



МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ОБОБЩЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К СИСТЕМАМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

*В. И. Пономаренко^{1,2}, М. Д. Прохоров¹, А. А. Короновский²,
О. И. Москаленко², А. Е. Храмов^{2,3}*

¹Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

²Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

³Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

Предложен метод диагностики обобщенной синхронизации, не использующий вспомогательную систему. Метод работает в реальном времени и основан на использовании лишь одной ведомой системы, на которую поочередно подаются сигнал ведущей системы и его задержанная копия. На основе предложенного метода построена система скрытой передачи информации, демонстрирующая высокую устойчивость к шумам в канале связи. Эффективность предложенной системы связи продемонстрирована при численном моделировании и в радиофизическом эксперименте.

Ключевые слова: Обобщенная синхронизация, системы скрытой передачи информации, системы с запаздыванием.

Введение

Разработка систем скрытой передачи информации, основанных на использовании различных видов хаотической синхронизации, является одним из актуальных направлений современной радиофизики и нелинейной динамики. К настоящему времени предложено большое количество разнообразных систем связи на основе синхронизации хаотических динамических систем [1–11]. Наряду с неоспоримыми достоинствами, такими как широкополосный спектр мощности, высокая скорость передачи информации и простота аппаратурной реализации, многие системы связи, основанные на явлении хаотической синхронизации, имеют и существенные недостатки. Основным недостатком абсолютного большинства известных систем связи, затрудняющим их использование на практике, является низкая устойчивость к шумам и искажениям сигнала в канале связи. Исключением из правила являются системы передачи информации, основанные на явлении обобщенной синхронизации [12–14], которые обладают очень высокой устойчивостью к шумам и флуктуациям в канале связи.

Обобщенная синхронизация может наблюдаться между двумя однонаправленно связанными хаотическими осцилляторами – ведущим $x(t)$ и ведомым $y(t)$ – и означает наличие функционального соотношения $y(t) = F[x(t)]$ [15]. Для диагностики режима обобщенной синхронизации применяют метод расчета условных ляпуновских экспонент [16], метод вспомогательной системы [17], метод ближайших соседей [15] и его дальнейшее развитие – метод фазовых трубок [18], а также методы, основанные на взаимной информации [19], расчете так называемого «обобщенного угла» [20], статистическом моделировании [21] и динамическом Байесовском подходе [22].

Наиболее широко используемым и относительно легко реализуемым из перечисленных методов является метод вспомогательной системы. Он наиболее привлекателен в физическом эксперименте, поскольку его можно использовать в реальном времени в отличие от других методов, требующих записи сигналов и их последующей обработки.

Метод вспомогательной системы заключается в использовании вспомогательной системы $v(t)$, являющейся точной копией системы $y(t)$. Начальные условия для $v(t)$ выбираются отличными от начального состояния для $y(t)$, однако лежащими в бассейне притяжения того же аттрактора. Если после завершения переходного процесса состояния ведомой и вспомогательной систем становятся идентичными, $y(t) \equiv v(t)$, то имеет место обобщенная синхронизация между системами $x(t)$ и $y(t)$. Однако для реализации этого метода в физическом эксперименте необходимо решить задачу построения двух идентичных автогенераторов (ведомого и вспомогательного). Это достаточно сложная техническая задача, особенно при работе на высоких частотах.

В настоящей работе предложен новый метод диагностики обобщенной синхронизации, позволяющий обойтись без использования вспомогательной системы. Так же, как и метод вспомогательной системы, предлагаемый подход может быть использован в реальном времени и применен к экспериментальным системам. На основе предложенного метода построена система скрытой передачи информации, демонстрирующая высокую устойчивость к шумам. Эта система связи исследована численно и реализована в физическом эксперименте, представляющем пример построения первой экспериментальной системы передачи информации на основе обобщенной синхронизации.

1. Описание метода и схема передачи информации на его основе

Мы предлагаем метод диагностики обобщенной синхронизации в системе двух однонаправленно связанных осцилляторов, который использует лишь одну ведомую систему, на которую поочередно подаются сигнал ведущей системы и его задержанная копия. Если мы подействуем на автоколебательную ведомую систему два раза одним и тем же сигналом ведущей системы и сравним ее динамику в первом и втором случаях, то мы увидим, что в отсутствие обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами динамика ведомой системы будет разной. Однако при наличии обобщенной синхронизации ведомая система будет демонстрировать после

переходного процесса одинаковые колебания в обоих случаях воздействия на нее идентичным сигналом. Для воздействия на ведомую систему два раза одинаковым сигналом будем использовать линию задержки.

