

О. В. Земляный

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: zolvas@ukr.net

ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МАНИПУЛЯЦИИ СПЕКТРОМ ШИРОКОПОЛОСНОГО ХАОТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Применение хаотических сигналов в современных радиолокационных и телекоммуникационных системах является актуальной задачей, решение которой позволяет значительно расширить функциональные возможности таких систем и улучшить их характеристики. В данной работе предложен способ передачи информации с использованием хаотического сигнала, формируемого нелинейной динамической системой с запаздывающей обратной связью кольцевого типа. Модулирующая информационная последовательность управляет параметром нелинейного элемента, вследствие чего происходит переключение хаотических режимов с изменением структуры спектра сигнала, передаваемого в канал связи. Для демодуляции принятого сообщения используется некогерентный прием. Показана эффективность рассматриваемого способа передачи информации для обеспечения скрытой работы системы связи в условиях сложной помеховой обстановки. Ил. 4. Библиогр.: 35 назв.

Ключевые слова: детерминированный хаос, широкополосная система передачи информации, нелинейная динамическая система с запаздывающей обратной связью.

В настоящее время получило развитие научное направление по использованию нелинейных динамических систем с хаотическими режимами для создания радиолокационных и телекоммуникационных систем, принципы функционирования которых основаны на специфических особенностях хаотических сигналов [1–6]. Известно несколько основных схем построения систем с хаотической динамикой для передачи информации, среди которых можно выделить системы с хаотической маскировкой (*Chaotic Masking*) [7], переключением хаотических режимов (*Chaos Shift Keying – CSK*) [8–10], нелинейным подмешиванием (*Nonlinear Mixing*) [11–13], прямой хаотической модуляцией (*Inverse Systems*) [14–16], опережающим управлением сечением Пуанкаре (*Predictive Poincare Control Modulation*) [17], хаосом в системах с фазовой автоподстройкой частоты [18, 19] и частотной модуляцией хаотическим сигналом [20]. По способу извлечения передаваемого сообщения из принятого сигнала различают системы с когерентным и некогерентным приемом. В основе работы систем, реализующих когерентный метод приема, лежит явление хаотической синхронизации [21], используемое для демодуляции хаотических колебаний. Как правило, в системах такого типа для достижения синхронизма необходимо обеспечивать высокую степень идентичности параметров передатчика и приемника. Структура и параметры передатчика, в общем случае, не известны третьей стороне, что обеспечивает конфиденциальность передаваемой информации. К недостаткам систем с хаотической синхронизацией относятся необходимость строго выдерживать идентичность параметров передатчика и приемника, а также ограничения, связанные с повышенными требованиями к качеству канала связи, и низкая устойчивость к аддитивным шумам. К примерам систем, не исполь-

зующих явление хаотической синхронизации, можно отнести системы, осуществляющие относительный прием (*Differential Chaos Shift Keying – DCSK*) [22], энергетический прием [23–25], инверсную систему без хаотической синхронизации [16]. В *DCSK*-системах и системах с оценкой энергетических параметров для извлечения информации из принимаемого сигнала используются его статистические свойства и применяются традиционные методы обработки сигналов. При этом может быть обеспечена высокая помехозащищенность, присущая системам, реализующим оптимальный прием сигнала.

Системы с запаздыванием [26, 27] представляют особый интерес с точки зрения использования их в системах конфиденциальной передачи информации ввиду того, что благодаря своей бесконечномерности они позволяют генерировать хаотические сигналы, параметры которых невозможно восстановить без применения специальных методик. Кроме того, вследствие своей широкополосности, они обладают потенциально большими возможностями по скрытой передаче сообщений по сравнению с низкоразмерными хаотическими системами.

В работе [27] предложена система скрытой передачи информации на базе генератора с запаздывающей обратной связью, основанная на переключении времени задержки в передатчике и выделении информационного сигнала с использованием в приемнике двух различных систем с запаздыванием, каждая из которых может синхронизироваться с принимаемым сигналом передатчика (когерентный прием). Для систем связи такого типа, в которых осуществляется переключение хаотических режимов, наличие шумов препятствует установлению полной хаотической синхронизации приемника и передатчика. Поэтому для увеличения помехоустойчивости авторами

предложено производить дополнительную обработку, снижающую уровень аддитивного шума в выходном сигнале приемника.

