

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

СПОСОБ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ В СВЯЗАННЫХ СИСТЕМАХ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Р. О. Чуб, В. И. Пономаренко, М. Д. Прохоров

Чуб Роман Олегович, аспирант, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, chub.roman.olegovich@gmail.com

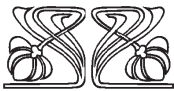
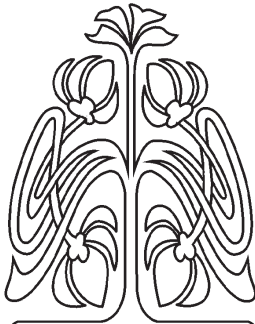
Пономаренко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского; ведущий научный сотрудник, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, romarenkov@gmail.com

Прохоров Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, зав. лабораторией, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, mdprokhorov@yandex.ru

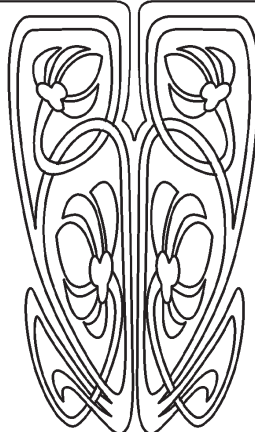
Объектом исследования является система скрытой передачи информации на базе генераторов с запаздыванием. Выбор модели обусловлен тем, что системы с запаздыванием достаточно просто реализовать в эксперименте, при этом они могут демонстрировать хаотическое поведение с большим числом положительных ляпуновских экспонент (гиперхаос). В передатчике использована модуляция времени задержки хаотического генератора бинарным информационным сигналом. В качестве приемника используется другая система с запаздыванием, в которой присутствует обобщенная синхронизация приемника и передатчика в случае, если передается логический 0 и отсутствует, если передается логическая 1. Одним из способов оценки наличия обобщенной синхронизации между передатчиком и приемником является метод вспомогательной системы. Однако он требует наличия двух идентичных систем с запаздыванием в приемнике. В данной работе для выделения скрытого информационного сигнала используется предсказательная модель сигнала передатчика по сигналу приемника. При удачном выборе параметров предсказательной модели ошибка предсказания мала в случае передачи логического 0 и велика в случае передачи логической 1. **Целью исследования** является подбор вида и параметров предсказательной модели для обеспечения уверенного приема информационного сигнала. **Использованы методы** численного моделирования систем с запаздыванием, проведена оценка скрытости предложенной системы передачи информации и ее устойчивости к шумам в канале связи. **В результате проведенных исследований** на основе численного моделирования построена предсказательная модель, подобраны параметры для системы скрытой передачи информации. Показаны преимущества предложенной системы связи перед другими системами передачи информации. Предложенный способ передачи информации имеет преимущество перед методом вспомогательной системы, поскольку не требует наличия двух идентичных систем в приемнике. **Ключевые слова:** системы с запаздыванием, обобщенная синхронизация, передача информации, предсказательная модель, численный эксперимент.

DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-84-91

© Чуб Р. О., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., 2018



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





Введение

Системы, демонстрирующие хаотическое поведение, активно используются для построения систем скрытой передачи информации с широкополосным спектром. При этом применяются различные способы передачи информации, основанные на эффекте хаотической синхронизации (это может быть полная хаотическая синхронизация [1], фазовая [2] или обобщенная синхронизация [3]). Кроме того, были предложены системы связи с использованием синхронного отклика [4], прямохаотические системы связи [5], системы передачи информации на системах с гиперболическим хаосом [6] и гиперхаотические системы [7].

Следует отметить, что в последнее время исследования в области хаотических систем передачи информации активизировались [8, 9]. Для построения эффективных и помехоустойчивых систем связи перспективным является использование систем с запаздыванием, которые отличаются весьма сложным поведением при относительно простом техническом устройстве.

Описание метода

Для передачи цифровой информации обычно используется модуляция одного или нескольких параметров передатчика. В [10] бинарный информационный сигнал изменяет время запаздывания в передатчике, что приводит к изменению его динамики. В качестве приемника используется другая система с запаздыванием, в которой присутствует обобщенная синхронизация приемника и передатчика в случае, если передается логический 0 и отсутствует, если передается логическая 1. Техническая проблема заключается в том, что для детектирования обобщенной синхронизации при помощи метода вспомогательной системы необходимо наличие двух одинаковых систем в приемнике.

