



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ СИСТЕМ ХАОТИЧЕСКОЙ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ

С.Н. Владимиров, В.В. Негруль

В работе ставится и решается задача экспериментального исследования некоторых систем синхронной хаотической связи с целью сравнения их качественных и энергетических характеристик. Первая из рассмотренных систем представляла собой прямо-передающее устройство с аддитивным подмешиванием информационной компоненты к хаотической несущей, вторая – устройство с нелинейным введением информационной компоненты в источник хаотических колебаний, третья – структуру связи, сочетающую в себе аддитивное подмешивание на передающей стороне и синхронный хаотический отклик на приемной. В целях объективности сравнения полученных результатов анализируемые системы были реализованы на базе одной и той же радиофизической модели автогенератора с трехмерным фазовым пространством.

Натурные эксперименты показали, что при условии сохранения конфиденциальности передачи аналоговых сигналов для первых двух систем качество сигнала, восстанавливаемого в их приемных устройствах, примерно одинаково. Однако использование нетривиального подхода, заключающегося в объединении аддитивного подмешивания информационной компоненты на передающей стороне и синхронного хаотического отклика на приемной, позволяет существенно улучшить качество восстанавливаемой информационной компоненты и увеличить энергетический потенциал канала связи.

Введение

После установления факта, что движения $x_1(t)$, $x_2(t)$ двух динамических систем (источника детерминированных хаотических колебаний и согласованного с этим источником нелинейного негенерирующего фильтра) могут быть синхронизированы по форме ($|x_1(t) - x_2(t)| \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$) [1], стало очевидно, что одним из перспективных практических применений обнаруженного явления может стать передача информации в аналоговой или цифровой форме, в том числе и конфиденциальным образом. Под конфиденциальностью передачи здесь будем понимать невозможность либо недопустимо длительное время извлечения информации из передаваемого сигнала сторонними лицами и организациями, причем сокрытие самого факта передачи не предполагается. Одновременное обеспечение конфиденциальности и маскировки может быть достигнуто путем совмещения идей синхронизации хаотических генераторов и корреляционных методов приема сверхширокополосных сигналов. Эта новая самостоятельная задача, находящаяся в стадии постановки, в данной работе не затрагивается. В последние годы был предложен целый ряд устройств [2–9], в той или иной мере

решающих задачу скрытой передачи информации. Список публикаций по данной тематике обширен, однако экспериментальные исследования занимают в нем незначительное место (см., например, [2,8–10]). Поэтому представляется весьма важным проведение дополнительных физических экспериментов, проясняющих нетривиальные вопросы функционирования реальных систем связи с использованием хаотической несущей.

Для обеспечения конфиденциальности спектр сигнала, переносящего полезную информацию, должен быть тем или иным образом скрыт в спектре хаотического сигнала, для чего существуют различные приемы. Один из них заключается в линейном добавлении малой информационной компоненты к более мощной хаотической несущей – хаотическая маскировка (chaotic masking). При втором способе малая информационная компонента воздействует непосредственно на нелинейное устройство, генерирующее хаотический тип колебания (nonlinear mixing). Третья группа методов (modulation of parameters, chaotic switching, chaos shift keying etc.) заключается в управлении хаотическим сигналом с помощью модуляции одного или нескольких параметров его источника. Существует еще ряд способов (predictive Poincare control modulation, chaotic frequency modulation), но они либо менее употребительны, либо находятся в стадии разработки и здесь не рассматриваются.

К системам конфиденциальной хаотической связи можно предъявлять различные требования, из них весьма важным, если не основным, является криптографическая стойкость. В пионерских работах, посвященных рассматриваемой проблеме, криптостойкость систем синхронной хаотической связи предполагалась очень высокой. Результаты исследований последних лет (см., например, [11–15]) существенно поколебали такую уверенность, однако не разрушили ее полностью. Во-первых, расшифровка информации даже с помощью современных суперкомпьютеров требует определенных временных затрат, после чего конфиденциальность информации может уже не иметь никакого значения. Во-вторых, необходима серьезная, если не сказать уникальная, научная подготовка обслуживающего персонала, что может себе позволить далеко не любая организация. В-третьих, передача на основе хаотической несущей может применяться в сочетании с другими приемами сокрытия и маскировки информации, что делает задачу декодирования перехваченной информации весьма неопределенной и проблематичной. Как следует из работ [11–15], наименьшей криптостойкостью обладают хаотические системы связи, использующие модуляцию параметров источника динамического хаоса, существенно же более устойчивыми являются системы с линейным и нелинейным подмешиванием при условии, что доля информационной компоненты в смеси с хаотической становится ощутимой. Однако увеличению этой доли препятствуют два обстоятельства. Во-первых, с ростом уровня информационной составляющей может уменьшиться степень когерентности передающей и приемной систем, что приведет к искажению или потере части полезной информации; во-вторых, облегчается задача обнаружения информации.

В настоящей работе поставлена и решена задача предварительного теоретического анализа и дальнейшего экспериментального исследования систем синхронной хаотической передачи аналоговой информации с ее аддитивным и нелинейным подмешиванием к хаотической несущей с целью выбора той системы связи, которая позволяла бы достигать большего уровня информационной составляющей при обеспечении сравнимого качества передачи.

1. Типичные структуры систем синхронной хаотической связи

Функциональные схемы, поясняющие аддитивный и нелинейный способ наложения информационного сигнала $s(t)$ на хаотическую несущую, представлены на рис. 1.

