а на выходе приемника установлена ключевая схема, которая фиксирует момент взятия отчета, совпадающего с моментом окончания сигнала.

На Рис. 4 приведены графики ВКФ для XY -компонент системы Лоренца и отображения Энона.

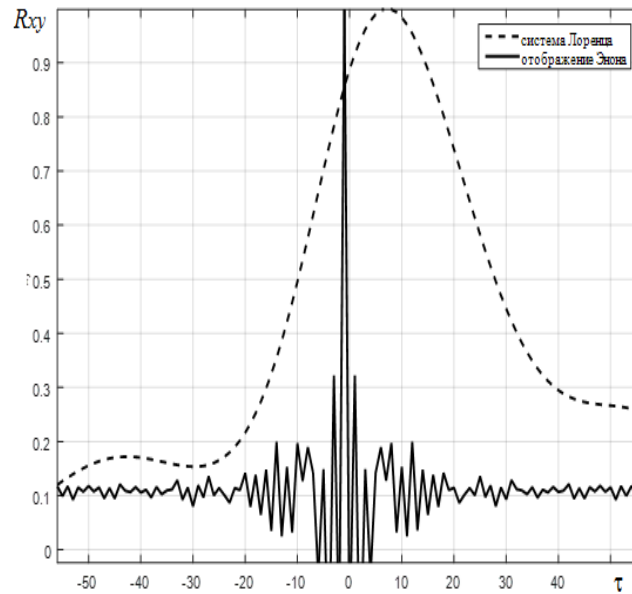


Рис. 4. Взаимно корреляционные функции XY-компонент системы Лоренца и отображения Энона

Цифровой вариант построения корреляционного приемника имеет ряд преимуществ по сравнению с аналоговым, в связи с возможностью быстрой смены параметров рабочего сигнала, а также возможностью длительного накопления сигнала, что особенно важно при приеме слабых сигналов.

Рабочие характеристики приемника информационного сигнала

На выходе системы обнаружения наблюдается случайный процесс, который сравнивается с порогом. Предполагаем, что хаотический сигнал и шумовая помеха являются широкополосными случайными процессами с гауссовским распределением вероятностей. Для построения характеристик обнаружения, зависимости вероятности ложной тревоги F и вероятности правильного обнаружения D от отношения сигнал/шум q , воспользуемся известными соотношениями [17]. Вычисления при заданных предположениях приводят к выражению

$$D = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \Phi \left[\frac{R_{XY} \sqrt{\frac{q}{2\rho} - \Phi^{-1}(1-2F)}}{\sqrt{q + qR_{XY} + 1}} \right] \right\} \quad (11)$$

Величина r_{XY} – коэффициент взаимной корреляции X , Y компонент сигнала, параметр ρ определяется выражением

$$\rho = \frac{1}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) r^2(\tau) d\tau \cong \Delta F T, \quad (12)$$

И вычислен при условии равенства коэффициентов автокорреляции X и Y компонент сигнала и помехи ξ .

$$r_X(\tau) = r_Y(\tau) = r_\xi(\tau) = r(\tau) = \exp(-2\Delta F |\tau|) \cos(2\pi f_0 \tau) \quad (13)$$

где ΔF – эффективная ширина частотной полосы; $f_0 = 1/T$ центральная частота спектра, T – длительность сигнала. Предполагается, что выполняется условие широкополосности: $\Delta F T \gg 1$ и $\Delta F \ll f_0$.

Величина q определяет отношение сигнал/шум:

$$q = \frac{M(X^2)}{M(N^2)} \quad (14)$$

На Рис.5 представлены характеристики обнаружения, соответствующие рассмотренному случаю и построенные при различных значениях параметров ΔFT , R_{xy} и вероятности ложных тревог F .