В работах [28, 29] рассматривается широкополосный канал передачи цифровой информации на основе спектральной кодовой модуляции, впервые предложенной в [30], при которой в передатчике происходит сложение опорного широкополосного шумового сигнала с его копией, задержанной на различные интервалы времени, длительность которых зависит от поступающего информационного бинарного символа. В приемнике однозначное восстановление потока бинарных символов происходит в процессе двойной спектральной обработки принятого сигнала при оценке положения информационного пика его автокорреляционной функции.

В настоящей работе рассмотрена широкополосная система связи на основе нелинейной динамической системы с запаздыванием и переключением хаотических режимов, в которой информационная последовательность управляет параметром нелинейного элемента в ключевом режиме. В результате такой манипуляции управляющим параметром происходит перераспределение спектральных составляющих передаваемого сигнала, что приводит к появлению в его спектре периодической (по частоте) неравномерности. При этом положение максимумов и минимумов на оси частот однозначно определяется значением управляющего параметра, а следовательно, и передаваемым символом. В предложенном ранее способе использования сигнала с такой же периодической неравномерностью в спектре для системы связи со спектральной модуляцией [30] формирование сигнала происходило в результате сложения шумового колебания и его задержанной копии [28, 29], а не в результате управления хаотическими режимами нелинейной системы с запаздыванием [31].

В некогерентном приемнике для демодуляции передаваемого сообщения используется согласованная фильтрация, что удовлетворяет критерию оптимальности для приема непрерывных шумовых сигналов. Восстановление информации производится путем оценивания амплитуд огибающих на выходах двух параллельно работающих гребенчатых фильтров, амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) которых согласованы с амплитудным спектром входного сигнала, и принятия решения при их сравнении. Таким образом, предлагаемый метод сочетает в себе использование специфических особенностей хаотических систем с запаздыванием, позволяющих сформировать хаотический сигнал с периодической структурой в спектральной области, и согласованный прием широкополосного хаотического сигнала, позволяющий достичь высокого соот-

ношения сигнал/шум, что обеспечивает хорошую помехоустойчивость системы связи в целом.

Спектральная манипуляция широкополосным хаотическим сигналом. Для генерации широкополосного хаотического сигнала используется нелинейная динамическая система с запаздывающей обратной связью кольцевого типа. В общем случае, в предположении безынерционности входящих в систему элементов, она описывается разностным уравнением вида $x(t) = F[x(t - T_0), a]$, где $F(x, a)$ – функция отображения единичного интервала оси x на себя $F: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$; a – параметр асимметрии отображения, задаваемого функцией F ; T_0 – время запаздывания. В работе [31] исследованы корреляционные свойства решений такого уравнения для случая, когда функция F задает однопараметрическое унимодальное кусочно-линейное отображение “tent-map”:

$$F(x, a) = \begin{cases} rx/a, & x \in [0, a], \\ r(1-x)/(1-a), & x \in (a, 1]. \end{cases} \quad (1)$$

В частности показано, что автокорреляционная функция решения уравнения представима в виде

$$R(\tau) = \int_0^{\infty} B(t)\delta(\tau - t)dt, \quad (2)$$

где $B(t) = \begin{cases} C(t), & t = nT_0, \\ 0, & t \neq nT_0, \end{cases} \quad n \in N$, при этом $C(t)$ –

зависимость автокорреляционной функции последовательности отсчетов одномерного отображения с нелинейной функцией (1) имеет следующий вид [32, 33]:

$$C(t) = \begin{cases} C_0 e^{-t/\tau_c}, & a > 1/2, \\ C_0 (-1)^t e^{-t/\tau_c}, & a < 1/2, \end{cases} \quad (3)$$

где $\tau_c = \lceil 1/\ln|2a-1| \rceil$. По теореме Винера – Хинчина находим спектр мощности процесса с функцией автокорреляции $R(\tau)$:

$$W(\omega) = 2 \int_0^{\infty} R(\tau) \cos \omega \tau d\tau. \quad (4)$$

Подставив формулу (2) в (4) и изменив порядок интегрирования, имеем

$$W(\omega) = 2 \int_0^{\infty} B(t) \cos \omega t dt. \quad (5)$$

Принимая во внимание, что функция $B(t)$ отлична от нуля лишь в точках $t = nT_0$, интеграл (5)

можно заменить рядом $W(\omega) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} C(nT_0) \cos n\omega T_0$,

а для вычисления суммы этого ряда подставить значения $C(nT_0)$ из (3). В результате задача сво-