При аддитивном подмешивании в передатчике информационный сигнал $s(t)$

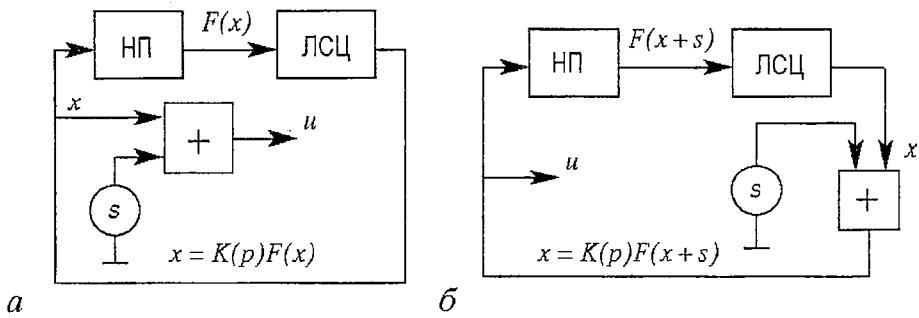


Рис. 1. Передающие устройства систем синхронной хаотической связи с аддитивным (а) и нелинейным (б) подмешиванием информационного сигнала $s(t)$ к хаотической компоненте $x(t)$. Здесь: НП – нелинейный преобразователь с передаточной характеристикой $F(x)$; ЛСЦ – линейная селективная цепь, избирательные свойства которой определяются линейным дифференциальным оператором $K(p)$; $p=d/dt$; $u(t)$ – излучаемый сигнал

поступает на вход сумматора, на другой вход которого поступает сигнал от хаотического генератора $x(t)$. Смесь хаотического и информационного сигналов поступает из сумматора в канал связи (рис. 1, а). Отличие нелинейного способа подмешивания состоит в том, что информационный сигнал воздействует непосредственно на хаотический генератор (рис. 1, б), создавая на его выходе сложную нелинейную смесь информационной и хаотической компонент.

Для представленных на рис. 1 передающих устройств сигнал, поступающий в канал связи, имеет вид $u(t)=s(t)+x(t)$, но в первом случае хаотическая несущая подчиняется дифференциальному уравнению $x(t)=K(p)F[x(t)]$, а во втором – $x(t)=K(p)F[x(t)+s(t)]$. Неавтономность второго уравнения может привести к ряду нежелательных эффектов, например, к разрушению хаотического режима генерации, что при прочих равных условиях накладывает на величину $s(t)$ дополнительные, по сравнению с хаотической маскировкой, ограничения. Однако для нелинейного смещения существует более эффективный метод демодуляции, названный в [6] синхронным хаотическим откликом.

Обсудим способы извлечения полезной информации из сигналов, сформированных рассмотренными выше способами. Для простоты будем считать канал связи идеальным, то есть не вносящим потерь, а также аддитивных и мультипликативных искажений. На рис. 2, а представлена функциональная схема приемного устройства, которое способно с определенной погрешностью демодулировать аддитивную смесь полезного и хаотического сигналов. Сигнал из канала связи поступает на вычитающее устройство и через однонаправленный элемент на самовозбуждающийся генератор хаотических колебаний (обведен штриховой линией). Если элементы этого генератора и аналогичные элементы генератора передающего устройства идентичны, то при отсутствии в принятом сигнале информационной составляющей возможна синхронизация хаотических сигналов передатчика и приемника при почти любых начальных условиях. В этом случае сигнал на выходе вычитателя отсутствует. Появление малой

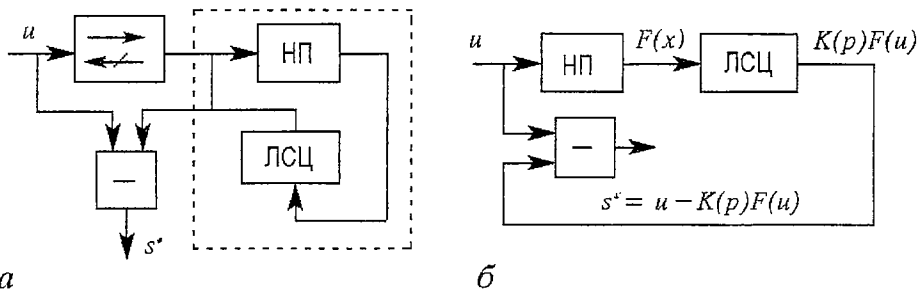


Рис. 2. Радиоприемные устройства систем синхронной хаотической связи, использующие для извлечения из принимаемого сигнала $u(t)$ информационной компоненты s^* синхронизацию хаотического генератора (а) и синхронный хаотический отклик (б)

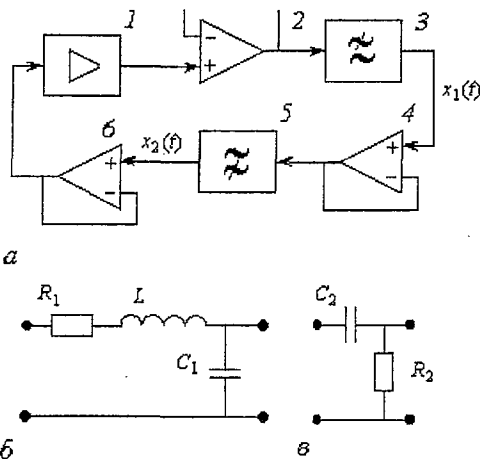
информационной компоненты приводит к некоторому нарушению когерентного режима, однако на выходе вычитателя появляется сигнал $s^*(t)$, который с погрешностью, пропорциональной величине $s(t)$, позволяет восстановить переданную информацию. Жесткие ограничения на долю информационной составляющей в ее смеси с хаотической и принципиальная невозможность точного восстановления переданной информации даже при идеальном канале связи являются препятствием для широкого использования рассмотренной системы синхронной связи на практике.