При этом для корректной работы приемника важно распознать, с каким временем запаздывания в текущий момент времени работает генератор в передатчике. В данной работе предложен метод оценки изменения параметра, основанный на построении модели приемника по сигналу передатчика. Основная идея заключается в следующем. Будем использовать в приемнике систему с запаздыванием, на которую действует сигнал из канала связи. Мы можем построить предсказательную модель для временного ряда приемника, которая использует сигнал от пере-

датчика, приходящий из канала связи. Коэффициенты модели подберем таким образом, чтобы при передаче логического 0 (при одном времени запаздывания в передатчике) ошибка предсказания была малой, а при передаче логической 1 (при другом времени запаздывания в передатчике) ошибка резко увеличивалась. Наличие или отсутствие обобщенной синхронизации между передатчиком и приемником для передачи информации перестает быть важным, а ключевым свойством является ошибка предсказания модели приемника по сигналу передатчика.

Построение модели ведомой системы $y(t)$ по сигналу ведущей системы $x(t)$ было проведено для двух однонаправленно связанных систем первого порядка с запаздыванием, имеющих следующий вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x \dot{x}(t) &= -x(t) + \lambda_x - x^2(t - \tau_x), \\ \varepsilon_y \dot{y}(t) &= -y(t) + kx(t) + (1 - k)(\lambda_y - y^2(t - \tau_y)), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 10$ – параметр инерционности, $\tau_x = \tau_y = 100$ – время запаздывания ведущей и ведомой систем, $\lambda_x = 1.6$, $\lambda_y = 1.7$ – параметры нелинейности, k – коэффициент связи.

Радиофизическая блок-схема для такого типа связи может быть представлена в следующем виде (рис. 1).

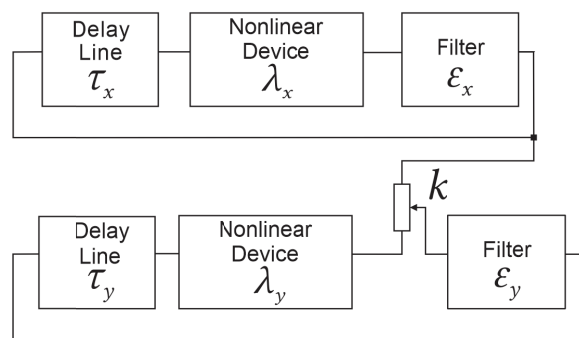


Рис. 1. Блок-схема связанных генераторов с запаздыванием
Fig. 1. Block-scheme of coupled oscillators with delay

Результаты исследования

Для численного исследования систем мы генерировали их временные ряды с единичным шагом интегрирования длиной 2×10^6 точек с различными начальными условиями, переходный процесс в 5×10^5 точек отбрасывали. Для предсказания временного ряда приемника при различных значениях коэффициента связи, выбираемых из интервала $k \in [0; 1]$ с шагом 0.01, строилась простейшая линейная модель следующего вида:



$$\hat{y}_{n+1} = a + a_0 x_n + a_1 x_{n-m}, \quad (2)$$

где n – дискретное время, m – временной лаг, который перебирался в диапазоне от 1 до 100; a, a_0 и a_1 – коэффициенты модели. Коэффициенты модели подгонялись методом наименьших квадратов. С использованием этой модели рассчитывалась среднеквадратичная ошибка аппроксимации, которая является суммой остатков модели:

$$\delta_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (3)$$

где N – количество точек, y_i – временной ряд ведомой системы, \hat{y}_i – значения, полученные при расчетах с оптимальной моделью. На рис. 2 представлена зависимость ошибки аппроксимации для оптимальной модели от коэффициента связи k .

Из рис. 2 видно, что при $k > 0.25$ ошибка предсказания модели сильно уменьшается, и для лага $m=10$ она минимальна. Это связано с тем, что при данных значениях параметров и достаточно больших коэффициентах связи ведомая система приближенно синхронизована с ведущей системой со сдвигом в 10 шагов интегрирования (рис. 3).

