

СИСТЕМА СВЯЗИ, ОСНОВАННАЯ НА СИНХРОНИЗАЦИИ СИСТЕМ С ЗАДЕРЖКОЙ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ХАОТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ

Д. Д. Кульминский^а, младший научный сотрудник

В. И. Пономаренко^а, доктор физ.-мат. наук, доцент

А. С. Караваяев^б, канд. физ.-мат. наук, доцент

М. Д. Прохоров^а, доктор физ.-мат. наук, доцент

^аСаратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Саратов, РФ

^бСаратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, РФ

Введение: многие системы передачи информации, основанные на явлении хаотической синхронизации, имеют низкую устойчивость к шумам и искажениям сигнала в канале связи, ограничивающую их практическое применение. **Цель:** разработка и исследование схемы передачи информации с переключением хаотических режимов, обладающей высокой устойчивостью к шумам и амплитудным искажениям сигнала в канале связи. **Результаты:** предложена модификация классической схемы связи с переключением хаотических режимов, существенно увеличивающая помехоустойчивость системы. Передатчик и приемник схемы построены на основе систем с запаздывающей обратной связью, демонстрирующих хаотическую динамику высокой размерности. Проведены численные исследования предложенной системы передачи информации. Построены зависимости вероятности ошибки на бит при передаче бинарного информационного сигнала от отношения сигнал/шум, затухания сигнала в канале связи и длины интервала времени, в течение которого передается один бит. Показано, что предложенная система связи демонстрирует значительно более высокую устойчивость к шумам и амплитудным искажениям сигнала в канале связи, чем большинство других систем передачи информации, использующих хаотическую синхронизацию для передачи информационного сигнала через аналоговый канал связи. **Практическая значимость:** предложенная система связи позволяет повысить устойчивость схем с переключением хаотических режимов к шумам и затуханию сигнала в канале связи, что открывает возможность их практического использования.

Ключевые слова — система передачи информации, хаотическая синхронизация, системы с запаздыванием.

Введение

В отличие от явления синхронизации периодических осцилляторов, впервые описанного Гюйгенсом еще в XVII в., синхронизация хаотических колебаний долгое время считалась невозможной из-за высокой чувствительности хаотических систем к начальным условиям. Лишь в 1990 г. Пекора и Кэрролл доказали теоретически, численно и экспериментально, что состояния двух однонаправленно связанных хаотических систем могут быть синхронизованы [1]. Эта работа стимулировала интерес к исследованию хаотической синхронизации и разработке информационно-коммуникационных систем на основе динамического хаоса. Было предложено много различных способов кодирования, передачи и извлечения информационного сигнала, использующих синхронизацию хаотических систем приемника и передатчика. Наиболее популярными из них являются хаотическая маскировка [2, 3], переключение хаотических режимов [4, 5], хаотическая модуляция [6] и нелинейное подмешивание информационного сигнала к хаотическому [7]. Перечисленные способы легли в основу разработки многочисленных систем связи с хаотической несущей [8–19].

Хаотические системы передачи информации привлекают к себе большой интерес благодаря,

в первую очередь, таким потенциальным достоинствам, как высокая скорость и конфиденциальность передаваемого сообщения. Вместе с тем системы связи, основанные на явлении хаотической синхронизации, не лишены серьезных недостатков, которые ограничивают их практическое применение. Основным недостатком таких систем является резкое ухудшение качества выделяемого в приемнике информационного сигнала при расстройке параметров передатчика и приемника и при увеличении шума и искажений сигнала в канале связи.

В нашей недавней работе [17] была разработана экспериментальная цифровая система связи с нелинейным подмешиванием информационного сигнала к хаотическому, в которой приемник и передатчик были реализованы на программируемых микроконтроллерах. Это позволило обеспечить идентичность параметров схемы и повысить ее помехоустойчивость. Была построена [19] устойчивая к шумам экспериментальная система связи с переключением хаотических режимов и аналоговым каналом передачи информации. В настоящей работе мы провели численные исследования экспериментально разработанной [19] системы передачи информации, которые позволили выявить технические недостатки экспериментальной установки и наметить пути их устранения.