На рис. 2, б изображено устройство, предназначенное для демодуляции сигнала, сформированного путем нелинейного подмешивания. Действительно, если нелинейные преобразователи и фильтры передатчика и приемника идентичны, то, подставляя в уравнение для сигнала на выходе вычитающего устройства $s^*=u-K(p)F(u)$ значение $u=x+s$, с учетом ранее полученного соотношения $x=K(p)F(x+s)$ имеем, что $s^*=s$. Таким образом, при использовании нелинейного подмешивания на передающей стороне и синхронного хаотического отклика на приемной стороне принципиально возможно точное восстановление переданной информации. Поэтому такая система передачи представляется более предпочтительной по отношению к системе с аддитивным подмешиванием.

Рассмотрим нетривиальный вопрос о возможности использования явления синхронного хаотического отклика для выделения информации из сигнала, сформированного аддитивным подмешиванием. В приближении малости информационной составляющей можно показать, что сигнал на выходе вычитателя будет подчиняться уравнению $s^*=s+K(p)s\partial F(x)/\partial x$. Последнее соотношение указывает на то, что в спектре демодулированного сигнала кроме составляющих полезного сигнала присутствуют побочные продукты преобразования, вызванные нелинейным взаимодействием регулярной $s(t)$ и хаотической $x(t)$ компонент. Данные побочные продукты могут оказывать или не оказывать вредное маскирующее влияние на возможность выделения полезной информации в зависимости от занимаемой полосы частот, то есть от возможности их отфильтровывания либо селективными цепями приемника, либо дополнительным фильтром. В настоящей работе будет экспериментально показана возможность построения приемного устройства с требуемыми свойствами и системы когерентной синхронной связи, обладающей рядом преимуществ перед рассмотренными ранее.

2. Математическая модель генератора хаотических колебаний и ее экспериментальная реализация

Рассмотрим представленный на рис. 3 источник хаотических колебаний, являющийся автоколебательной системой, состоящей из последовательно соединенных и замкнутых в кольцо обратной связи нелинейного усилителя и двух селективных звеньев.



Подсистемы R_1LC_1 и R_2C_2 , представляющие собой соответственно фильтр нижних частот второго порядка и фильтр верхних частот первого порядка, образуют линейную селективную цепь. Нелинейный элемент генератора обладает гладкой характеристикой, которую при расчетах удобно аппроксимировать выражением вида

Рис. 3. Функциональная схема источника хаотических колебаний (а) и его селективные подсистемы: R_1LC_1 —фильтр нижних частот (б), R_2C_2 —фильтр верхних частот (в); 1 — нелинейный усилитель; 2, 4, 6 — элементы развязки; 3 — фильтр нижних частот; 5 — фильтр верхних частот

$$F(x) = kx \exp(-k^2 x^2 / g),$$

$$\begin{cases} g = 2e, & x \geq 0, \\ 0 \leq g \leq 2e, & x < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где k – коэффициент усиления в режиме малого сигнала, g – параметр несимметрии. Выбор такого вида нелинейности обусловлен ее глобальной ограниченностью ($-1 \leq F(x) \leq 1$), легкостью моделирования несимметричных режимов, удобством экспериментальной реализации в виде последовательно включенных линейного усилителя с коэффициентом передачи k и нелинейного четырехполосника, представленного на рис. 4.

В принятых на рис. 3 обозначениях переменных состояния $x_1(t)$ и $x_2(t)$ динамические режимы генератора описывает система нелинейных дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3, \\ \dot{x}_2 = -\alpha x_2 + x_3, \\ \dot{x}_3 = -x_1 + F(x_2) - \varepsilon x_3, \end{cases} \quad (2)$$

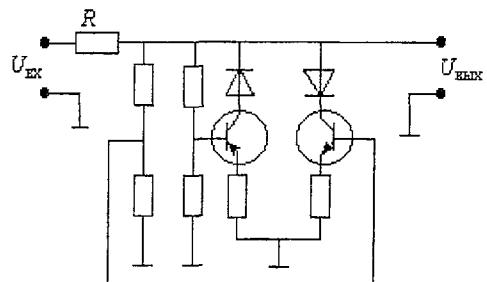
где точка над переменной означает операцию дифференцирования по безразмерному времени $\tau = \omega_0 t$, $\omega_0 = 1/(LC_1)^{1/2}$ и приняты обозначения: $\alpha = 1/(\omega_0 R_2 C_2)$ – нормированная частота среза фильтра верхних частот, $\varepsilon = R_1/(\omega_0 L)$ – коэффициент затухания фильтра нижних частот.

Линейный анализ системы (2) показал, что существует единственная особая точка – тривиальное состояние покоя. Данное состояние теряет устойчивость при $k > 1 + \alpha\varepsilon - \alpha/(\alpha + \varepsilon)$. При пограничном значении коэффициента усиления k характеристическое уравнение исследуемой структуры

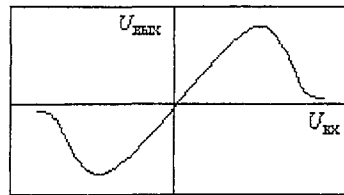
$$\lambda^3 + (\alpha + \varepsilon)\lambda^2 + (1 + \alpha\varepsilon - k)\lambda + \alpha = 0 \quad (3)$$

имеет один отрицательный вещественный корень и два мнимых комплексно-сопряженных корня, а именно, $\lambda_1 = -(\alpha + \varepsilon)$, $\lambda_{2,3} = \pm j[\alpha/(\alpha + \varepsilon)]^{1/2}$. Такое соотношение между корнями уравнения указывает на то, что система (2) находится в состоянии, являющемся пограничным между устойчивым и неустойчивым седло-фокусами. Теперь окрестность особой точки представляет собой пересечение двумерного неустойчивого и одномерного устойчивого многообразий.

