

УДК 621.391
DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-1-50-60

А. А. Гавришев, А. П. Жук

*Северо-Кавказский федеральный университет
ул. Пушкина, 1, Ставрополь, 355009, Россия*

alexxx.2008@inbox.ru, alekszhuk@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАОТИЧНОСТИ СИГНАЛОВ-ПЕРЕНОСЧИКОВ ЗАЩИЩЕННЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА

Исследуется хаотичность передаваемых сигналов защищенных систем связи на основе динамического хаоса с помощью распространенных методов нелинейной динамики (максимальный показатель Ляпунова, показатель Хёрста и рекуррентные графики). В качестве защищенной системы связи на основе динамического хаоса рассмотрено устройство имитозащиты контролируемых объектов с повышенной структурной скрытностью сигналов-переносчиков. С помощью методов нелинейной динамики, проведено исследование временных реализаций передаваемых в канале связи сигналов, полученных в среде ScicosLab с помощью рассматриваемого устройства. Анализ полученных данных показывает, что исследуемые сигналы в целом обладают свойствами хаотичности и потенциально могут обеспечить защищенность передаваемой в беспроводных каналах связи информации от несанкционированного доступа. Описанный в данной работе подход к исследованию хаотичности передаваемых сигналов, основанный на комплексном применении известного математического аппарата методов нелинейной динамики, потенциально можно применять для исследования хаотичности передаваемых сигналов широкого класса систем защищенной связи на основе динамического хаоса.

Ключевые слова: нелинейная динамика, хаотические сигналы, устройство имитозащиты контролируемых объектов, радиоканал.

Введение

В настоящее время идет активное развитие защищенных систем связи в гражданских и военных сферах применения. Одним из самых перспективных направлений в области защищенных систем связи является использование хаотических сигналов. Хаотические сигналы по сравнению с классическими шумоподобными сигналами обладают следующими преимуществами: большое потенциальное число кодовых конструкций, сплошной спектр мощности, непредсказуемость на больших интервалах времени, повышенная защищенность от несанкционированного доступа [1]. В настоящее время интерес представляет исследование защищенных систем связи на основе хаотических сигналов. При этом одним из самых существенных вопросов использования хаотических сигналов в области защищенных систем связи является обеспечение хаотичности передаваемых сигналов как возможного показателя защищенности от несанкционированного доступа [2].

Целью данной статьи является исследование хаотичности передаваемых сигналов защищенных систем связи на основе динамического хаоса с помощью распространенных методов нелинейной динамики.

Гавришев А. А., Жук А. П. Применение методов нелинейной динамики для исследования хаотичности сигналов-переносчиков защищенных систем связи на основе динамического хаоса // Вестн. НГУ. Серия: Информационные технологии. 2018. Т. 16, № 1. С. 50–60.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим некоторые распространенные методы нелинейной динамики, которые можно применить в исследовании хаотичности передаваемых сигналов в защищенных системах связи на основе динамического хаоса.

Одной из самых известных количественных мер хаоса является максимальный показатель Ляпунова λ_{\max} . Эта величина представляет собой меру расхождения изначально близких друг другу траекторий в фазовом пространстве [3]. Если d_0 – мера начального расстояния между двумя исходными точками, то спустя малое время t расстояние между траекториями, выходящими из этих точек, становится равным [4]

$$d(t) = d_0 2^{\lambda t}.$$

Если динамическая система описывается разностными уравнениями или отображением, то [4]

$$d_n = d_0 2^{\lambda n}.$$

Если показатель Ляпунова λ_{\max} положителен, это означает, что близкие фазовые траектории потенциально расходятся и движение в динамической системе хаотическое. При этом чем он больше, тем быстрее расходятся траектории и тем хаос больше согласно этой мере оценивания. Если показатель Ляпунова λ_{\max} отрицателен, то траектории сближаются и движутся регулярно. Если $\lambda_{\max} = 0$, то расстояние между фазовыми траекториями либо не меняется, либо увеличивается в соответствии с более медленно растущей функцией, чем экспонента [3].

Далее рассмотрим показатель Хёрста H . Он позволяет разделить между собой стационарные, стохастические (случайные) и хаотические процессы. Показатель Хёрста H определяется следующим образом [5]:

$$R / S = (\tau / 2)^H,$$

где R – нормированный размах вариации (разность максимального и минимального значений измеряемого параметра), S – стандартное отклонение (корень квадратный из дисперсии), τ – период (длина ряда) наблюдений.

В соответствии с [6] значение показателя Хёрста $0 \leq H \leq 0.5$ определяет хаотический процесс, значение $0.5 \leq H \leq 1$ определяет стохастический (случайный) процесс, а значение $H > 1$ определяет стационарный процесс. При этом значение $H = 0.5$ соответствует понятию «белый шум».