Схема передачи информации

Блок-схема предложенной системы связи с переключением хаотических режимов представлена на рис. 1. Передатчик и приемник схемы построены на основе систем с запаздывающей обратной связью. Такие системы могут демонстрировать хаотическую динамику высокой размерности, что потенциально может повысить уровень защиты передаваемой информации [9, 15–17].

В передатчике реализована кольцевая система, генерирующая хаотический сигнал. Она включает в себя две линии задержки со временами запаздывания τ_1 и τ_2 , нелинейный элемент и линейный фильтр низких частот. Бинарный информационный сигнал $m(t)$ управляет ключом, положение которого определяет величину времени запаздывания в системе. Если передается логический 0, то передатчик имеет время задержки, равное τ_1 . Если же передается логическая 1, то передатчик имеет время задержки $\tau_1 + \tau_2$. Динамика реализованной в передатчике системы с запаздыванием описывается дифференциальным уравнением с запаздывающим аргументом:

$$\varepsilon \dot{x}(t) = -x(t) + f(x(t - (\tau_1 + m(t)\tau_2))), \quad (1)$$

где ε — параметр инерционности; $x(t)$ — динамическая переменная; f — нелинейная функция. Для обеспечения скрытности передаваемого информационного сигнала хаотическая несущая передатчика должна обладать близкими статистическими и спектральными характеристиками при τ_1 и $\tau_1 + \tau_2$.

В приемнике реализованы две ведомые системы с запаздыванием, одна из которых имеет линию задержки со временем запаздывания τ_1 , а вторая — со временем запаздывания $\tau_3 = \tau_1 + \tau_2$. Остальные элементы ведомых систем идентичны соответствующим элементам передатчика. Обе системы приемника содержат вычитатель, разрывающий цепь обратной связи. Эти ведомые системы описываются следующими уравнениями:

$$\varepsilon \dot{y}(t) = -y(t) + f(x(t - \tau_1)); \quad (2)$$

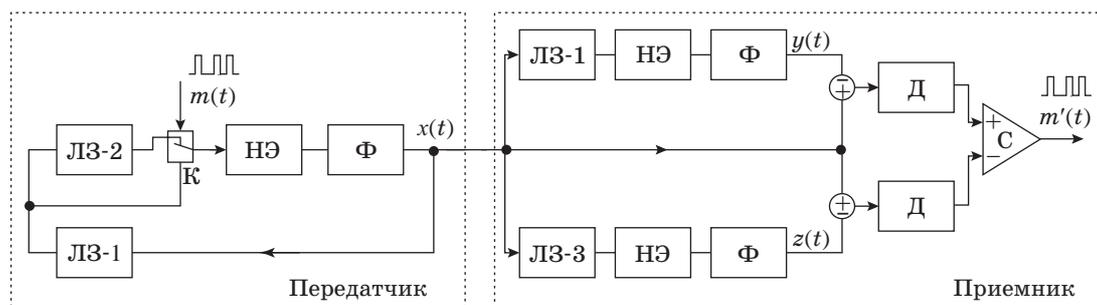
$$\varepsilon \dot{z}(t) = -z(t) + f(x(t - \tau_3)). \quad (3)$$

Для работоспособности схемы необходимо соответствующим образом задать ее параметры, обеспечив в каждый момент времени существование синхронизации между передатчиком и лишь одной из систем приемника. При передаче логического 0 сигнал $y(t)$ первой системы приемника синхронизируется в отсутствие шума с сигналом $x(t)$. В этом случае $x(t) = y(t)$, и на выходе вычитателя этой ведомой системы имеем нулевой сигнал. При этом на выходе вычитателя второй системы приемника имеем отличный от нуля сигнал, так как $x(t)$ и $z(t)$ не синхронизованы. При передаче логической 1 $x(t) = z(t)$, но $x(t) \neq y(t)$. Поэтому на выходе первой системы приемника сигнал отличен от нуля, а на выходе второй равен нулю.