Используем эту особенность для передачи бинарной информации. Исследуем зависимость ошибки предсказания оптимальной линейной модели в зависимости от времени запаздывания в передатчике. Для этого зафиксируем коэффициент связи $k = 0.25$, при котором ошибка предсказания для $\tau_x = \tau_y = 100$ весьма мала, и для

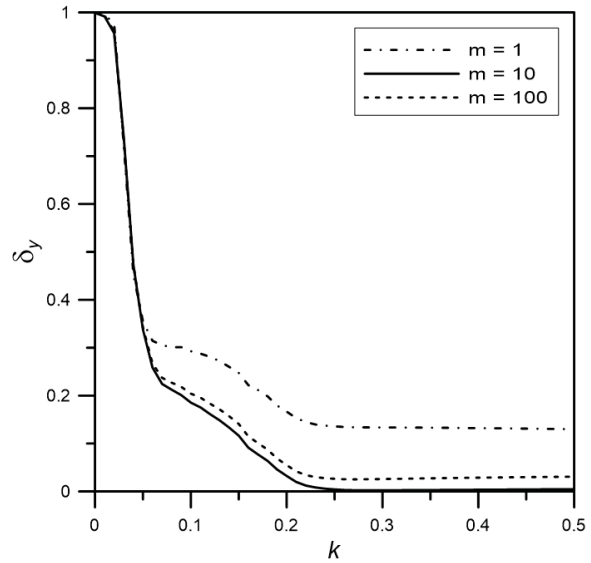


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичной ошибки аппроксимации d_y от коэффициента связи k при $\tau_x = \tau_y = 100$ для $m = 1, m = 10$ и $m = 100$

Fig. 2. Dependence of the root-mean-square error of approximation d_y on the coupling coefficient at $\tau_x = \tau_y = 100$ for $m = 1, m = 10$ and $m = 100$

модели (2) с оптимальными коэффициентами $a = -0.0024, a_0 = 0.1057, a_1 = 0.9342$ и лаге $m = 10$ будем изменять τ_x в ведущей системе в диапазоне $\tau_x [80, 160]$. Зависимость ошибки модели (2) от времени запаздывания τ_x представлена на рис. 4.

При одинаковых временах запаздывания в приемнике и передатчике линейная модель (2) дает малую ошибку предсказания, а при от-

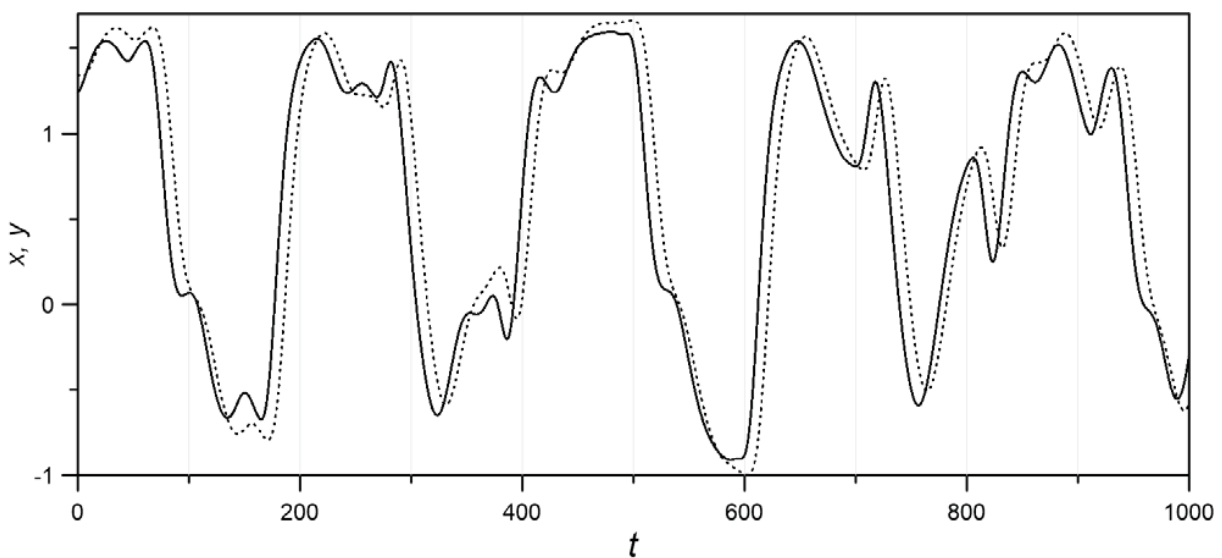


Рис. 3. Фрагмент временных рядов ведущей x (сплошная линия) и ведомой y (пунктирная линия) систем при $k = 0.25$

Fig. 3. Fragment of time series for the master system x (solid line) and slave system y (dashed line) at $k = 0.25$