О дальнейшей динамике системы с ростом управляющего параметра k при фиксированных значениях оставшихся параметров α и ε можно судить по бифуркационной диаграмме, которая строилась по результатам численного моделирования системы (2). Анализ этой диаграммы показал, что области регулярного поведения чередуются с областями хаотических движений. Для примера на рис. 5 приведены два частных фрагмента



а



б

Рис. 4. Принципиальная схема (а) и качественный вид проходной характеристики (б) нелинейного элемента

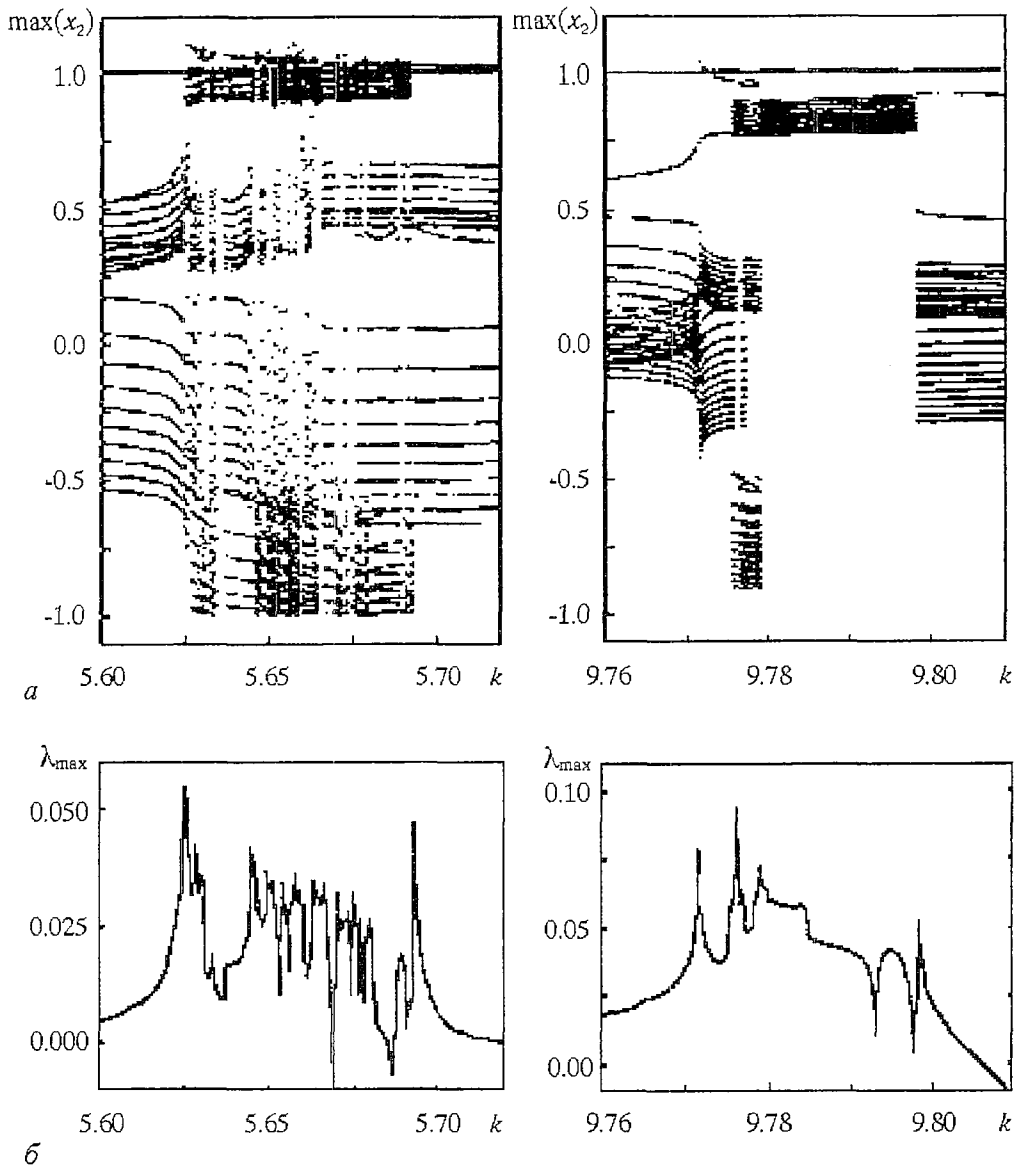


Рис. 5. Фрагменты бифуркационных диаграмм – $\max(x_2(t))$ как функции от управляющего параметра k (а) и соответствующие им значения максимального ляпуновского характеристического показателя λ_{\max} (б), полученные в результате обработки результатов численного интегрирования математической модели (2) для следующих значений параметров: $\alpha=0.05$, $\varepsilon=0.25$

бифуркационной диаграммы. Можно видеть, что при значениях $k \approx 5.65$ и $k \approx 9.78$ реализуются области сложных ограниченных неперiodических движений, которые асимптотически неустойчивы, на что указывает положительность максимального ляпуновского показателя. Интересно, что структура распределения максимумов переменной $x_2(t)$ чрезвычайно сложна, что не позволяет сопоставить реализующиеся сценарии перехода от порядка к хаосу ни с одним из хорошо изученных и описанных в литературе сценариев.