Сначала в течение времени τ будем воздействовать на ведомую систему $y(t)$ сигналом ведущей системы $x(t)$. Затем в течение того же времени τ будем воздействовать на ту же ведомую систему $y(t)$ сигналом системы $x(t)$, задержанным на время τ . Этот задержанный сигнал будем подавать на систему $y(t)$ с выхода линии задержки, имеющей время запаздывания, равное τ . Наконец, сравним динамику ведомой системы в этих двух случаях. Для этого найдем разность между сигналом на выходе ведомой системы и сигналом ведомой системы, прошедшим через еще одну линию задержки со временем запаздывания τ . При наличии обобщенной синхронизации эта разность будет равна нулю после завершения переходного процесса.

На основе описанного метода диагностики обобщенной синхронизации нами предложена система скрытой передачи информации. Блок-схема этой системы связи представлена на рис. 1.

Информационный сигнал $m(t)$, состоящий из последовательности битов 0 и 1, модулирует один из параметров ведущей системы. Хаотический сигнал $x(t)$ с выхода передатчика передается в канал связи. Приемник состоит из автоколебательной ведомой системы, двух одинаковых линий задержки со временем запаздывания τ , генератора прямоугольных импульсов, коммутатора и разностного усилителя. Параметры схемы выбраны таким образом, чтобы обобщенная синхронизация между приемником и передатчиком наблюдалась только при передаче бинарного 0.

Сигнал $z(t)$ генератора прямоугольных импульсов управляет коммутирующим устройством, которое переключает сигнал воздействия на ведомую систему. В течение одной половины периода сигнала $z(t)$ на ведомую систему подается сигнал $x(t)$ из канала связи, а в течение другой половины периода – сигнал $x(t - \tau)$ с выхода первой линии задержки ЛЗ-1. Период T сигнала $z(t)$ выбран таким, чтобы переходный процесс, предшествующий возникновению обобщенной синхронизации, закончился за время, меньшее $T/2$. Время запаздывания первой линии задержки равно $\tau = T/2$.

Для сравнения сигналов ведомой системы в случае воздействия на нее сигналами $x(t)$ и $x(t - \tau)$ мы использовали вторую линию задержки ЛЗ-2, имеющую такое же время запаздывания, как и ЛЗ-1. Мы поместили в приемник разностный усилитель и исследовали разность $\Delta(t) = y(t) - y(t - \tau)$ сигналов на его выходе. Во второй

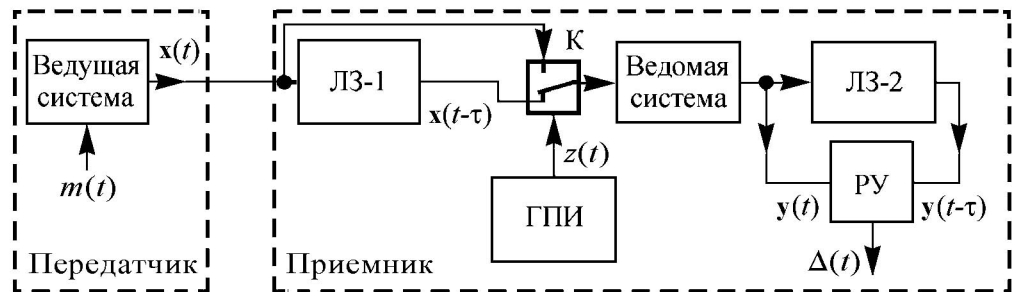


Рис. 1. Блок-схема системы передачи информации на основе обобщенной синхронизации. ЛЗ-1 и ЛЗ-2 – линии задержки, ГПИ – генератор прямоугольных импульсов, К – коммутатор, РУ – разностный усилитель

половине периода сигнала $z(t)$ разность $\Delta(t)$ обращается в нуль после завершения переходного процесса, если ведущая и ведомая системы находятся в режиме обобщенной синхронизации. В отсутствие обобщенной синхронизации разность $\Delta(t)$ отлична от нуля в течение всей второй половины периода сигнала $z(t)$. Для лучшей визуализации режима обобщенной синхронизации к выходу разностного усилителя можно дополнительно подключить детектор и фильтр нижних частот.

В течение первой половины периода сигнала $z(t)$ разность $\Delta(t)$ не содержит полезной информации для диагностики обобщенной синхронизации. В течение этого интервала времени $\Delta(t)$ демонстрирует незатухающие колебания, похожие на те, которые наблюдаются во второй половине периода $z(t)$ при отсутствии обобщенной синхронизации между $x(t)$ и $y(t)$.