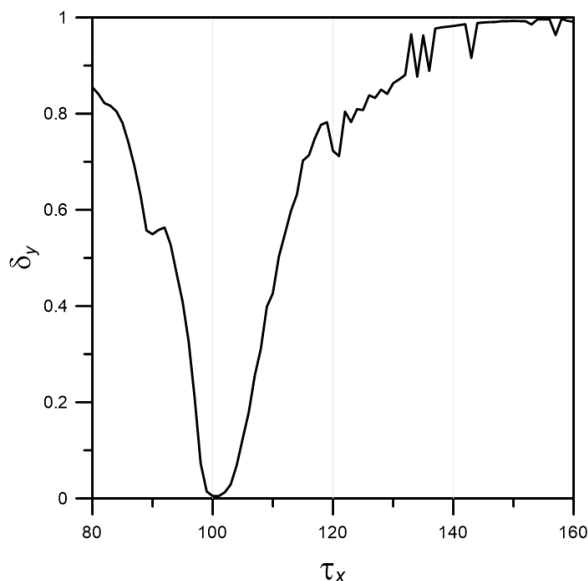


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичной ошибки аппроксимации d_y от времени запаздывания в передатчике τ_x при $k = 0.25$

Рис. 4. Dependence of the root-mean-square error of approximation d_y on the delay time in the transmitter τ_x at $k = 0.25$

личающихся временах запаздывания – большую ошибку. Таким образом, построенную прогнозную модель (2) можно использовать для передачи бинарной информации.

Зафиксируем коэффициент связи между ведущей и ведомой системами $k=0.25$ и будем модулировать время запаздывания в ведущей системе по следующему закону: если передается логический 0, то время запаздывания в ведущей системе равно 100, и ошибка предсказания модели (2) при этом мала, а если передается логическая 1, то время запаздывания устанавливается

равным 120, при котором ошибка модели (2) резко увеличивается.

Работа предложенного метода проиллюстрирована нами на примере системы передачи информации следующего вида:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x \dot{x}(t) &= -x(t) + \lambda_x - x^2(t - (\tau + m(t)\tau_0)), \\ \varepsilon_y \dot{y}(t) &= -y(t) + kx(t) + (1 - k)(\lambda_y - y^2(t - \tau)), \end{aligned} \quad (4)$$

где $m(t)$ – бинарный информационный сигнал, $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 10$, $\tau = 100$ – время запаздывания, $\tau_0 = 20$ – модуляция времени запаздывания, $\lambda_x = 1.6$, $\lambda_y = 1.7$, $k = 0.25$.

При передаче информации генерировалась последовательность битов 0/1 случайным образом длиной 2×10^6 точек. Длина бита составляла 2000 точек. Общее количество переданных битов 1000. На рис. 5 черным цветом показан фрагмент передаваемого информационного сигнала длиной 10^5 точек, а серым цветом показана ошибка предсказания модели (2).

Для детектирования информационного сигнала среднеквадратичная ошибка предсказания усреднялась в скользящем окне по 2000 точкам. Фрагмент усредненного сигнала ошибки представлен на рис. 6 (серая линия).

Среднее значение сигнала ошибки составляет 0.37 при равной вероятности 0 и 1 в информационном сигнале. Логично выбрать это значение в качестве порогового и восстанавливать информационный сигнал по следующему правилу: если на длине бита более 50% значений сигнала ошибки оказывается меньше порога, то это логический 0, а если больше порога, то это логическая 1. Полученные результаты представлены на рис. 5, 6.

