

01

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

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
410012 Саратов, Россия

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
410054 Саратов, Россия
e-mail: moskalenko@nonlin.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 3 октября 2012 г. В окончательной редакции 9 августа 2013 г.)

Обнаружена обобщенная синхронизация в случае воздействия хаотического сигнала на генераторы периодических колебаний. Исследованы особенности поведения границы возникновения синхронного режима при изменении параметров хаотического сигнала. Показана возможность использования таких устройств для скрытой передачи информации.

Введение

Исследование синхронизации колебаний связанных динамических систем представляется в настоящее время одним из актуальных направлений нелинейной динамики [1]. Интерес к этому явлению обусловлен как большим фундаментальным значением его исследования [1], так и возможностью применения различных его типов, например, в физиологии, медицине, для скрытой передачи информации, а также в других областях науки и техники [2–4].

Одним из наиболее интересных типов хаотической синхронизации является режим обобщенной синхронизации [5]. Как правило, он вводится в рассмотрение для системы двух однонаправленно связанных хаотических осцилляторов, ведущего $\mathbf{x}(t)$ и ведомого $\mathbf{u}(t)$, и означает наличие функционального соотношения

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}[\mathbf{x}(t)] \quad (1)$$

между их состояниями. В последнее время появились попытки обобщения этого режима на системы с взаимной связью и сети связанных нелинейных элементов [6–8]. Однако изучение этого режима в системах с однонаправленной связью остается по-прежнему актуальным.

Одним из неизученных вопросов является анализ возможности установления обобщенной синхронизации в том случае, когда ведомая система находится в периодическом режиме. При этом понятно, что характеристики взаимодействующих систем должны оказывать существенное влияние на установление синхронизации. Однако методы диагностики синхронного режима останутся практически неизменными.

В настоящей работе проводится изучение характера расположения границы обобщенной синхронизации на плоскости параметров „частота хаотического сигнала — параметр связи“ при различных значениях параметров ведомой системы. В качестве объектов исследования выбраны как модельные системы (однонаправленно связанные осцилляторы Ресслера [9]), так и реальные системы пучково-плазменной природы (однонаправленно

связанные низковольтные виркаторы [10]). Как будет показано ниже, во всех рассмотренных случаях порог возникновения синхронного режима меняется достаточно резко¹ при изменении параметров внешнего хаотического сигнала, что делает возможным использование этих устройств для скрытой передачи информации на основе обобщенной синхронизации [3]. Предложена модификация этого способа и обсуждены ее достоинства по сравнению с оригиналом.

1. Режим обобщенной синхронизации и методы его диагностики

Перед тем как перейти к изложению полученных результатов, коротко остановимся на определении режима обобщенной синхронизации и методов его диагностики в однонаправленно связанных системах. Как отмечалось во Введении, под синхронным режимом в данном случае понимается установление функционального соотношения (1) между состояниями этих систем. Аналогичное определение применимо для режима обобщенной синхронизации в случае взаимодействия хаотического осциллятора с системой, демонстрирующей периодическую динамику.

Для диагностики обобщенной синхронизации в двух однонаправленно связанных хаотических системах традиционно используют метод вспомогательной системы [11] или метод расчета условных ляпуновских экспонент [12]. Оба метода могут быть применены к анализу обобщенной синхронизации в случае воздействия хаотического сигнала на систему с периодической динамикой. При этом реализация этих методов и критерии наличия обобщенной синхронизации останутся практически неизменными.

Согласно методу вспомогательной системы, наряду с ведомой системой $\mathbf{u}(t)$ рассматривается идентичная ей

¹ Под резким изменением порога возникновения синхронного режима подразумевается значительное изменение порогового значения параметра связи, соответствующего установлению режима обобщенной синхронизации, при слабом изменении управляющего параметра.

вспомогательная система $\mathbf{v}(t)$. Начальные условия для вспомогательной системы $\mathbf{v}(t_0)$ выбираются отличными от начального состояния ведомой системы $\mathbf{u}(t_0)$, однако лежащими в бассейне притяжения того же аттрактора. В случае отсутствия режима обобщенной синхронизации между взаимодействующими системами (разумеется, в случае, если в ведомой системе реализуется периодический режим, отличный от предельного цикла) векторы состояния ведомой $\mathbf{u}(t)$ и вспомогательной $\mathbf{v}(t)$ систем принадлежат одному и тому же аттрактору, но являются различными. В режиме обобщенной синхронизации, в силу выполнения соотношений $\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}[\mathbf{x}(t)]$ и соответственно $\mathbf{v}(t) = \mathbf{F}[\mathbf{x}(t)]$, после завершения переходного процесса состояния ведомой и вспомогательной систем должны стать идентичными $\mathbf{u}(t) \equiv \mathbf{v}(t)$, что является критерием наличия обобщенной синхронизации между ведущим и ведомым осцилляторами.

При диагностике режима обобщенной синхронизации при помощи расчета спектра показателей Ляпунова в силу однонаправленной связи между системами достаточно рассчитать ляпуновские показатели только для ведомой системы (так называемые условные ляпуновские показатели) $\lambda_1^i \geq \dots \geq \lambda_{N_r}^i$. Критерием существования обобщенной синхронизации в данном случае является отрицательность старшего условного ляпуновского показателя λ_1^i , который в силу того, что ведомая система находится в периодическом режиме, изначально будет нулевым. Понятно, что если расстройка собственных частот взаимодействующих систем будет мала, режим обобщенной синхронизации будет близок к режиму фазовой синхронизации [13].

