



## НОВАЯ СХЕМА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ НЕСУЩЕГО ХАОТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

*А. Ю. Жалнин*

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

Предложена новая схема передачи информации на основе динамического хаоса. В качестве несущего используется сигнал, генерируемый автоколебательной системой в режиме фазово-когерентных хаотических автоколебаний. Этот сигнал подвергается модифицированной процедуре фазовой модуляции информационным сигналом, который одновременно воздействует на генератор-передатчик через петлю обратной связи. После прохождения канала связи модулированный информацией сигнал воздействует на генератор-приемник, вызывая в нем синхронный хаотический отклик. Для извлечения информации разработана процедура фазового детектирования хаотического сигнала. Работоспособность схемы демонстрируется на примере связанных модифицированных осцилляторов Рёсслера в режиме спирального хаоса, и на примере связанных автогенераторов структурно-устойчивого (гиперболического) хаоса.

*Ключевые слова:* Синхронизация, хаотическая коммуникация, автоколебательная система, гиперболический хаос.

### Введение

В последние годы значительное внимание исследователей привлекает задача использования систем с хаотической динамикой в различных схемах связи [1]. Гипотетически, хаотический сигнал в качестве носителя информации имеет ряд преимуществ перед регулярным. Во-первых, это потенциально более высокая информационная емкость и помехоустойчивость при невысоком уровне сигнала в силу широкополосности. Во-вторых, благодаря фундаментальному явлению хаотической синхронизации [2], снимается проблема синхронизации передатчика и приемника: при подходящем способе связи полностью идентичное синхронное поведение возникает в них само, не требуя дополнительных схем управления. В третьих, в силу необходимости восстанавливать динамику передающей хаотической системы для извлечения информации, такая коммуникация является относительно «безопасной». Есть и другие преимущества, перечисленные в монографии [1].

Как было показано, наиболее перспективным для передачи аналоговой информации является метод нелинейного «подмешивания» информационного сигнала в хаотическую динамику передатчика [3]. В схемах, реализующих этот принцип, информационный сигнал воздействует на генератор-передатчик, управляя его хаотической динамикой через петлю обратной связи, и сформированный таким образом хаотический сигнал, комбинируясь с информационным, отправляется в канал передачи. Воздействуя на приемник, композитный сигнал вызывает хаотический синхронный отклик, который, будучи выделен через разомкнутую петлю обратной связи приемника, используется для извлечения информации из переданного композитного сигнала. Следует, однако, отметить две проблемы, препятствующие реализации подобных схем на практике. Первая из них состоит в том, что в большинстве таких схем передаваемый композитный сигнал в канале связи представляет собой суперпозицию слабой информационной составляющей и мощной хаотической, которая вычитается в процессе декодирования, что приводит к неэффективному использованию мощности и понижает помехоустойчивость. Вторая проблема заключается в чувствительности режимов хаотической синхронизации к расстройке параметров и внутренним шумам подсистем, что препятствует возникновению в приёмнике полностью идентичного синхронного отклика, необходимого для декодирования информации. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы наметить пути к преодолению этих проблем.

Предлагаемая модификация схемы с нелинейным подмешиванием основана на классическом принципе фазовой модуляции. Новизна схемы состоит в том, что в качестве несущего сигнала используется хаотический сигнал псевдогармонического вида с «плывущей» фазой, генерируемый хаотической автоколебательной системой. Данный сигнал подвергается фазовой модуляции и воздействует на генератор-передатчик через петлю обратной связи, а его модулированная «копия» отправляется в канал связи. Приемник представляет собой систему, аналогичную передатчику, но с разомкнутой петлей обратной связи. Воздействие переданного сигнала приводит к его полной хаотической синхронизации с передатчиком. Для извлечения информации используется классическая схема фазового детектирования с одной важной поправкой: опорный сигнал, необходимый для преобразования фазовой модуляции в амплитудную, является хаотическим. Этот сигнал естественным образом получается за счет полной синхронизации передатчика и приемника. В дальнейшем, амплитудно-модулированный сигнал декодируется стандартным образом, посредством усреднения по времени и выделения огибающей. Работоспособность схемы демонстрируется на примере связанных модифицированных осцилляторов Рёсслера и связанных автогенераторов структурно-устойчивого (гиперболического) хаоса [4]. Применение принципа фазовой модуляции, как и в классическом случае простого гармонического несущего сигнала, должно повышать устойчивость схемы к аддитивным шумам в канале связи, равномерно искажающим амплитудный профиль сигнала. В свою очередь, использование генераторов «грубого» хаоса в качестве передатчика и приёмника снимает проблему чувствительности синхронного хаотического режима к расстройке параметров и внутренним шумам подсистем, поскольку гиперболический странный аттрактор слабо чувствителен к возмущениям уравнений системы, а хаотическая синхронизация на его основе является «сильной» практически во всём диапазоне значений параметра связи подсистем [5].

