

# Двухканальная система передачи информации на основе генератора с хаотической динамикой и синергетического наблюдателя

А. А. Колесников<sup>1</sup>, А. С. Мушенко<sup>2</sup>, А. Д. Золкин<sup>3</sup>

Кафедра синергетики и процессов управления

Южный Федеральный Университет

Таганрог, Россия

<sup>1</sup>anatoly.kolesnikov@gmail.com, <sup>2</sup>asmushenko@sfnu.ru, <sup>3</sup>a.d.zolkin@yandex.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрена методика восстановления полезного сигнала, передаваемого путем параметрической модуляции хаотических колебаний, создаваемых генератором Cicek, с помощью нелинейного синергетического наблюдателя переменных состояния. Приведено решение задачи восстановления двух одновременно передаваемых сигналов с использованием единой хаотической несущей. Генератор детерминированного хаоса представляет собой нелинейную систему с хаотической динамикой, два передаваемых сигнала вводятся в структуру этого генератора путем параметрической модуляции его параметров. Для восстановления полезных сигналов на стороне приемника строится синергетический наблюдатель, отличительной особенностью которого является способность работы с нелинейными объектами. Приведены результаты моделирования полученной системы приема-передачи информации.

**Ключевые слова:** нелинейная динамика; синергетика; детерминированный хаос; наблюдатель состояния; скрытая передача информации

## I. ВВЕДЕНИЕ

Хаотическая система – это нелинейная динамическая система с положительным показателем Ляпунова [1]. С момента обнаружения явлений детерминированного хаоса в моделях нелинейных систем в работах Лоренца актуальны исследования по анализу и исследованию новых хаотических систем и принципов их использования, включая работы, связанные с их практическим применением.

Хаотические системы применяются в инженерных и научных разработках, таких как осцилляторы, лазеры, химические реакции, системы шифрования, системы безопасной связи [2]–[4], биологии, экологии, робототехнике, кардиологии, нейронных сетях, финансах и др.

Одной из областей применения хаотических систем 3-го порядка является их использование в качестве генераторов несущих колебаний в системах связи. Использование

детерминированного хаоса в качестве несущей позволяет обеспечить защиту передаваемой информации, в том числе и свойство стеганографичности – т. е. скрытия от постороннего наблюдателя самого факта защищенной передачи. В такой постановке задачи возникает проблема восстановления полезного сигнала на стороне приемника, заключающаяся в выделении полезного передаваемого сигнала из хаотического. В работе [5] изложен подход по созданию одноканальной хаосодинамической системы передачи данных с использованием нелинейного подмешивания полезного сигнала в хаотический на стороне передатчика и восстановлением полезного сигнала на стороне приемника с помощью синергетического наблюдателя состояния для хаотического генератора Шимизу-Мориока [6]. В данной работе изложена методика синтеза двухканальной системы с синергетическим наблюдателем для хаотического генератора Cicek [7].

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

В работе для сигнала внедренного в структуру генератора детерминированного хаоса необходимо синтезировать реконструктор, позволяющий восстановить полезный сигнал на стороне приемника.

Используемый в работе адаптивный метод приема рассмотрен в работах научной школы профессора В.С. Анищенко [8], исследован в работах И. Тюкина [9], А.Л. Фрадкова и Б.Р. Андриевского [10] и др. Однако применяемые в этих работах наблюдатели состояния имеют существенное отличие от используемого в данной работе синергетического нелинейного наблюдателя: структура синергетического наблюдателя формируется в ходе процедуры синтеза и в его структуру входят правые части уравнений хаотического генератора, т.е. учитываются его естественные свойства и связи. В других методах структура наблюдателя жесткая, постулируется, а не синтезируется. В этой связи применение синергетических наблюдателей для реализации адаптивных методов приема позволит восстановить полезный сигнал с меньшим значением ошибки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №19-08-00366 А.

### III. ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗА ДВУХКАНАЛЬНОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ

Синтез двухканального наблюдателя проводится на основе генератора Сісек, описываемый системой (1) [7]. Фазовый портрет системы изображен на рис. 1.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y + ax + bxz; \\ \dot{y} &= cxz + dx + yz; \\ \dot{z} &= 1 + xy.\end{aligned}\quad (1)$$

Наблюдатель [5], [11] будет построен для параметров  $a$  и  $c$  системы (1), при этом полагается, что параметры  $b$  и  $d$  известны. Таким образом, новые параметры в системе (1) будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}a^* &= a + \mu_1; \\ c^* &= c + \mu_2,\end{aligned}$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – полезный сигнал, передаваемый системе.