Описанная выше идея лежит в основе работы классических схем передачи информации с переключением хаотических режимов. Недостатком этих схем является их низкая устойчивость к шуму в канале связи. Наличие шума мешает возникновению синхронизации между передатчиком и приемником, приводя к тому, что сигнал на выходе вычитателей и первой, и второй ведомой системы всегда отличен от нуля. Это затрудняет определение того, какой из логических символов (0 или 1) передается.

Для увеличения помехоустойчивости схемы мы модифицировали ее, руководствуясь следующими соображениями. В присутствии шума в канале связи сигнал на выходе вычитателя синхронизованной ведомой системы приемника имеет дисперсию, величина которой сравнима с дисперсией этого шума. При этом сигнал на выходе вычитателя несинхронизованной ведомой системы имеет дисперсию, сравнимую с дисперсией хаотического сигнала.

Учитывая тот факт, что уровень шума канала связи, как правило, намного меньше уровня хаотического сигнала, можно точно восстановить скрытое сообщение даже при достаточно высоком уровне шума. Для этого мы модифицировали классическую схему с переключением хаотических режимов, добавив в приемник два детектора и компаратор (см. рис. 1). Детекторы оценивают



■ Рис. 1. Блок-схема системы передачи информации: ЛЗ-1, ЛЗ-2, ЛЗ-3 — линии задержки; К — ключ; НЭ — нелинейный элемент; Ф — фильтр; Д — детектор; С — компаратор

дисперсию сигнала, поступающего с выхода вычитателя, а компаратор находит разность $r(t)$ поступающих на него сигналов. На выходе компаратора имеем выделенный информационный сигнал $m'(t)$, который равен логическому 0 при $r(t) \leq 0$ и логической 1 при $r(t) > 0$. Отметим, что представленная на рис. 1 схема отличается и от схемы, предложенной нами [16], в которой приемник дополнительно содержал амплитудные детекторы, дифференциальный усилитель и фильтр. Как показали проведенные исследования, схема на рис. 1 оказывается более устойчивой к шуму и ее проще реализовать в радиофизическом эксперименте.

Рассмотренная система передачи информации на основе генератора с запаздывающей обратной связью с переключением хаотических режимов была реализована в радиофизическом эксперименте [19]. Для обеспечения полной идентичности параметров передатчика и приемника все элементы схемы были реализованы в цифровом виде. Использование в качестве генератора хаоса системы с запаздыванием первого порядка позволило реализовать систему передачи на базе простых 8-битных микроконтроллеров семейства Atmel mega AVR. Экспериментальное исследование системы показало, что она имеет более высокую устойчивость к шумам и амплитудным искажениям сигнала в канале связи, чем большинство других систем передачи информации, использующих хаотическую синхронизацию для передачи скрытого сообщения через аналоговый канал связи [8, 12]. Однако численных исследований предложенной системы связи проведено не было.

Численное исследование системы передачи информации

В настоящей работе мы впервые провели численные исследования системы передачи информации, представленной на рис. 1, и изучили ее потенциальные возможности и границы применимости.

В качестве передатчика возьмем генератор с запаздывающей обратной связью, имеющий квадратичную нелинейность $f(x) = \lambda - x^2$, где λ — параметр нелинейности, и фильтр низких частот в виде фильтра Баттерворта первого порядка с частотой среза $f_c = 1/\varepsilon$. Такой передатчик описывается уравнением

$$\varepsilon \dot{x}(t) = -x(t) + \lambda - (x(t - (\tau_1 + m(t)\tau_2)))^2. \quad (4)$$

Уравнения ведомых систем приемника имеют следующий вид:

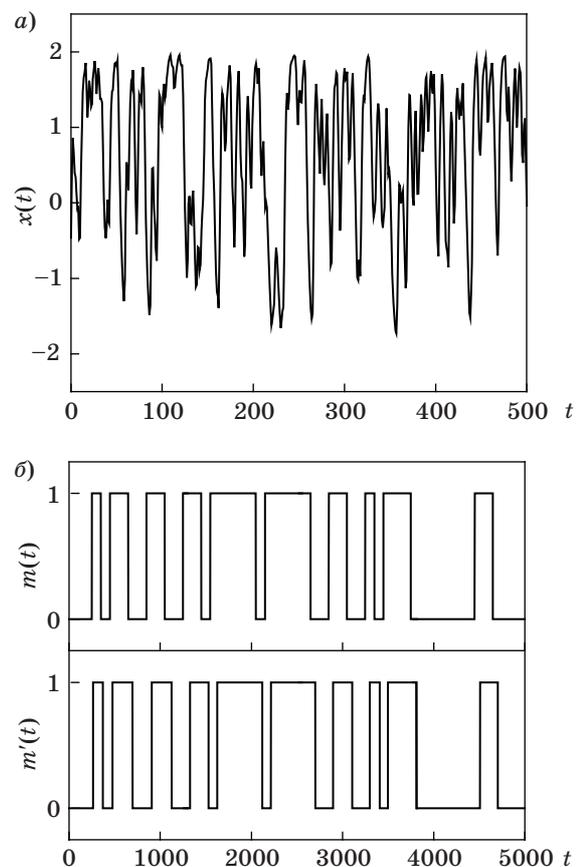
$$\varepsilon \dot{y}(t) = -y(t) + \lambda - (x(t - \tau_1))^2; \quad (5)$$

$$\varepsilon \dot{z}(t) = -z(t) + \lambda - (x(t - \tau_3))^2. \quad (6)$$

Зададим такие значения параметров передатчика: $\tau_1 = 100$, $\tau_2 = 10$, $\tau_3 = 110$, $\lambda = 1,9$, $f_c = 0,5$ ($\varepsilon = 2$), — при которых он демонстрирует хаотическую динамику. На рис. 2, а представлен фрагмент временной реализации хаотического сигнала $x(t)$ на выходе передатчика. При близких значениях τ_1 и $\tau_1 + \tau_2$ временные реализации сигнала $x(t)$ практически неразличимы. Поэтому стороннему наблюдателю сложно определить сам факт передачи информационного сигнала.

Временная реализация передаваемого бинарного сигнала $m(t)$ показана на рис. 2, б. Каждый бит информационного сигнала $m(t)$ передается в течение интервала времени $l = 100$. Этот же интервал времени используется для оценки дисперсии сигналов, поступающих на вход детекторов. Восстановленный информационный сигнал $m'(t)$ на выходе приемника также показан на рис. 2, б. Видно, что информационный сигнал восстанавливается точно, но с некоторой задержкой, величина которой зависит от параметров детекторов.

Для моделирования шума в канале связи к временному ряду хаотического сигнала передатчика $x(t)$ добавлялся гауссов шум с нулевым средним,



■ Рис. 2. Фрагменты временных реализаций хаотического сигнала $x(t)$ (а) и информационных сигналов $m(t)$ и $m'(t)$ (б)

отфильтрованный в полосе частот хаотической несущей. Для различных уровней шума в приемнике был восстановлен бинарный информационный сигнал $m'(t)$. Затем мы построили графики, иллюстрирующие вероятность ошибки на бит (BER) при передаче бинарного сигнала при различных отношениях сигнал/шум (SNR), понимая под сигналом сигнал $x(t)$.

Зависимости BER от SNR для различных значений l построены на рис. 3, а. На этом и последующих графиках величина BER рассчитывалась при передаче случайной последовательности, содержащей 10^5 логических символов 0 и 1. При $l = 100$ и $l = 200$ сигнал сообщения выделялся без ошибок при $\text{SNR} \geq 12$ дБ и $\text{SNR} \geq 10$ дБ соответственно. То есть предложенная система связи демонстрирует значительно более высокую помехоустойчивость, чем остальные системы передачи информации, использующие хаотическую синхронизацию для передачи сигнала сообщения [8, 12].

В реальном канале связи всегда происходит затухание сигнала, которое может оказаться критичным для работы схемы передачи информации. Действительно, многие системы связи, особенно хаотические системы с нелинейным подмешиванием и системы с переключением хаотических режимов, имеют низкую устойчивость к искажениям сигнала в канале связи. Для исследования устойчивости предложенной схемы к амплитудным искажениям сигнала мы меняли затухание сигнала в канале связи.