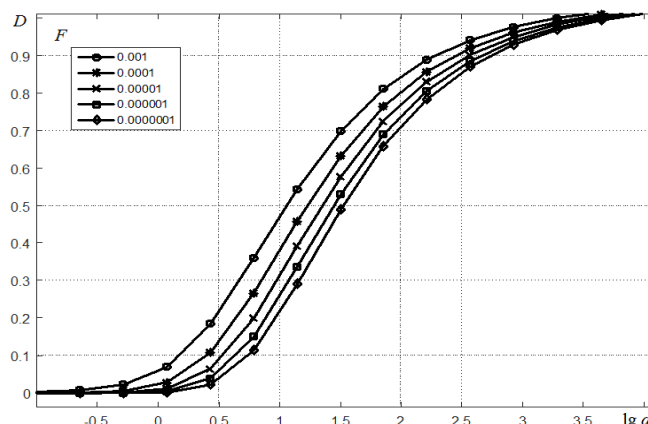


Рис. 5. Характеристики обнаружения при $\rho = 100$, $R_{xy} = 1.0$.

Заключение

На примере динамической системы Лоренца и отображений Энона и Бернулли, проведено моделирование информационного канала с использованием хаотических сигналов нелинейных динамических систем. Представление системы нелинейных динамических уравнений как стохастических дифференциальных уравнений позволило сконструировать функционал правдоподобия рассмотренных ДС. Проанализированы корреляционные функции сигналов нелинейных ДС и показано, что автокорреляционные функции имеют вид, подобный автокорреляционной функции стационарного белого шума.

На основе метода максимального правдоподобия предложен алгоритма обнаружения хаотических широкополосных сигналов, в основу которого положен корреляционный прием между компонентами сигнала рассчитаны характеристики обнаружения.

Литература

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384с.
2. Дмитриев Ю.А., Кузьмин Л.В. Прием хаотических сигналов с использованием опорного генератора хаоса // Радиоэлектроника 2012. № 1.
3. Dmitriev A.S., Emel'yanov R.Yu., Lazarev V.A., et al. Simulation of Dynamics of the Neural Ensemble in the Active Wireless Network. J. Communication Technology and Electronics. 2017. V. 62. №10. pp. 1148-1151.
4. Губанов Д. и др. Генераторы хаоса в интегральном исполнении [Электронный ресурс]. Доступно по: URL: http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/99_08/stat_9.htm. Ссылка активна на: 10 октября 2019.
5. Андреев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А. «Коллективная передача информации сверхширокополосным прямо хаотическим ансамблем». Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6. №2 (24). С. 80-89.
6. Дмитриев А.С., Герасимов М.Ю., Ицков В.В., Лазарев В.А., Попов М.Г., Рыжов А.И. «Активные беспроводные сверхширокополосные сети на основе хаотических радиоимпульсов». Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. №4. С. 354-363.
7. Афанасьев В.В., Логинов С.С. Новый класс цифровых радиоэлектронных динамических систем // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. Доступно по: URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3777
8. Гавришев А.А., Жук А.П. Моделирование устройства имитации защиты контролируемых объектов с новым набором хаотических сигналов // Прикладная информатика. 2017. Т.12. № 4 (70). С. 122-132
9. Колесов В.В., Полубехин А. И., Чигин Е.П., и др. Применение дискретных хаотических алгоритмов в широкополосных телекоммуникационных системах // Вестник СибГУТИ. 2016. №3. С. 77-92.
10. Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Окрокверцхов Г.А, и др. Статистические свойства динамического хаоса // УФН. 2005. Т. 175. № 2. С. 163-179.

11. Когай Г.Д., Тен Т.Л. Методы и модели хаотических процессов в системах связи // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 10. С. 61-64.
12. Кучеренко И.А. Применение сверхширокополосных сигналов с линейной частотной модуляцией в заградной радиолокации // Инженерный вестник Дона. 2016. №1. Доступно по: URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3545.
13. Васюта К.С., Малышев А.А., Зоц Ф.Ф. Анализ корреляционных свойств хаотических радиопульсов // Системы обработки информации. 2012. Т. 2. Выпуск 3. С. 22-25.
14. Насыров И.К., Андреев В.В. Оптимальная оценка параметров псевдослучайных сигналов нелинейных динамических систем // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2017. № 1. С. 29-35.
15. Насыров И.К., Андреев В.В. International Scientific Conference. «2018 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems». WECONF 2018 (IEEE Conference #№ 45890) 26-30 November 2018. St. Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation (SUAI).
16. Nasyrov I.K., Andreev V.V. Optimal Estimation of Parameters of Pseudorandom Signals of Nonlinear Dynamic Systems // Russian Aeronautics. 2018. V. 61. №. 4. pp. 692-696,
17. Nasyrov I.K., Andreev V.V. About Optimal Reception of Pseudorandom Signals of Nonlinear Dynamic Systems // Russian Aeronautics. 2019. V. 62. №. 2. pp. 326-330.