## 1. Процедура модуляции хаотической фазы

Используемая процедура фазовой модуляции несущего хаотического сигнала схожа с аналогичной процедурой для сигнала простого гармонического. Пусть имеется хаотический сигнал псевдогармонического вида  $y(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$ , где  $A(t)$  и  $\varphi(t)$  – хаотические функции времени, описывающие медленно меняющиеся амплитуду и фазу ( $\dot{\varphi} \ll \omega$ ,  $\dot{A}/A \ll \omega$ ). Необходимо внести в этот сигнал информацию  $\xi(t)$  (где  $\xi \ll 1$  и  $\dot{\xi} \ll \omega$ ) путем модуляции хаотической фазы:  $\varphi \rightarrow \varphi + \xi$ , чтобы получить  $s(t) = A \cos(\omega t + \varphi + \xi)$ . Чтобы понять, как это можно сделать, будем исходить из уже полученной желаемой формы сигнала:

$$\begin{aligned} s(t) &= A \cos(\omega t + \varphi(t) + \xi) \approx A \cos(\omega t + \varphi(t)) - A\xi(t) \sin(\omega t + \varphi(t)) \approx \\ &\approx A \cos(\omega t + \varphi(t)) - A\xi(t) \cos(\omega(t - \pi/2\omega) + \varphi(t - \pi/2\omega)) = \\ &= y(t) - y(t - \pi/2\omega)\xi(t). \end{aligned}$$

Таким образом, фазово-модулированный информацией сигнал, отправляемый в канал связи, будет представлять собой суперпозицию оригинального хаотического сигнала с ним же, задержанным на четверть квазипериода и перемноженным на информационный:

$$s(t) \approx y(t) - y(t - \pi/2\omega)\xi(t). \quad (1)$$

Для извлечения информации применим модифицированную процедуру фазового детектирования. Она состоит, во-первых, из сложения фазово-модулированного сигнала с опорным для его преобразования в амплитудно-модулированный и, во-вторых, из детектирования амплитудно-модулированного сигнала. В нашем случае опорный сигнал имеет вид

$$s_{ref}(t) = -y(t) - y(t - \pi/2\omega). \quad (2)$$

Суммируя его с  $s(t)$ , получаем

$$\tilde{s}(t) = s + s_{ref} = -(1 + \xi(t))y(t - \pi/2\omega).$$

Из последнего выражения видно, что величина  $\tilde{s}(t)$  есть хаотический сигнал, амплитудно-модулированный информационным  $\xi(t)$ . Так как  $\dot{\xi} \ll \omega$ , то изменение  $\xi$  за квазипериод  $T = 2\pi/\omega$  незначительно, и, производя усреднение последнего выражения за интервал  $T$ , получим

$$\xi(t) \approx \frac{\langle |\tilde{s}(t)| \rangle}{\langle |y(t - \pi/2\omega)| \rangle} - 1, \quad \text{где } \langle f(t) \rangle = \int_{t-\pi/\omega}^{t+\pi/\omega} f(\tau) d\tau. \quad (3)$$

Таким образом, процедуры фазовой модуляции и детектирования хаотического сигнала квазигармонического вида вполне аналогичны тем же процедурам для сигнала простого гармонического.