2. Численное исследование системы передачи информации на основе обобщенной синхронизации

Проиллюстрируем работу предложенной системы передачи информации на основе обобщенной синхронизации (см. рис. 1) для случая, когда ведущая и ведомая системы представляют собой генераторы с запаздывающей обратной связью. На рис. 2, а приведена блок-схема ведущей системы, состоящей из двух линий задержки ЛЗ-3 и ЛЗ-4 с временами запаздывания τ_1 и τ_2 , соответственно, нелинейного элемента НЭ-1 и линейного фильтра нижних частот $\Phi-1$. Бинарный информационный сигнал $m(t)$ управляет коммутатором, переключающим время запаздывания в системе таким образом, что, когда передается бинарный 0, время запаздывания равно τ_1 , а когда передается бинарная 1, оно равно $\tau_1 + \tau_2$. Ведущая система описывается дифференциальным уравнением первого порядка с запаздыванием

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

где $x(t)$ – состояние системы в момент времени t ; ε_1 – параметр, характеризующий инерционность системы; f_1 – нелинейная функция. Сигнал $x(t)$ с выхода фильтра передается в канал связи. Отметим, что в интересах конфиденциальности передачи данных сигналы передатчика должны иметь сходные спектральные и статистические свойства при временах запаздывания τ_1 и $\tau_1 + \tau_2$.

Блок-схема ведомой системы, состоящей из линии задержки, нелинейного элемента и линейного фильтра нижних частот, приведена на рис. 2, б. Линия задержки ЛЗ-5 имеет такое же время запаздывания τ_1 , как и ЛЗ-3. Нелинейный элемент НЭ-2 и фильтр $\Phi-2$ ведомой системы в общем случае могут

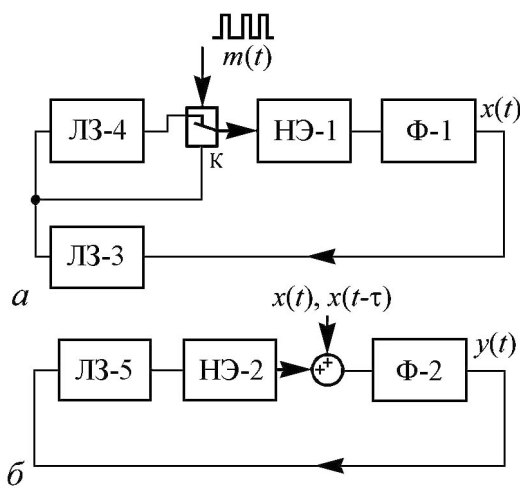


Рис. 2. Блок-схемы ведущей (а) и ведомой системы (б). ЛЗ-3, ЛЗ-4 и ЛЗ-5 – линии задержки, НЭ-1 и НЭ-2 – нелинейные элементы, $\Phi-1$ и $\Phi-2$ – фильтры, К – коммутатор

отличаться от НЭ-1 и Ф-1 ведущей системы. На ведомую систему по очереди действуют сигналы $x(t)$ и $x(t - \tau)$. Она описывается следующим уравнением:

$$\varepsilon_2 \dot{y}(t) = -y(t) + f_2(y(t - \tau_1)) + k \left(z(t)x(t) + \overline{z(t)}x(t - \tau) \right), \quad (2)$$

где ε_2 – параметр инерционности, f_2 – нелинейная функция, k – коэффициент связи, $\overline{z(t)}$ – инверсия сигнала $z(t)$ генератора прямоугольных импульсов. Одну половину периода $z(t)$ на ведомую систему воздействует сигнал $x(t)$ (в этом случае $z(t) = 1$, а $\overline{z(t)} = 0$), а другую половину периода – сигнал $x(t - \tau)$ (в этом случае $z(t) = 0$, а $\overline{z(t)} = 1$).

Рассмотрим случай, когда нелинейные элементы НЭ-1 и НЭ-2 обеспечивают квадратичное преобразование, а фильтры Ф-1 и Ф-2 представляют собой низкочастотные фильтры Баттерворта первого порядка с частотой среза $\nu_1 = 1/\varepsilon_1$ и $\nu_2 = 1/\varepsilon_2$, соответственно. Выберем следующие значения параметров системы связи: $\tau_1 = 100$, $\tau_2 = 10$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2$ ($\nu_1 = \nu_2 = 0.5$), $f_1(x) = \lambda_1 - x^2$, $f_2(y) = \lambda_2 - y^2$, где $\lambda_1 = 1.7$ и $\lambda_2 = 1.3$ – параметры нелинейности, $k = 0.13$, $\tau = 20000$ ($T = 40000$). При этих параметрах передатчик генерирует хаотический сигнал $x(t)$ (рис. 3), а приемник демонстрирует в отсутствие связи ($k = 0$) периодические колебания. Было показано, что в системах передачи информации на основе обобщенной синхронизации использование периодического режима в приемнике имеет ряд преимуществ перед использованием хаотического режима [23].