Далее рассмотрим понятие рекуррентного графика (РГ), позволяющего исследовать m – размерную траекторию лагового пространства посредством двухмерного представления ее рекуррентности (повторяемости траекторий по прошествии некоторого времени в пространстве реконструкции аттрактора) [7]. РГ представляется в виде двухмерной матрицы размером N^2 . Матрица заполняется черными и белыми точками, где черные точки обозначают рекуррентность, а белые – отсутствие [7; 8]:

$$R_{ij} = \theta(\varepsilon_i - \|x_i - x_j\|),$$

где $i, j = 1, \dots, N$ – число рассматриваемых состояний x_i ; ε_i – радиус выбранной окрестности (расстояние от центра окрестности x_i до ее границы); $\|\bullet\|$ – норма; θ – функция Хевисайда.

Значительный интерес представляет внешний вид РГ, с помощью которого на основе их топологий можно классифицировать наблюдаемые процессы [8]:

- однородные РГ типичны для процессов с независимыми, идентично распределенными случайными значениями (например, «белый шум»);

- РГ с характерным «дрейфом» соответствуют процессам с медленно меняющимися параметрами (например, обобщенное броуновское движение);
- периодически повторяющиеся структуры соответствуют осциллирующим (нелинейным) системам (например, хаотический процесс).

Расчеты проведем с помощью следующего программного обеспечения:

- максимальный показатель Ляпунова λ_{\max} рассчитаем с помощью программы Lyarmax.exe [9];
- показатель Хёрста H рассчитаем с помощью программы Fractan [10];
- РГ построим с помощью программы Visual recurrence analysis [11].

Исследование хаотичности передаваемых сигналов защищенной системы связи на основе динамического хаоса

В качестве защищенной системы связи на основе динамического хаоса рассмотрим устройство имитозащиты контролируемых объектов с повышенной структурной скрытностью сигналов-переносчиков [12], основанное на перезаписываемых накопителях хаотических последовательностей и предназначенное для защиты передаваемых служебных и тревожных сообщений в беспроводных системах безопасности (охранно-пожарные системы, специальная робототехника и т. д.). Рассмотрим более подробно приемо-передающую часть устройства имитозащиты контролируемых объектов с повышенной структурной скрытностью сигналов-переносчиков [12] (рис. 1).

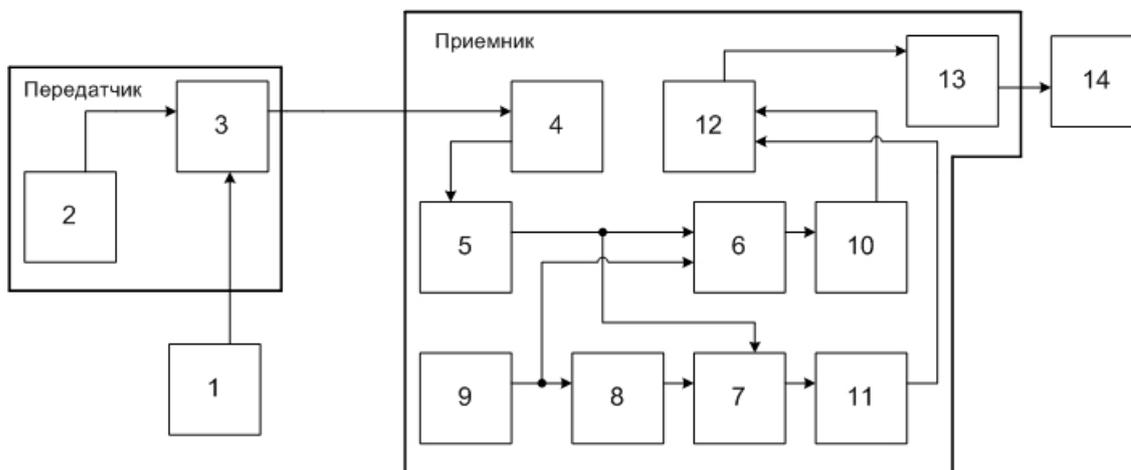


Рис. 1. Приемно-передающая часть устройства имитозащиты контролируемых объектов:

1 – источник информации (блок контроля, датчик); 2 – накопитель хаотического сигнала; 3 – модулятор-передатчик; 4 – полосовой фильтр; 5 – усилитель; 6 – первый умножитель; 7 – второй умножитель; 8 – инвертор; 9 – накопитель копии хаотического сигнала; 10 – первый интегратор; 11 – второй интегратор; 12 – вычитающее устройство; 13 – решающее устройство; 14 – получатель информации (блок контроля, датчик)

Опишем математически, как функционирует схема, изображенная на рис. 1. Исходными данными будут следующие понятия [13]:

- 1) $S_x(t)$ – произвольный хаотический сигнал;
- 2) $S_{инф}(t)$ – исходный информационный сигнал;
- 3) $U(t)$ – передаваемый в канале связи сигнал;
- 4) $S_{вых.инф.}(t)$ – 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 хаотическим сигналом $S_x(t)$. В канале связи на передаваемый сигнал $U(t)$ действует аддитивная гауссовская помеха $N(t)$, поэтому на вход приемного устройства поступает смесь передаваемого сигнала и помехи $R(t) = U(t) + N(t)$ [1]. 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 $Y_{yc}(t)$ одновременно умножается на копию хаотического сигнала $S_x(t)$, аналогичную хаотическому сигналу в передатчике, а также умножается на ее инвертированное значение $-S_x(t)$. В итоге получаются сигналы $S_{П1}(t) = Y_{yc}(t) \times S_x(t)$ и $S_{П2}(t) = -Y_{yc}(t) \times S_x(t)$, которые затем проходят через интеграторы и принимают следующие значения $G_1(t)$ и $G_2(t)$. Причем в соответствии с [1] после выхода сигнала из интегратора возможны следующие случаи:

- $G(t) = \max$ при $G(t) + S_{П}(t) \geq \max$;
- $G(t) = G(t) + S_{П}(t)$ при $\min < G(t) + S_{П}(t) < \max$;
- $G(t) = \min$ при $G(t) + S_{П}(t) \leq \min$.

Здесь \min и \max – постоянные, характеризующие порог ограничения выходного сигнала интегратора. Далее сигналы $G_1(t)$ и $G_2(t)$ 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 [1]:

- $S_{вых.инф.}(t) = 1$ при $Z_{раз}(t) > 0$,
- $S_{вых.инф.}(t) = -1$ при $Z_{раз}(t) < 0$.

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

Воспользуемся приведенным выше математическим аппаратом нелинейной динамики для анализа передаваемых в канале связи сигналов $U(t)$, вырабатываемых устройством имитозащиты контролируемых объектов с повышенной структурной скрытностью сигналов-переносчиков (см. рис. 1).

Сначала рассмотрим в качестве генератора хаотических сигналов аттрактор Рёсслера, который задается следующей системой нелинейных уравнений [14]:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -y - z, \\ \frac{dy}{dt} &= x + ay, \\ \frac{dz}{dt} &= b + z(x - c). \end{aligned} \quad (1)$$

В работе [15] на основе аттрактора Рёсслера и схемы, изображенной на рис. 1, в среде ScicosLab авторами при изменении в (1) переменной c были получены различные временные реализации передаваемых в канале связи сигналов $U(t)$. На рис. 2 в качестве примера изображен фрагмент передаваемого сигнала при значении $c = 4$. При этом для упрощения процесса моделирования в качестве информационного сигнала использовалась равномерная последовательность прямоугольных импульсов в диапазоне $[-1; 1]$.

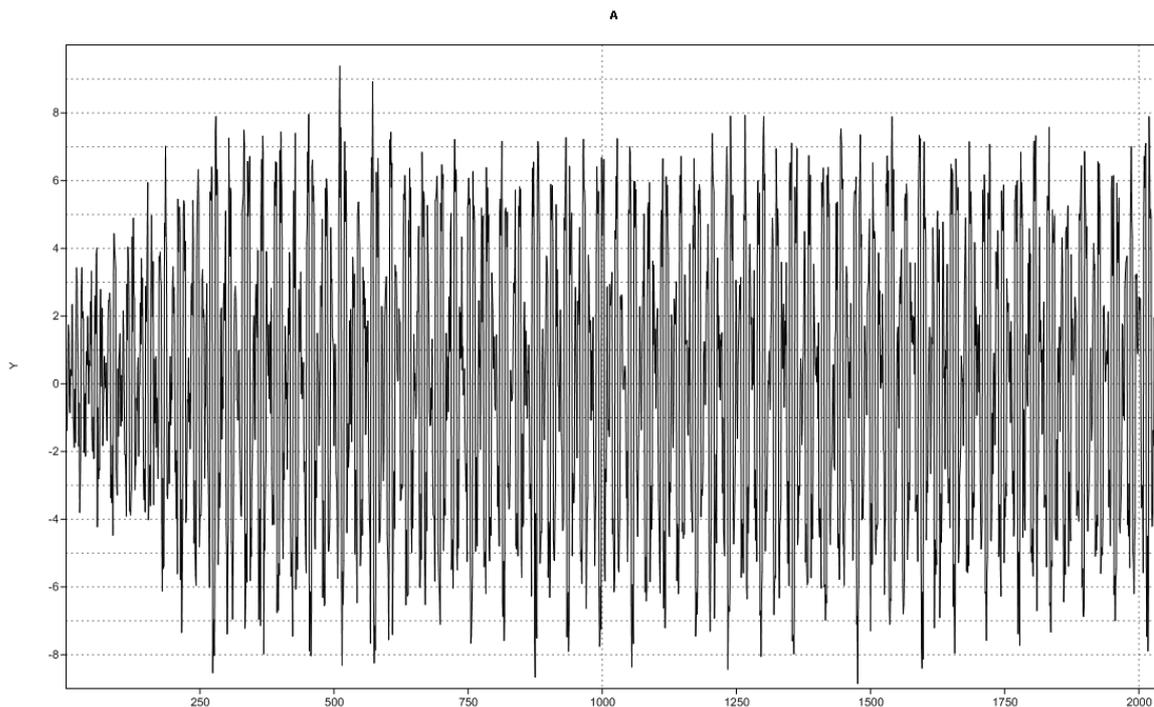


Рис 2. Фрагмент сигнала, поступающего в линию связи при значении $c = 4$

Проведем анализ временных реализаций передаваемых в канале связи сигналов $U(t)$ с целью определить, обладают ли они свойствами хаотичности.