## 2. Связанные осцилляторы Рёсслера

При численном моделировании в качестве первого примера базового генератора схемы мы будем использовать модифицированный осциллятор Рёсслера:

$$\dot{x} = -\omega y - z, \quad \dot{y} = \omega x + ay - z, \quad \dot{z} = r + z(x + y - c). \quad (4)$$

Смысл модификации состоит в увеличении дисперсии фазы по сравнению с классическими уравнениями. При значениях параметров  $\omega = 1.0$ ,  $a = 0.2$ ,  $r = 0.65$ ,  $c = 11$  в системе реализуется режим фазово-когерентных хаотических автоколебаний, образом которого является спиральный аттрактор [6], характеризуемый ляпуновскими показателями  $\lambda_1 \approx 0.071$ ,  $\lambda_2 = 0.0$ ,  $\lambda_3 \approx -10.7$ , средней угловой частотой  $\omega_0 = 2\pi/T \approx 1.019$  и эффективным коэффициентом дисперсии фазы  $D \approx 7.8 \times 10^{-4}$ . Проекция фазового портрета аттрактора в координатах  $(x, y)$  представлена на рис. 1, а. Фрагменты временных реализаций величин  $x(t)$  и  $-y(t)$  представлены на рис. 1, б. Из приведенных рисунков видно, что временная динамика координаты  $x$  достаточно точно совпадает со сдвинутой на четверть периода динамикой  $y$ , как это и должно быть для колебаний квазигармонического вида. Следовательно, в процедуре фазовой модуляции (1) можно сделать замену  $-y(t - \pi/2\omega_0) \rightarrow x(t)$ . Рассмотрим пару однонаправлено связанных осцилляторов, в которой управляющий выступает в роли передатчика D, а управляемый – в роли приемника R,

$$D : \begin{cases} \dot{x}_D = -\omega y_D - z_D \\ \dot{y}_D = \omega x_D + as(t) - z_D \\ \dot{z}_D = r + z_D(x_D + y_D - c) \end{cases} \quad R : \begin{cases} \dot{x}_R = -\omega y_R - z_R \\ \dot{y}_R = \omega x_R + as(t) - z_R \\ \dot{z}_R = r + z_R(x_R + y_R - c) \end{cases} \quad (5)$$

где

$$s(t) = y_D + x_D \xi(t). \quad (6)$$

При отсутствии информационного воздействия на передатчик ( $\xi(t) = 0$ ) связь систем по переменной  $y$  во втором уравнении приводит к возникновению хаотического синхронного отклика [3], и динамика их переменных становится полностью идентичной ( $x_D = x_R$ ,  $y_D = y_R$ ,  $z_D = z_R$ ). Такой режим синхронизации характеризуется

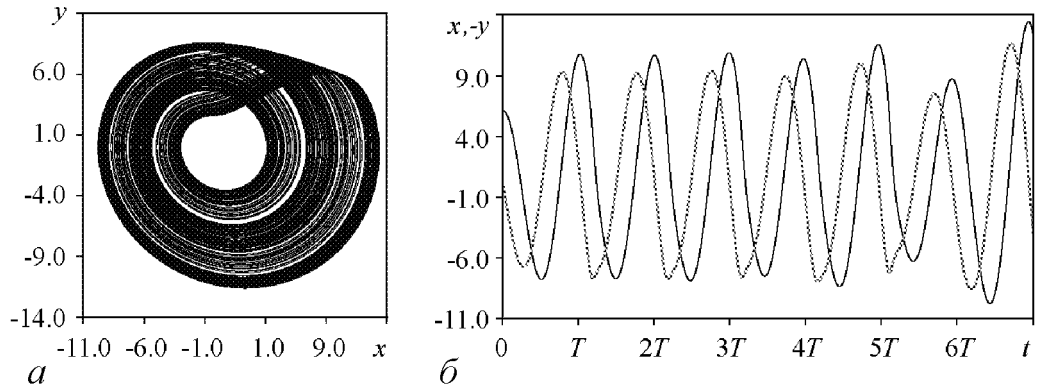


Рис. 1. Проекция фазового портрета (а) и временные реализации (б) системы (4); « $x(t)$ » – черные линии, « $-y(t)$ » – серые линии