Для того чтобы система приёмопередачи обладала свойствами стеганографичности, необходимо, чтобы она пребывала в режиме хаотического функционирования. Для этого введём диапазон изменения параметров системы:

$$\begin{cases} -0.9 < a < 0; \\ 2.6 < b < 5; \\ -12 < c < -3; \\ -1 < d < 1.2. \end{cases}$$

Здесь и далее будем называть наблюдаемый параметр  $a$  как  $w_1$ , а параметр  $c$  как  $w_2$ .

Согласно положениям синергетической теории управления [12] введём вектор макропеременной  $\Psi$ , определяемый выражением:

$$\Psi = \begin{bmatrix} w_1 - \hat{w}_1; \\ w_2 - \hat{w}_2; \end{bmatrix}, \quad (2)$$

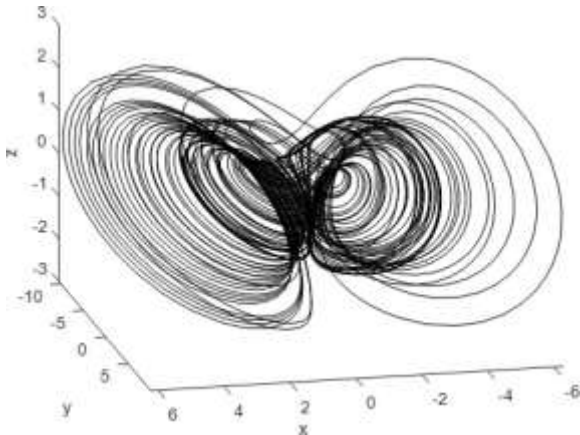


Рис. 1. Фазовый портрет системы Сісек при  $a = -0.6$ ;  $b = 3$ ;  $c = -10$ ;  $d = -0.3$ ;  $\{x_0, y_0, z_0\} = \{1, 1, 1\}$

где  $\hat{w}_1$  и  $\hat{w}_2$  – оценки переменных  $w_1$  и  $w_2$  соответственно.

Согласно процедуре синтеза синергетического наблюдателя задаваемое уравнение редукции имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\hat{w}_1 &= Q_1 + v_1; \\ \hat{w}_2 &= Q_2 + v_2,\end{aligned}\quad (3)$$

где  $Q_1, Q_2$  – неизвестные функции от наблюдаемых переменных состояний системы, а  $v_1$  и  $v_2$  – переменные состояния динамического наблюдателя.

Производные по времени уравнения редукции имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{d\hat{w}_1}{dt} &= \frac{\partial Q_1}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial Q_1}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial Q_1}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{dv_1}{dt}; \\ \frac{d\hat{w}_2}{dt} &= \frac{\partial Q_2}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial Q_2}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial Q_2}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{dv_2}{dt}.\end{aligned}\quad (4)$$

Макропеременная (2) должна удовлетворять следующему функциональному уравнению:

$$\dot{\Psi} + \mathbf{L}\Psi = 0, \quad (5)$$

где  $\mathbf{L}$  – матрица коэффициентов, обеспечивающая устойчивость функционального уравнения и задающая динамику наблюдателя. Матрица  $\mathbf{L}$  имеет следующий вид:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Решив совместно системы (2)–(6), получаем следующие уравнения:

$$\begin{aligned}\frac{dv_1}{dt} &= -\frac{\partial Q_1}{\partial x} (y + w_1x + bxz) - \frac{\partial Q_1}{\partial y} (w_2xz + dx + yz) - \frac{\partial Q_1}{\partial z} (1 - xy) + \\ &L_{11}(w_1 - \hat{w}_1) + L_{12}(w_2 - \hat{w}_2); \\ \frac{dv_2}{dt} &= -\frac{\partial Q_2}{\partial x} (y + w_1x + bxz) - \frac{\partial Q_2}{\partial y} (w_2xz + dx + yz) - \frac{\partial Q_2}{\partial z} (1 - xy) + \\ &L_{21}(w_1 - \hat{w}_1) + L_{22}(w_2 - \hat{w}_2);\end{aligned}\quad (7)$$