дится к вычислению суммы ряда вида $\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k e^{-ky} \cos kx$, где $y > 0$ [34]. После проведения преобразований окончательно получим, что спектр мощности процесса с автокорреляционной функцией (2) с точностью до постоянного множителя имеет следующий вид:

$$W(\omega, a) = \begin{cases} \frac{e^{T_0/\tau_c} - \cos \omega T_0}{e^{T_0/\tau_c} + e^{-T_0/\tau_c} - 2 \cos \omega T_0}, & 0,5 < a < 1, \\ \frac{e^{T_0/\tau_c} + \cos \omega T_0}{e^{T_0/\tau_c} + e^{-T_0/\tau_c} + 2 \cos \omega T_0}, & 0 < a < 0,5. \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, спектр мощности хаотических автоколебаний в кольцевой динамической системе с запаздыванием при отклонении нелинейного отображения от симметричной формы является периодической функцией частоты с частотным периодом $f_T = \omega_T / 2\pi = 1/T_0$, соответствующим времени запаздывания T_0 сигнала в линии задержки (рис. 1).

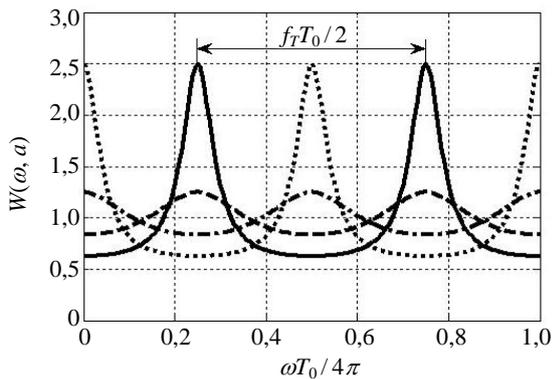


Рис. 1. Спектр мощности хаотических колебаний в кольцевой динамической системе с запаздыванием при различных значениях параметра a : $a = 0,2$ (сплошная линия); $a = 0,4$ (пунктирная линия); $a = 0,6$ (штрих-пунктирная линия); $a = 0,8$ (точечная линия)

При $0,5 < a < 1$ первый максимум спектра мощности расположен на нулевой частоте, в то время как при $0 < a < 0,5$ он сдвинут на $f_T/2$ (максимумы расположены на частотах $1/(2T_0)$, $3/(2T_0)$, ...). Следовательно, присваивая управляющему параметру a значение из промежутка $(0, 0,5)$ или $(0,5, 1)$, можно производить манипуляцию положениями максимумов спектра, осуществляя таким способом ввод информации в хаотическую несущую. Для передачи двоичной последовательности достаточно использовать два фиксированных значения a , например следуя формуле $a = 0,5 + \lambda \text{sign}(s_i - 0,5)$, где s_i – информационный бит, принимающий значения «0» или «1». Здесь параметр $\lambda \in]0, 1[$ определяет

соотношение между максимумами и минимумами («глубину» неравномерности) в формируемом спектре (рис. 1).

Моделирование работы системы передачи информации. Работоспособность предлагаемого метода передачи информации проверялась с использованием имитационного моделирования в среде *Simulink* программного пакета *MATLAB*. Формирование сигнала в передатчике производится следующим образом. Выберем в качестве тестового информационного сигнала $S(t)$ бинарную последовательность, элементы которой s_i принимают значения «0» или «1». Информационный сигнал воздействует на коммутирующий элемент, который изменяет параметр нелинейной функции (рис. 2), при этом $a_0 = 0,1$, $a_1 = 0,9$ – значения параметра при передаче символов «0» и «1» соответственно.

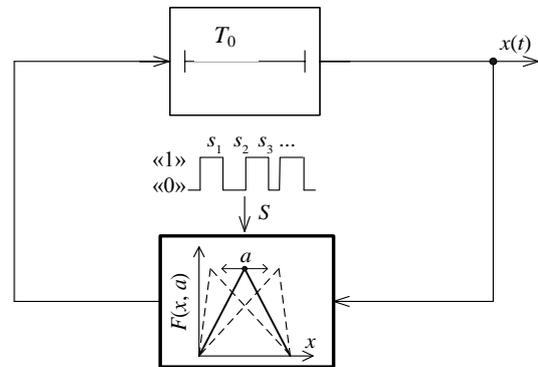


Рис. 2. Хаотическая система кольцевого типа с изменяемым параметром нелинейного элемента

Для передачи одного информационного символа длительностью T_S необходимо выполнение условия $T_S > T_0 \gg \Delta t$, где T_0 – время задержки, равное времени анализа спектра сигнала в приемнике, Δt – длительность одного отсчета хаотической несущей (один информационный символ передается в течение следования $M = T_S / \Delta t$ отсчетов хаотического сигнала). Во время передачи символа «0» в канал связи поступает непрерывный хаотический сигнал, в спектре которого положения максимумов определяются из условия $\Omega_n^0 = (2n - 1)\pi / T_0$, $n \in N$. Когда передается символ «1», максимумы в спектре передаваемого сигнала соответствуют условию $\Omega_n^1 = 2(n - 1)\pi / T_0$, $n \in N$.