отрицательными условными ляпуновскими показателями, связанными с системой-приемником:  $\lambda_1^R \approx -0.025$ ,  $\lambda_2^R \approx -0.109$ ,  $\lambda_3^R \approx -10.7$ . При добавлении малого информационного воздействия, не разрушающего динамику системы, режим синхронизации также сохраняется. Пользуясь тем, что  $x_D = x_R$  и  $y_D = y_R$ , выражение для опорного сигнала получим в следующем виде:

$$s_{ref}(t) = -y_R(t) + x_R(t). \quad (7)$$

Тогда амплитудно-модулированный сигнал будет иметь вид

$$\tilde{s}(t) = s + s_{ref} = -(1 + \xi(t))x_R(t), \quad (8)$$

а детектированный информационный сигнал  $\xi'(t)$ , соответственно, может быть получен по формуле

$$\xi'(t) = \frac{\langle |\tilde{s}(t)| \rangle}{\langle |x_R(t)| \rangle} - 1. \quad (9)$$

При компьютерном моделировании передачи и детектирования информации сигнал  $\xi(t)$  выберем в виде сложного квазипериодического сигнала с широким спектром

$$\xi(t) = A_1 \cos(\Omega_1 t + A_2 \cos \Omega_2 t), \quad (10)$$

где отношение  $\Omega_1/\Omega_2$  – иррационально. Рассмотрим фазовую динамику переменной  $s(t)$  в канале связи в случаях отсутствия и наличия передаваемой информации. Фаза может быть определена с привлечением дифференцирования переданного сигнала по формуле  $\varphi_s = \arg(s - i\dot{s}/\omega_0)$ . При отсутствии информации эта фаза совпадает с фазой переменной  $y$ :  $\varphi_y = \arg(y - i\dot{y}/\omega_0)$ . На рис. 2, а представлена реализация переменной фазы  $\varphi_y(t)$  при  $\xi(t) = 0$ . На следующем графике (рис. 2, б) представлена зависимость  $\varphi_s(t)$  при наличии информационного сигнала вида (10) с параметрами:  $\Omega_1 = 0.1\omega$ ,  $\Omega_2 = \Omega_1(\sqrt{5} + 1)/2$ ,  $A_1 = 0.1$ ,  $A_2 = 0.5$ . Сравнивая графики, можно видеть, что наличие малого информационного воздействия не оказывает существенного влияния на динамику хаотической фазы, что позволяет говорить о маскировке передаваемой информации.

Для того, чтобы получить «приблизительную» расшифровку информационного сигнала, рассмотрим разность фаз переменных:  $\Delta\varphi \approx \varphi_s - \varphi_y$ . Соответствующий график представлен на рис. 3, а (параметры информационного сигнала выбраны теми же, что и на рис. 2, б), где серым цветом показана зависимость  $\Delta\varphi(t)$ , а черным цветом показан оригинальный информационный сигнал  $\xi(t)$ . Из сравнения видно, что «разностная» аппроксимация информационного сигнала содержит высокочастотные осцилляции. Следовательно, для точного декодирования необходимо: (i) выполнение условия  $\xi \ll \omega_0$  и (ii) применение процедуры детектирования (8) с усреднением по времени в соответствии с формулой (9).

Результаты компьютерного моделирования передачи и детектирования информационного сигнала вида (10) с параметрами  $\Omega_1 = 10^{-3}\omega$ ,  $\Omega_2 = \Omega_1(\sqrt{5} + 1)/2$ ,  $A_1 = 0.1$ ,  $A_2 = 0.5$  представлены на рис. 3, б. Серым цветом показан фрагмент амплитудно-модулированного сигнала  $\tilde{s}(t)$ , полученного в соответствии с формулой (8), черным – декодированный информационный сигнал  $\xi'(t)$ , восстановленный в виде огибающей  $\tilde{s}(t)$ . Декодированный сигнал полностью совпадает с оригинальным сигналом  $\xi(t)$ , что и требовалось показать.