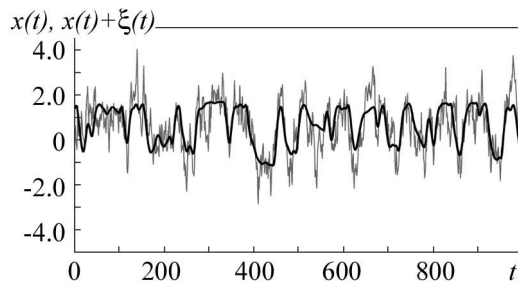


Рис. 3. Временные реализации хаотического сигнала $x(t)$ ведущей системы в отсутствие шума (черная кривая) и при наличии интенсивного аддитивного шума (серая кривая)

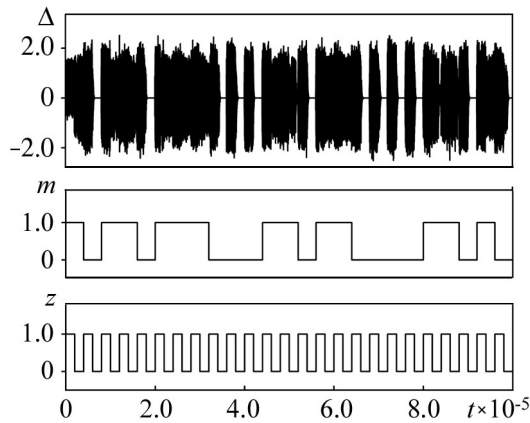


Рис. 4. Временные реализации сигналов $\Delta(t)$, $m(t)$ и $z(t)$

Для исследования устойчивости к шуму предложенной системы передачи информации мы добавляли к временно-му ряду хаотического сигнала $x(t)$, передаваемого в канал связи, гауссов шум $\xi(t)$ с нулевым средним, отфильтрованный в полосе частот хаотической несущей. На рис. 3 серым цветом показан фрагмент временной реализации зашумленного сигнала $x(t)$ для случая, когда дисперсия шумового сигнала $\xi(t)$ равняется дисперсии сигнала $x(t)$ на выходе передатчика, то есть отношение сигнал/шум равно 0 дБ.

На рис. 4 приведен фрагмент временной реализации сигнала $\Delta(t) = y(t) - y(t - \tau)$ на выходе приемника для случая, когда отношение сигнал/шум равно 0 дБ, а также фрагменты временных реализаций сигналов $m(t)$ и $z(t)$. При передаче бинарного нуля ($m(t) = 0$) разность $\Delta(t)$ отлична от нуля при $z(t) = 1$ и равна нулю при $z(t) = 0$, что указывает на наличие обобщенной

синхронизации между ведущей и ведомой системами. При $m(t) = 1$ сигнал $\Delta(t)$ отличен от нуля как при $z(t) = 1$, так и при $z(t) = 0$, что указывает на отсутствие обобщенной синхронизации между $x(t)$ и $y(t)$. Таким образом, предложенная система передачи информации остается работоспособной, несмотря на очень высокий уровень шума в канале связи.

3. Экспериментальное исследование системы связи на основе обобщенной синхронизации

Предложенная схема передачи информации реализована нами в радиофизическом эксперименте, в котором ведущая и ведомая системы с запаздыванием состояли из аналогового низкочастотного RC -фильтра первого порядка и цифровых линий задержки и нелинейного элемента, выполненных на программируемом микроконтроллере. Так же как и в численном эксперименте, нелинейные элементы экспериментальной схемы обеспечивали квадратичное преобразование.

Ведущая система описывается уравнением (1) со следующими значениями параметров: $\tau_1 = 930$ мкс, $\tau_2 = 93$ мкс, $\varepsilon_1 = R_1C_1 = 47$ мкс, $f_1(x) = \lambda_1 - x^2$, где $\lambda_1 = 1.7$, при которых она генерирует хаотический сигнал. Ведомая система описывается уравнением (2) с $\tau_1 = 930$ мкс, $\varepsilon_2 = R_2C_2 = 95$ мкс, $f_2(y) = \lambda_2 - y^2$, где $\lambda_2 = 1.3$, $k = 0.1$, $\tau = 90$ мс ($T = 180$ мс) и генерирует в отсутствие связи периодические колебания. Вспомогательные линии задержки ЛЗ-1 и ЛЗ-2 в приемнике (см. рис. 1) тоже выполнены на микроконтроллере с использованием встроенных 12-битных аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей.

На рис. 5 приведены фрагменты экспериментальных временных реализаций сигнала $x(t)$ и разностного сигнала $\Delta(t)$, отфильтрованного фильтром нижних частот с частотой среза $\nu = 200$ Гц, для случая передачи бинарного нуля. На рис. 5 показан также фрагмент временной реализации сигнала $z(t)$. Временной масштаб по горизонтальной оси равен 200 мс/дел, а масштаб по вертикальной оси равен 1 В/дел, 5 В/дел и 200 мВ/дел для $x(t)$, $z(t)$ и $\Delta(t)$, соответственно.

