

## СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ, ОСНОВАННАЯ НА ОБОБЩЕННОЙ ХАОТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Д. Д. Кульминский<sup>а</sup>, младший научный сотрудник

В. И. Пономаренко<sup>а</sup>, доктор физ.-мат. наук, доцент

М. Д. Прохоров<sup>а</sup>, доктор физ.-мат. наук, доцент

Б. П. Безручко<sup>б</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор

<sup>а</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Саратов, РФ

<sup>б</sup>Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, РФ

**Введение:** системы передачи информации, основанные на режиме обобщенной хаотической синхронизации между передатчиком и приемником, традиционно используют два идентичных генератора в приемнике, создание которых зачастую является технически сложной задачей. **Цель:** разработка и исследование схемы передачи информации на основе обобщенной хаотической синхронизации, приемник которой содержит лишь один генератор, что снимает вопрос об обеспечении идентичности двух генераторов в приемнике. **Результаты:** предложена система передачи информации, основанная на использовании режима обобщенной хаотической синхронизации, которая содержит лишь одну ведомую автоколебательную систему в приемнике. Для диагностики режима обобщенной синхронизации между ведущей системой (передатчиком) и ведомой системой (приемником) предложено подавать на единственную ведомую систему поочередно сигнал ведущей системы и его задержанную копию и проверять, будет ли ведомая система демонстрировать одинаковую динамику. В отсутствие обобщенной синхронизации динамика ведомой системы оказывается разной при воздействии на нее два раза одним и тем же сигналом, а при наличии обобщенной синхронизации ведомая система демонстрирует после переходного процесса одинаковые колебания в обоих случаях. Работоспособность предложенной системы передачи информации продемонстрирована для случая, когда в качестве ведущей и ведомой систем использованы генераторы с запаздывающей обратной связью. Проведены численные исследования предложенной схемы связи. Выявлено, что она обладает высокой устойчивостью к шумам в канале связи. Разработанная система передачи информации реализована в радиофизическом эксперименте. Показана ее эффективность при передаче бинарного информационного сигнала. **Практическая значимость:** предложенная схема связи позволяет избежать технических трудностей создания систем передачи информации на основе обобщенной синхронизации, связанных с необходимостью обеспечить в эксперименте идентичность двух генераторов в приемнике.

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

### Введение

Системы связи, принцип действия которых базируется на использовании такого нелинейного явления, как синхронизация однонаправленно связанных хаотических систем, уже давно активно разрабатываются многими авторами [1–10]. В большинстве предложенных схем передачи информации, построенных на хаотической синхронизации, используется режим полной синхронизации между генераторами передатчика и приемника, представляющими собой ведущую и ведомую системы соответственно. Известны также системы передачи информации, основанные на фазовой синхронизации хаотических генераторов [11]. Следует отметить, что для систем связи как с полной, так и с фазовой синхронизацией очень важна высокая степень идентичности параметров приемника и передатчика, которую трудно обеспечить в реальных экспериментальных системах. Кроме того, такие информационно-коммуникационные системы критичны к шумам в канале связи и, как правило, теряют работоспособность уже при сравнительно небольших уровнях

шума, при которых отношение сигнал/шум оказывается менее 30 дБ [12].

Существенно повысить устойчивость к шуму и флуктуациям в канале связи удается в системах передачи информации, основанных на явлении обобщенной хаотической синхронизации [13–15]. Для диагностики режима обобщенной синхронизации между ведущей системой (передатчиком) и ведомой системой, находящейся в приемнике, традиционно используется метод, при котором в приемник дополнительно вводится вспомогательная система [16], являющаяся точной копией ведомой системы. Хотя при этом не требуется идентичность генераторов в приемнике и передатчике, возникает задача построения двух идентичных генераторов в приемнике. Ее решение зачастую является технически сложным, особенно при работе на высоких частотах.

В данной работе мы предлагаем систему передачи информации, основанную на обобщенной хаотической синхронизации, в которой не требуется вспомогательная система в приемнике, за счет чего снимается вопрос об обеспечении идентичности используемых генераторов. Предложенная

схема связи исследована численно и реализована в радиофизическом эксперименте. Показано, что схема демонстрирует высокую устойчивость к шуму.