Рассчитаем сначала максимальный показатель Ляпунова λ_{\max} и показатель Хёрста H . Как видно из табл. 1, при различных значениях постоянной c временные реализации передаваемых в канале связи сигналов $U(t)$ обладают положительным максимальным показателем Ляпунова λ_{\max} , а значения показателя Хёрста H попадают в интервал $0 \leq H \leq 0.5$. Оба факта указывают на то, что исследуемые сигналы обладают свойствами хаотического процесса.

Таблица 1

Расчеты показателей Ляпунова и Хёрста

№	Значение постоянной c	Максимальный показатель Ляпунова λ_{\max}	Показатель Хёрста H
1	4	2.319573	0.289822
2	6	2.112951	0.210014
3	8.5	1.649407	0.171915
4	8.7	2.001937	0.123097

Далее, рассмотрим РГ для различных значений постоянной c . Как видно из рис. 3, на них присутствуют разнообразные периодически повторяющиеся структуры в виде горизонтальных и вертикальных линий. Это соответствует осциллирующим (нелинейным) системам и указывает также на хаотичность процесса.

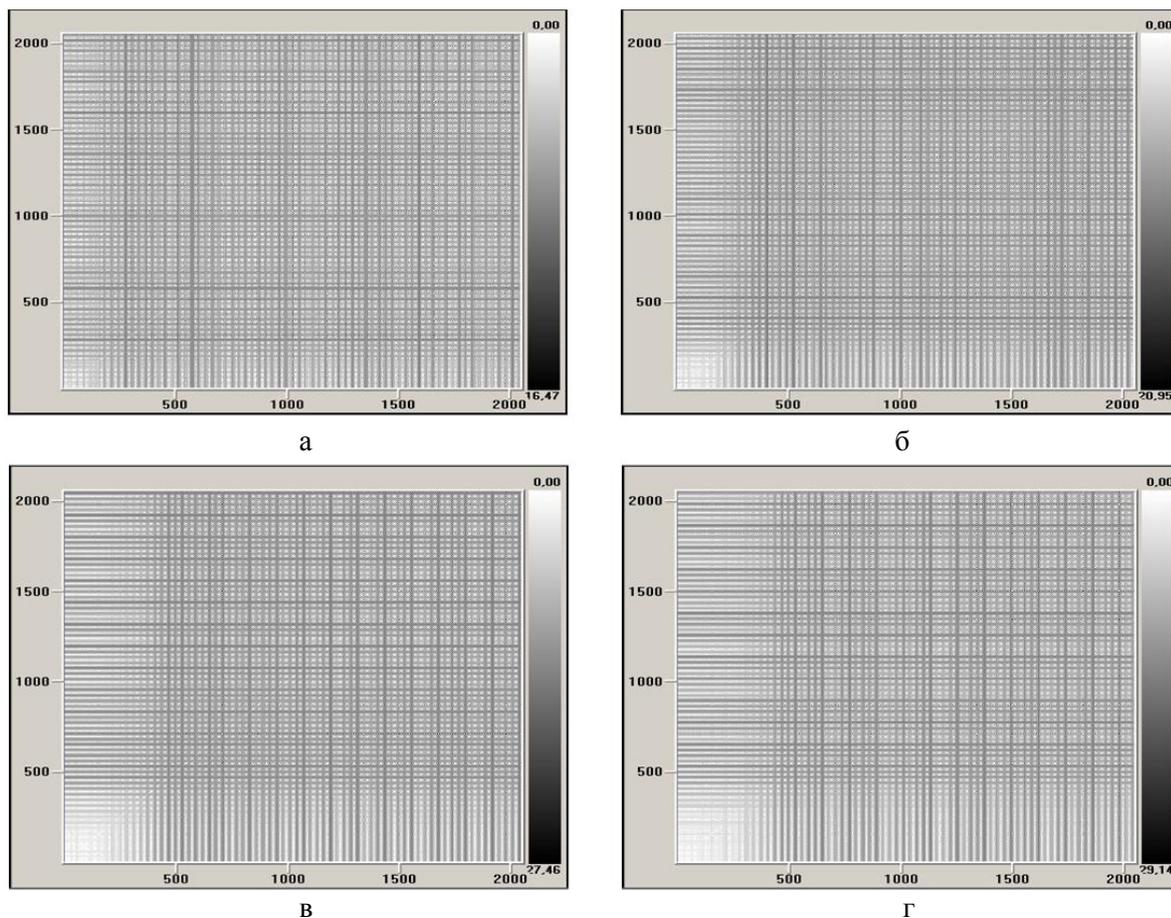


Рис. 3. РГ при значениях: $a - c = 4$; $б - c = 6$; $в - c = 8.5$; $г - c = 8.7$

Далее рассмотрим в качестве генератора хаотических сигналов возмущенный осциллятор Ван дер Поля, который задается следующей системой нелинейных уравнений [14]:

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = (1 - x^2)y - x + A \cos(z), \\ \dot{z} = 2\pi / T. \end{cases} \quad (2)$$

В работе [16] на основе возмущенного осциллятора Ван дер Поля и схемы, изображенной на рис. 1, в среде ScicosLab авторами при изменении в (2) переменной A были получены различные временные реализации передаваемых в канале связи сигналов $U(t)$. На рис. 4 в качестве примера изображен фрагмент передаваемого сигнала при $A = 1.966$. При этом для упрощения процесса моделирования в качестве информационного сигнала использовалась равномерная последовательность прямоугольных импульсов в диапазоне $[-1; 1]$.

Проведем анализ временных реализаций передаваемых в канале связи сигналов $U(t)$ с целью определить, обладают они свойствами хаотичности или нет. Рассчитаем сначала максимальный показатель Ляпунова λ_{\max} и показатель Хёрста H (табл. 2).

Как видно из табл. 2, при различных значениях постоянной A временные реализации передаваемых в канале связи сигналов $U(t)$ обладают положительным максимальным показателем Ляпунова λ_{\max} , а значения показателя Хёрста H попадают в интервалы $0 \leq H \leq 0.5$

и $0.5 \leq H \leq 1$. Положительный максимальный показатель Ляпунова λ_{\max} указывает на то, что исследуемые сигналы обладают свойствами хаотического процесса. Полученные же значения показателя Хёрста H указывают на то, что исследуемые сигналы обладают как свойствами хаотического процесса, так и свойствами стохастического (случайного) процесса. При этом следует отметить, что некоторые из значений показателя Хёрста H находятся рядом со значением 0.5, которое описывает понятие белого шума.

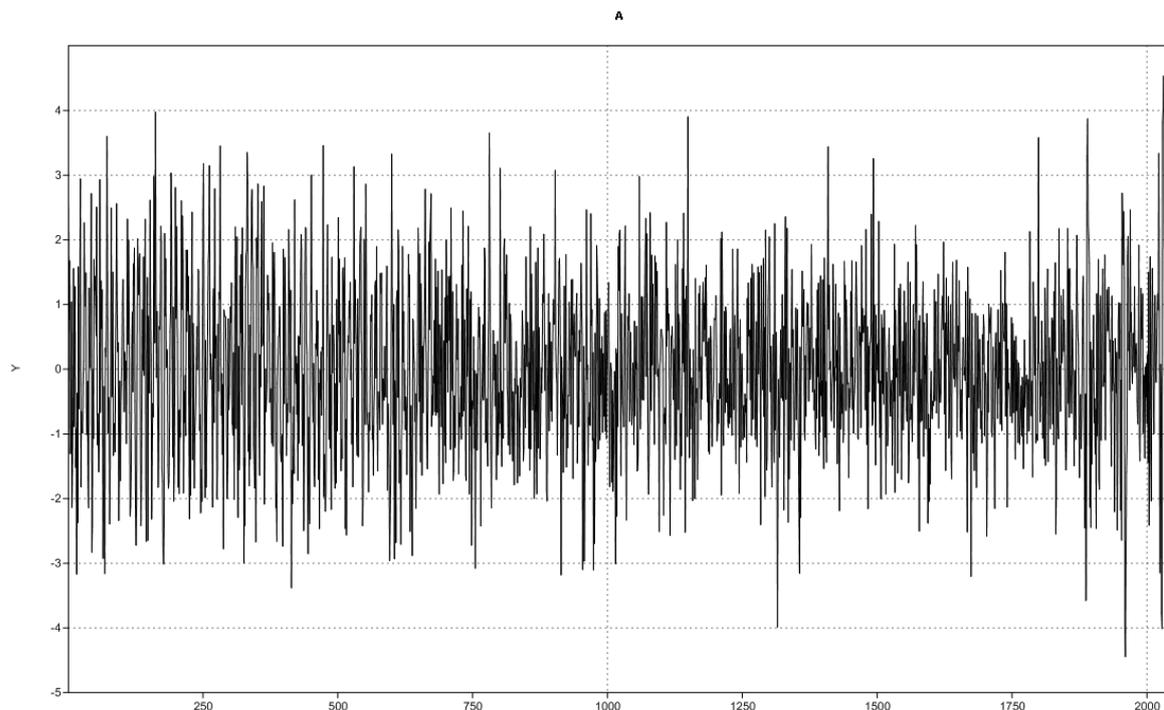


Рис. 4. Фрагмент сигнала, поступающего в линию связи при значении $A = 1.966$

Таблица 2

Расчеты показателей Ляпунова и Хёрста

№	Значение постоянной A	Максимальный показатель Ляпунова λ_{\max}	Показатель Хёрста H
1	1.966	2.177418	0.587875
2	1.97	1.516883	0.597453
3	1.976	2.020661	0.375757
4	1.984	2.241799	0.481174

Далее, рассмотрим РГ для различных значений постоянной A . Как видно из рис. 5, на них присутствуют разнообразные периодически повторяющиеся структуры в виде горизонтальных и вертикальных линий. Это соответствует осциллирующим (нелинейным) системам и указывает также на хаотичность процесса.