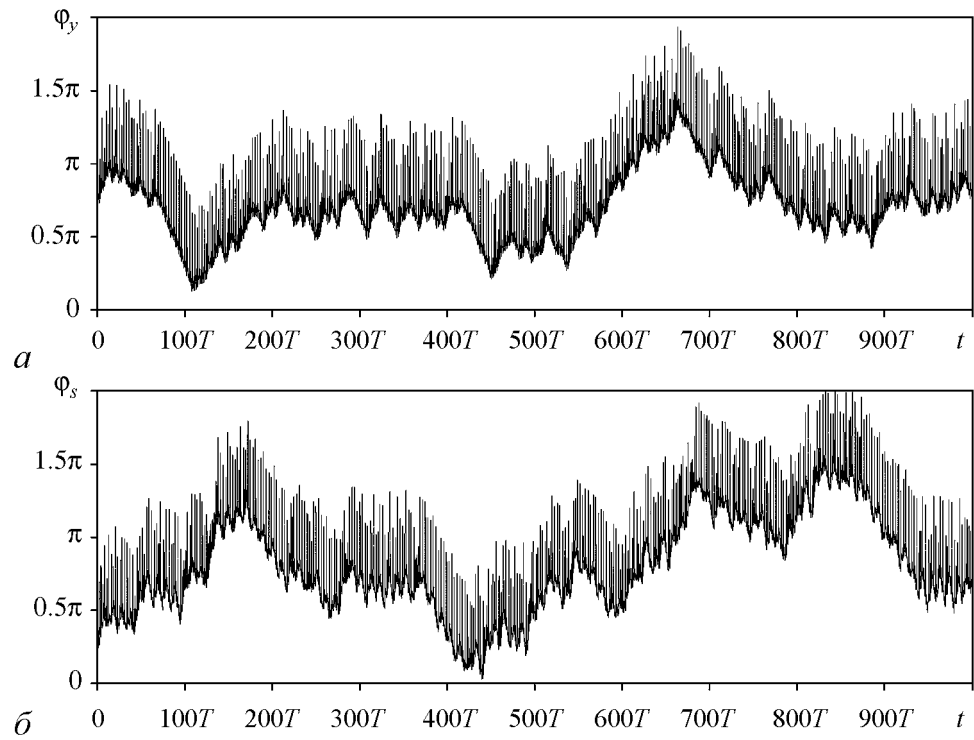


Рис. 2. Динамика хаотической фазы сигнала в канале связи при отсутствии (а) и при наличии (б) передаваемой информации

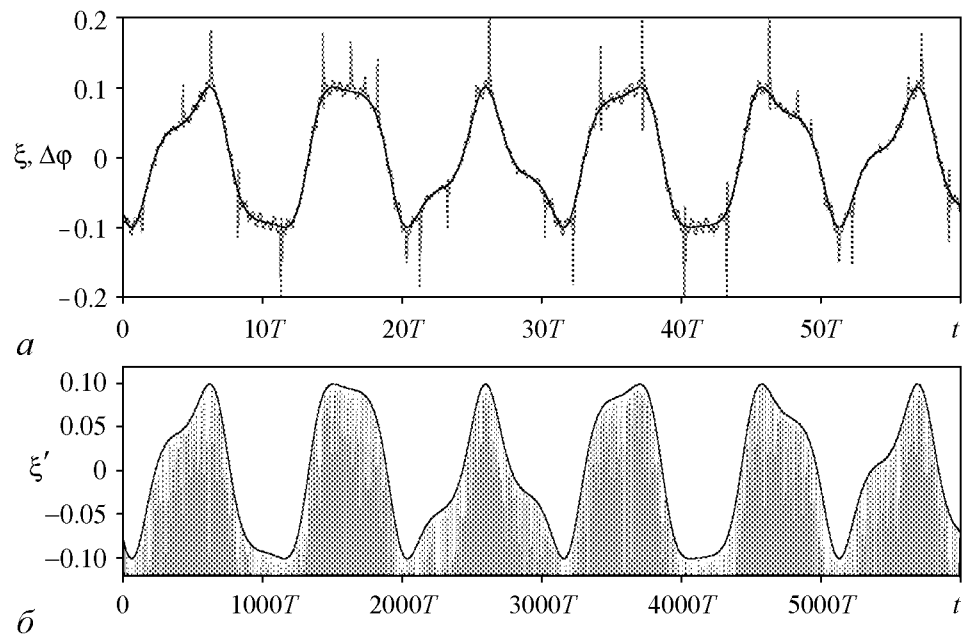


Рис. 3. Извлечение информации из фазы переданного сигнала путем оценки разности фаз  $\varphi_s$  и  $\varphi_y$  (а) и посредством процедуры хаотического фазового детектирования (б)