### Схема передачи информации

Блок-схема предложенной нами системы связи на основе обобщенной синхронизации представлена на рис. 1.

Передатчик содержит хаотическую ведущую систему  $x(t)$ , на которую действует бинарный информационный сигнал  $m(t)$ , модулируя один из ее параметров. Сигнал с выхода передатчика передается в канал связи. В состав приемника входят автоколебательная ведомая система  $y(t)$ , две одинаковые линии задержки со временем запаздывания  $\tau$ , коммутатор, генератор прямоугольных импульсов и разностный усилитель. Параметры схемы выбраны так, чтобы при передаче бинарного нуля между ведущей и ведомой системами существовал режим обобщенной синхронизации, а при передаче бинарной единицы обобщенной синхронизации не было.

Для диагностики существования обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами мы не используем в приемнике вспомогательную систему, как это обычно делается в системах связи, основанных на обобщенной синхронизации [13–15]. Вместо этого мы подаем на единственную ведомую систему поочередно сигнал ведущей системы и его задержанную копию. Если обобщенная синхронизация между ведущей и ведомой системами существует, то после переходного процесса ведомая система будет демонстрировать идентичные колебания при воздействии на нее одинаковым сигналом. Если же обобщенная синхронизация между ведущей и ведомой системами отсутствует, то колебания ведомой системы будут разными, несмотря на то, что на нее действует один и тот же сигнал.

Для того чтобы два раза подействовать на ведомую систему одинаковым сигналом, мы исполь-

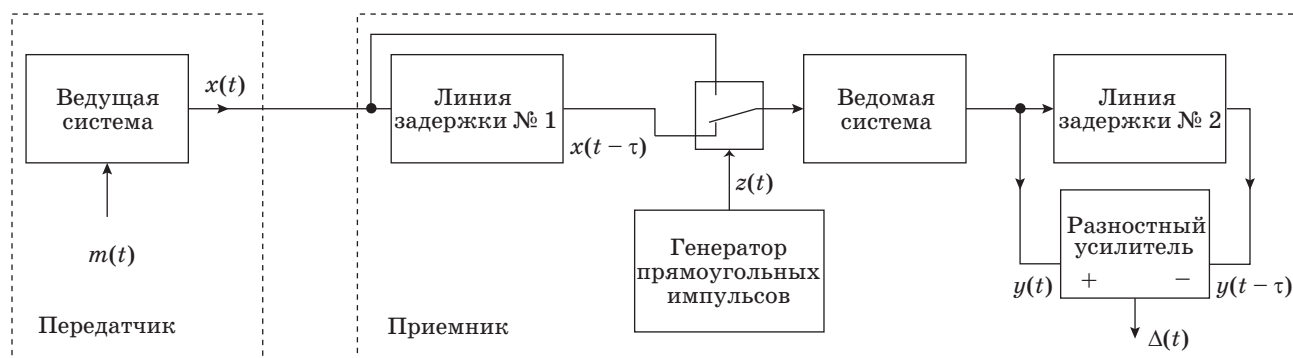
зуем линию задержки № 1 (см. рис. 1). Переключения сигнала воздействия на ведомую систему осуществляет коммутирующее устройство, которое управляется сигналом генератора прямоугольных импульсов  $z(t)$ , имеющим период  $T$ . Половину периода сигнала  $z(t)$  ведомая система находится под действием сигнала  $x(t)$ , а другую половину периода на ведомую систему действует сигнал  $x(t - \tau)$ . Для работоспособности схемы длительность переходного процесса, предшествующего возникновению режима обобщенной синхронизации, должна быть меньше  $T/2$ . Время задержки следует выбрать равным  $\tau = T/2$ .

Чтобы сравнить колебания ведомой системы при воздействии на нее сигналов  $x(t)$  и  $x(t - \tau)$ , мы использовали в приемнике линию задержки № 2 со временем запаздывания  $\tau$  и разностный усилитель. При наличии обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами разность сигналов  $\Delta(t) = y(t) - y(t - \tau)$  на выходе разностного усилителя будет равна нулю во второй половине периода  $z(t)$  после окончания переходного процесса. При отсутствии обобщенной синхронизации разность  $\Delta(t)$  будет отлична от нуля в течение всей второй половины периода сигнала  $z(t)$ .