Коротко обсудим механизмы возникновения обобщенной синхронизации в случае воздействия хаотического сигнала на систему, демонстрирующую периодическое поведение. В работе [9] было показано, что в случае взаимодействия двух хаотических осцилляторов, независимо от типа связи (диссипативная или недиссипативная) между ними, возникновение обобщенной синхронизации определяется балансом между подавлением собственной хаотической динамики в ведомой системе и возбуждением хаотических колебаний в ней под действием внешнего сигнала ведущей системы. Понятно, что в рассматриваемом случае „собственная хаотическая динамика“ в ведомой системе отсутствует, а следовательно, ведущая система может легко навязать ей свою хаотическую динамику. В этом случае режим обобщенной синхронизации должен возникать при меньших значениях параметра связи по сравнению со случаем двух однонаправленно связанных хаотических систем.

Интересным представляется вопрос о поведении границы обобщенной синхронизации при изменении параметров ведущей системы. В частности, известно, что для двух однонаправленно связанных хаотических осцилляторов поведение границы обобщенной синхронизации на плоскости параметров „частота ведущей системы — параметр связи“ существенным образом отличается от поведения границ других известных типов хаотической

синхронизации: в области относительно больших значений расстройки собственных частот порог возникновения синхронного режима практически не зависит от параметров ведущей системы, в то время как в области относительно слабых расстройек порог обобщенной синхронизации в некоторых системах начинает резко расти [14]. Рассмотрим поведение границы обобщенной синхронизации в случае взаимодействия хаотического осциллятора с системой, находящейся в периодическом режиме, на конкретных примерах. Начнем рассмотрение с модельной системы.

2. Обобщенная синхронизация в модельных системах

В качестве первого примера рассмотрим две однонаправленно связанные системы Ресслера. Значения управляющих параметров выберем таким образом, чтобы в ведущей системе наблюдалась хаотическая динамика, а в ведомой системе — периодические колебания. Данная модель в безразмерном виде описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= -\omega_d y_d - z_d, & \dot{x}_r &= -\omega_r y_r - z_r + \varepsilon(x_d - x_r), \\ \dot{y}_d &= \omega_d x_d + a_d y_d, & \dot{y}_r &= \omega_r x_r + a_r y_r, \\ \dot{z}_d &= p + z_d(x_d - c), & \dot{z}_r &= p + z_r(x_r - c), \end{aligned} \quad (2)$$

где $a_d = 0.15$, $p = 0.2$, $c = 10$ — управляющие параметры, параметр ε характеризует величину связи между осцилляторами. Управляющий параметр ведомой системы $\omega_r = 0.95$, характеризующий основную частоту колебаний, был фиксирован, а аналогичный параметр ведущей системы ω_d варьировал в диапазоне от 0.86 до 1.04 для того, чтобы задать расстройку взаимодействующих осцилляторов. При выборе управляющего параметра ведомой системы $a_r = 0.08$ в системе реализуется цикл периода 2, аналогично при $a_r = 0.09$ — цикл периода 4, при $a_r = 0.094$ — цикл периода 8.

На рис. 1 показано расположение границы обобщенной синхронизации системы (2) на плоскости управляющих параметров (ω_d, ε) . Линия 1 соответствует границе установления режима обобщенной синхронизации при $a_r = 0.08$, линия 2 — при $a_r = 0.09$, а линия 3 — при $a_r = 0.094$. Порог возникновения синхронного режима определялся по моменту перехода нулевой ляпуновской экспоненты в область отрицательных значений, а затем уточнялся при помощи метода вспомогательной системы. Из рисунка видно, что чем проще режим, реализующийся в системе, тем ниже пороговое значение параметра связи, соответствующее установлению синхронного режима. Более того, границы возникновения синхронного режима в данном случае проходят значительно ниже аналогичной границы в случае взаимодействия двух связанных хаотических систем (ср. рис. 1 и рис. 1 в [14], где приведена граница обобщенной синхронизации в системе (2) с теми же

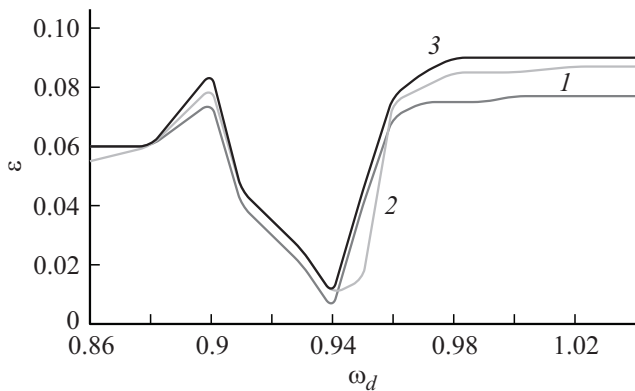


Рис. 1. Границы возникновения режима обобщенной синхронизации: 1 — $a = 0.08$; 2 — $a = 0.09$; 3 — $a = 0.094$ для двух однонаправленно связанных осцилляторов Ресслера (2) на плоскости управляющих параметров (ω_d, ε) .