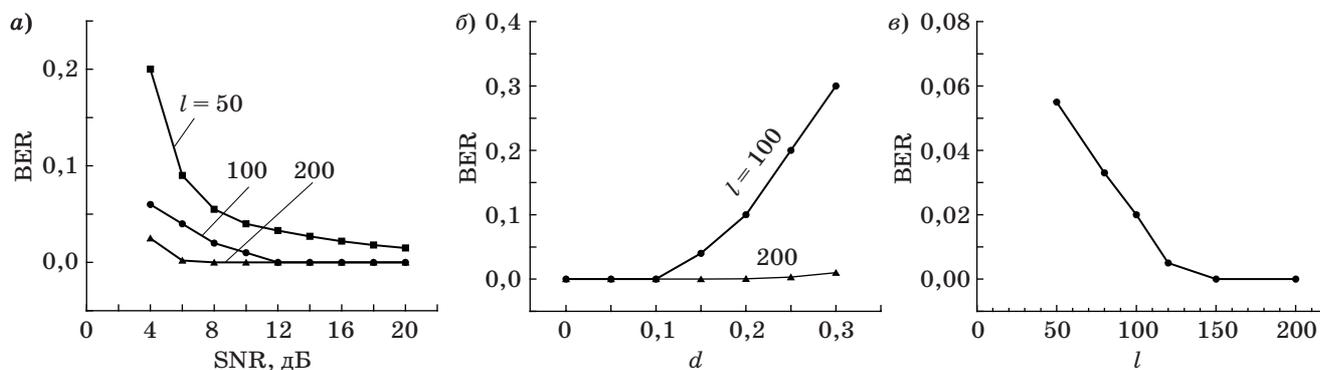
Построены (рис. 3, б) зависимости BER от параметра $d = (A_t - A_r)/A_t$, где A_t и A_r — амплитуды сигналов на выходе передатчика и входе приемника соответственно. При $l = 100$ и $l = 200$ бинарный информационный сигнал на выходе приемника выделялся без ошибок при $d \leq 0,1$ и $d \leq 0,15$ соответственно. Значение $d = 0,1$ соответствует затуханию сигнала примерно на 1 дБ. При таком уровне затухания сигнала в канале связи другие схемы с переключением хаотических режимов

и схемы с нелинейным подмешиванием оказываются неработоспособными [12].

Исследуемая система передачи информации имеет определенные ограничения на скорость передачи сигнала сообщения. Это ограничение обусловлено переходными процессами, вызываемыми изменением параметров системы под действием информационного сигнала, и присущее всем системам связи с переключением хаотических режимов. После скачкообразного изменения времени запаздывания передающей системы возникает переходный процесс, лишь после окончания которого одна из ведомых систем приемника синхронизируется с передатчиком. Для повышения скорости передачи информации необходимо уменьшить характерные временные масштабы хаотической системы или уменьшить длину временного интервала, в течение которого передается каждый бит. Однако в последнем случае это может привести к увеличению BER при выделении информационного сигнала в приемнике.

Зависимость BER от длины l интервала времени, в течение которого передается один бит (рис. 3, в), построена при $\text{SNR} = 8$ дБ и $d = 0$. В области малых значений l с уменьшением l наблюдается рост BER. С другой стороны, при высоких уровнях шума в канале связи можно улучшить качество восстановления информационного сигнала, увеличив величину l , что приведет к уменьшению BER.

Сравнение представленных результатов численного исследования системы передачи информации с результатами исследования экспериментальной схемы [19] показывает, что при численном моделировании исследуемая система связи демонстрирует существенно более высокую устойчивость к шуму и затуханию сигнала, чем в радиофизическом эксперименте. В экспериментальной схеме величина BER при высоких уровнях шума была на порядок выше, а при большом затухании сигнала в разы выше, чем при численном моделировании.