В приемнике для выделения информационной составляющей из хаотического сигнала используется его анализ в спектральной области. Сигнал со структурной особенностью спектра в виде эквидистантно расположенных максимумов спектральной плотности может быть эффективно

выделен и распознан с помощью гребенчатого фильтра, модуль коэффициента передачи которого $|K(\omega)| = 1/\sqrt{1+G^2-2G\cos\omega T_0}$, где G и T_0 – коэффициент передачи усилителя и время запаздывания в цепи обратной связи соответственно. При положительном коэффициенте G АЧХ

фильтра согласована со спектром хаотического сигнала при $0,5 < a < 1$ (передача информационного бита «1»), а при отрицательном – со спектром сигнала при $0 < a < 0,5$ (передача информационного бита «0»). Информационное сообщение декодируется с помощью устройства, структура которого приведена на рис. 3.

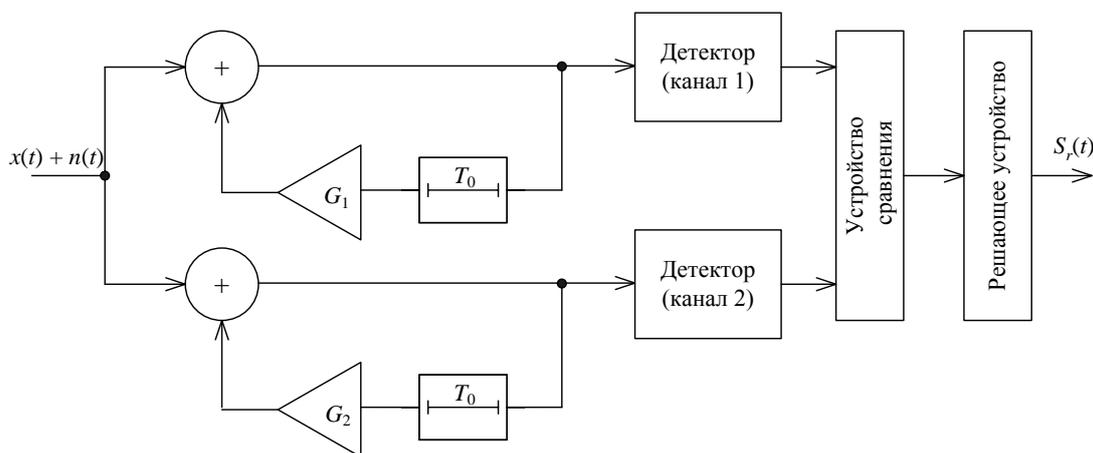


Рис. 3. Схема приемного устройства для выделения информационного сигнала

Принятый сигнал одновременно подается на два гребенчатых фильтра, один из которых имеет положительный коэффициент усиления в цепи обратной связи ($G_1 = 0,9$), а другой – отрицательный ($G_2 = -0,9$). На выходе каждого фильтра включен детектор, оценивающий на интервале T_0 дисперсию поступающего на его вход сигнала. Сигналы с обоих детекторов поступают на вход устройства сравнения и далее на решающее устройство, на выходе которого формируется логический «0», если сигнал на выходе первого канала превышает сигнал на выходе второго, и логическая «1» в противоположном случае. Как следует из результатов моделирования, представленных на рис. 4, двоичная последовательность на выходе приемника (рис. 4, д) повторяет модулирующую последовательность в передатчике (рис. 4, а). При этом сигнал передатчика в канале связи выглядит как шумовой, моменты смены информационных битов по наблюдаемой реализации не обнаруживаются (рис. 4, б), а фрагменты, соответствующие передаче информационных битов «0» и «1», визуально неразличимы, что позволяет говорить о скрытности предлагаемого метода передачи информации.