значениями управляющих параметров и $a_r = 0.15$), что подтверждает теоретические рассуждения, приведенные в разд. 1. В то же самое время, как и в случае двух связанных хаотических систем, во всех рассмотренных случаях порог возникновения режима обобщенной синхронизации в области относительно больших значений расстройки собственных частот практически не зависит от параметра ведущей системы. Однако в области относительно слабых значений частотной расстройки наблюдается сильный „провал“, что не характерно для систем, демонстрирующих хаотическую динамику.

Возникновение обнаруженного провала можно объяснить следующим образом. Если частота внешнего хаотического воздействия близка к собственной частоте колебаний ведомой системы, происходит захват частот, а следовательно, установление фазовой синхронизации. Ведомая система находится в периодическом режиме, поэтому ведущая система может легко навязать ей свою хаотическую динамику. В этом случае границы фазовой и обобщенной синхронизаций будут примерно совпадать, а граница обобщенной синхронизации будет демонстрировать „нормальное“ поведение². К аналогичному выводу можно прийти, исходя из теоретических рассуждений, представленных в разд. 1. В области относительно слабых значений расстройки собственных частот режиму фазовой синхронизации предшествует переход условной нулевой ляпуновской экспоненты в область отрицательных значений. Так как этот ляпуновский показатель является старшим для ведомой системы, момент его перехода в область отрицательных значений соответствует порогу обобщенной синхронизации. Понятно, что в области относительно слабых значений расстройки частот взаимодействующих систем эти две границы должны располагаться очень близко друг к другу.

В области же относительно больших значений расстройки собственных частот возникновение обобщенной

² Под „нормальным“ поведением в данном случае понимается рост порогового значения параметра связи, соответствующего установлению синхронного режима, при увеличении величины расстройки между системами.

синхронизации обусловлено другим механизмом. Как и в случае двух связанных хаотических систем, синхронный режим возникает за счет подавления собственной динамики ведомой системы и возбуждением в ней хаотических колебаний под действием ведущей системы.

В то же самое время, несмотря на качественно отличное поведение границ обобщенной синхронизации в случае взаимодействия двух хаотических систем и системы, демонстрирующей периодическое поведение, находящейся под действием хаотического осциллятора, и в том и в другом случае порог обобщенной синхронизации меняется достаточно резко при слабом изменении параметров внешнего хаотического сигнала (в частности, при переходе из области относительно больших в область относительно слабых значений расстройки собственных частот взаимодействующих систем критическое значение параметра связи, соответствующее установлению синхронного режима, меняется более чем в 2 раза), что делает возможным использование этих систем для скрытой передачи информации [2,15,16].

3. Обобщенная синхронизация в системах пучково-плазменной природы

В качестве второго примера рассмотрим установление режима обобщенной синхронизации в системах электронно-волновой природы — цепочке из двух однонаправленно связанных низковольтных виркаторов [17].

Низковольтный виркатор представляет собой плоский диодный промежуток, пронизываемый электронным потоком со сверхкритическим первеансом [10]. Для создания сверхкритического первеанса на выходную сетку системы подается тормозящий потенциал, с увеличением которого в электронном потоке формируется виртуальный катод (потенциальный барьер, отражающий часть электронов обратно к плоскости инжекции и модулирующий проходящий поток).

Для моделирования нелинейных нестационарных процессов в пучке заряженных частиц с виртуальным катодом использовалась одномерная модель пролетного промежутка с тормозящим полем. Моделирование осуществлялось при помощи метода крупных частиц [18]. Согласно этому методу, электронный поток представляется в виде совокупности крупных частиц (заряженных листов), инжектируемых через равные промежутки времени с постоянной скоростью в пространство взаимодействия. Для каждой крупной частицы решаются нерелятивистские уравнения движения, которые в безразмерных переменных записываются в виде

$$\frac{d^2x_i}{dt^2} = -E(x_i), \quad (3)$$

где x_i — координата i -й частицы, $E(x_i)$ — напряженность поля пространственного заряда в точке с координатой x_i .

Напряженность и потенциал поля пространственного заряда определяются на равномерной пространственной сетке с шагом Δx , покрывающей межсеточное пространство. Потенциал поля пространственного заряда в квазистатическом приближении определяется уравнением Пуассона, которое в одномерном приближении имеет вид

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \alpha^2\rho(x), \quad (4)$$

где $\alpha = \omega_p L / v_0$ — параметр Пирса (ω_p — плазменная частота, L — длина пролетного промежутка, v_0 — невозмущенная скорость электронного потока). Граничным условием для уравнения Пуассона является условие подачи тормозящей разности потенциалов между сетками системы: $\varphi(0) = 0$, $\varphi(1) = \Delta\varphi$. Напряженность E поля пространственного заряда определяется в данном случае численным дифференцированием полученных значений потенциала.

Расчет плотности электронного потока осуществлялся методом частиц в ячейке, который заключается в том, что осуществляется билинейное взвешивание заряда крупных частиц на сетке для нахождения пространственного заряда [18]. В этом методе плотность пространственного заряда в j -м узле пространственной сетки ($x_j = j\Delta x$) выражается как

$$\rho(x_j) = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^N \Theta(x_i - x_j), \quad (5)$$

где N — полное число крупных частиц, n_0 — параметр вычислительной схемы, равный числу частиц на ячейку в невозмущенном состоянии,

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1 - |x|/\Delta x, & |x| < \Delta x, \\ 0, & |x| > \Delta x \end{cases} \quad (6)$$

— кусочно-линейная функция, определяющая процедуру “взвешивания” крупной частицы на пространственной сетке с шагом Δx .