### 3. Связанные генераторы гиперболического хаоса

Для второй иллюстрации работоспособности схемы за основу возьмём 4-мерную потоковую систему, описывающую автономный генератор гиперболического хаоса, предложенный в работе [4] («модель А»),

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \omega_0 y + (1 - a_2 + a_1/2 - a_1^2/50)x + \varepsilon uv, \\ \dot{y} &= -\omega_0 x + (1 - a_2 + a_1/2 - a_1^2/50)y, \\ \dot{u} &= \omega_0 v + (a_1 - 1)u + \varepsilon x, \\ \dot{v} &= -\omega_0 u + (a_1 - 1)v, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $a_1 = x^2 + y^2$ ,  $a_2 = u^2 + v^2$ . При значениях параметров  $\omega_0 = 2\pi$ ,  $\varepsilon = 0.3$  в системе (11) реализуется гиперболический странный аттрактор типа Смейла–Вильямса, характеризующийся набором ляпуновских показателей  $\lambda_1 \approx 0.092$ ,  $\lambda_2 = 0$ ,  $\lambda_3 \approx -0.982$ ,  $\lambda_4 \approx -1.330$  и динамикой фазы  $\varphi = \arg(u + iv)$  (определяемой в последовательные дискретные моменты пересечения траекторией условной поверхности  $x^2 + y^2 - u^2 - v^2 = 0$ ), приблизительно описываемой отображением Бернулли

$$\varphi' \approx 2\varphi + \text{const.}$$

Пара однонаправлено связанных систем, описываемых уравнениями (11), может выступать в качестве «передатчика/приёмника» схемы передачи информации

$$\begin{aligned} D : \begin{cases} \dot{x}_D = \omega_0 y_D + (1 - a_2 + a_1/2 - a_1^2/50)x_D + \varepsilon u_D v_D, \\ \dot{y}_D = -\omega_0 x_D + (1 - a_2 + a_1/2 - a_1^2/50)y_D, \\ \dot{u}_D = \omega_0 v_D + (a_1 - 1)u_D + \varepsilon S(t), \\ \dot{v}_D = -\omega_0 u_D + (a_1 - 1)v_D, \end{cases} \\ R : \begin{cases} \dot{x}_R = \omega_0 y_R + (1 - b_2 + b_1/2 - b_1^2/50)x_R + \varepsilon u_R v_R, \\ \dot{y}_R = -\omega_0 x_R + (1 - b_2 + b_1/2 - b_1^2/50)y_R, \\ \dot{u}_R = \omega_0 v_R + (b_1 - 1)u_R + \varepsilon S(t), \\ \dot{v}_R = -\omega_0 u_R + (b_1 - 1)v_R. \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь  $a_1 = x_D^2 + y_D^2$ ,  $a_2 = u_D^2 + v_D^2$ ,  $b_1 = x_R^2 + y_R^2$ ,  $b_2 = u_R^2 + v_R^2$ . Связь между передатчиком и приёмником осуществляется за счёт общего члена в третьем уравнении подсистем

$$S(t) = x_D + y_D \xi(t), \quad (13)$$

где  $\xi(t)$  – информационный сигнал, подлежащий передаче. При отсутствии подмешивания информации ( $\xi(t) = 0$ ) возникающий устойчивый режим идентичной синхронизации характеризуется набором из 4-х отрицательных ляпуновских показателей, связанных с системой приёмником:  $\lambda_1^R \approx -0.087$ ,  $\lambda_2^R \approx -0.453$ ,  $\lambda_3^R \approx -0.598$ ,  $\lambda_4^R \approx -1.085$ . Поскольку хаотический режим является структурно-устойчивым, он сохраняется при внесении (относительно небольшого) информационного воздействия на систему-передатчик; полная синхронизация подсистем ( $x_D = x_R$ ,  $y_D = y_R$ ,