На протяжении всей первой половины периода  $z(t)$  наблюдаются незатухающие колебания сигнала  $\Delta(t)$ , которые внешне похожи на колебания этого сигнала во второй половине периода  $z(t)$  в отсутствие обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами. Таким образом, в течение этого интервала времени разность  $\Delta(t)$  не несет полезной информации для диагностики режима обобщенной синхронизации.

### Численное исследование системы передачи информации

В качестве ведущей и ведомой систем в предложенной схеме передачи информации могут быть использованы различные генераторы хаотических колебаний. Мы рассмотрим случай, когда



■ Рис. 1. Блок-схема системы передачи информации

в качестве хаотических генераторов в передатчике и приемнике используются генераторы с запаздывающей обратной связью.

Ведущая система состоит из двух линий задержки (№ 3 со временем запаздывания  $\tau_1$  и № 4 со временем запаздывания  $\tau_2$ ), коммутатора, нелинейного элемента № 1 и линейного фильтра нижних частот № 1 (рис. 2, а). Коммутатор управляется бинарным информационным сигналом  $m(t)$  и переключает время запаздывания в системе так, что при передаче бинарного нуля оно равно  $\tau_1$ , а при передаче бинарной единицы равно  $\tau_1 + \tau_2$ . Такая система описывается дифференциальным уравнением с запаздыванием

$$\varepsilon_1 \dot{x}(t) = -x(t) + f_1(x(t - (\tau_1 + m(t)\tau_2))), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1$  — параметр инерционности, а  $f_1$  — нелинейная функция.

Ведомая система состоит из линии задержки № 5 со временем запаздывания  $\tau_3$ , нелинейного элемента № 2, сумматора и линейного фильтра нижних частот № 2 (рис. 2, б). На нее поочередно действуют сигналы  $x(t)$  и  $x(t - \tau)$ . Ведомая система описывается уравнением

$$\varepsilon_2 \dot{y}(t) = -y(t) + f_2(y(t - \tau_3)) + k(z(t)x(t) + \bar{z}(t)x(t - \tau)), \quad (2)$$

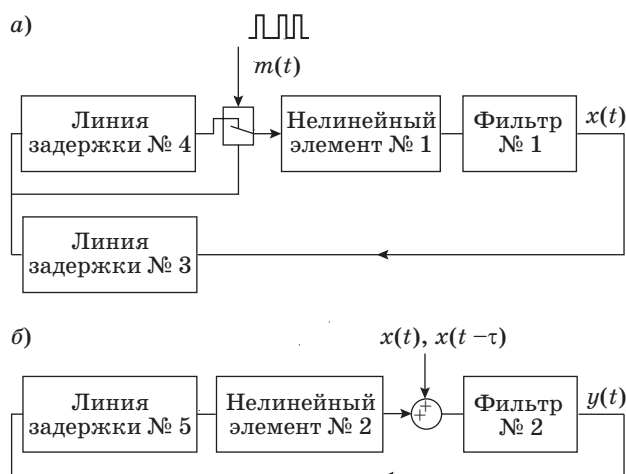
где  $\varepsilon_2$  — параметр инерционности;  $f_2$  — нелинейная функция;  $k$  — коэффициент связи;  $z(t)$  — инверсия сигнала  $x(t)$ . При воздействии на ведомую систему сигналом  $x(t)$  имеем  $z(t) = 1$  и  $\bar{z}(t) = 0$ , а при воздействии сигналом  $x(t - \tau)$  имеем  $z(t) = 0$  и  $\bar{z}(t) = 1$ .

Пусть нелинейные элементы № 1 и № 2 имеют квадратичную нелинейность ( $f_1(x) = \lambda_1 - x^2$  и  $f_2(y) = \lambda_2 - y^2$  соответственно, где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — параметры нелинейности), а фильтры № 1 и № 2