Для вывода мощности СВЧ-колебаний виртуального катода в низковольтном виркаторе использовался отрезок спиральной замедляющей системы (ОСЗС), который моделировался методом эквивалентных схем [19]. Согласно этому методу, ОСЗС описывается телеграфными уравнениями, дополненными слагаемым, описывающим возбуждение электромагнитных волн пучком:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial U_{\text{out}}}{\partial x}, \quad \frac{\partial U_{\text{out}}}{\partial t} = -\frac{1}{C} \frac{\partial I}{\partial x} + \frac{1}{C} \frac{\partial q}{\partial t}, \quad (7)$$

где U_{out} — выходной сигнал низковольтного виркатора (интегральная величина, характеризующая состояние системы). Телеграфные уравнения решались численно в предположении согласования линии передачи на левом $x = 0$ и правом $x = l$ концах ОСЗС. Распределение величины заряда пучка $q(t, x)$, возбуждающего электромагнитные волны в линии передачи, бралось из решения задачи методом крупных частиц (см. выше).

Для исследования обобщенной синхронизации в цепочке из двух однонаправленно связанных низковольтных виркаторов осуществлялось численное моделирование динамики ведущего (далее индекс 1) и ведомого (далее индекс 2) генераторов согласно описанным выше уравнениям (3)–(7). Однонаправленная связь между низковольтными виркаторами реализовывалась путем подачи СВЧ-сигнала с выхода ведущего генератора на вход ведомого генератора [17]. Ввод сигнала в пучок в ведомом генераторе осуществлялся за счет модуляции потока, входящего в диодный промежуток, отрезком спирали, расположенным между электронной пушкой и входной сеткой пространства взаимодействия, на который подавался выходной сигнал ведущего виркатора. В канале связи между генераторами предполагалось наличие аттенуатора, который позволял управлять мощностью СВЧ-сигнала, воздействующего на ведомый генератор. В исследуемой модели это учитывалось путем добавления к уравнениям для ведомого генератора дополнительных уравнений, описывающих модулирующую спираль:

$$\frac{\partial I_{2\text{in}}}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial U_{2\text{in}}}{\partial x}, \quad \frac{\partial U_{2\text{in}}}{\partial t} = -\frac{1}{C} \frac{\partial I_{2\text{in}}}{\partial x}, \quad (8)$$

с граничным условием

$$U_{2\text{in}}(0, t) = \sqrt{\varepsilon} U_{1\text{out}}(1, t - T), \quad (9)$$

где ε — коэффициент связи в системе, который вводится как отношение мощности сигнала, поданного на модулятор, к выходной мощности ведущего генератора.

Управляющими параметрами в системе связанных низковольтных виркаторов являются тормозящая разность потенциалов $\Delta\varphi_{1,2}$ между сетками пролетного промежутка, ток пучка $\alpha_{1,2}$ и коэффициент связи ε . Варьированием тормозящего потенциала выходной сетки и параметра Пирса можно добиться изменения динамики электронного пучка в генераторе и смены режима колебаний виртуального катода.

Так же, как и в случае модельных систем, рассмотренных в разд. 2, ведущий генератор, характеризующийся выходным сигналом $x(t) = U_{\text{out1}}(t)$, был настроен на хаотический режим, а ведомый генератор, характеризующийся выходным сигналом $u(t) = U_{\text{out2}}(t)$, — на сложнопериодический режим. Значения управляющих параметров в этом случае были выбраны следующими: тормозящий потенциал ведомой системы $\Delta\varphi_2 = 0.6$ и токи пучков $\alpha_{1,2} = 0.9$ фиксировались, при этом тормозящий потенциал ведущей системы варьировался в диапазоне $\Delta\varphi_1 \in [0.48; 0.58]$, обеспечивая реализацию хаотических колебаний в системе.

На рис. 2 (кривая 1) приведена граница обобщенной синхронизации на плоскости параметров „тормозящий потенциал ведущей системы $\Delta\varphi_1$ —параметр связи ε “ при фиксированных значениях всех остальных управляющих параметров. На этом же рисунке (кривая 2) приведена аналогичная граница при $\Delta\varphi_2 = 0.525$ и тех же значениях остальных управляющих параметров,

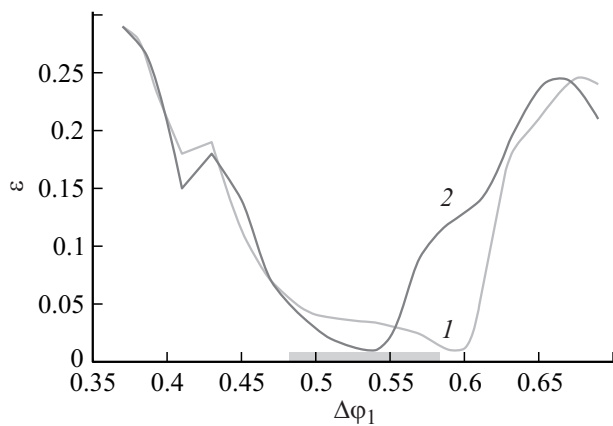


Рис. 2. Границы обобщенной синхронизации в системе двух однонаправленно связанных низковольтных генераторов на плоскости параметров $(\Delta\varphi_1, \varepsilon)$ при $\Delta\varphi_2 = 0.6$ (сложнопериодический режим, кривая 1) и $\Delta\varphi_2 = 0.525$ (хаотический режим, кривая 2).