$u_D = u_R, v_D = v_R$ ) также сохраняется. Поэтому декодирование информации может быть произведено по вышеописанной схеме: сначала к передаваемому сигналу  $S(t)$  добавляется опорный  $S_{ref}(t) = -x_R(t) + y_R(t)$ , после чего возникающий амплитудно-модулированный сигнал  $\tilde{S}(t) = (1 + \xi(t))y_R(t)$  детектируется посредством выделения огибающей (усреднения)

$$\xi'(t) = \frac{\langle |\tilde{S}(t)| \rangle}{\langle |y_R(t)| \rangle} - 1. \quad (14)$$

Результаты компьютерного моделирования передачи и детектирования широкополосного информационного сигнала, заданного формулой (10), представлены на рис. 4 при параметрах  $\Omega_1 = 10^{-3}\omega_0, \Omega_2 = \Omega_1(\sqrt{5} + 1)/2, A_1 = 0.2, A_2 = 0.5$ . Передаваемый в канал связи сигнал (рис. 4, а) после сложения с опорным превращается в фазово-модулированный (рис. 4, б), который затем детектируется путём усреднения с выделением огибающей (рис. 4, в). Восстановленный таким образом информационный сигнал  $\xi'(t)$  совпадает с исходным.

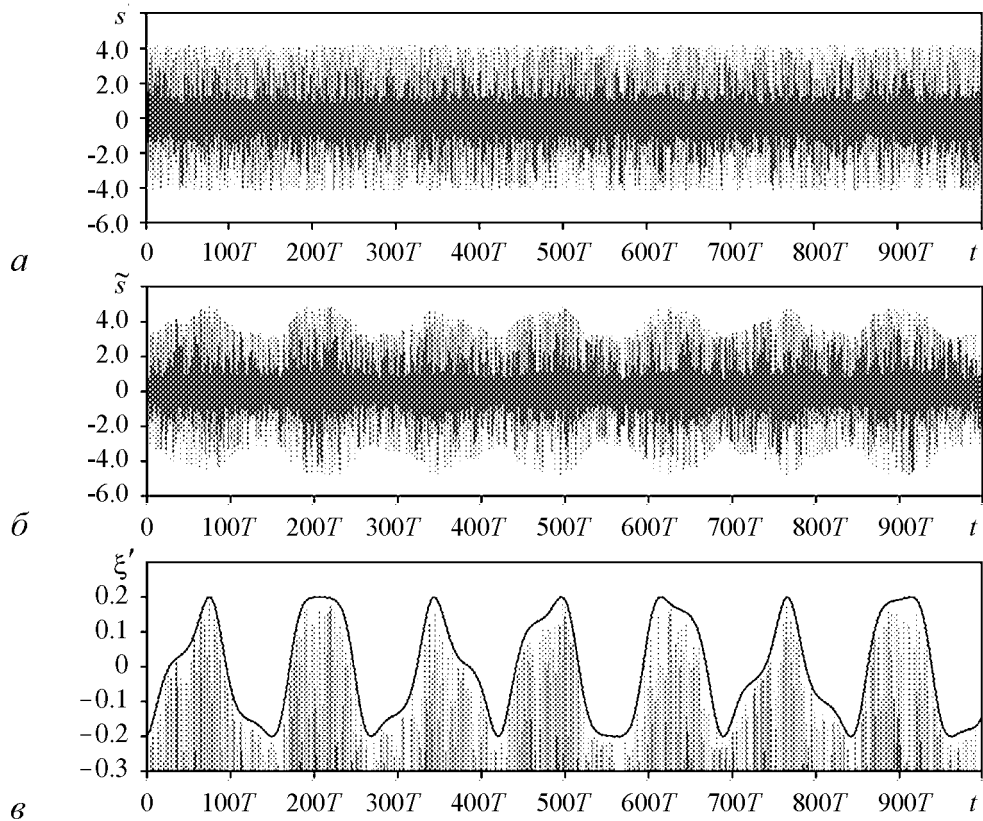


Рис. 4. Иллюстрация процедуры передачи информации на основе системы (13): передаваемый в канал связи фазово-модулированный сигнал (а); преобразование фазовой модуляции в амплитудную (б); выделение информационной огибающей (в)



## Заключение

Предложенная схема реализует следующие актуальные идеи в области передачи информации:

- сохранение принципов широкополосности несущего хаотического сигнала, самосинхронизации передатчика и приёмника, условной «конфиденциальности» передачи информации;
- применение принципа фазовой модуляции, разработка процедуры внесения и детектирования информации, в которой используется полная мощность несущего хаотического сигнала (энергетическая эффективность и помехоустойчивость);
- использование генераторов структурно-устойчивого (гиперболического) хаоса в качестве передатчика и приёмника.