Как видно из рис. 5, амплитуда колебаний сигнала $\Delta(t)$ заметно выше при более высоких значениях $z(t)$, чем при более низких значениях $z(t)$. Резкое уменьшение амплитуды $\Delta(t)$ при изменении $z(t)$ указывает на наличие обобщенной синхронизации между ведущей и ведомой системами.

На рис. 6 приведены фрагменты экспериментальных временных реализаций сигналов $x(t)$, $z(t)$ и $\Delta(t)$ для случая передачи бинарной единицы. Так же, как и в рассмотренном выше случае, разностный сигнал $\Delta(t)$ отфильтрован фильтром нижних частот с частотой среза $\nu = 200$ Гц. Масштабы по осям на рис. 6 такие же, как на рис. 5. В отличие от рис. 5, соответствующего передаче бинарного нуля, амплитуда колебаний сигнала $\Delta(t)$ на рис. 6 практически не зависит от амплитуды сигнала $z(t)$, что указывает на отсутствие обобщенной синхронизации между $x(t)$ и $y(t)$.

Рассмотренный пример является первой экспериментальной реализацией системы передачи информации на основе обобщенной синхронизации. В дальнейшем мы планируем исследовать эту систему более подробно. Следует отметить, что рассмотренная система связи имеет ограничение на скорость передачи информации. Это связано с длительным переходным процессом, предшествующим установлению ре-

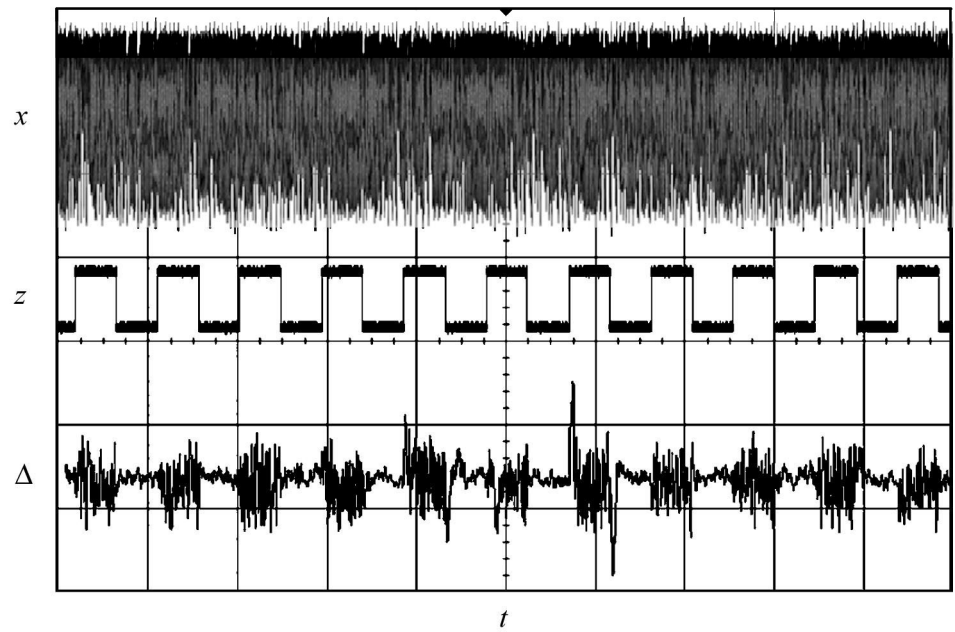


Рис. 5. Осциллограммы временных реализаций хаотического сигнала $x(t)$ в канале связи, сигнала $z(t)$ и фильтрованного разностного сигнала $\Delta(t)$ при $m(t) = 0$