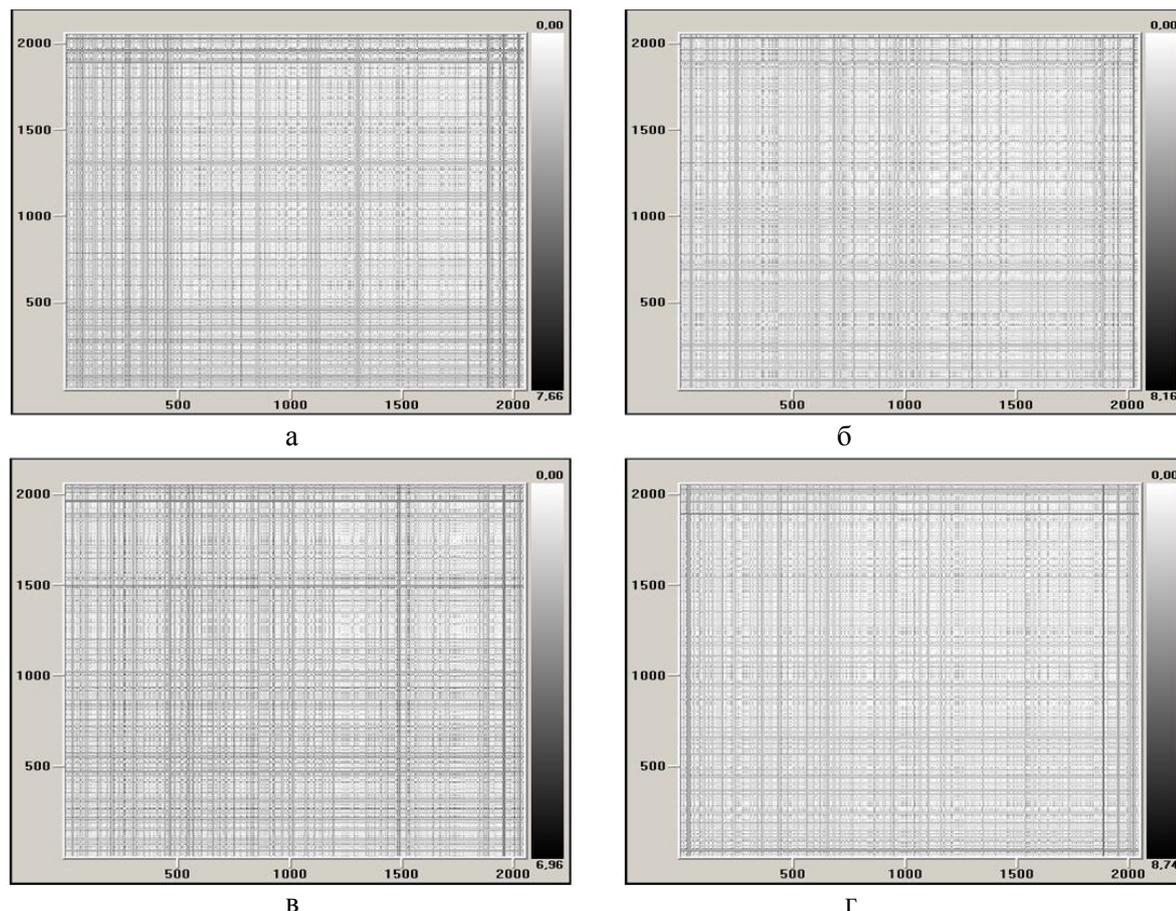


Рис. 5. РГ при значениях: а – $A = 1.966$; б – $A = 1.97$; в – $A = 1.976$; г – $A = 1.984$

Заключение

В данной статье проведено исследование хаотичности передаваемых сигналов защищенных систем связи на основе динамического хаоса с помощью распространенных методов нелинейной динамики. В качестве распространенных методов нелинейной динамики использованы максимальный показатель Ляпунова λ_{\max} , показатель Хёрста H и рекуррентные графики. В качестве защищенной системы связи на основе динамического хаоса рассмотрено устройство имитозащиты контролируемых объектов с повышенной структурной скрытностью сигналов-переносчиков. Описано, как функционирует приемо-передающая часть устройства имитозащиты контролируемых объектов с повышенной структурной скрытностью сигналов-переносчиков.