Авторы публикации

Насыров Ильгиз Кутдусович – д-р.техн. наук, профессор кафедры «Инженерная кибернетика», Казанский государственный энергетический университет. Email: nasyrovik@mail.ru.

Андреев Владимир Васильевич – канд. физ-мат.наук, доцент кафедры «Инженерная кибернетика», Казанский государственный энергетический университет. Email: vandreev46@mail.ru.

References

1. Tikhonov VI. *Optimal'nyi priem signalov*. M.: Radio i svyaz', 1983. 320 s.
2. Varakin LE. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami*. M.: Radio i svyaz', 1985. 384s.
3. Dmitriev YuA, Kuz'min LV. Priem khaoticheskikh signalov s ispol'zovaniem opornogo generatora khaosa. *Radioelektronika* 2012. № 1.
4. Anishchenko VS, Vadivasova TE, Okrokvetskikh GA, et al. *Statisticheskie svoystva dinamicheskogo khaosa*. *UFN*. 2005;175(2):163-179.
5. Kogai GD, Ten TL. Metody i modeli khaoticheskikh protsessov v sistemakh svyazi. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2014;10:61-64.
6. Afanas'ev VV, Loginov SS. Novyi klass tsifrovyykh radioelektronnykh dinamicheskikh system. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2016. № 4. Available at: URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3777.
7. Kucherenko IA. Primenenie sverkhshirokopolosnykh signalov s lineinoi chastotnoi modulyatsiei v zapregradnoi radiolokatsii. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2016. № 1. Available at: URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3545.
8. Gubanov D. Generatory khaosa v integral'nom ispolnenii Available at: URL:http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/99_08/stat_9.htm Accessed to: 10 Oct 2019.
9. Vasyuta KS, Malyshev AA, Zots FF. Analiz korrelyatsionnykh svoystv khaoticheskikh radioimpul'sov. *Sistemy obrobki informatsii*. 2012;2(3):22-25.
10. Nasyrov IK, Andreev VV. Optimal'naya otsenka parametrov psevdosluchainykh signalov nelineynykh dinamicheskikh sistem. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2017;1:29-35.
11. Nasyrov IK, Andreev VV. *International Scientific Conference. «2018 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems»*. WECONF 2018 (IEEE Conference #№ 45890) 26-30 November 2018. St. Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation (SUAI).
12. Nasyrov IK, Andreev VV. Optimal Estimation of Parameters of Pseudorandom Signals of Nonlinear Dynamic Systems. *Russian Aeronautics*. 2018;61(4):692-696.
13. Nasyrov IK, Andreev VV. About Optimal Reception of Pseudorandom Signals of Nonlinear Dynamic Systems. *Russian Aeronautics*. 2019;62(2):326-330.
14. Nasyrov IK, Andreev VV. Optimal'naya ozenka parametrov psevdosluchainykh signalov nelineynykh dinamicheskikh sistem. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2017;1:29-35.

15. Nasyrov IK, Andreev VV. *International Scientific Conference. 2018 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems*. WECONF 2018 (IEEE Conference #№ 45890) 26-30 November 2018. St. Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation (SUAI).

16. Nasyrov IK, Andreev VV. Optimal Estimation of Parameters of Pseudorandom Signals of Nonlinear Dynamic Systems. *Russian Aeronautics*. 2018;61(4):692-696.

17. Nasyrov IK, Andreev VV. About Optimal Reception of Pseudorandom Signals of Nonlinear Dynamic Systems. *Russian Aeronautics*. 2019;62(2):326-330.

Authors of the publication

Il’giz K. Nasyrov – Kazan Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: nasyrovik@mail.ru.

Vladimir V. Andreev – Kazan Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: vandreev46@mail.ru.

Поступила в редакцию

16 марта 2020г.