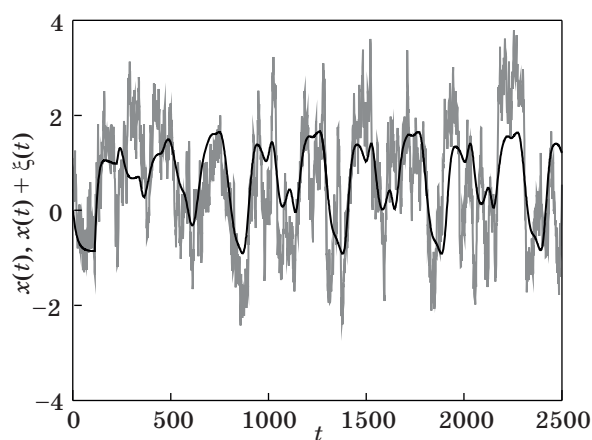
являются фильтрами Баттерворта первого порядка и имеют частоту среза  $\nu_1 = 1/\varepsilon_1$  и  $\nu_2 = 1/\varepsilon_2$  соответственно. Параметры системы передачи информации выберем следующими:  $\tau_1 = 110$ ,  $\tau_2 = 10$ ,  $\tau_3 = 100$ ,  $\lambda_1 = 1,7$ ,  $\lambda_2 = 1,3$ ,  $\varepsilon_1 = 20$ ,  $\varepsilon_2 = 25$ ,  $k = 0,08$ ,  $\tau = 20\,000$ . При этом передатчик генерирует хаотический сигнал (рис. 3), а в приемнике при  $k = 0$  наблюдаются периодические колебания. В системах связи, основанных на обобщенной синхронизации, использование генератора периодических колебаний в приемнике имеет преимущества перед использованием генератора хаотических колебаний [17]. Обратим внимание, что передатчик и приемник имеют также расстройку по времени запаздывания и параметру инерционности, чтобы исключить возникновение режима полной синхронизации между ними.

Мы исследовали устойчивость предложенной схемы передачи информации к шуму, добавляя к временному ряду хаотического сигнала  $x(t)$ , передаваемого в канал связи, шум  $\xi(t)$  различной интенсивности, имеющий нормальное распределение, нулевое среднее и отфильтрованный таким же фильтром, как фильтр № 1 ведущей системы. Временная реализация зашумленного сигнала для случая, когда отношение сигнал/шум составляло  $-6$  дБ, приведена на рис. 3.

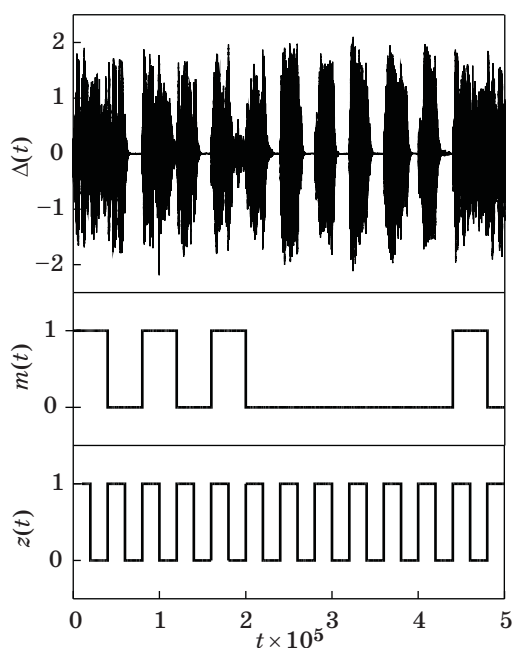
На рис. 4 показаны временные реализации информационного сигнала  $m(t)$ , управляющего сигнала  $z(t)$  и сигнала  $\Delta(t) = y(t) - y(t - \tau)$  на выходе разностного усилителя при отношении сигнал/шум, равном  $-6$  дБ. При  $m(t) = 0$  разность  $\Delta(t)$  демонстрирует незатухающие колебания при  $z(t) = 1$  и стремится к нулю при  $z(t) = 0$ , что указывает на существование обобщенной синхронизации между  $x(t)$  и  $y(t)$ . При передаче бинарной единицы ( $m(t) = 1$ ) сигнал  $\Delta(t)$  отличен от нуля при любом значении  $z(t)$ , что свидетельствует



■ Рис. 2. Блок-схемы ведущей (а) и ведомой (б) систем



■ Рис. 3. Фрагменты временных реализаций хаотического сигнала  $x(t)$  в отсутствие шума (черная кривая) и при наличии интенсивного аддитивного шума (серая кривая)