■ Рис. 3. Зависимости вероятности ошибки на бит: а — от отношения сигнал/шум; б — от затухания сигнала в канале связи; в — от длины интервала времени, в течение которого передается один бит

Мы провели исследование причин столь существенной разницы характеристик BER в модельной и экспериментальной системах и установили, что основной причиной увеличения BER в экспериментальной установке является наличие постоянного смещения сигнала в канале связи. Это смещение снижало устойчивость схемы к шумам и приводило к существенному ухудшению качества приема информационного сигнала. Таким образом, результаты численного моделирования системы связи показали, что возможности построенной нами ранее экспериментальной схемы далеко не исчерпаны, и можно существенно улучшить ее помехоустойчивость, введя подстройку постоянного смещения сигнала в канале связи.

Заключение

Проведены численные исследования оригинальной системы передачи информации, основанной на переключении хаотических режимов в генераторе с запаздывающей обратной связью. Показано, что предложенная модификация при-

емника позволяет повысить устойчивость схемы к шумам и затуханию сигнала в канале связи.

Эффективность исследованной системы связи продемонстрирована при передаче бинарного информационного сигнала. Построены зависимости вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/шум, затухания сигнала в канале связи и длины интервала времени, в течение которого передается один бит. Обсуждены возможности увеличения скорости передачи информационного сигнала.

Сравнение результатов численного моделирования исследуемой системы связи с результатами ранее проведенного исследования экспериментальной схемы свидетельствует о том, что эффективность предложенной схемы передачи информации может быть существенно улучшена в радиофизическом эксперименте. В частности, вероятность ошибки на бит при передаче бинарного информационного сигнала при высоких уровнях шума может быть уменьшена в несколько раз.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 13-02-00227, и гранта президента РФ, НШ-1726.2014.2.

Литература

1. Pecora L. M., Carroll T. L. Synchronization in Chaotic Systems // *Physical Review Letters*. 1990. Vol. 64. P. 821–824. doi:10.1103/PhysRevLett.64.821
2. Kocarev L., et al. Experimental Demonstration of Secure Communications via Chaotic Synchronization // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1992. Vol. 2. P. 709–713. doi:10.1142/S0218127492000823
3. Cuomo K. M., Oppenheim A. V. Circuit Implementation of Synchronized Chaos with Applications to Communications // *Physical Review Letters*. 1993. Vol. 71. P. 65–68. doi:10.1103/PhysRevLett.71.65
4. Parlitz U., et al. Transmission of Digital Signals by Chaotic Synchronization // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1992. Vol. 2. P. 973–977. doi:10.1142/S0218127492000562
5. Dedieu H., Kennedy M. P., Hasler M. Chaos Shift Keying: Modulation and Demodulation of a Chaotic Carrier Using Self-Synchronizing Chua's Circuits // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*. 1993. Vol. 40. P. 634–642. doi:10.1109/82.246164
6. Halle K. S., Wu C. W., Itoh M., Chua L. O. Spread Spectrum Communication through Modulation of Chaos // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1993. Vol. 3. P. 469–477. doi:10.1142/S0218127493000374
7. Волковский А. Р., Рувльков Н. Ф. Синхронный хаотический отклик нелинейной системы передачи информации с хаотической несущей // *Письма в Журнал технической физики*. 1993. Т. 19. Вып. 3. С. 71–75.
8. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. — М.: Физматлит, 2002. — 252 с.
9. Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Кодирование и извлечение информации, замаскированной хаотическим сигналом системы с запаздыванием // *Радиотехника и электроника*. 2004. Т. 49. № 9. С. 1098–1104.
10. Tao Y. A Survey of Chaotic Secure Communication Systems // *International Journal of Computational Cognition*. 2004. Vol. 2. P. 81–130. doi:10.1.1.14.9724
11. Argyris A., et al. Chaos-based Communications at High Bit Rates Using Commercial Fibre-optic Links // *Nature*. 2005. Vol. 437. P. 343–346. doi:10.1038/nature04275
12. Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации // *Успехи физических наук*. 2009. Т. 179. С. 1281–1310. doi:10.3367/UFN.0179.200912c.1281
13. Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е. Скрытая передача информации на основе режима обобщенной синхронизации в присутствии шумов // *Журнал технической физики*. 2010. Т. 80. Вып. 4. С. 1–8.
14. Wang M.-J., Wang X.-Y., Pei B.-N. A New Digital Communication Scheme Based on Chaotic Modulation // *Nonlinear Dynamics*. 2012. Vol. 67. P. 1097–1104. doi:10.1007/s11071-011-0053-z
15. Kye W.-H. Information Transfer via Implicit Encoding with Delay Time Modulation in a Time-Delay System // *Physics Letters A*. 2012. Vol. 376. P. 2663–2667. doi:10.1016/j.physleta.2012.07.015