Уравнения наблюдателя не должны содержать ненаблюдаемые переменные состояния, поэтому для цели синтеза из (7) необходимо выписать все слагаемые, содержащие ненаблюдаемые переменные и приравнять их к нулю, таким образом, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} -\frac{\partial Q_1}{\partial x} x + L_{11} = 0; & -\frac{\partial Q_1}{\partial y} xz + L_{12} = 0; \\ -\frac{\partial Q_2}{\partial x} x + L_{21} = 0; & -\frac{\partial Q_2}{\partial y} xz + L_{22} = 0. \end{cases}\quad (8)$$

В системе (8) четыре уравнения, но шесть неизвестных, поэтому два элемента матрицы  $\mathbf{L}$  необходимо выбрать таким образом, чтобы она была устойчива по Гурвицу [64],

то есть главные миноры матрицы  $\mathbf{L}$  должны быть больше нуля. Исходя из этих условий, матрица  $\mathbf{L}$  будет выглядеть следующим образом:

$$L = \begin{bmatrix} \alpha_1(xz)^2 & 0 \\ \alpha_1xyz & \alpha_2(xz)^2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Базисный минор матрицы (9) равен  $\alpha_1\alpha_2(xz)^4$ , что свидетельствует о том, что полученная матрица устойчива.

Так же из (9) следует:

$$Q_1 = \frac{1}{2}\alpha_1(xz)^2; Q_1 = \alpha_2xyz. \quad (10)$$

Исходя из (3), (9), (10) и (7) динамические уравнения наблюдателя будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dv_1}{dt} &= -x \left( \frac{\alpha_1 x^3 z^3}{2} - x^2 y + (bz^2 + v_1 z + 1)x + yz \right) \alpha_1 z; \\ \frac{dv_2}{dy} &= \left( \frac{yz^3(\alpha_1 + 2\alpha_2)x^3}{2} + (-y^2 + z(v_2 z + d))x^2 + \right. \\ &\quad \left. + (1 + (b+1)z^2 + v_1 z)yx + y^2 z \right) \alpha_2. \end{aligned} \quad (11)$$

#### IV. ПОСТРОЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С НАБЛЮДАТЕЛЕМ В MATLAB/SIMULINK

Моделирование синтезированной системы выполнено в среде MATLAB/Simulink. Модель состоит из трёх основных частей: передатчика, приёмника и канала связи между ними. Общий вид Simulink-модели системы представлен на рис. 2. Результаты моделирования приведены на рис. 3–9.