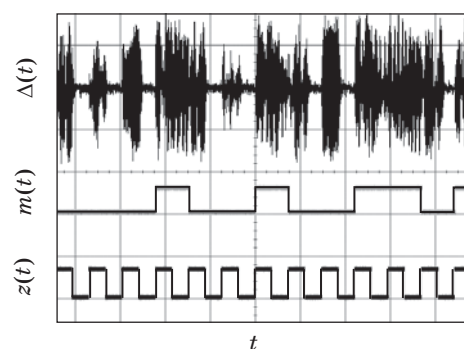
■ Рис. 4. Фрагменты временных реализаций сигналов  $\Delta(t)$ ,  $m(t)$  и  $z(t)$

об отсутствии обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами. Несмотря на очень высокий уровень шума, предложенная система связи позволяет выделить бинарный информационный сигнал.

### Экспериментальное исследование системы передачи информации

Предложенная система связи на основе обобщенной синхронизации реализована нами в радиофизическом эксперименте. Ведущая и ведомая системы в экспериментальной схеме представляли собой гибридные генераторы с запаздывающей обратной связью, состоящие из цифровых и аналоговых элементов. Линии задержки и нелинейные элементы были реализованы в цифровом виде на базе программируемых микроконтроллеров, а фильтры представляли собой аналоговые низкочастотные  $RC$ -фильтры первого порядка. Вспомогательные линии задержки № 1 и № 2 в приемнике (см. рис. 1) тоже были реализованы в цифровом виде с помощью микроконтроллера.

Параметры ведущей системы, описываемой уравнением (1), имели следующие значения:  $\tau_1 = 1,244$  мс,  $\tau_2 = 113$  мкс,  $\varepsilon_1 = R_1 C_1 = 113$  мкс,  $f_1(x) = \lambda_1 - x^2$ , где  $\lambda_1 = 1,7$ , — соответствующие хаотическому режиму колебаний. Параметры ведомой системы, описываемой уравнением (2), были выбраны следующими:  $\tau_3 = 1,13$  мс,  $\varepsilon_2 = R_2 C_2 = 287$  мкс,  $f_2(y) = \lambda_2 - y^2$ , где  $\lambda_2 = 1,3$ ,  $k = 0,138$ ,  $\tau = 185$  мс. При таких параметрах vedo-



■ Рис. 5. Осциллограммы временных реализаций фильтрованного разностного сигнала  $\Delta(t)$ , информационного сигнала  $m(t)$  и сигнала  $z(t)$  генератора прямоугольных импульсов

мая система в отсутствие связи находилась в режиме периодических колебаний.

Фрагменты экспериментальных временных реализаций разностного сигнала  $\Delta(t) = y(t) - y(t - \tau)$ , информационного сигнала  $m(t)$  и управляющего сигнала  $z(t)$  показаны на рис. 5. Для лучшей визуализации режима обобщенной синхронизации сигнал  $\Delta(t)$  отфильтрован фильтром нижних частот с частотой среза  $\nu = 200$  Гц. Временной масштаб по горизонтальной оси равен 500 мс/дел, а масштаб по вертикальной оси равен 200 мВ/дел для  $\Delta(t)$  и 5 В/дел для  $m(t)$  и  $z(t)$ .

Как видно из рис. 5, при передаче бинарной единицы амплитуда колебаний сигнала  $\Delta(t)$ , так же как и в рассмотренном выше численном примере, практически не зависит от амплитуды сигнала  $z(t)$ , что свидетельствует об отсутствии обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами. При передаче бинарного нуля амплитуда колебаний сигнала  $\Delta(t)$ , хотя и не падает до нуля, оказывается заметно меньше при более низких значениях  $z(t)$ . Такое резкое уменьшение амплитуды  $\Delta(t)$  при изменении  $z(t)$  является признаком того, что обобщенная синхронизация между ведущей и ведомой системами существует.

### Заключение

Нами предложена система передачи информации, основанная на использовании режима обобщенной синхронизации между передатчиком и приемником. В отличие от других систем связи на основе обобщенной синхронизации, предложенная схема содержит лишь одну ведомую автоколебательную систему в приемнике. Отсутствие вспомогательной системы в приемнике позволяет избежать технических трудностей, характерных для основанных на обобщенной синхронизации систем связи и обусловленных необходимостью



обеспечить в эксперименте идентичность двух генераторов в приемнике.