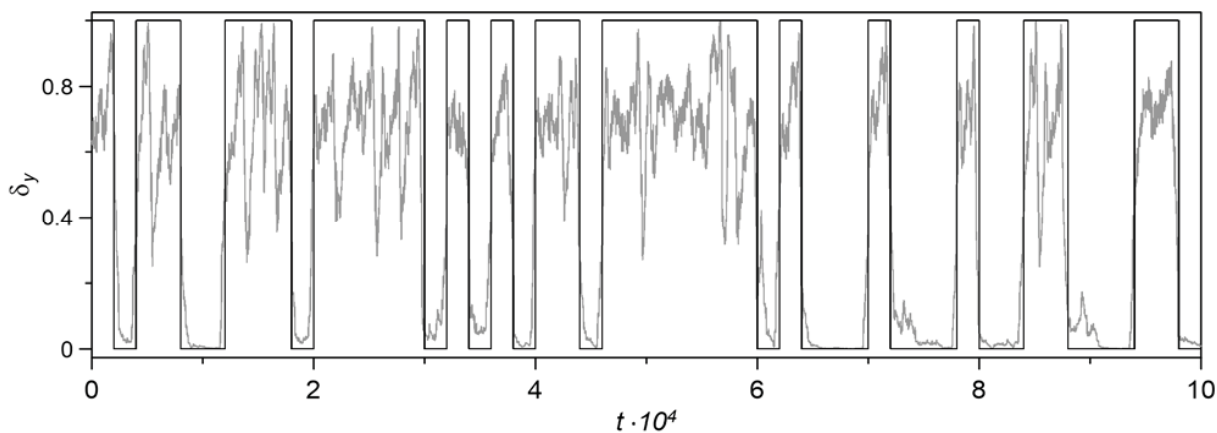


Рис. 5. Фрагмент информационного сигнала, представляющий собой последовательность битов 0/1 (черная линия), сигнал ошибки (серая линия)

Fig. 5. Fragment of the information signal representing a sequence of bits 0/1 (black line) and the error signal (gray line)

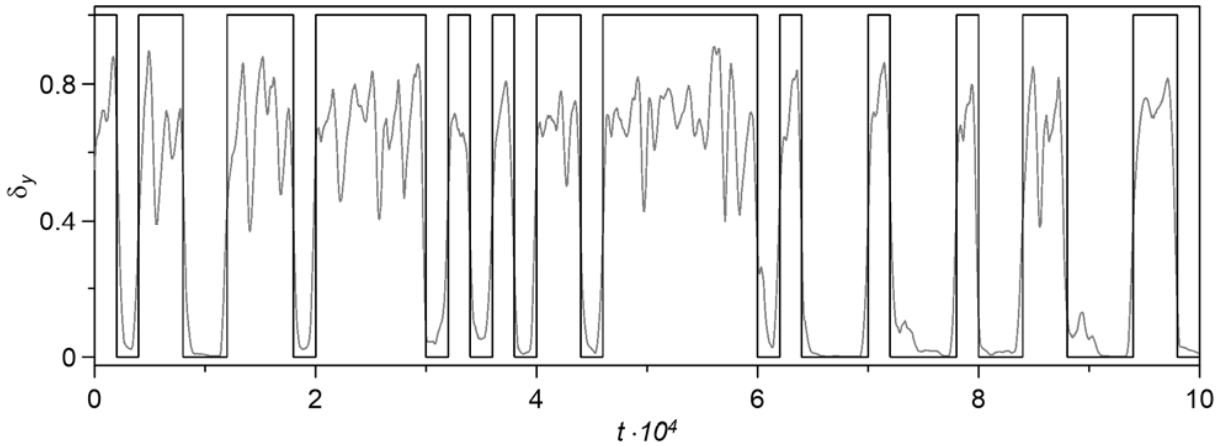


Рис. 6. Фрагмент усредненного сигнала ошибки предсказания модели (4) (серая линия) и восстановленный информационный сигнал (черная линия)

Fig. 6. Fragment of the averaged prediction error signal of the model (4) (gray line) and the reconstructed information signal (black line)

Достоверность передачи информации в цифровых системах связи характеризуется статистической величиной – вероятностью ошибки на бит (Bit Error Rate – BER). BER является вероятностью ошибочного приема при передаче одного бита информации, усредненной для статистически большого объема передаваемой информации. Из теории передачи аналоговых сигналов существует много параметров, которые используются для указания характеристики чувствительности радиоприемников, отношение сигнал/шум – S/N , определяемое как отношение средней мощности сигнала S к средней мощности шума N , является одним из основных и легко понимаемых. Поэтому широко применяется для различных радиоприемников, используемых в приложениях, начиная от радиоприема до фиксированной или подвижной радиосвязи. При измерении отношения сигнал/шум имеются две основные величины измерения. Одна – это уровень шума, а другая – уровень сигнала. Как результат способа, с помощью которого сделаны измерения, часто измерение полезного сигнала также включает в себя шум, т. е. это измерение сигнал + шум. Это, как правило, не является слишком большой проблемой, так как уровень сигнала, как и предполагалось, будет намного выше, чем уровень шума. В цифровой связи большое практическое значение имеет нормированная версия отношения сигнал/шум, E_b/N_0 . Энергия бита E_b – энергия, необходимая для передачи одного бита информации, равная произведению мощности передатчика S на длительность бита