Для исследования помехоустойчивости в канал передачи добавлялся аддитивный гауссовский белый шум. На рис. 4, г показан сигнал на выходе устройства сравнения для случая,

когда полезный сигнал на входе приемника полностью скрыт шумом (отношение сигнал/шум $S/N = -12$ дБ). Результаты моделирования показывают, что при выбранных параметрах системы, обеспечивающих базу сигнала $B \approx 500$, восстановление информации происходит правильно при соотношениях сигнал/шум не ниже -14 дБ. При дальнейшем увеличении мощности аддитивной помехи огибающие на выходе каждого канала имеют недопустимо большую дисперсию выбросов, в результате чего возникают ложные срабатывания ключевого каскада в решающем устройстве на выходе приемника и информационная битовая последовательность восстанавливается с ошибками. Полученные оценки находятся в соответствии с приведенными в работе [35] характеристиками хаотической системы беспроводной передачи данных на основе манипуляции задержки, где при базе сигнала $B = 500$ и вероятности ошибки $P_{\text{ош}} = 10^{-2}$ обеспечивался параметр скрытности $q_0 = -12$ дБ.

Использование системы с запаздыванием в качестве источника хаотической несущей позволяет упростить схему передающего устройства с переключением хаотических режимов по сравнению, например с устройством, описанным в [28, 29], где процедура формирования спектра с чередующимися максимумами и мини-

мумами применяется к предварительно сгенерированному шумовому сигналу. В данной работе для этого использована особенность спектральных характеристик колебаний в системе с запаз-

дывающей обратной связью кольцевого типа, что исключило необходимость включения дополнительных блоков преобразования сигнала для придания его спектру требуемой формы.