Для диагностики режима обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами предложено поочередно воздействовать на ведомую систему сигналом ведущей системы и задержанной копией этого сигнала. Работоспособность рассмотренной системы передачи информации

продемонстрирована для случая, когда в качестве ведущей и ведомой систем использованы генераторы с запаздывающей обратной связью.

Предложенная схема связи исследована численно и реализована экспериментально. Показана ее высокая устойчивость к шуму в канале связи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-02-00091.

## Литература

1. Kocarev L., et al. Experimental Demonstration of Secure Communications via Chaotic Synchronization / L. Kocarev, K. S. Halle, K. Eckert, L. O. Chua, U. Parlitz // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1992. Vol. 2. P. 709–713. doi:10.1142/S0218127492000823
2. Parlitz U., et al. Transmission of Digital Signals by Chaotic Synchronization / U. Parlitz, L. O. Chua, L. Kocarev, K. S. Halle, A. Shang // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1992. Vol. 2. P. 973–977. doi:10.1142/S0218127492000562
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. García-Ojalvo J., Roy R. Spatiotemporal Communication with Synchronized Optical Chaos // *Physical Review Letters*. 2001. Vol. 86. P. 5204–5207. doi:10.1103/PhysRevLett.86.5204
5. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. — М.: Физматлит, 2002. — 252 с.
6. Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Extracting Information Masked by the Chaotic Signal of a Time-Delay System // *Physical Review E*. 2002. Vol. 66. 026215. doi:10.1103/PhysRevE.66.026215
7. 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(65). С. 30–35.
8. 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
9. Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Караваев А. С., Прохоров М. Д. Система связи, основанная на синхронизации систем с задержкой с переключением хаотических режимов // *Информационно-управляющие системы*. 2015. № 3(76). С. 85–91. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.85
10. Karavaev A. S., Kulminskiy D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. An Experimental Communication Scheme Based on Chaotic Time-Delay System with Switched Delay // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2015. Vol. 25. 1550134. doi:10.1142/S0218127415501345
11. Chen J. Y., Wong K. W., Cheng L. M., Shuai J. W. A Secure Communication Scheme Based on the Phase Synchronization of Chaotic Systems // *Chaos*. 2003. Vol. 13. P. 508–514. doi: 10.1063/1.1564934
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/UFNr.0179.200912c.1281
13. Короновский А. А., Москаленко О. И., Попов П. В., Храмов А. Е. Способ скрытой передачи информации, основанный на явлении обобщенной синхронизации // *Известия РАН. Серия физическая*. 2008. Т. 72. № 1. С. 143–147.
14. Moskalenko O. I., Koronovskii A. A., Hramov A. E. Generalized Synchronization of Chaos for Secure Communication: Remarkable Stability to Noise // *Physics Letters A*. 2010. Vol. 374. P. 2925–2931. doi:10.1016/j.physleta.2010.05.024
15. 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. В. 4. С. 1–8.
16. Abarbanel H. D. I., Rulkov N. F., Sushchik M. M. Generalized Synchronization of Chaos: The Auxiliary System Approach // *Physical Review E*. 1996. Vol. 53. P. 4528–4535. doi:10.1103/PhysRevE.53.4528
17. Короновский А. А. и др. Обобщенная синхронизация в случае воздействия хаотического сигнала на периодическую систему / А. А. Короновский, О. И. Москаленко, А. С. Павлов, Н. С. Фролов, А. Е. Храмов // *Журнал технической физики*. 2014. Т. 84. Вып. 5. С. 1–8.

UDC 537.86

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.42

**Communication System based on Generalized Chaotic Synchronization**Kul'minskii D. D.<sup>a</sup>, Junior Researcher, kulminskydd@gmail.comPonomarenko V. I.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Associate Professor, ponomarenkovi@gmail.comProkhorov M. D.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Associate Professor, mdprokhorov@yandex.ruBezruchko B. P.<sup>b</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, bezruchkobp@gmail.com<sup>a</sup>Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 38, Zelyonaya St., 410019, Saratov, Russian Federation<sup>b</sup>Saratov State University, 83, Astrakhanskaya St., 410012, Saratov, Russian Federation