T_b . N_0 – это спектральная плотность мощности шума, и её можно выразить как мощность шума N , деленную на ширину полосы W . Поскольку время передачи и скорость передачи битов R_b взаимно обратны, T_b можно заменить на $1/R_b$:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{ST_b}{N/W} = \frac{SR_b}{N/W} = \frac{S}{N} \left(\frac{W}{R_b} \right). \quad (5)$$

Для исследования влияния шума на качество передачи информации мы добавляли в канал связи гауссовый шум с нулевым средним. На рис. 7 представлена зависимость BER от уровня шума в канале связи. Для сравнения

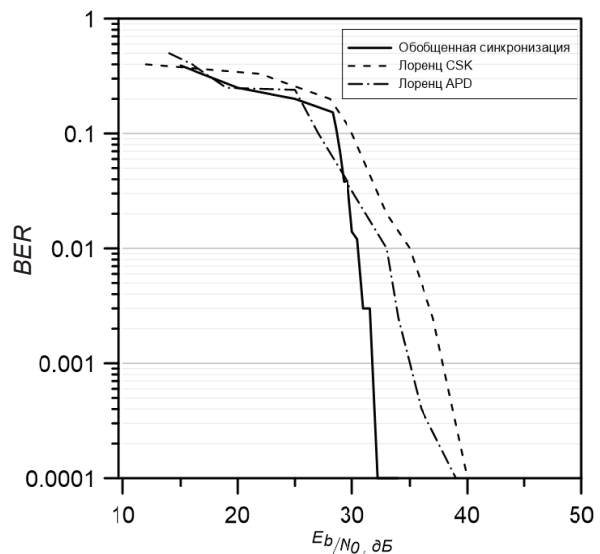


Рис. 7. Зависимость BER от уровня шума в канале связи
Fig. 7. Dependence of BER on the noise level in the communication channel



предложенной системы передачи информации с другими системами мы рассмотрели два метода передачи информации для системы Лоренца [11]: метод активно-пассивного разложения APD [12] (штрихпунктирная линия на рис. 7) и метод переключения хаотических режимов CSK [1] (штриховая линия на рис. 7).

Из сравнения приведенных результатов можно сделать вывод о том, что предложенный способ передачи информации является энер-

гетически эффективным, начиная с 30 дБ (см. рис. 7). Выигрыш составляет около 6 дБ.

Для проверки скрытости предложенной системы передачи информации мы провели численный эксперимент, в котором в качестве информационного сигнала использован меандр (последовательная передача 0, 1). Рис. 8 иллюстрирует спектры информационного сигнала (показан черным) и сигнала в канале связи (показан серым).

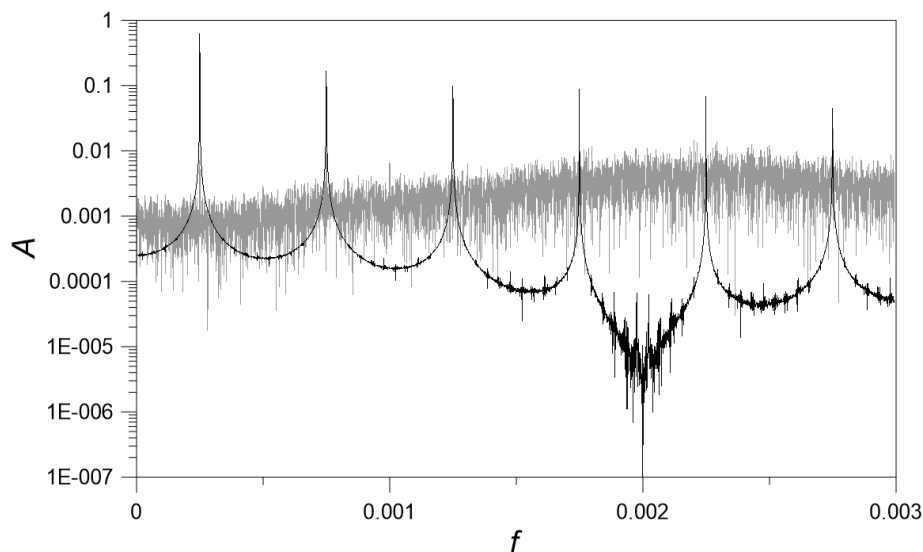


Рис. 8. Спектр информационного сигнала (черная линия) и сигнала в канале связи (серая линия)

Fig. 8. Spectra of the information signal (black line) and the signal in the communication channel (gray line)

По горизонтальной оси на рисунке отложена частота в условных единицах, по вертикальной оси – амплитуда в логарифмическом масштабе.