В заключение теоретического анализа заметим, что дивергенция фазового потока для исследуемой системы $D = \partial \dot{x}_1 / \partial x_1 + \partial \dot{x}_2 / \partial x_2 + \partial \dot{x}_3 / \partial x_3 = -(\alpha + \varepsilon)$ сравнительно невелика, следовательно, степень сжатия некоторого начального объема V_0 в фазовом пространстве с течением времени $V(\tau) = V_0 \exp(D\tau)$ также не может быть

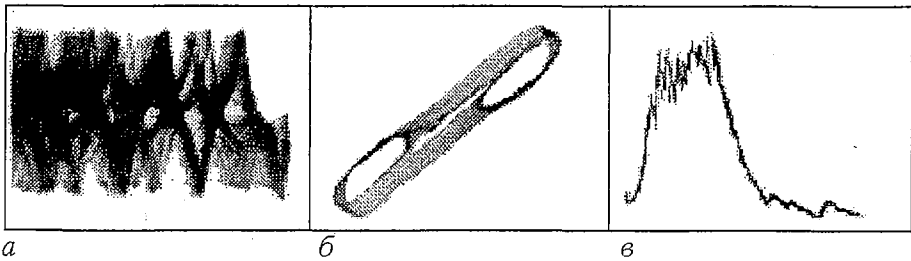


Рис. 6. Экспериментально реализованный режим хаотического генератора. Временная реализация хаотического сигнала $x_1(t)$ (а), его фазовый портрет в плоскости (x_1, x_2) (б) и энергетический спектр (1 см – 1.5 кГц) (в)

значительной. Поэтому аттрактор системы (2) должен иметь скорее «объемную» форму, чем плоскую.

Лабораторные макеты источников хаотических типов колебаний, используемые для исследования систем синхронной хаотической связи, изготавливались в соответствии с функциональной схемой, представленной на рис. 3. После детального экспериментального исследования этих источников в качестве основного колебательного режима был выбран хаотический режим, временная реализация, фазовый портрет и фурье-спектр которого представлены на рис. 6. Данный колебательный режим имел место при следующих значениях параметров генератора: $L=22.82$ мГн, $R_1=680$ Ом, $C_1=9100$ пФ, $R_2=12$ кОм, $C_2=0.5$ мкФ.

Хаотический сигнал имел среднеквадратичное значение около 2.5 В в частотной полосе 100–3500 Гц, достаточной для эффективной маскировки аналоговой информационной компоненты – голосовых сообщений в полосе телефонного канала.

3. Экспериментальные исследования

Хаотическая синхронизация. Исследуемые системы хаотической связи являются синхронными, поскольку, в основе их функционирования лежит явление хаотической синхронизации. Известно, что две хаотические системы (в нашем случае передатчик и приемник) могут быть синхронизированы, если все соответствующие параметры этих систем удовлетворяют требованию высокой степени идентичности. Для этой цели в нашем эксперименте параметры пассивных элементов передатчика и приемника подбирались с точностью до 0.5%.

Хаотическая синхронизация, используемая для детектирования информационной компоненты в системе хаотической связи с нелинейным подмешиванием, реализуется в виде синхронного хаотического отклика. Выполнив все условия для его достижения, то есть обеспечив максимально возможную степень идентичности параметров и отсутствие существенных возмущений в канале, мы получили равенство сигналов $x_1(t)$ и $x_1'(t)$ ведущей и ведомой системы, соответственно (рис. 7, а). Расстройка какого-либо параметра каждой из систем приводит к десинхронизации хаотического отклика (рис. 7, б), пропорциональной величине этой расстройки.

Поскольку в реальных условиях отклонение параметров соответствующих элементов цепей передатчика и приемника неизбежно, некоторая доля несинхронности хаотического отклика всегда имеет место. В результате на выходе вычитателя приемной системы присутствует определенный уровень остаточного шума рассогласования. В эксперименте этот уровень составил –35.5 дБ по отношению к сигналу в канале.

В системе хаотической связи типа хаотической маскировки, при выполнении аналогичных условий, между передающей и приемной системами возникает вынужденная хаотическая синхронизация. Ведущая хаотическая система (передатчик) жестко навязывает ведомой системе (приемнику) свои начальные

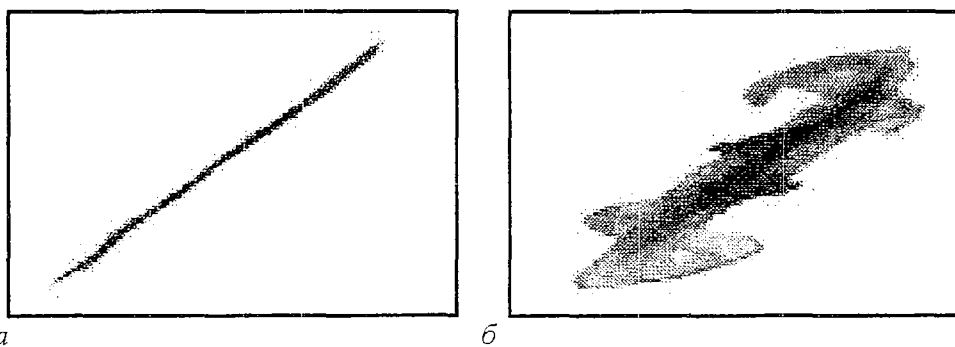


Рис. 7. Синхронный (а) и несинхронный (б) хаотические отклики приемной системы в плоскости (x_1', x_1)

условия. В результате сигналы в этих системах полностью совпадут по форме. Однако в реальных условиях на выходе вычитателя ведомой системы, также как и в первом случае, будет присутствовать некоторый уровень остаточного шума рассогласования. В эксперименте он составил -31.5 дБ по отношению к сигналу в канале.