16. Пономаренко В. И., Караваев А. С., Глуховская Е. Е., Прохоров М. Д. Система скрытой передачи информации на основе системы с запаздыванием с переключаемым временем задержки // Письма в Журнал технической физики. 2012. Т. 38. Вып. 1. С. 103–110.
17. Караваев А. С., Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Система цифровой передачи информации, маскируемой хаотическим сигналом системы с запаздыванием // Информационно-управляющие системы. 2013. № 4. С. 30–35.
18. Abderrahim N. W., Benmansour F. Z., Seddiki O. A Chaotic Stream Cipher Based on Symbolic Dynamic Description and Synchronization // *Nonlinear Dynamics*. 2014. Vol. 78. P. 197–207. doi:10.1007/s11071-014-1432-z
19. Караваев А. С., Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Экспериментальная система скрытой передачи информации на генераторе с запаздывающей обратной связью с переключением хаотических режимов // Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41. Вып. 1. С. 3–11.

UDC 537.86

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.85

Communication System Based on Synchronization of Time-Delay Systems with Switching of Chaotic RegimesKul'minskii D. D.^a, Junior Researcher, kulminskydd@gmail.comPonomarenko V. I.^a, Dr. Sc., Phys.-Math., Associate Professor, ponomarenkovi@gmail.comKaravaev A. S.^b, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, karavaevas@gmail.comProkhorov M. D.^a, Dr. Sc., Phys.-Math., Associate Professor, mdprokhorov@yandex.ru^aSaratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 38, Zelyonaya St., 410019, Saratov, Russian Federation^bSaratov State University, 83, Astrakhanskaya St., 410012, Saratov, Russian Federation

Introduction: Many communication systems based on chaotic synchronization have a low interference immunity and low resistance to signal distortion in the communication channel, which restricts their use in practice. **Purpose:** The development and investigation of a communication scheme with switching of chaotic regimes, which would have a high resistance to noise and amplitude distortions of the signal in the communication channel. **Results:** A modification of the classic data transmission scheme with switching of chaotic regimes is proposed, which significantly increases the noise tolerance of the system. The transmitter and receiver are constructed on the base of time-delayed feedback oscillators, which exhibit high-dimensional chaotic dynamics. The proposed communication scheme has been studied numerically. The dependencies of bit-error rate of the recovered binary message on the signal-to-noise ratio, on the signal attenuation in the communication channel and on the bit transmission duration have been studied. It is shown that the proposed communication system has a significantly higher resistance to noise and amplitude distortions of the signal in the communication channel than most other communication schemes using chaotic synchronization for the transmission of information signals through an analog communication channel. **Practical relevance:** The proposed system of information transmission allows you to increase the tolerance to noise and signal attenuation in the communication channel of a scheme based on switching of chaotic regimes. This result opens a possibility for their use in practice.