Из приведенного рисунка можно сделать вывод, что информационный сигнал невозможно выделить из сигнала в канале связи при помощи простой частотной фильтрации.

Заключение

Таким образом, в данной работе показана возможность построения системы скрытой передачи информации, основанной на построении модели приемника по сигналу передатчика. Этот способ позволяет обойтись без использования вспомогательной системы в приемнике. Построена и оптимизирована линейная прогностическая модель, позволяющая выделить информационный сигнал из хаотической несущей. На примере двух систем с запаздыванием

исследована устойчивость системы передачи информации к шумам в канале связи. Предложенный способ передачи информации имеет преимущество перед методом вспомогательной системы, поскольку не требует наличия двух идентичных систем в приемнике. Следует отметить, что выбор времени задержки в качестве управляющего параметра также не является единственным. Однако модуляция параметра нелинейности или параметра инерционности может привести к амплитудной модуляции сигнала в канале связи, что, в свою очередь, приведет к тому, что сторонний наблюдатель сможет выделить передаваемое сообщение при помощи простого амплитудного детектора.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-00205).



Список литературы

1. Cuomo K. M., Oppenheim A. V., Strogatz S. H. Synchronization of Lorenz-based Chaotic Circuits with Applications to Communications // IEEE Trans. Circuits Syst. II : Analog Digital Signal Process. 1993. Vol. 40, № 10. P. 626–633.
2. Chen J. Y., Wong K. W., Cheng L. M. A secure communication scheme based on the phase synchronization of chaotic systems // Chaos. 2003. Vol. 13. P. 508–514.
3. Короновский А. А., Москаленко О. И., Попов П. В., Храмов А. Е. Способ скрытой передачи информации, основанный на явлении обобщенной синхронизации // Изв. РАН. Сер. физическая. 2008. Т. 72, № 1. С. 143–147.
4. Волковский А. Р., Рувльков Н. Ф. Синхронный хаотический отклик нелинейной системы передачи информации с хаотической несущей // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, вып. 3. С. 71–75.
5. Дмитриев А. С., Кяргинский Б. Е., Панас А. И., Старков С. О. Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысококачастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 2. С. 224–233.
6. Isaeva O. B., Jalnina A. Yu., Kuznetsov S. P. Chaotic Communication with Robust Hyperbolic Transmitter and Receiver. URL: <https://arxiv.org/abs/1708.02871> (дата обращения: 07.08.2017).
7. Filali R. L., Benrejeb M., Borne P. On observer-based secure communication design using discrete-time hyperchaotic systems // Commun. Nonlinear Sci. and Numerical Simulations. 2014. Vol. 19. P. 1424–1432.
8. Kocamaz U. E., Cicek S., Uyaroglu Y. Secure Communication with Chaos and Electronic Circuit Design Using Passivity-Based Synchronization // Journal of Circuits, Systems, and Computers. 2018. Vol. 27, № 4. 1850057.
9. Ren H.P., Bai C., Kong Q., Baptista M. S., Grebogi C. A chaotic spread spectrum system for underwater acoustic communication // Physica A. 2017. Vol. 478. P. 77–92.
10. Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Kulminskiy D. D., Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. Resistant to noise chaotic communication scheme exploiting the regime of generalized synchronization // Nonlinear Dynamics. 2017. Vol. 87, № 3. P. 2039–2050.
11. Williams C. Chaotic communications over radio channels // IEEE Trans. Circuits Syst. I : Fundamental theory and applications. 2001. Vol. 48, № 12. P. 1394–1404.
12. Parlitz U., Kocarev L., Stojanovski T., Preckel H. Encoding messages using chaotic synchronization // Phys. Rev. E. 1996. Vol. 53, № 5. P. 4351–4361.

Образец для цитирования:

Чуб Р. О., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Способ передачи информации с использованием предсказательной модели в связанных системах с запаздыванием // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 84–91. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-84-91.