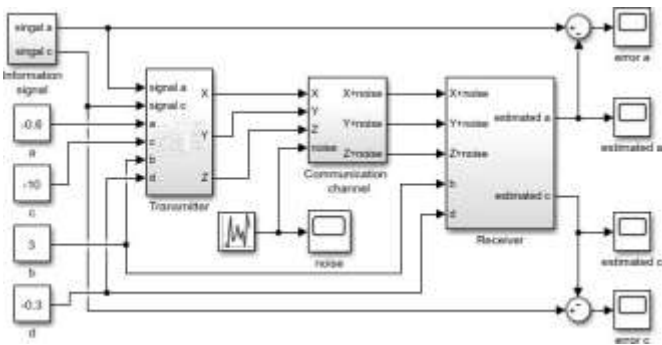


Рис. 2. Общий вид модели в MATLAB/Simulink

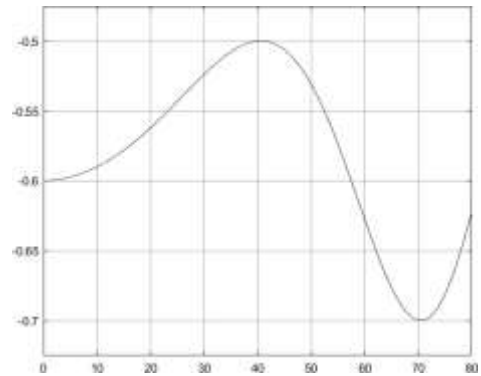


Рис. 3. Оригинальный сигнал  $a$

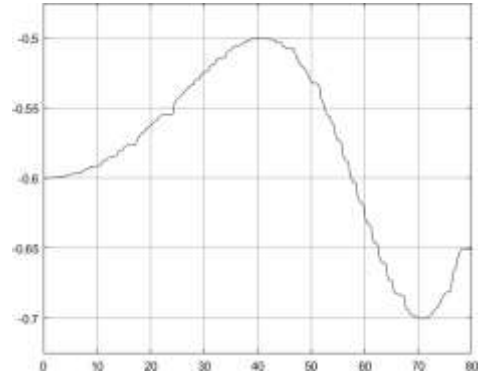


Рис. 4. Восстановленный сигнал  $a$

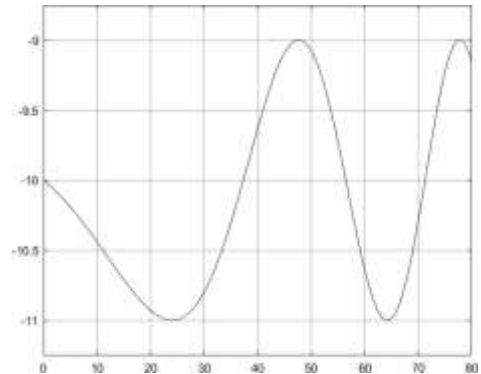


Рис. 5. Оригинальный сигнал  $c$

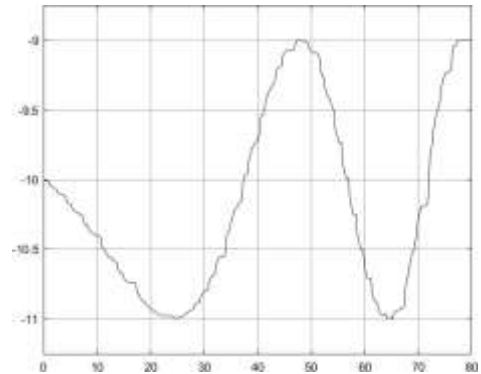


Рис. 6. Восстановленный сигнал  $c$

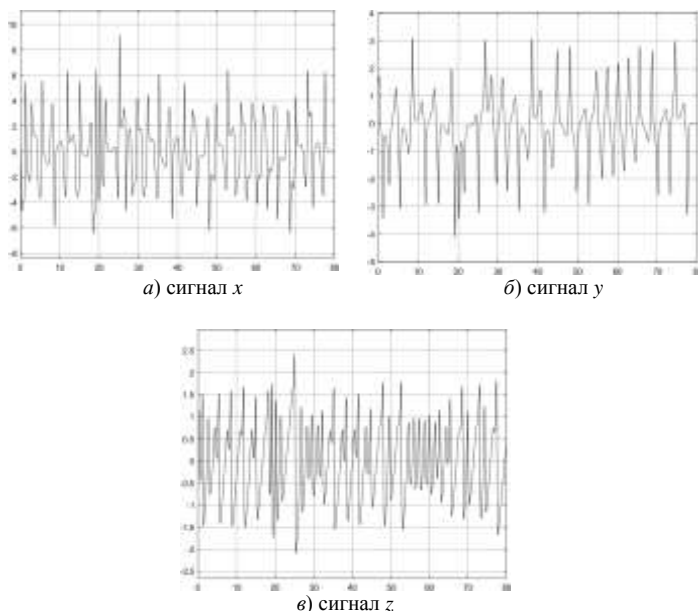


Рис. 7. Сигналы  $x$ ,  $y$ ,  $z$  в канале связи

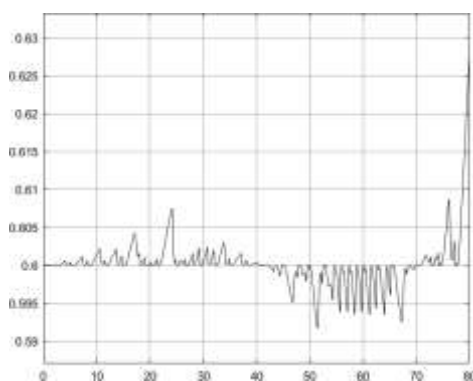


Рис. 8. Ошибка восстановления сигнала  $a$

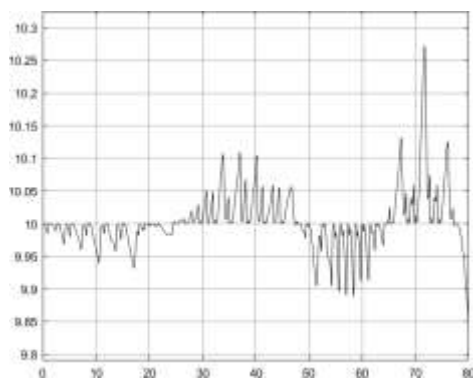


Рис. 9. Ошибка восстановления сигнала  $c$

Моделирование в среде MATLAB проводилось с использованием решателя ode45. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о принципиальной работоспособности разработанной системы. Показанная на рисунках 10 и 11 ошибка восстановления может, в том числе, возникать в вычислениях средой MATLAB в зависимости от передаваемого сигнала, что выражается в неожиданном

переходе характера колебаний из хаотического в периодический и обратно. Ошибки такого рода решаются уменьшением максимального размера шага моделирования. Во всех случаях  $\alpha_1 = 60$ ,  $\alpha_2 = 60$ .

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе принципов и подходов синергетической теории управления в работе продемонстрирована процедура синтеза двухканального наблюдателя состояния для нелинейной системы с хаотической динамикой. В отличие от работы [5] здесь рассмотрен случай двухканальной передачи полезного сигнала. Результаты численного моделирования полученной имитационной модели передачи и приема информации с хаотической несущей продемонстрировали работоспособность рассматриваемого подхода с использованием подмешивания полезной информации в модель хаотического генератора Cicek путем модуляции двух параметров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kuznetsov N.V., Leonov G.A. On stability by the first approximation for discrete systems [Text] // Proceedings. 2005 International Conference Physics and Control, 2005. IEEE, 2005. P. 596–599.