Keywords — Communication System, Chaotic Synchronization, Time-Delay Systems.**References**

- Pecora L. M., Carroll T. L. Synchronization in Chaotic Systems. *Physical Review Letters*, 1990, vol. 64, pp. 821–824. doi:10.1103/PhysRevLett.64.821
- Kocarev L., Halle K. S., Eckert K., Chua L. O., Parlitz U. Experimental Demonstration of Secure Communications via Chaotic Synchronization. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1992, vol. 2, pp. 709–713. doi:10.1142/S0218127492000823
- Cuomo K. M., Oppenheim A. V. Circuit Implementation of Synchronized Chaos with Applications to Communications. *Physical Review Letters*, 1993, vol. 71, pp. 65–68. doi:10.1103/PhysRevLett.71.65
- Parlitz U., Chua L. O., Kocarev L., Halle K. S., Shang A. Transmission of Digital Signals by Chaotic Synchronization. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1992, vol. 2, pp. 973–977. doi:10.1142/S0218127492000562
- Dedieu H., Kennedy M. P., Hasler M. Chaos Shift Keying: Modulation and Demodulation of a Chaotic Carrier Using Self-Synchronizing Chua's Circuits. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, 1993, vol. 40, pp. 634–642. doi:10.1109/82.246164
- Halle K. S., Wu C. W., Itoh M., Chua L. O. Spread Spectrum Communication through Modulation of Chaos. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1993, vol. 3, pp. 469–477. doi:10.1142/S0218127493000374
- Volkovskii A. R., Rul'kov N. F. Synchronous Chaotic Response of a Nonlinear Oscillator System as a Principle for the Detection of the Information Component of Chaos. *Pisma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1993, vol. 19, pp. 97–99 (In Russian).
- Dmitriev A. S., Panas A. I. *Dinamicheskii khaos: novye nositeli informatsii dlia sistem svyazi* [Dynamical Chaos: New Information Carriers for Communication Systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 252 p. (In Russian).
- Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Coding and Recovery of Information Masked by the Chaotic Signal of a Time-Delay System. *Radiotekhnika i elektronika*, 2004, vol. 49, pp. 1031–1037 (In Russian).
- Tao Y. A Survey of Chaotic Secure Communication Systems. *International Journal of Computational Cognition*, 2004, vol. 2, pp. 81–130. doi:10.1.1.14.9724
- Argyris A., Syvridis D., Larger L., Annovazzi-Lodi V., Colet P., Fischer I., Garcia-Ojalvo J., Mirasso C. R., Pesquera L., Shore K. A. Chaos-Based Communications at High Bit Rates Using Commercial Fibre-Optic Links. *Nature*, 2005, vol. 437, pp. 343–346. doi:10.1038/nature04275
- Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. On the Use of Chaotic Synchronization for Secure Communication. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2009, vol. 52, pp. 1213–1238. doi:10.3367/UFNe.0179.200912c.1281 (In Russian).

13. Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. Hidden Data Transmission Using Generalized Synchronization in the Presence of Noise. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2010, vol. 55, pp. 435–441. doi:10.1134/S1063784210040018 (In Russian).
14. Wang M.-J., Wang X.-Y., Pei B.-N. A New Digital Communication Scheme Based on Chaotic Modulation. *Nonlinear Dynamics*, 2012, vol. 67, pp. 1097–1104. doi:10.1007/s11071-011-0053-z
15. Kye W.-H. Information Transfer via Implicit Encoding with Delay Time Modulation in a Time-Delay System. *Physics Letters A*, 2012, vol. 376, pp. 2663–2667. doi:10.1016/j.physleta.2012.07.015
16. Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Glukhovskaya E. E., Prokhorov M. D. Hidden Data Transmission Based on Time-Delayed Feedback System with Switched Delay Time. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2012, vol. 38, pp. 51–54. doi:10.1134/S1063785012010129 (In Russian).
17. Karavaev A. S., Kulminskiy D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. System of Digital Transmission of Information Masked by Chaotic Signal of Time-Delay System. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 4(65), pp. 30–35 (In Russian).
18. Abderrahim N. W., Benmansour F. Z., Seddiki O. A Chaotic Stream Cipher Based on Symbolic Dynamic Description and Synchronization. *Nonlinear Dynamics*, 2014, vol. 78, pp. 197–207. doi:10.1007/s11071-014-1432-z
19. Karavaev A. S., Kul'minskii D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. An Experimental System for Hidden Data Transmission Based on a Delayed-Feedback Generator with Switching of Chaotic Modes. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2015, vol. 41, pp. 1–4. doi:10.1134/S1063785015010083 (In Russian).

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.