Областью применения этой схемы могут стать устройства широкополосной беспроводной аналоговой связи, функционирующие на малых дистанциях и не требующие выделения специальных частот в силу малой плотности спектральной мощности. В качестве базового генератора схемы в реальных приложениях можно использовать, в частности, СВЧ-генераторы хаоса на основе кольцевых резонаторов [7], демонстрирующие фазово-когерентные хаотические автоколебания, а также другие генераторы с выраженной хаотической динамикой фазы, например, генераторы «грубого» (то есть структурно-устойчивого) хаоса, перечисленные в монографии [8], если их удастся реализовать в микроволновом диапазоне частот.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-02-00342).*

## Библиографический список

1. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. 251 с.
2. *Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю.* Синхронизация: Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. 493 с.
3. *Волковский А.Р., Рудков Н.В.* Синхронный хаотический отклик нелинейной системы передачи информации с хаотической несущей // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, № 3. С. 71.
4. *Kuznetsov S.P., Pikovsky A.* Autonomous coupled oscillators with hyperbolic strange attractors // *Physica D*. 2007. Vol. 232. P. 87.
5. *Кунцов П.В., Кузнецов С.П.* О феноменах, сопровождающих переход к режиму синхронного хаоса в связанных неавтономных осцилляторах, представленных уравнениями для комплексных амплитуд // *Нелинейная динамика*. 2006. Т. 2, № 3. С. 307.
6. *Захарова А.С., Вадивасова Т.Е., Анищенко В.С.* Взаимосвязь порога синхронизации с коэффициентом эффективной диффузии мгновенной фазы хаотических автоколебаний // *Нелинейная динамика*. 2008. Т. 4, № 2. С. 169.
7. *Grishin S.V., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A., and Romanenko D.V.* Generation of

chaotic microwave pulses in ferromagnetic film ring oscillators under external influence // IEEE Transactions on Magnetics. 2013. Vol. 49, № 3. P. 1047.

8. Кузнецов С.П. // Динамический хаос и гиперболические аттракторы: От математики к физике. Москва–Ижевск, 2013. 488 с.

*Поступила в редакцию* 26.09.2014

*После доработки* 24.11.2014

## **A NEW INFORMATION TRANSFER SCHEME BASED ON PHASE MODULATION OF A CARRIER CHAOTIC SIGNAL**

*Alexey Jalnine*

Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics of RAS, Saratov Branch

A new information transfer scheme based on dynamical chaos is suggested. An analog carrier signal is generated by self-exciting chaotic generator in a phase-coherent oscillatory regime. This carrier undergoes a modified procedure of phase modulation by information signal, which simultaneously affects upon the transmitting generator via the feedback loop. After the communication channel is passed, the signal modulated by information acts upon a receiving generator, so that a synchronous chaotic response arises in it. For data mining, a special procedure of phase detection for chaotic signal is developed. An efficiency of the scheme is demonstrated by the examples of coupled modified Rössler oscillators in the regime of spiral chaos, and by the example of coupled self-contained generators of structurally stable (hyperbolic) chaos.

*Keywords:* Synchronization, chaotic communication, self-sustained generators, hyperbolic chaos.



*Жалнин Алексей Юрьевич* – окончил Факультет нелинейных процессов СГУ им. Н.Г. Чернышевского (2000) и аспирантуру СГУ, защитив диссертацию кандидата физ.-мат. наук по специальности «радиофизика» (2003). Область научных интересов: теория бифуркаций, странные аттракторы, синхронизация хаоса и управление, схемы передачи информации на основе широкополосных несущих сигналов. В настоящее время работает в должности старшего научного сотрудника в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Автор более 20 статей в отечественных и зарубежных научных изданиях.

410019 Саратов, ул. Зеленая, 38  
Саратовский филиал Института радиотехники  
и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
E-mail: jalnine@rambler.ru