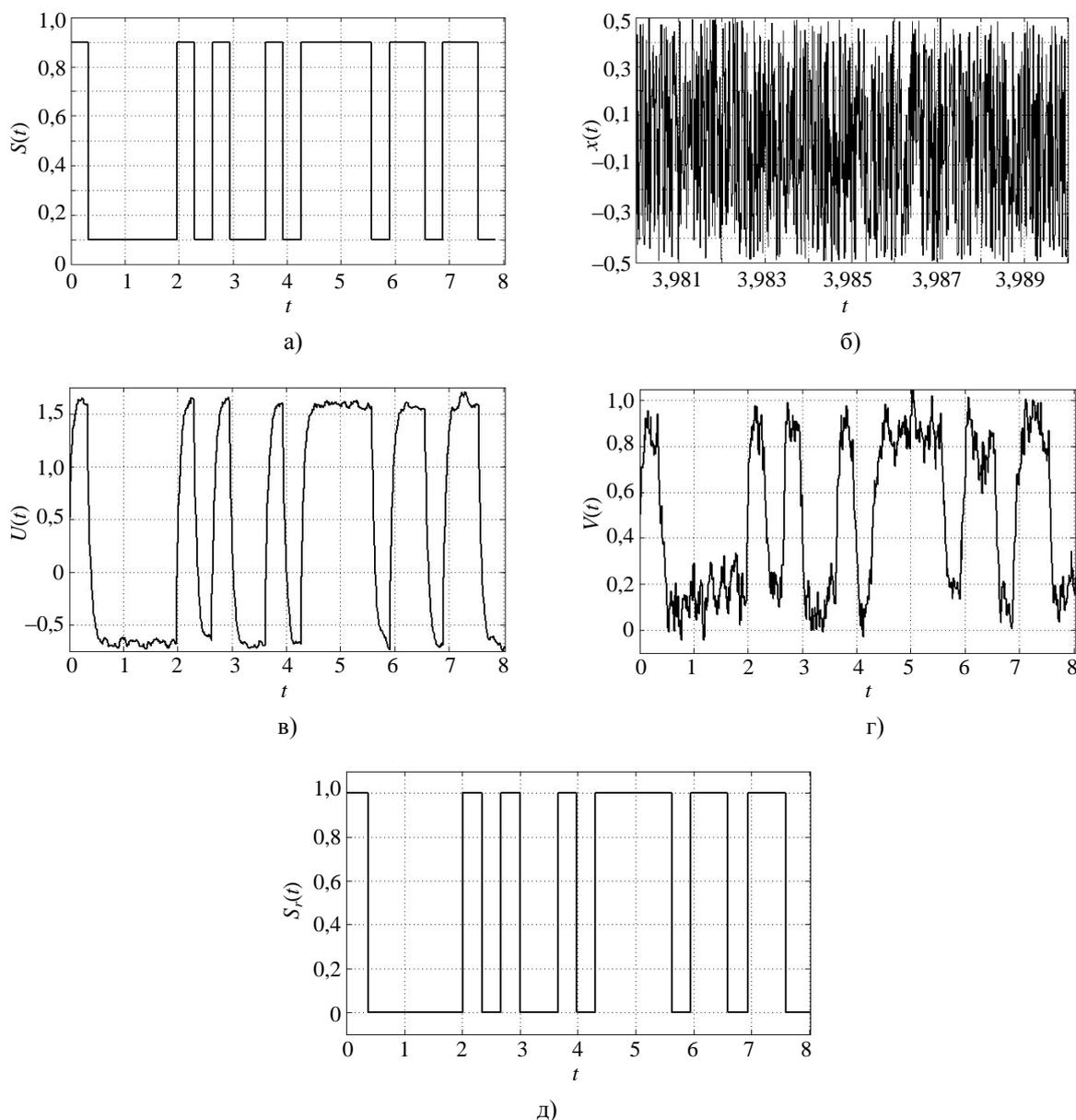


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования: а) исходная информационная импульсная последовательность, соответствующая передаваемому сообщению; б) фрагмент временной реализации сигнала в канале связи при последовательной передаче «1» и «0»; в) сигнал на выходе при отсутствии помехи в канале связи; г) сигнал на выходе при воздействии аддитивного гауссовского белого шума в канале связи с уровнем +12 дБ относительно уровня полезного сигнала; д) восстановленная информационная последовательность

Как и во всех системах с переключением хаотических режимов, в предлагаемом способе передачи информации существует ограничение по быстродействию, связанное с существованием минимально допустимого интервала времени, необходимого приемнику для правильного распо-

знавания передаваемого символа после окончания переходных процессов, появляющихся в результате смены одного хаотического режима на другой. Время накопления, необходимое приемнику на оценивание дисперсии огибающей элементарных фрагментов сигнала, из которых

сформирована информационная последовательность, на длительности одного символа передаваемой информации конечно и определяет минимальную длительность одного информационного бита. Алгоритм работы системы может быть построен так, что через определенные интервалы времени заранее определенные контрольные кодовые последовательности будут анализироваться приемником. В случае их неправильного распознавания из-за искажения при прохождении через канал будет приниматься решение о снижении скорости передачи, что позволит при работе детекторов производить накопление в течение более длительного промежутка времени. В случае необходимости можно обеспечить периодическую привязку работы тактовых генераторов передатчика и приемника для достижения их согласованной работы путем передачи контрольных кодовых последовательностей.

Выводы. Предложен способ передачи информации с использованием широкополосного хаотического сигнала, формируемого нелинейной динамической системой с запаздыванием. Этот способ отличается от ранее известных тем, что использована особенность хаотических систем, состоящая в возможности формирования периодической структуры в спектре сигнала непосредственно в процессе его генерации. В передатчике, построенном по схеме с переключением хаотических режимов, информационная последовательность управляет параметром нелинейного элемента, вследствие чего происходит изменение структуры спектра сигнала, передаваемого в канал связи. В некогерентном приемнике, не требующем хаотической синхронизации с передатчиком, реализован алгоритм декодирования информационного сообщения, близкий к оптимальному, что позволило достичь высокой помехоустойчивости. В результате проведенного имитационного моделирования продемонстрирована работоспособность предлагаемого метода и показано, что правильное восстановление передаваемого бинарного сообщения возможно при уровне аддитивной широкополосной гауссовской помехи в канале связи, значительно превышающем уровень полезного хаотического сигнала.

В заключение автор выражает благодарность профессору К. А. Лукину за плодотворные дискуссии, ценные замечания и поддержку на всех этапах выполнения этой работы.