В обоих случаях шум рассогласования выступает в роли основной причины снижения качества восстановленного в приемнике информационного сигнала. Очевидно, что в системе связи, использующей синхронный хаотический отклик для детектирования информационной компоненты, качество последней должно быть выше. Также ясно, что для оценки качества передачи следует использовать отношение мощности информационного сигнала на выходе приемника $P_{ис}$ к мощности остаточного шума рассогласования $P_{ош}$, определяемое как $C/Ш = P_{ис}/P_{ош}$.

Передача аналоговой информации. Передающая и приемная части исследуемых систем хаотической связи реализованы на базе генератора хаотических колебаний, представленного на рис. 3, а. Эксперименты по передаче аналоговой информации посредством хаотического несущего сигнала проводились в низкочастотном диапазоне. Функцию канала связи выполняла проводная линия, что соответствовало идеальному случаю, когда канальный шум и искажения не оказывали влияния на передаваемый по каналу связи сигнал.

Первоначально в качестве тестового информационного сигнала использовалось синусоидальное колебание $s(t) = A \sin(2\pi ft)$. При этом доля информационной компоненты μ , заключенной в хаотическом несущем сигнале, изменялась в пределах от 0.1 до 50 % в диапазоне частот f от 0 до 3.5 кГц.

На рис. 8 представлены спектры мощности сигнала, поступающего на вход приемной системы. Из рисунков видно, что при нелинейном и аддитивном подмешивании информационного сигнала его влияние на вид спектра передаваемого сигнала неодинаково. В первом случае спектр более чувствителен к амплитуде и частоте вводимого информационного сигнала. Так, если частота информационного сигнала находится в пределах от 300 Гц до 3 кГц и его доля в смеси с хаотическим несущим сигналом превышает соответственно 0.5 % для случая нелинейного и 15.2 % для случая аддитивного подмешивания, то он становится заметным на фоне широкополосного спектра несущего сигнала и начинает прослушиваться в канале. Замечено, если частота вводимого нелинейным образом информационного сигнала лежит вблизи характерных спектральных пиков хаотического несущего сигнала, возникает эффект резонансного усиления информационного сигнала.

Спектры мощности восстановленного в приемной системе информационного сигнала вида $s(t) = A \sin(2\pi ft)$ представлены на рис. 9. Для того чтобы данный сигнал был скрыт в несущем хаотическом сигнале, его доля составляла 0.5 % при нелинейном и 15.2 % при аддитивном подмешивании. Такое соотношение информационной и хаотической компонент обеспечило отношение $C/Ш$ на выходе вычитателя приемной системы соответственно 6 и 12 дБ (рис. 10, а). В результате

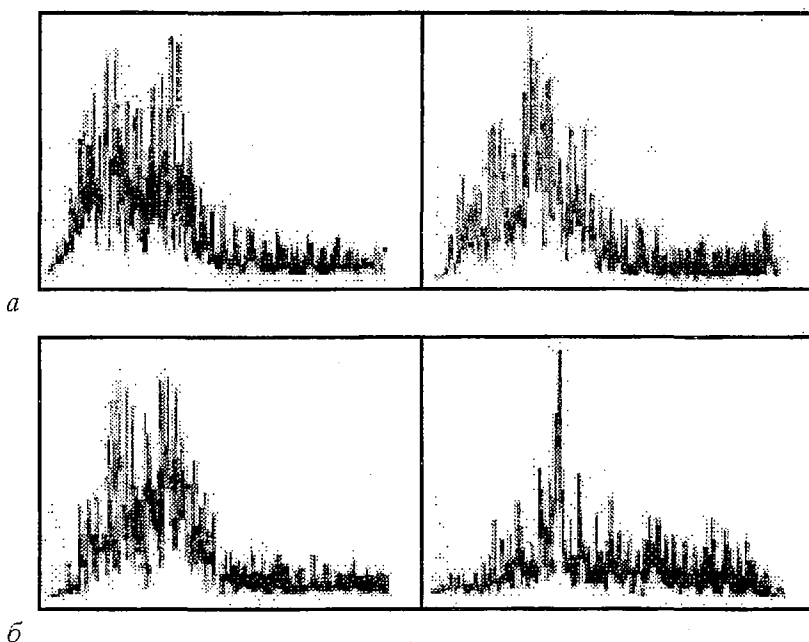


Рис. 8. Спектры мощности сигналов на входе приемника при нелинейном (а) и аддитивном (б) подмешивании информационного сигнала $s(t)=A\sin(2\pi ft)$ для $f=1.5$ кГц и значений A (слева направо): 0.3 В, 0.5 В (а); 10 мВ, 20 мВ (б); (1см – 1.5 кГц)

в первом случае восстановленный информационный сигнал был едва различимым на фоне остаточного шума рассогласования за счет эффекта резонансного усиления, а во втором – отличался относительно высоким качеством.

Предположение о том, что введенный аддитивным способом информационный сигнал может быть детектирован на приемной стороне с помощью синхронного хаотического отклика, было проверено экспериментально. Эксперимент показал, что в этом случае спектр демодулированного сигнала содержит побочные продукты преобразования, которые возникают на частотах 4 кГц и выше (рис. 9, в). Следовательно, данные продукты не должны искажать спектр восстановленного информационного сигнала. Причем качество этого сигнала может быть значительно улучшено путем использования дополнительного фильтра низких частот (ФНЧ) на выходе приемника.