что соответствует реализации хаотических колебаний в ведомой системе. Порог возникновения синхронного режима для обоих случаев определялся при помощи метода вспомогательной системы. Обе границы представлены в более широком диапазоне изменения параметра $\Delta\varphi_1 \in [0.37; 0.7]$, что соответствует различным режимам колебаний в ведущей системе (более подробно см. [10]), область хаоса отмечена серым. Как видно из рисунка, поведение границы обобщенной синхронизации в данном случае качественно аналогично последнему для модельных систем (рис. 1). Собственная частота колебаний ведущей системы близка к частоте ведомого генератора во всем диапазоне изменения $\Delta\varphi_1 \in [0.48; 0.58]$, что в силу аргументов, приведенных в разд. 2, говорит о близости границ режимов обобщенной и фазовой синхронизаций в исследуемой системе. При этом для обоих случаев порог возникновения синхронного режима меняется достаточно резко при малом изменении параметра $\Delta\varphi_1$, что делает возможным применение однонаправленно связанных низковольтных генераторов для скрытой передачи информации на основе обобщенной синхронизации [15]. Обсудим более детально этот вопрос в следующем разделе.

4. Практические приложения обобщенной синхронизации

Одним из наиболее важных практических приложений режима обобщенной синхронизации, как упоминалось выше, является ее применение для скрытой передачи информации. В настоящее время известно несколько способов скрытой передачи данных на основе этого явления (см., например, [3,25,16,20–22]), при этом способ [22] и его модификации [15,16] обладают наибольшими достоинствами по сравнению с известными аналогами, основанными как на режиме обобщенной синхронизации,

так и на других типах синхронного поведения (фазовой, полной синхронизации) (более подробно см. обзор [3]). Основными достоинствами этих методов являются их высокая устойчивость по отношению к шумам и флуктуациям в канале связи и упрощение возможности технической реализации, а в способах [15,16] — еще и высокая степень конфиденциальности передачи информации. В то же самое время эти способы не свободны от недостатков, один из которых, связанный с нестабильностью работы этих способов при неидентичности параметров передающего и принимающего генераторов, оказывается ликвидированным в них лишь частично. Так же как и в известных аналогах, в этих способах присутствуют два идентичных хаотических генератора, но в отличие от последних они располагаются на одной стороне канала связи, что позволяет осуществить их юстировку.

Юстировка генераторов хаотических колебаний оказывается не всегда возможной. Более того, эта проблема усугубляется в процессе длительной эксплуатации устройств, что делает упомянутые выше способы нерентабельными в долгосрочной перспективе. В то же самое время, как было установлено выше в разд. 2, 3, режим обобщенной синхронизации может наблюдаться не только в случае воздействия хаотического сигнала на хаотические генераторы, но и при воздействии того же хаотического сигнала на генераторы периодических колебаний. Разработка идентичных генераторов периодических колебаний является менее сложной задачей, чем реализация хаотических генераторов. Более того, в данном случае нестабильность работы генераторов при неидентичности параметров выражена намного меньше, чем в случае использования генераторов хаоса, что сделает подобную схему стабильной и работоспособной в течение длительного времени. При этом качество передачи информации будет более высоким.

Принципиальная схема для реализации предлагаемого способа передачи информации приведена на рис. 3. Способ скрытой передачи информации заключается в

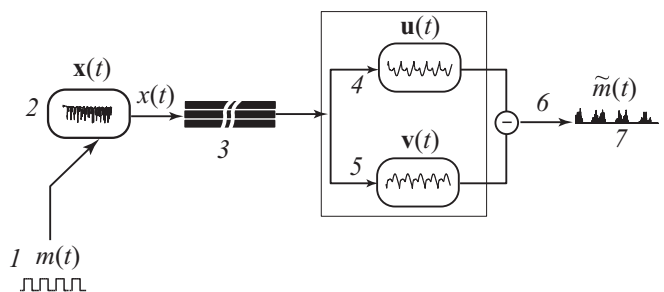


Рис. 3. Схема для скрытой передачи информации на основе обобщенной синхронизации в случае воздействия хаотического сигнала на периодические генераторы: 1 — полезный бинарный сигнал $m(t)$, 2 — первый (передающий) генератор, 3 — канал связи, 4 — второй (принимающий) генератор, 5 — третий генератор, идентичный второму генератору 4 по управляющим параметрам, 6 — вычитающее устройство, 7 — восстановленный полезный сигнал $\tilde{m}(t)$.