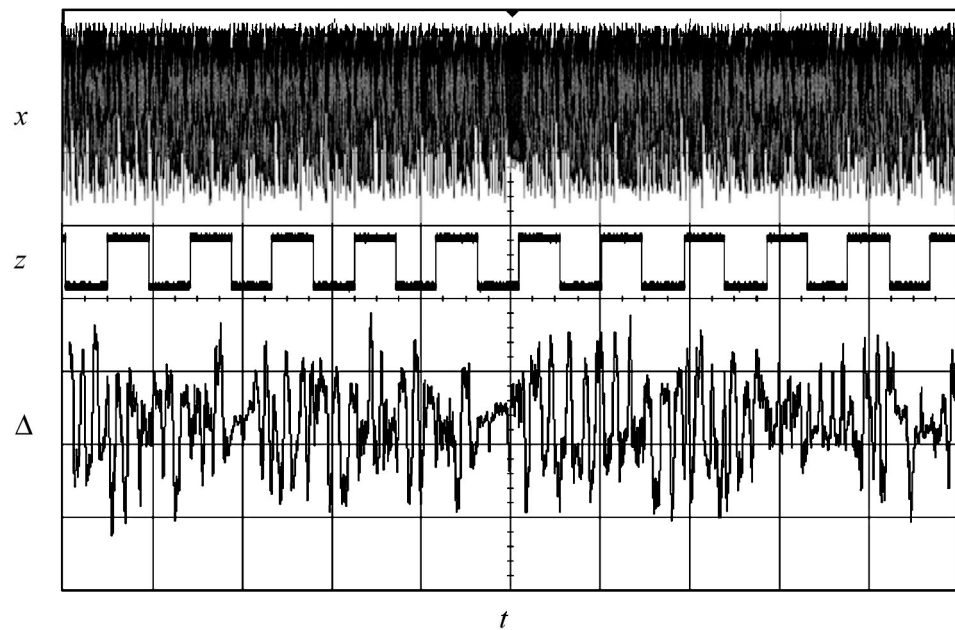


Рис. 6. Осциллограммы временных реализаций хаотического сигнала $x(t)$ в канале связи, сигнала $z(t)$ и фильтрованного разностного сигнала $\Delta(t)$ при $m(t) = 1$

жима обобщенной синхронизации в генераторах с запаздывающей обратной связью, использованных нами для построения ведущей и ведомой систем. Однако скорость передачи информации можно существенно повысить, выбрав в качестве ведущей и ведомой систем другие генераторы, имеющие небольшое время переходного процесса, предшествующего установлению обобщенной синхронизации.

Заключение

Нами предложен метод диагностики обобщенной синхронизации, который можно применять в реальном времени. Он не использует вспомогательную систему и не требует записи исследуемых сигналов для их последующей обработки. На основе предложенного метода построена система скрытой передачи информации, использующая режим обобщенной синхронизации между передатчиком и приемником. Приемник системы связи содержит лишь одну ведомую автоколебательную систему, на которую поочередно подаются сигнал ведущей системы и его задержанная копия. Работоспособность схемы продемонстрирована при использовании в качестве ведущей и ведомой систем генераторов с запаздывающей обратной связью.

Предложенная система передачи информации исследована численно и реализована в радиофизическом эксперименте. Проиллюстрирована ее эффективность при передаче бинарного информационного сигнала. Показано, что предложенная схема передачи информации обладает высокой устойчивостью к шумам в канале связи.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 14-12-00324.

Библиографический список

1. *Kocarev L., Halle K.S., Eckert K., Chua L.O., Parlitz U.* Experimental demonstration of secure communications via chaotic synchronization // *Int. J. Bifurc. Chaos.* 1992. Vol. 2. P. 709.
2. *Parlitz U., Chua L.O., Kocarev L., Halle K.S., Shang A.* Transmission of digital signals by chaotic synchronization // *Int. J. Bifurc. Chaos.* 1992. Vol. 2. P. 973.
3. *Cuomo K.M., Oppenheim A.V.* Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 71. P. 65.
4. *Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O.* Experiments on speech and music signals transmission using chaos // *Int. J. Bifurc. Chaos.* 1995. Vol. 5. P. 1249.
5. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. Москва: Физматлит, 2002.
6. *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.
7. *Tao Y.* A survey of chaotic secure communication systems // *Int. J. Comput. Cogn.* 2004. Vol. 2. P. 81.