- [2] Feki Moez. An adaptive chaos synchronization scheme applied to secure communication [Text] // Chaos, Solitons and Fractals. 2003. sep. Vol. 18, no. 1. P. 141–148.
- [3] Lakshmanan M. Murali K. Secure communication using a compound signal from generalized synchronizable chaotic systems [Text] // Physics Letters A. 1998. may. Vol. 241, no. 6. P. 303–310.
- [4] Abu-Rezq A. Zaher A.A. On the design of chaos-based secure communication systems [Text] // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2011. sep. Vol. 16, no. 9. P. 3721–3737.
- [5] Колесников А.А., Мушенко А.С., Дзюба Ю.Н., Золкин А.Д. Синергетический наблюдатель переменных состояния в задачах реконструкции систем с хаотической динамикой // Труды Всероссийской научной конференции по проблемам управления в технических системах, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 2017. С. 58–61.
- [6] Shimizu T. and Morioka N. On the bifurcation of a symmetric limit cycle to an asymmetric one in a simple model, Phys. Lett. A76 (1980), 201–204.
- [7] Cicek S., Ferikoglu A., Pehlivan I. A new 3D chaotic system: Dynamical analysis, electronic circuit design, active control synchronization and chaotic masking communication application [Text] // Optik. 2016. apr. Vol. 127, no. 8. P. 4024–4030.
- [8] Reconstruction of dynamic systems as applied to secure communications / Anishchenko V.S. et. all // Technical Physics. 1998. Vol. 43(12). Pp. 1401–1407.
- [9] Tyukin Ivan, Prokhorov Danil V., Cees van Leeuwen. (2007). Adaptation and parameter estimation in systems with unstable target dynamics and nonlinear parametrization. IEEE Transactions on Automatic Control, volume 52(9), 1543–1559.
- [10] Andrievsky B.R., Fradkov A.L. Adaptive-based methods for information transmission by means of chaotic signal source modulation. Automation and Remote Control, 2011, 72:9, 1967–1980.
- [11] Колесников А.А., Веселов Г.Е., Колесникова С.И., Колесников Ал.А., Дзюба Ю.Н. Синерго-кибернетический подход к созданию хаосодинамических систем обработки и защиты информации // Приложение к журналу "Информационные технологии". 2013. №10. С. 1–32.
- [12] Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.