С помощью методов нелинейной динамики проведено исследование временных реализаций передаваемых в канале связи сигналов $U(t)$, полученных в среде ScicosLab с помощью приемо-передающей части устройства имитозащиты контролируемых объектов с повышенной структурной скрытностью сигналов-переносчиков [15; 16]. Анализ полученных данных показывает, что исследуемые сигналы в целом обладают свойствами хаотичности и потенциально могут обеспечить защищенность передаваемой в беспроводных каналах связи информации от несанкционированного доступа. Описанный в данной работе подход к исследованию хаотичности передаваемых сигналов, основанный на комплексном применении известного математического аппарата методов нелинейной динамики, потенциально можно применять для исследования хаотичности передаваемых сигналов широкого класса систем защищенной связи на основе динамического хаоса.

Список литературы

1. *Леонов К. Н., Потапов А. А., Ушаков П. А.* Математическое моделирование системы передачи информации на основе хаотических сигналов с фрактальной размерностью // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13, № 3. С. 47–53.
2. *Сидоренко А. В., Шакинко И. В.* Метод модифицированного сингулярного спектрального анализа для зашифрованной на основе динамического хаоса информации // Технические средства защиты информации: Тез. докл. XI Белорусско-российской НТК. Минск: БГУИР, 2013. С. 54–55.
3. *Аливер В. Ю.* Хаотические режимы в непрерывных динамических системах // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2006. № 1. С. 65–84.
4. *Мун Ф.* Хаотические колебания: вводный курс для научных работников и инженеров: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 312 с.
5. *Карманов А. П., Кочева Л. С., Щемелинина Т. Н.* Применение методов нелинейной динамики для анализа результатов мониторинга сточных вод // Изв. высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 6. С. 129–137.
6. *Петрунина Т. С.* Численный анализ структурных свойств хаотических временных рядов // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». Темат. вып.: Системный анализ, управление и информационные технологии. 2011. № 32. С. 71–75.
7. *Сидоров К. В., Филатова Н. Н.* Применение методов нелинейной динамики для распознавания эмоции радости в речи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 5 (81). С. 110–114.
8. *Васюта К. С.* Рекуррентный анализ процессов в телекоммуникационных системах // Наукові записки УНДІЗ. 2008. № 6 (8). С. 90–96.
9. *Stane Kodba, Matjaž Perc and Marko Marhl* Detecting chaos from a time series // European journal of physics. 2005. No. 1 (26). P. 205–215.
10. *Махортых С. А., Сычев В. В.* Алгоритмы вычисления характеристик стохастических сигналов и их применение к анализу электрофизиологических данных // Задачи компьютерной биологии: Тез. докл. 4-й Пущинской школы молодых ученых. Пущино: ИМПБ, 1999. С. 10.
11. *Омельченко В. П., Михальчик И. О.* Нелинейный анализ ритмических составляющих электроэнцефалограммы человека в норме // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2014. № 10 (159). С. 52–59.
12. *Осипов Д. Л., Жук А. П., Гавришев А. А.* Устройство имитозащиты контролируемых объектов с повышенной структурной скрытностью сигналов-переносчиков // Патент РФ. 2015. № 2560824. 15 с.
13. *Баркетов С. В., Жук А. П., Сазонов В. В., Авдеенко С. И., Жук Е. П., Лохов В. И., Голубь Ю. С.* Когерентная система передачи информации хаотическими сигналами // Патент РФ. 2008. № 2326500. 6 с.
14. *Layec A.* «Modnum». Scilab toolbox for the communication systems. User's guide. IRCOM Group. 2006. 100 p.
15. *Гавришев А. А., Жук А. П.* Моделирование устройства имитозащиты контролируемых объектов с повышенной структурной скрытностью сигналов-переносчиков // Прикладная информатика. 2017. Т. 12, № 1 (67). С. 68–78.
16. *Гавришев А. А., Жук А. П.* Моделирование устройства имитозащиты контролируемых объектов с новым набором хаотических сигналов // Прикладная информатика. 2017. Т. 12, № 4 (70). С. 122–132.

A. A. Gavrishchev, A. P. Zhuk

*North-Caucasus Federal University
1 Pushkin Str., Stavropol, 355009, Russian Federation*

alexxx.2008@inbox.ru, alekszhuk@mail.ru

APPLICATION OF METHODS OF NONLINEAR DYNAMICS TO STUDY THE CHAOTIC STATE OF THE CARRIER SIGNALS OF SECURE COMMUNICATION SYSTEMS BASED ON DYNAMIC CHAOS

In this article a study of the chaotic state of the carrier signals secure communication systems based on dynamic chaos using common methods of nonlinear dynamics (the maximum Lyapunov exponent, Hurst exponent and recurrent graphics). As secure communication systems based on dynamic chaos are considered apparatus for protection against imitation of controlled objects with high structural security of carrier signals. Using methods of nonlinear dynamics, the study of time realizations transmitted in the communication channel signals obtained in the ScicosLab environment with the studied device. Analysis of the data shows that the studied signals generally have the properties of the chaotic state and can potentially provide protection of transmitted over wireless communication channels information from unauthorized access. The described approach to the study of the chaotic state of the carrier signals based on the integrated application of known mathematical apparatus of nonlinear dynamics techniques potentially can be applied to study the chaotic state of the carrier signals of a wide class of systems for secure communications based on dynamic chaos.