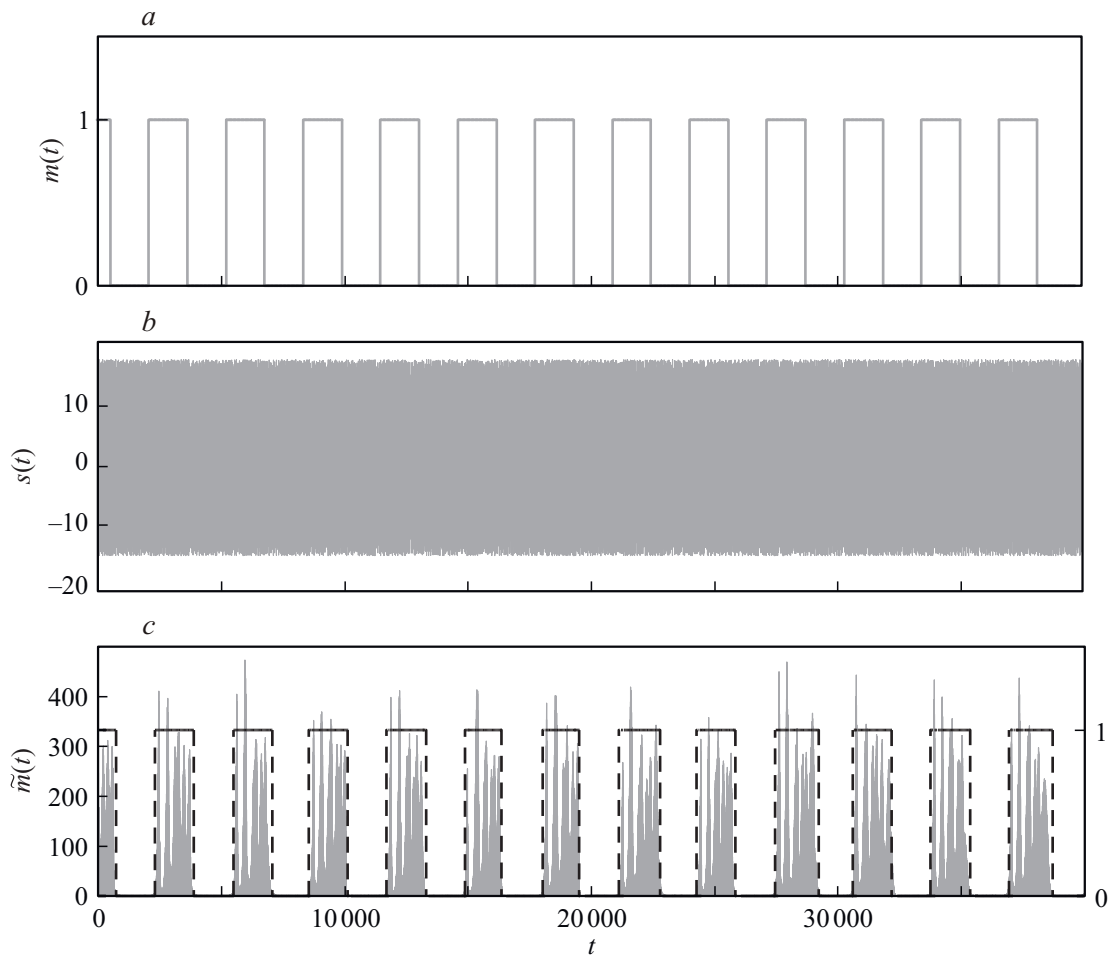


Рис. 4. Иллюстрация работоспособности способа скрытой передачи информации на основе обобщенной синхронизации в случае использования систем Ресслера в качестве генераторов передающего и принимающего устройств: информационный сигнал $m(t)$, представленный простой последовательностью бинарных битов 0/1 (а), сигнал $s(t)$, передаваемый по каналу связи (б), восстановленный сигнал $\tilde{m}(t)$ (с), сплошная линия. На рисунке представлен также детектированный информационный сигнал (штриховая линия) после пропускания через фильтр нижних частот.

следующем. Полезный информационный сигнал $m(t)$ кодируется в виде бинарного кода. Один или несколько управляющих параметров передающего (первого) генератора $x(t)$ модулируется информационным сигналом таким образом, чтобы характеристики передаваемого сигнала менялись незначительно, но при этом оставалась возможность возникновения/разрушения режима обобщенной синхронизации в зависимости от передаваемого бинарного бита. Для реализации этой особенности граница возникновения режима обобщенной синхронизации на плоскости параметров „параметр модуляции–интенсивность связи“ должна обладать некоторой особенностью: при малом изменении управляющего параметра порог возникновения синхронного режима должен меняться достаточно резко. Сигнал, генерируемый передающей системой, передается по каналу связи 3, где он подвергается влиянию шумов и искажений, неизбежно присутствующих в реальных устройствах. Принимающее устройство находится на другой стороне канала связи. Оно представляет собой

два идентичных генератора периодических колебаний, второй $u(t)$ 4 и третий $v(t)$ 5, способных находиться в режиме обобщенной синхронизации с передающим 2. Принцип работы принимающего устройства основан на диагностике режима обобщенной синхронизации при помощи метода вспомогательной системы. Сигнал из канала связи поступает на генераторы принимающего устройства. Полученные на выходе сигналы проходят через вычитающее устройство 6, и затем детектируется восстановленный полезный сигнал 7, представляющий собой чередующуюся последовательность участков с несинхронным и синхронным поведением, по которой исходный информационный сигнал может быть легко детектирован.