Для того чтобы информационный сигнал был скрыт в хаотическом несущем сигнале и не прослушивался в канале связи, его доля по отношению к хаотическому несущему сигналу не превышала 15.2 %. При этом отношение С/Ш на выходе приемника достигало 16 дБ (см. рис. 10, а). Использование дополнительного ФНЧ позволило повысить отношение С/Ш до 20 дБ.

На следующем этапе был проведен эксперимент по передаче речевых сигналов. Также как и в первом случае, варьируемой величиной выступала доля информационной компоненты в смеси с хаотическим несущим сигналом.

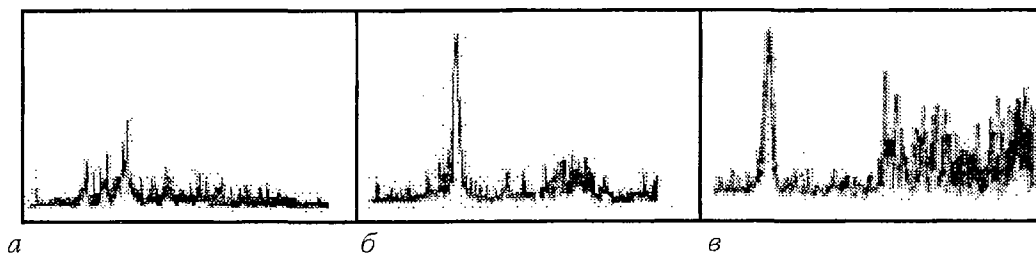


Рис. 9. Энергетические спектры восстановленного информационного сигнала в системе связи с нелинейным (а), аддитивным (б) подмешиванием, а также в случае аддитивного подмешивания в сочетании с синхронным хаотическим откликом (в)

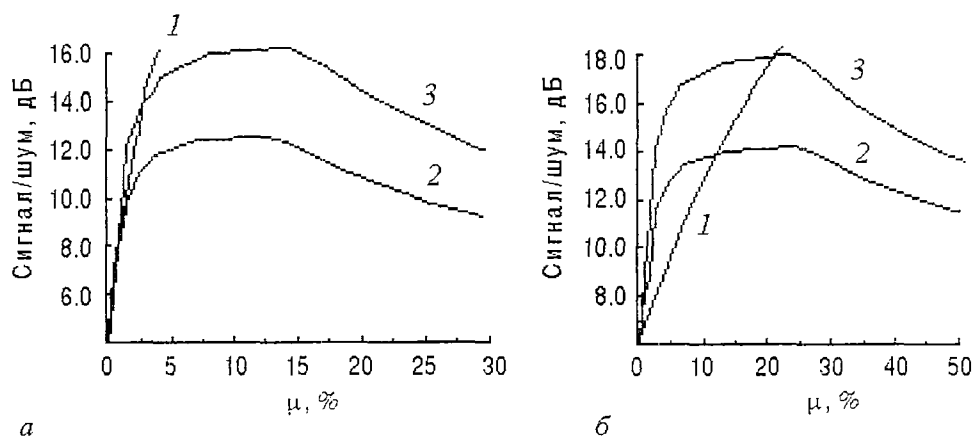


Рис. 10. Зависимость отношения С/Ш на выходе приемника от доли информационной компоненты в системе связи с нелинейным 1, аддитивным 2 подмешиванием, а также в случае аддитивного подмешивания в сочетании с синхронным хаотическим откликом 3: $s(t)=A\sin(2\pi ft)$ (а), речевой сигнал (б)

Эксперимент показал, если доля информационной компоненты превышала 6.5 %, система хаотической связи с нелинейным подмешиванием становилась неустойчивой по отношению к вводимому информационному сигналу. Так, при уровне информационной компоненты 8.6 % модуляция собственного хаотического сигнала передающей системы становилась существенной, а передаваемый речевой сигнал прослушивался в канале связи. Когда речевой сигнал оставался неразборчивым при прослушивании канала, отношение С/Ш на выходе приемной системы достигало 12 дБ (рис. 10, б).

Для случая системы связи с хаотической маскировкой существенного изменения формы спектра передаваемого сигнала не наблюдалось вплоть до момента, когда доля информационной компоненты достигала 26 %. Однако при дальнейшем увеличении уровня информационного сигнала он начинал проявляться на фоне маскирующего хаотического колебания, искажая исходную форму последнего, и становился разборчивым при прослушивании канала связи. Уровень информационной компоненты, при котором речь в канале не прослушивалась, обеспечивал отношение С/Ш на выходе приемной системы около 14 дБ (см. рис. 10, б).

Однако применение метода синхронного хаотического отклика для детектирования речевого сигнала, введенного аддитивным способом, значительно повысило отношение С/Ш, которое составило 18 дБ (см. рис. 10, б). При использовании дополнительного ФНЧ на выходе приемной системы отношение С/Ш могло достигать 20 дБ. По-прежнему, чтобы обеспечить конфиденциальность связи, доля информационной компоненты в смеси с хаотическим несущим сигналом не превышала 26 %.

Заключение

В настоящей работе проведен сравнительный анализ трех систем синхронной хаотической связи. Первая представляла собой систему с аддитивным подмешиванием информационной компоненты к хаотической несущей; вторая – систему с нелинейным воздействием информационной компоненты на источник хаотических колебаний; третья – систему, сочетающую в себе аддитивное подмешивание на передающей стороне и синхронный хаотический отклик на приемной.