8. *Argyris A., Syvridis D., Larger L., Annovazzi-Lodi V., Colet P., Fischer I., García-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. P. 343.
9. *Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е.* О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации // *УФН*. 2009. Т. 179. С. 1281.
10. *Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Kulminskiy D.D.* An experimental digital communication scheme based on chaotic time-delay system // *Nonlinear Dyn.* 2013. Vol. 74. P. 1013.
11. *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 // *Int. J. Bifurc. Chaos*. 2015. Vol. 25. 1550134.
12. *Короновский А.А., Москаленко О.И., Понов П.В., Храмов А.Е.* Способ скрытой передачи информации, основанный на явлении обобщенной синхронизации // *Изв. РАН. Сер. физическая*. 2008. Т. 72. № 1. С. 143.
13. *Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е.* Скрытая передача информации на основе режима обобщенной синхронизации в присутствии шумов // *ЖТФ*. 2010. Т. 80. В. 4. С. 1.
14. *Moskalenko O.I., Koronovskii A.A., Hramov A.E.* Generalized synchronization of chaos for secure communication: Remarkable stability to noise // *Phys. Lett. A*. 2010. Vol. 374. P. 2925.
15. *Rulkov N.F., Sushchik M.M., Tsimring L.S., Abarbanel H.D.I.* Generalized synchronization of chaos in directionally coupled chaotic systems // *Phys. Rev. E*. 1995. Vol. 51. P. 980.
16. *Pyragas K.* Weak and strong synchronization of chaos // *Phys. Rev. E*. 1996. Vol. 54. P. R4508.
17. *Abarbanel H.D.I., Rulkov N.F., Sushchik M.M.* Generalized synchronization of chaos: The auxiliary system approach // *Phys. Rev. E*. 1996. Vol. 53. P. 4528.
18. *Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Hramov A.E.* Nearest neighbors, phase tubes, and generalized synchronization // *Phys. Rev. E*. 2011. Vol. 84. 037201.
19. *Paluš M., Komárek V., Hrnčíř Z., Štěrbová K.* Synchronization as adjustment of information rates: Detection from bivariate time series // *Phys. Rev. E*. 2001. Vol. 63. 046211.
20. *Liu Z., Zhou J., Munakata T.* Detecting generalized synchronization by the generalized angle // *Europhys. Lett.* 2009. Vol. 87. 50002.
21. *Schumacher J., Haslinger R., Pipa G.* Statistical modeling approach for detecting generalized synchronization // *Phys. Rev. E*. 2012. Vol. 85. 056215.
22. *Stankovski T., McClintock P.V.E., Stefanovska A.* Dynamical inference: Where phase synchronization and generalized synchronization meet // *Phys. Rev. E*. 2014. Vol. 89. 062909.
23. *Короновский А.А., Москаленко О.И., Павлов А.С., Фролов Н.С., Храмов А.Е.* Обобщенная синхронизация в случае воздействия хаотического сигнала на периодическую систему // *ЖТФ*. 2014. Т. 84. Вып. 5. С. 1.

Поступила в редакцию 2.11.2015

METHOD FOR GENERALIZED SYNCHRONIZATION DETECTING AND ITS APPLICATION TO COMMUNICATION SYSTEMS

*V.I. Ponomarenko^{1,2}, M.D. Prokhorov¹, A.A. Koronovskii²,
O.I. Moskalenko², A.E. Hramov^{2,3}*

¹Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering
and Electronics of Russian Academy of Sciences,

²Saratov State University

³Saratov State Technical University

A method is proposed for generalized synchronization detection which does not exploit an auxiliary system. The method operates in a real time and uses a single response system that is driven alternately by the drive system signal and its delayed copy. A system of secure communication based on the proposed method is developed that has high resistance to noises of a transmission channel. The proposed communication system is studied both numerically and experimentally.

Keywords: Generalized synchronization, systems of hidden data transmission, time-delay systems.

References

1. *Kocarev L., Halle K.S., Eckert K., Chua L.O., Parlitz U.* // Int. J. Bifurc. Chaos. 1992. Vol. 2. P. 709.
2. *Parlitz U., Chua L.O., Kocarev L., Halle K.S., Shang A.* // Int. J. Bifurc. Chaos. 1992. Vol. 2. P. 973.
3. *Cuomo K.M., Oppenheim A.V.* // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71. P. 65.
4. *Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O.* // Int. J. Bifurc. Chaos. 1995. Vol. 5. P. 1249.
5. *Dmitriev A.S., Panas A.I.* Dynamical Chaos: New Information Carriers for Communication Systems. Moscow: Fizmatlit, 2002. (in Russian).
6. *Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D.* // J. Commun. Technol. El. 2004. Vol. 49. P. 1031.
7. *Tao Y.* // Int. J. Comput. Cogn. 2004. Vol. 2. P. 81.
8. *Argyris A., Syvridis D., Larger L., Annovazzi-Lodi V., Colet P., Fischer I., García-Ojalvo J., Mirasso C.R., Pesquera L., Shore K.A.* // Nature. 2005. Vol. 437. P. 343.
9. *Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Hramov A.E.* // Physics-Uspekhi. 2009. Vol. 52. P. 1213.
10. *Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D., Karavaev A.S., Kulminskiy D.D.* // Nonlinear Dyn. 2013. Vol. 74. P. 1013.
11. *Karavaev A.S., Kulminskiy D.D., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D.* // Int. J. Bifurc. Chaos. 2015. Vol. 25. 1550134.
12. *Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Popov P.V., Hramov A.E.* // Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. 2008. Vol. 72. P. 131.
13. *Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Hramov A.E.* // Tech. Phys. 2010. Vol. 55. P. 435.
14. *Moskalenko O.I., Koronovskii A.A., Hramov A.E.* // Phys. Lett. A. 2010. Vol. 374. P. 2925.
15. *Rulkov N.F., Sushchik M.M., Tsimring L.S., Abarbanel H.D.I.* // Phys. Rev. E. 1995. Vol. 51. P. 980.