Проиллюстрируем работоспособность предлагаемого способа передачи информации на конкретных примерах. В качестве генераторов передающего и принимающего устройств выберем системы Ресслера, рассмотренные в разд. 2, с теми же значениями управляющих параметров a_d , p , c , ω_r (низковольтные виркаторы, рассмотрен-

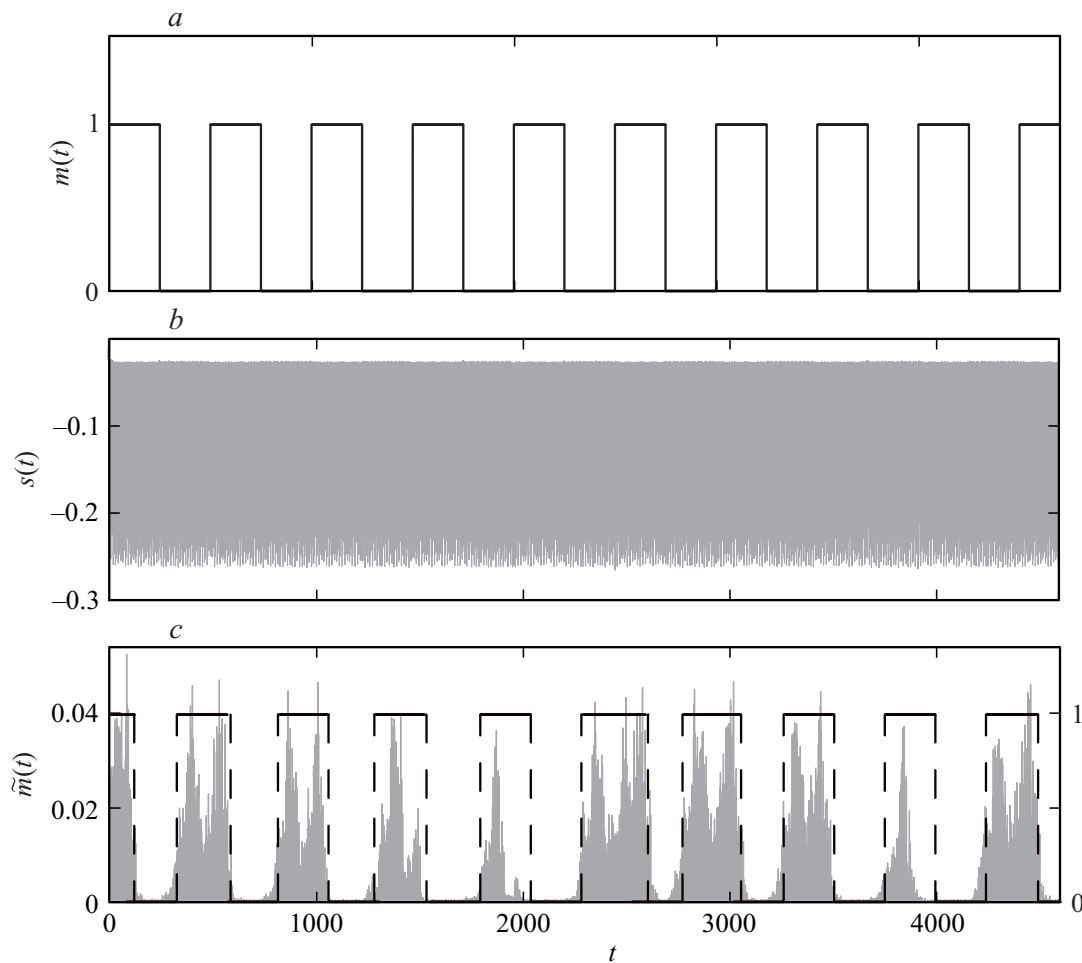


Рис. 5. Иллюстрация работоспособности способа скрытой передачи информации на основе обобщенной синхронизации в случае использования низковольтных виркаторов в качестве генераторов передающего и принимающего устройств: информационный сигнал $m(t)$, представленный простой последовательностью бинарных битов 0/1 (а), сигнал $s(t)$, передаваемый по каналу связи (b), восстановленный сигнал $\tilde{m}(t)$ (c), сплошная линия. На рисунке представлен также детектированный информационный сигнал (штриховая линия) после пропускания через фильтр нижних частот.

ные в разд. 3, с теми же значениями управляющих параметров α , $\Delta\varphi_2$ ³. Значение параметра связи выберем равным $\varepsilon = 0.06$ ($\varepsilon = 0.1$). В качестве параметра модуляции выберем частоту ведущего генератора ω_d (тормозящую разность потенциалов $\Delta\varphi_1$): если в заданный интервал времени передается бинарный бит 1, то $\omega_d = 0.95$ ($\Delta\varphi_1 = 0.52$) на протяжении всего этого интервала; при передаче бинарного бита 0 параметр ω_d ($\Delta\varphi_1$) принимает значение 0.96 (0.54).

Работоспособность предлагаемого способа передачи информации иллюстрирует рис. 4 (рис. 5). Здесь приведены информационный сигнал $m(t)$, представленный простой последовательностью бинарных битов 0/1 (а), сигнал $s(t)$ в канале связи, представляющий собой сигнал, генерируемый передающим генератором хаоса (b), восстановленный сигнал $\tilde{m}(t) = (\mathbf{u}(t) - \mathbf{v}(t))^2$ до

³ Здесь и далее по тексту будем указывать значения параметров для систем Ресслера, а в квадратных скобках приводить аналогичные значения для низковольтных виркаторов.