Keywords: nonlinear dynamics, chaotic signals, apparatus for protection against imitation of controlled objects, radio.

References

1. Leonov K. N., Potapov A. A., Ushakov P. A. Mathematical modeling of data transition system on the base of chaotic signals with fractional dimension]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy – Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2010, vol. 13, no. 3, p. 47–53. (In Russ.).
2. Sidorenko A. V., Shakinko I. V. Metod modifitsirovannogo singulyarnogo spektral'nogo analiza dlya zashifrovannoy na osnove dinamicheskogo khaosa informatsii [Method a modified singular spectrum analysis for encrypted based on dynamic chaos information]. *Tekhnicheskie sredstva zashchity informatsii: Tezisy dokladov XI Belorussko-rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technical means of information protection: Abstracts of the XI Belarusian-Russian scientific-technical conference]. Minsk, BSUIR, 2013, p. 54–55. (In Russ.).
3. Aliver V. Yu. Chaotic Regimes in Continuous Dynamic Systems. *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya: priborostroenie – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2006, no. 1, p. 65–84. (In Russ.).
4. Moon F. C. Chaotic vibrations: an introduce for applied scientists and engineers. New York. John Wiley & Sons. 1987, 311 p. (Russ. ed.: Mun F. *Khaoticheskie kolebaniya: vvodnyi kurs lektsii dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. Moscow. Mir Publ., 1990, 312 p.).
5. Karmanov A. P., Kocheva L. S., Shchemelinina T. N. Application of Non-Linear Dynamics Methods for Analysis of Results of Industrial Wastewater. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal – “Lesnoy zhurnal” (Forestry journal)*, 2014, no. 6, p. 129–137. (In Russ.).
6. Petrunina T. S. Chislennyy analiz strukturnykh svoystv khaoticheskikh vremennykh ryadov [Numerical analysis of the structural properties of the chaotic time series]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta «KhPI». Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii – Bulletin of NTU “KhPI”. The themed slots. vol.: System analysis, management and information technology*, 2011, no. 32, p. 71–75. (In Russ.).
7. Sidorov K. V., Filatova N. N. Application of nonlinear dynamics methods for joy emotion recognition in speech. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki*

i optiki – "Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics". 2012, no. 5, p. 110–114. (In Russ.).

8. Vasyuta K. S. Rekurrentnyy analiz protsessov v telekommunikatsionnykh sistemakh [The recurrent analysis of processes in the telecommunication systems.]. *Naukovi zapiski UNDIIZ – Scientific proceeding of URIC*, 2008, no. 6, p. 90–96. (In Russ.).

9. Stane Kodba, Matjaž Perc and Marko Marhl Detecting chaos from a time series. *European journal of physics*, 2005, no. 1 (26), p. 205–215.

10. Makhortykh S. A., Sychev V. V. Algoritmy vychisleniya kharakteristik stokhasticheskikh signalov i ikh primenenie k analizu elektrofiziologicheskikh dannyykh [Algorithms for computing characteristics of stochastic signals and their application to the analysis of electrophysiological data]. *Tezisy dokladov 4-y Pushchinskoy shkoly molodykh uchenyykh «Zadachi komp'yuternoy biologii»* [Abstracts of 4th Pushchino school of young scientists "Challenges for computational biology"]. Pushchino, 1999, p. 10. (In Russ.).

11. Omel'chenko V. P., Mikhal'chich I. O. Nonlinear analysis of normal human electroencephalogram rhythmic components. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki – "Izvestiya SFedU. Engineering Sciences"*, 2014, no. 10, p. 52–59. (In Russ.).

12. Osipov D. L., Zhuk A. P., Gavrishev A. A. Apparatus for protection against imitation of controlled objects with high structural security of carrier signals. Patent RF, no. 2560824, 2015, 15 p. (In Russ.).

13. Barketov S. V., Zhuk A. P., Sazonov V. V., Avdeenko S. I., Zhuk E. P., Lokhov V. I., Golub' J. S. Coherent data transmission system using random signals. Patent RF, no. 2326500, 2008, 6 p. (In Russ.).

14. Layec A. «Modnum». Scilab toolbox for the communication systems. User's guide. IRCOM Group, 2006, 100 p.

15. Gavrishev A. A., Zhuk A. P. Simulation of apparatus for protection against imitation of controlled objects with high structural security of carrier signals. *Prikladnaya informatika – Journal of Applied Informatics*, 2017, vol. 12, no. 1(67), p. 68–78. (In Russ.).

16. Gavrishev A. A., Zhuk A. P. Simulation of apparatus for protection against imitation of controlled objects with new set of chaotic signals. *Prikladnaya informatika – Journal of Applied Informatics*, 2017, vol. 12, no. 4 (70), p. 122–132. (In Russ.).

For citation:

Gavrishev A. A., Zhuk A. P. 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*, 2018, vol. 16, no. 1, p. 50–60. (In Russ.)