16. *Pyragas K.* // Phys. Rev. E. 1996. Vol. 54. P. R4508.
17. *Abarbanel H.D.I., Rulkov N.F., Sushchik M.M.* // Phys. Rev. E. 1996. Vol. 53. P. 4528.
18. *Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Hramov A.E.* // Phys. Rev. E. 2011. Vol. 84. 037201.
19. *Paluš M., Komárek V., Hrnčíř Z., Štěrbová K.* // Phys. Rev. E. 2001. Vol. 63. 046211.
20. *Liu Z., Zhou J., Munakata T.* // Europhys. Lett. 2009. Vol. 87. 50002.
21. *Schumacher J., Haslinger R., Pipa G.* // Phys. Rev. E. 2012. Vol. 85. 056215.
22. *Stankovski T., McClintock P.V.E., Stefanovska A.* // Phys. Rev. E. 2014. Vol. 89. 062909.
23. *Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Pavlov A.S., Frolov N.S., Hramov A.E.* // Tech. Phys. 2014. Vol. 59. P. 629.



Пономаренко Владимир Иванович – родился в Саратове (1960). Окончил Саратовский государственный университет (1982). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1992) и доктора физико-математических наук (2008). Ведущий научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники РАН. Профессор кафедры динамических систем СГУ. Область научных интересов – статистическая радиофизика, анализ временных рядов, нелинейная динамика и ее приложения. Автор более 200 научных публикаций.
410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: ponomarenkovi@gmail.com



Прохоров Михаил Дмитриевич – родился в Саратове (1968). Окончил Саратовский государственный университет (1992). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1997) и доктора физико-математических наук (2008). Заведующий лабораторией Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Область научных интересов – нелинейная динамика и ее приложения, математическое моделирование, анализ временных рядов. Имеет более 200 научных публикаций.
410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
E-mail: mdprokhorov@yandex.ru



Короновский Алексей Александрович – родился в Саратове (1972). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1995), доктор физико-математических наук (2007), проректор по научно-исследовательской работе СГУ, заведующий кафедрой физики открытых систем СГУ. Область научных интересов – нелинейная динамика и ее проявления в различных сферах человеческой деятельности. Автор ряда статей в центральной печати, а также монографий (в соавторстве) «Нелинейная динамика в действии» и «Непрерывный вейвлетный анализ», вышедших в Издательстве ГосУНЦ «Колледж», двухтомной монографии «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009, под редакцией А.А. Короновского, А.А. Кураева, Д.И. Трубецкова и А.Е. Храмова), монографии «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд-во МГУ, 2010, под редакцией С.И. Ильина и Д.И. Трубецкова) и др.
410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: alexey.koronovskii@gmail.com

Москаленко Ольга Игоревна – родилась в Саратове (1984). Окончила факультет нелинейных процессов Саратовского госуниверситета (2006), кандидат физико-математических наук (2008). Доцент кафедры физики открытых систем СГУ (2012), начальник Управления научной деятельности СГУ. Область научных интересов – исследование классической и хаотической синхронизации и явлений, имеющих место на её границе, в нелинейных системах; применение непрерывного вейвлет- и фурье-анализа к проблеме хаотической синхронизации в системах с малым числом степеней свободы и пространственно-распределенных средах; изучение обобщенной синхронизации в системах с однонаправленной и взаимной связью и ее возможных приложений; влияние шума на установление синхронных режимов и характеристики перемежаемости; применение хаотической синхронизации для скрытой передачи информации; анализ хаотической синхронизации в сложных сетях, разработка методов анализа поведения систем по временным рядам и их применение к живым системам. Автор более 100 статей в центральных реферируемых отечественных и зарубежных научных журналах.



410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: o.i.moskalenko@gmail.com

Храмов Александр Евгеньевич – окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1996). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1999) и доктора (2006) физико-математических наук. Профессор кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Заведующий кафедрой автоматизации, управления, мехатроники Саратовского государственного технического университета. Научные интересы – нейронаука, теория сложных сетей, вейвлет-анализ и его приложения в нелинейной динамике и нейронауке, нелинейная динамика приборов и устройств электроники СВЧ- и ТГц-диапазонов. Опубликовал (с соавторами) книгу «Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков» (Т. 1, М.: Физматлит, 2003; Т. 2, М.: Физматлит, 2004), монографию «Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения» (Москва: Наука, Физматлит, 2003), двухтомную коллективную монографию «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009), коллективную монографию «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд-во МГУ, 2010) и др.



410054 Саратов, ул. Политехническая, 77
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: hramovae@gmail.com