**Introduction:** Communication systems based on the regime of generalized chaotic synchronization between transmitter and receiver conventionally use two identical generators in the receiver. Their development is often a technically difficult problem. **Purpose:** The goal is the development and research of a communication scheme based on generalized chaotic synchronization when the receiver contains only one generator. This would eliminate the problem of ensuring the identity of two generators in the receiver. **Results:** A data transmission scheme is proposed, based on the regime of generalized chaotic synchronization, which has only one self-oscillating response system in the receiver. To detect the regime of generalized synchronization between the drive system (transmitter) and response system (receiver), a single response system is affected in turn by the drive system signal and its delayed copy. After that, it is checked whether the response system exhibits similar dynamics. In the absence of generalized synchronization, the response system shows different oscillations under the driving by the same signal, but in the presence of generalized synchronization, the response system dynamics is identical in both cases after the transient process is over. The efficacy of the proposed communication system is shown for the case when time-delay generators are used as the drive and response systems. Numerical investigation of the scheme have been carried out. The scheme has shown a high resistance to noise in the transmission channel. The developed communication system is experimentally implemented. Its efficacy has been demonstrated for the case of binary information signal transmission. **Practical relevance:** The proposed system of information transmission allows one to avoid the technical difficulties common in communication systems based on generalized synchronization caused by the necessity to create two identical generators in the receiver.

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

**References**

- 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
- 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
- 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
- Garc a-Ojalvo J., Roy R. Spatiotemporal Communication with Synchronized Optical Chaos. *Physical Review Letters*, 2001, vol. 86, pp. 5204–5207. doi:10.1103/PhysRevLett.86.5204
- Dmitriev A. S., Panas A. I. *Dinamicheskii khaos: novye nositeli informatsii dlya sistem svyazi* [Dynamical Chaos: New Information Carriers for Communication Systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 252 p. (In Russian).
- Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Extracting Information Masked by the Chaotic Signal of a Time-Delay System. *Physical Review E*, 2002, vol. 66, 026215. doi:10.1103/PhysRevE.66.026215
- Karavaev A. S., Kul'minskii D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. System of Digital Transmission of Information Masked by Chaotic Signal of Time-Delay System. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 4(65), pp. 30–35 (In Russian).
- 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
- Kul'minskii D. D., Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Prokhorov M. D. Communication System Based on Synchronization of Time-Delay Systems with Switching of Chaotic Regimes. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 3(76), pp. 85–91 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.85
- Karavaev A. S., Kulminskiy D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. An Experimental Communication Scheme Based on Chaotic Time-Delay System with Switched Delay. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2015, vol. 25, 1550134. doi:10.1142/S0218127415501345
- Chen J. Y., Wong K. W., Cheng L. M., Shuai J. W. A Secure Communication Scheme Based on the Phase Synchronization of Chaotic Systems. *Chaos*, 2003, vol. 13, pp. 508–514. doi: 10.1063/1.1564934
- Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. On the Use of Chaotic Synchronization for Secure Communication. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2009, vol. 179, pp. 1213–1238 (In Russian). doi:10.3367/UFNe.0179.200912c.1281
- Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Popov P. V., Hramov A. E. Method for Secure Data Transmission Based on Generalized Synchronization. *Izvestia RAN. Seriya fizicheskaya*, 2008, vol. 72, pp. 131–135 (In Russian). doi:10.3103/S1062873808010309
- Moskalenko O. I., Koronovskii A. A., Hramov A. E. Generalized Synchronization of Chaos for Secure Communication: Remarkable Stability to Noise. *Physics Letters A*, 2010, vol. 374, pp. 2925–2931. doi:10.1016/j.physleta.2010.05.024
- 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 (In Russian). doi:10.1134/S1063784210040018
- Abarbanel H. D. I., Rulkov N. F., Sushchik M. M. Generalized Synchronization of Chaos: The Auxiliary System Approach. *Physical Review E*, 1996, vol. 53, pp. 4528–4535. doi:10.1103/PhysRevE.53.4528
- Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Pavlov A. S., Frolov N. S., Hramov A. E. Generalized Synchronization in the Action of a Chaotic Signal on a Periodic System. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2014, vol. 84, iss. 5, pp. 1–8 (In Russian). doi:10.1134/S1063784214050132