Method for Information Transmission Using a Predictive Model in Coupled Time-delay Systems

R. O. Chub, V. I. Ponomarenko, M. D. Prokhorov

Roman O. Chub, ORCID 0000-0002-5154-6834, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38, Zelyonaya Str., Saratov, 410019, Russia, chub.roman.olegovich@gmail.com

Vladimir I. Ponomarenko, ORCID 0000-0002-1579-6465, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38, Zelyonaya Str., Saratov, 410019, Russia, ponomarenkovi@gmail.com

Mikhail D. Prokhorov, ORCID 0000-0003-4069-9410, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38, Zelyonaya Str., Saratov, 410019, Russia, mdprokhorov@yandex.ru

Background and Objectives: The object of our study is a system for secure information transmission based on time-delay generators. The choice of the model is justified by the fact that time-delay systems can be easily realized in experiment and they can exhibit chaotic behavior with a large number of positive Lyapunov exponents (hyperchaos). A transmitter uses the modulation of the delay time of a chaotic genera-

tor by a binary information signal. As a receiver, another time-delayed system is used, in which a generalized synchronization between the receiver and transmitter is present in the case of logical 0 transmission, and is absent in the case of logical 1 transmission. **Materials and Methods:** The auxiliary system approach is used to demonstrate that generalized synchronization is established between the transmitter and receiver. However, it requires the presence of two identical systems in the receiver. In this paper, a predictive model of the transmitter signal is used to extract a hidden information signal from the signal of the receiver. With a successful choice of parameters of the predictive model, the prediction error is small in the case of logical 0 transmission and is large in the case of logical 1 transmission. **Results:** The aim of our study is the selection of parameters for the predictive model to ensure a reliable extraction of the information signal. The predictive model is constructed and the parameters of the secure information transmission system are chosen. The advantages of the proposed communication system over the other information transmission systems are shown. The proposed method of information transmission has an advantage over the auxiliary system method, since it does not require the presence of two identical systems in the receiver.

Key words: time-delay systems, generalized synchronization, information transmission, predictive model, numerical experiment.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Researches (project no. 18-07-00205).



References

1. Cuomo K. M., Oppenheim A. V., Strogatz S. H. Synchronization of Lorenz-based Chaotic Circuits with Applications to Communications. *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Analog Digital Signal Process*, 1993, vol. 40, no. 10, pp. 626–633.
2. Chen J. Y., Wong K. W., Cheng L. M. A secure communication scheme based on the phase synchronization of chaotic systems. *Chaos*, 2003, vol. 13, pp. 508–514.
3. Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Popov P. V., Hramov A. E. Method of hidden information transmission, based on the phenomenon of generalized synchronization. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2008, vol. 72, iss. 1, pp. 143–147 (in Russian).
4. Volkovsky A. R., Rulkov N. F. Sinhronnyiy haoticheskiy otklik nelineynoy sistemyi peredachi informatsii s haoticheskoy nesuschey [Synchronous chaotic response of the nonlinear system of information transfer by the chaotic carrier]. *Technical Physics Letters* [Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki], 1993, vol. 19, iss. 3, pp. 71–75 (in Russian).
5. Dmitriev A. S., Kjarginsky B. E., Panas A. I., Starikov S. O. Plain Scheme of Chaotic-Carrier Data Communications at Microwave Frequencies. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2001, vol. 46, no. 2, pp. 224–233.
6. Isaeva O. B., Jalnina A. Yu., Kuznetsov S. P. *Chaotic Communication with Robust Hyperbolic Transmitter and Receiver*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1708.02871> (accessed 07 August 2017).
7. Filali R. L., Benrejeb M., Borne P. On observer-based secure communication design using discrete-time hyperchaotic systems. *Commun. Nonlinear Sci. and Numerical Simulations*, 2014, vol. 19, pp. 1424–1432.
8. Kocamaz U. E., Cicek S., Uyaroglu Y. Secure Communication with Chaos and Electronic Circuit Design Using Passivity-Based Synchronization. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 2018, vol. 27, no. 4, 1850057.
9. Ren H.P., Bai C., Kong Q., Baptista M.S., Grebogi C. A chaotic spread spectrum system for underwater acoustic communication. *Physica A*, 2017, vol. 478, pp. 77–92.
10. Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Kulminskiy D. D., Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. Resistant to noise chaotic communication scheme exploiting the regime of generalized synchronization. *Nonlinear Dynamics*, 2017, vol. 87, no. 3, pp. 2039–2050.
11. Williams C. Chaotic communications over radio channels. *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundamental theory and applications*, 2001, vol. 48, no. 12, pp. 1394–1440.
12. Parlitz U., Kocarev L., Stojanovski T., Preckel H. Encoding messages using chaotic synchronization. *Phys. Rev. E*, 1996, vol. 53, no. 5, pp. 4351–4361.

Cite this article as:

Chub R. O., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Method for Information Transmission Using a Predictive Model in Coupled Time-delay Systems. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 84–91 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-84-91.