Выбор доли информационной компоненты, вводимой в несущий хаотический сигнал, определяется на основе разумного компромисса. С одной стороны, увеличение этой доли, приводящее к улучшению качества восстанавливаемого в

приемнике сигнала, ограничено снижением скрытности передаваемого сообщения. С другой стороны, уменьшение доли информационного сигнала, повышающее степень конфиденциальности системы связи, ограничено уменьшением энергетического потенциала канала связи и снижением качества восстанавливаемого в приемнике сигнала за счет имеющегося в системе уровня шума рассогласования. Последнее обстоятельство предъявляет жесткие требования к качеству хаотической синхронизации.

Натурный эксперимент показал, что при соблюдении условий конфиденциальности передачи речевых сигналов для первых двух систем связи, качество сигнала, восстанавливаемого в приемниках этих систем, примерно одинаково. Однако объединение аддитивного подмешивания информационной компоненты и синхронного хаотического отклика для ее детектирования позволяет значительно повысить качество восстанавливаемой информационной компоненты и увеличить энергетический потенциал канала связи.

Библиографический список

1. Pecora L.M., Carroll T.L. Synchronization in chaotic systems // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 64, № 8. P. 821.
2. Kocarev L., Halle K.S., Eckert K., Chua L., Parlitz U. Experimental demonstration of secure communications via chaotic synchronization // Int. J. Bif. & Chaos. 1992. Vol. 2, № 3. P. 709.
3. Parlitz U., Chua L., Kocarev L., Halle K., Shang A. Transmission of digital signals by chaotic synchronization // Int. J. Bif. & Chaos. 1992. Vol. 2, № 4. P. 973.
4. Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С. Передача информации с использованием детерминированного хаоса // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, № 7. С. 1310.
5. Cuomo K., Oppenheim A. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71, № 1. P. 65.
6. Волковский А.Р., Рутьков Н.В. Синхронный хаотический отклик нелинейной системы передачи информации с хаотической несущей // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 9, № 3. С. 71.
7. Козлов А.К., Шалфеев В.Д. Управление хаотическими колебаниями в генераторах с запаздывающей петлей фазовой автоподстройки // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 2. С. 36.
8. Dmitriev A., Panas A., Starkov S. Experiments on speech and music signals transmission using chaos // Int. J. Bif. & Chaos. 1995. Vol. 5, № 3. P. 371.
9. Dmitriev A., Panas A. Experiments on RF bend communications using chaos // Int. J. Bif. & Chaos. 1997. Vol. 7, № 11. P. 2511.
10. Vladimirov S.N., Negru' V.V. Control of output signal entropy of the deterministic chaotic oscillations sources // Proc. The 3-rd international symposium SIB-CONVERS'99, May 18–20, Tomsk, Russia. 1999. Vol. 2. P. 333.
11. Short K.M. Step toward unmasking secure communication // Int. J. Bif. & Chaos. 1994. Vol. 4. P. 959.
12. Baker G.L., Golub J.P., Blackbum J.A. Inverting chaos: Extracting system parameters from experimental data // Chaos. 1996. Vol. 6, № 4. P. 528.
13. Pecora L.M., Carrol T.L., Jonson G., Marr D. Volume-preserving and volume expanding synchronized chaotic system // Phys. Rev. E. 1997. Vol. 56, № 5. P. 5090.
14. Анищенко В.С., Павлов А.Н., Янсон Н.Б. Реконструкция динамических систем в приложениях к решению задачи защиты информации // ЖТФ. 1998. Т. 68, № 12. С. 1.
15. Mathiazhagan C. Deciphering secure chaotic communication // <http://xxx.lanl.gov/abs/chaos-dyn/9905001>, 3 May. 1999.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOME CHAOTIC SYNCHRONOUS COMMUNICATION SYSTEMS

S.N. Vladimirov, V.V. Negrul'

The task of experimental investigation of some synchronous chaotic communication systems in order to compare their qualitative and energy features is formulated and solved in this paper. The first of investigated systems was a receiver-transmitter device with additive mixing of an informative component to a chaotic carrying signal, second – a device with nonlinear injecting of informative component into the source of chaotic oscillations, third – a structure of communication combining the additive mixing at the transmitting side and synchronous chaotic response at the receiving side. For objective comparison of obtained results the systems being analyzed were realized on a basis of the same radiophysical model of autogenerator with three-dimensional phase space.

The physical experiments have shown that under the condition of confidential transmitting of analogous signals for the first two kinds of the systems a quality of signal restored in their receivers is nearly same. However the use of a nontrivial approach in combining the additive mixing informative component at the transmitting side and the synchronous chaotic response at the receiving side allows to improve essentially a quality of informative component being restored and to increase an energy potential of the communication channel.



Владимиров Сергей Николаевич – родился в 1953 году, окончил радиофизический факультет Томского государственного университета (1980). В настоящее время кандидат физико-математических наук (1987), доцент кафедры радиоэлектроники Томского госуниверситета. Область научных интересов – теория нелинейных колебаний и ее практические приложения. Автор монографии «Нелинейные колебания многочастотных автоколебательных систем» (1993), а также многих публикаций, связанных с теорией и практикой функционирования генерирующих структур с запаздывающей обратной связью, генерации и управления хаотическими типами колебаний. E-mail: vsn@re.tsu.ru



Негруль Владимир Вячеславович – родился в 1976 году, окончил радиофизический факультет Томского государственного университета (1998). В настоящее время аспирант (1998) кафедры радиоэлектроники Томского государственного университета. Область научных интересов – теория динамического хаоса и его приложение в системах передачи и обработки информации. Автор 10 научных публикаций по данным вопросам. E-mail: nvv@elefot.tsu.ru