Библиографический список

1. *Лукин К. А.* Шумовая радарная технология / К. А. Лукин // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 1999. – 4, № 3. – С. 105–111.
2. *Lukin K. A.* Noise Radar Technology: The principles and short overview / K. A. Lukin // Appl. Radio Electronics. – 2005. – 4, N 1. – P. 4–13.
3. *Кислов В. Я.* Новый класс сигналов для передачи информации. Широкополосные хаотические сигналы / В. Я. Кислов, В. В. Кислов // Радиотехника и электрон. – 1997. – 42, № 8. – С. 962–973.
4. *Lukin K. A.* New method for generation of quasi-orthogonal chaotic sequences / K. A. Lukin, V. Ye. Shcherbakov, D. V. Shcherbakov // Appl. Radio Electronics. – 2013. – 12, N 1. – P. 17–24.
5. *Chaotic electronics in telecommunications* / edited by M. P. Kennedy, R. Rovatti, G. Setti. – CRC Press, 2000. – 445 p.
6. *Дмитриев А. С.* Динамический хаос как парадигма современных средств связи / А. С. Дмитриев, А. И. Панас, С. О. Старков // Зарубежная радиоэлектрон. Успехи современной радиоэлектрон. – 1997. – № 10. – С. 4–26.
7. *Cuomo K.* Circuit Implementation of Synchronized Chaos with Application to Communications / K. Cuomo, A. Oppenheim // Phys. Rev. Lett. – 1993. – 71, N 1. – P. 65–68.
8. *Transmission of digital signals by chaotic synchronization* / U. Parlitz, L. Chua, L. Kosarev et al. // Int. J. Bifurcation and Chaos. – 1992. – 2, N 4. – P. 973–977.
9. *Бельский Ю. Л.* Передача информации с помощью детерминированного хаоса / Ю. Л. Бельский, А. С. Дмитриев // Радиотехника и электрон. – 1993. – 38, № 7. – С. 1310–1315.
10. *Dedieu H.* Chaos Shift Keying Modulation and Demodulation of a Chaotic Carrier Using Self-synchronizing Chua's Circuits / H. Dedieu, M. P. Kennedy, M. Hasler // IEEE Trans. Circuits and Systems. – 1993. – 40, N 10. – P. 634–642.
11. *Дмитриев А. С.* Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи / А. С. Дмитриев, А. И. Панас, С. О. Старков. – М.: Физматлит, 2002. – 251 с.
12. *Волковский А. П.* Синхронный хаотический отклик нелинейной системы передачи информации с хаотической несущей / А. П. Волковский, Н. В. Рувльков // Письма в журн. техн. физики. – 1993. – 19, вып. 3. – С. 71–75.
13. *Dmitriev A. S.* Experiments on speech and music signals transmission using chaos / A. S. Dmitriev, A. I. Panas, S. O. Starkov // Int. J. of Bifurcation and chaos. – 1995. – 5, N 4. – P. 1249–1254.
14. *Information transmission by chaotizing* / F. Bohme, U. Feldman, W. Schwarz, A. Bauer // Proc. 2nd Int. Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES'94). – Krakov, 1994. – P. 163–168.
15. *Feldman U.* Communication by Chaotic Signals: the Inverse System Approach / U. Feldman, M. Hasler, W. Schwarz // Int. J. on Circuit Theory and Applications. – 1996. – 24, Iss. 5. – P. 551–579.
16. *Ryabov V. B.* Chaotic masking without synchronization / V. B. Ryabov, P. V. Usik, D. M. Vavriv // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – 2, № 4. – С. 473–479.
17. *Schweizer J.* Predictive Poincare Control: a Control Theory for Chaotic Systems / J. Schweizer, M. P. Kennedy // Phys. Rev. E. – 1995. – 52, Iss. 5. – P. 4865–4876.
18. *Козлов А. К.* Управление хаотическими колебаниями в генераторах с запаздывающей петлей фазовой автоподстройки / А. К. Козлов, В. Д. Шалфеев // Прикладная нелинейная динамика. – 1994. – № 2. – С. 36–47.
19. *Kolumban G.* Nonlinear dynamics and chaotic behavior of sampling phase-locked loops / G. Kolumban, R. Vizvari // IEEE Trans. Circuits and Systems. – 1994. – 41, N 4. – P. 333–337.
20. *Multi-User Communication using Chaotic Frequency Modulation* / A. R. Volkovskii, S. C. Young, L. S. Tsimring, N. F. Rulkov // Proc. Int. Symp. Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA'01). – Miyagi, 2001. – P. 561–564.
21. *Pecora L. M.* Synchronization in Chaotic Systems / L. M. Pecora, T. L. Carroll // Phys. Rev. Lett. – 1990. – 64, N 8. – P. 821–824.
22. *Kennedy M. P.* Chaotic Modulation for Robust Digital Communications over Multipath Channels / M. P. Kennedy, G. Columban // Int. J. Bifurcation Chaos. – 2000. – 10, N 4. – P. 695–719.
23. *Перспективы создания прямо хаотических систем связи в радио- и СВЧ-диапазонах* / А. С. Дмитриев, Б. Е. Кяргин-