(сплошная линия) и после (штриховая линия) пропускания через фильтр нижних частот и выбора пороговых значений (c). Как видно из рис. 4, 5, b, в обоих случаях модуляция управляющих параметров практически не меняет характеристики сигнала, производимого передающим генератором хаоса, что делает невозможным дешифрование информационного сообщения третьей стороной. В то же самое время качество информации, восстановленной в принимающем устройстве, является достаточно высоким. Нетрудно заметить, что сигналы, приведенные на рис. 4, 5, a (исходный информационный сигнал) и c, штриховая линия (детектированный информационный сигнал), практически в точности совпадают, что и свидетельствует о высоком качестве передачи информации. Аналогичная ситуация имеет место в случае наличия шума в канале связи, причем отношение энергии на бит к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 [23], при котором способ становится неработоспособным, оказывается значительно ниже (по модулю

выше), чем в случае использования генераторов хаоса в принимающем устройстве⁴.

Таким образом, предложенный способ передачи информации позволяет ликвидировать проблему неустойчивости работы способа при неидентичности параметров передающего и принимающего устройств (более того, эти устройства могут находиться в принципиально разных режимах колебаний), а также повысить устойчивость к шумам и качество передачи информации.

Заключение

В настоящей работе обнаружена обобщенная синхронизация в случае воздействия хаотического сигнала на систему, находящуюся в периодическом режиме. На примере двух различных систем (однонаправленно связанные системы Ресслера и низковольтные виркаторы) показано, что порог возникновения синхронного режима в данном случае снижается по сравнению со случаем двух связанных хаотических систем. Исследован характер расположения границы обобщенной синхронизации на плоскости параметров „частота расстройки — интенсивность связи“, объяснены механизмы возникновения синхронного режима в области относительно больших и относительно слабых значений расстройки собственных частот. Показана возможность использования обнаруженного режима для скрытой передачи информации. Установлено, что использование генераторов периодических колебаний в принимающем устройстве позволяет ликвидировать проблему неустойчивости работы способа при неидентичности управляющих параметров взаимодействующих систем, а также повысить устойчивость к шумам и качество передачи информации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12–02–33071, 14–02–31204) и Совета по грантам президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (МД-345.2013.2).

Список литературы

- [1] Пиковский А.С., Розенблюм М.Г., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. 496 с.
- [2] Sosnovitseva O.V., Pavlov A.N., Mosekilde E., Yip K.P., Holstein-Rathlou N.H., Marsh D.J. // *Am. J. Physiol. Renal*. 2007. Vol. 293. P. F1445–F1555.
- [3] Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. // *УФН*. 2009. Т. 179. № 12. С. 1281–1310.
- [4] Luijtelaaar van J., Hramov A.E., Sitnikova E.Yu., Koronovskii A.A. // *Clin. Neurophysiol.* 2011. Vol. 122. P. 687–695.
- [5] Rulkov N.F., Sushchik M.M., Tsimring L.S., Abarbanel H.D.I. // *Phys. Rev. E*. 1995. Vol. 51. N 2. P. 980–994.
- [6] Zheng Z., Wang X., Cross M.C. // *Phys. Rev. E*. 2002. Vol. 65. P. 056 211.
- [7] Guan S., Wang X., Gong X., Li K., Lai C.H. // *CHAOS*. 2009. Vol. 19. P. 013 130.
- [8] Moskalenko O.I., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Boccalletti S. // *Phys. Rev. E*. 2012. Vol. 86. P. 036 216.
- [9] Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. // *ЖТФ*. 2006. Т. 76. Вып. 2. С. 1–9.
- [10] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А. // *Физика плазмы*. 2005. Т. 31. № 11. С. 1009–1025.
- [11] Abarbanel H.D.I., Rulkov N.F., Sushchik M.M. // *Phys. Rev. E*. 1996. Vol. 53. N 5. P. 4528–4535.
- [12] Pyragas K. // *Phys. Rev. E*. 1997. Vol. 56. N 5. P. 5183–5188.
- [13] Osipov G.V., Hu B., Zhou C.S., Ivanchenko M.V., Kuths J. // *Phys. Rev. Lett.* 2003. Vol. 91. N 2. P. 024 101.
- [14] Hramov A.E., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I. // *Europhys. Lett.* 2005. Vol. 72. N 6. P. 901–907.
- [15] Moskalenko O.I., Koronovskii A.A., Hramov A.E. // *Phys. Lett. A*. 2010. Vol. 374. P. 2925–2931.
- [16] Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. // *ЖТФ*. 2010. Т. 80. Вып. 4. С. 1–8.
- [17] Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2012. Т. 75. № 12. С. 1697–1700.
- [18] Birdsall C.K., Langdon A.B. *Plasma physics, via computer simulation* NY: Mc Graw-Hill, 1985. 479 p.
- [19] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Морозов М.Ю. // *Письма в ЖТФ*. 2006. Т. 32. Вып. 9. С. 71–78.
- [20] Terry J., Van Wiggeren G. // *Chaos, Solitons and Fractals*. Vol. 12. P. 145–152.
- [21] Murali K., Lakshmanan M. // *Phys. Lett. A*. 1998. Vol. 241. P. 303–310.
- [22] Короновский А.А., Москаленко О.И., Попов П.В., Храмов А.Е. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2008. Т. 72. № 1. С. 143–147.
- [23] Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.

⁴ Для сравнения: способ передачи информации на основе обобщенной синхронизации хаотических колебаний в случае использования систем Ресслера в качестве генераторов передающего и принимающего устройств становится неработоспособным при $E_b/N_0 = -10.01$ dB, в то время как предложенный способ в случае использования тех же систем Ресслера со значениями управляющих параметров для принимающих генераторов, соответствующих реализации в них периодических колебаний периода 8, работает эффективно до $E_b/N_0 = -22.75$ dB.