- ский, Н. А. Максимов и др. // Радиотехника. – 2000. – № 3. – С. 9–20.
24. *Сверхширокополосная* беспроводная связь и сенсорные сети / А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, А. В. Клецов и др. // Радиотехника и электрон. – 2008. – 53, № 10. – С. 1278–1289.
 25. *Сверхширокополосная* прямохаотическая передача информации в СВЧ-диапазоне / А. С. Дмитриев, Б. Е. Кяргинский, А. И. Панас и др. // Письма в журн. техн. физики. – 2003. – 29, вып. 2. – С. 70–76.
 26. *Дмитриев А. С.* Стохастические колебания в радиофизике и электронике / А. С. Дмитриев, В. Я. Кислов. – М.: Наука, 1989. – 280 с.
 27. Система скрытой передачи информации на основе системы с запаздыванием с переключаемым временем задержки / В. И. Пономаренко, А. С. Караваев, Е. Е. Глуховская, М. Д. Прохоров // Письма в журн. техн. физики. – 2012. – 38, № 1. – Р. 103–110.
 28. *Калинин В. И.* Широкополосный канал со спектральной модуляцией для передачи цифровой информации / В. И. Калинин // 14th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2004): Proc. – Sevastopol, 2004. – Р. 292–293.
 29. *Калинин В. И.* Сверхширокополосная передача информации с двойной спектральной обработкой шумовых сигналов / В. И. Калинин // Письма в журн. техн. физики. – 2005. – 31, вып. 21. – С. 58–63.
 30. *Калинин В. И.* Спектральная модуляция широкополосных шумовых сигналов / В. И. Калинин // Радиотехника и электрон. – 1996. – 41, № 4. – С. 488–493.
 31. *Земляний О. В.* Корреляционно-спектральные свойства хаоса в нелинейной динамической системе с запаздыванием и асимметричным нелинейным отображением / О. В. Земляний, К. А. Лукин // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2002. – 7, № 2. – С. 406–414.
 32. *Grossmann S.* Invariant Distribution and Stationary Correlation Functions of One-dimensional Discrete Processes / S. Grossmann, S. Thomae // Z. Naturforsch. – 1977. – 32a. – Р. 1353–1363.
 33. *Сочнев С. В.* Построение одномерных отображений по данной плотности распределения и автокорреляционной функции / С. В. Сочнев // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 1993. – 1, № 1–2. – С. 63–71.
 34. *Прудников А. И.* Интегралы и ряды / А. И. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. – М.: Наука, 1981. – 797 с.
 35. *Калинин В. И.* Потенциальные характеристики беспроводной передачи цифровой информации на основе непрерывных хаотических сигналов / В. И. Калинин, В. В. Чапурский // Докл. 10-й Междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA'2008». – М., 2008. – С. 297–301.

Рукопись поступила 15.06.2015.

O. V. Zemlyaniy

INFORMATION TRANSMISSION BASED ON SPECTRUM MANIPULATION OF A WIDEBAND CHAOTIC SIGNAL

Application of chaotic signals in modern radar and telecommunications is an actual task that can significantly extend the functionality of these systems and improve their performance. In this paper, a method for information transmission using chaotic signal generated by nonlinear dynamical system with delayed feedback of ring type has been suggested. Modulating information sequence controls the parameter of non-linear element, so that it switches the chaotic modes and changes the spectral structure of the signal transmitted to the communication channel. A non-coherent reception was used for demodulation of the received message. The effectiveness of this method of information transmission for the covert operation of communication system in a complex interference environment has been shown.

Key words: deterministic chaos, broadband data transmission system, a nonlinear dynamical system with delayed feedback.

О. В. Земляний

ПЕРЕДАЧА ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ МАНІПУЛЯЦІЇ СПЕКТРОМ ШИРОКОСМУТОВОГО ХАОТИЧНОГО СИГНАЛУ

Застосування хаотичних сигналів у сучасних радіолокаційних і телекомунікаційних системах є актуальним завданням, вирішення якого дозволяє значно розширити функціональні можливості таких систем і поліпшити їх характеристики. У цій роботі запропоновано спосіб передачі інформації з використанням хаотичного сигналу, сформованого нелінійною динамічною системою з затриманим зворотним зв'язком кільцевого типу. Модулююча інформаційна послідовність керує параметром нелінійного елемента, внаслідок чого відбувається перемикання хаотичних режимів зі зміною структури спектра сигналу, що передається в канал зв'язку. Для демодуляції прийнятого повідомлення застосовується некогерентне приймання. Показано ефективність розглянутого способу передачі інформації для забезпечення прихованої роботи системи зв'язку за складних завадових умов.

Ключові слова: детермінований хаос, широкосмутова система передачі інформації, нелінійна динамічна система з затриманим зворотним зв'язком.