

01;09
©1994

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИНХРОНИЗОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ХАОСА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА

А.К.Козлов

Способность нелинейных детерминированных систем генерировать хаотические колебания хорошо известна. Уникальные свойства детерминированных хаотических процессов привлекают в последнее время внимание исследователей, ищущих возможности их практического применения. Интенсивно ведутся работы в области радиофизики по синхронной обработке сложных сигналов. Теоретической основой этих поисков является возможность синхронизации хаотических колебаний в диссипативных системах [1-3]. Различают несколько способов синхронизации хаотических колебаний: взаимная или вынужденная синхронизация связанных генераторов хаоса [1,4], возбуждение синхронного отклика в специальной устойчивой подсистеме [2,5,6-8], достижение синхронизма средствами управления [3]. Одним из перспективных приложений синхронной обработки сложных сигналов является защита данных в аппаратуре связи. Детерминированный хаотический процесс с широким непрерывным спектром используется в качестве маскирующего [9,10] или несущего [5-8] сигнала. В последнем случае в результате модуляции хаоса достигается более эффективное сокрытие информации. В качестве демодулятора до сих пор рассматривались системы, использующие явление синхронного отклика [2], синхронизация же связанных генераторов хаоса изучалась в связи с задачами простого маскирования сообщений [9]. В данной работе рассматривается синхронизация двух генераторов детерминированного хаоса с однонаправленной связью по быстрой и медленной компонентам колебаний и предлагается способ скрытной передачи информационного сигнала в такой системе; приведены результаты численного моделирования процессов синхронизации и преобразования колебаний. В качестве источника хаотических колебаний взят генератор радиодиапазона на туннельном диоде [11-13].

Парциальная динамика генератора. Генератор на туннельном диоде представляет собой простейший автогенератор с нелинейным элементом в цепи колебательного

контура. Динамика генератора описывается следующей системой уравнений [12]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= 2hx + y - gz, \\ \dot{y} &= -x, \\ \mu\dot{z} &= x - f(z),\end{aligned}\tag{1}$$

где x, y, z — безразмерные переменные, g, h, μ — безразмерные параметры, причем $\mu \ll 1$, и нелинейность $f(z)$ — нормированная кусочнолинейная характеристика туннельного диода [13]:

$$f(z) = \begin{cases} 11.765z, & z \leq 0.085, \\ 1 - 2.108(z - 0.085), & 0.085 < z < 0.5, \\ 0.125 + 1.75(z - 0.5), & z \geq 0.5. \end{cases}$$

Установлено [11], что при $\mu = 0$ движения в системе (1) могут быть стохастическими и определяться растягивающим отображением отрезка в себя. При $0 \neq \mu \ll 1$ сложная динамика сохраняется, однако в фазовом пространстве системы (1) возможно существование предельных циклов [12]. Хаотизация движений в этом случае происходит с уменьшением h в результате каскада бифуркаций удвоения и добавления периода циклов. Вследствие малости параметра μ в системе (1) в режиме хаотической генерации чередуются медленные движения на поверхности $x = f(z)$ и быстрые движения по переменной z .

Вынужденная синхронизация. Рассмотрим два генератора хаоса с однонаправленной связью, описываемых системой

$$\begin{aligned}\dot{x} &= 2h_1x + y - g_1z, & \dot{u} &= 2h_2u + v - g_2w, \\ \dot{y} &= -x + s(t), & \dot{v} &= -u + \delta_y(y - v), \\ \mu_1\dot{z} &= x - f_1(z), & \mu_2\dot{w} &= u - f_2(w + \delta_z(z - w)).\end{aligned}\tag{2}$$

где δ_y, δ_z — параметры связи по медленной и быстрой переменным, $s(t)$ — информационный сигнал. Синхронному режиму отвечают решения, лежащие в шестимерном фазовом пространстве системы (2) на многообразии

$$u = x, \quad v = y, \quad w = z.\tag{3}$$

Отметим, что при нулевых значениях параметров связи обе парциальные подсистемы (x, y, z) и (u, v, w) могут демонстрировать хаотическое поведение. Влияние одной подсистемы на другую в основном определяет параметр δ_y , связь

по быстрой переменной (параметр δ_z) сказывается только во время пиков переменной $z(t)$. Установлено, что без информационного сигнала ($s(t) \equiv 0$) синхронизация хаотических колебаний (x, y, z) - и (u, v, w) -подсистем наступает в (2) при одинаковых нелинейностях и равных значениях одноименных параметров, если параметры связи удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\delta_y \gg 1, \quad 0 < \delta_z < 1. \quad (4)$$

В случае малой расстройки параметров подсистем точный синхронизм недостижим, однако при условии (4) в системе (2) устанавливаются колебания, близкие к синхронным (3). Внешний информационный сигнал $s(t)$ также нарушает синхронизм подсистем, но если справедливы неравенства (4), то различие колебаний подсистем мало, причем разность переменных y и v определяется величиной связи δ_y и информационным сигналом $s(t)$:

$$y - v \simeq \frac{1}{\delta_y} s(t).$$

Установленные свойства системы (2) позволяют предложить модельную схему скрытной передачи аналоговых сообщений, построенную на основе двух синхронизованных генераторов хаоса с однонаправленной связью и не использующую эффектов маскирования [9] или синхронного отклика [2].

Выделение информационного сигнала из хаоса. Информационный сигнал $s(t)$ подается на вход (x, y, z) -подсистемы, работающей в режиме хаотической генерации, и преобразуется в широкополосные хаотические сигналы $y(t)$, $z(t)$, которые передаются открытым способом и поступают на вход (u, v, w) -подсистемы. Если параметры подсистем установлены равными друг другу, а параметры связи удовлетворяют условиям (4), то выделяемый в (u, v, w) -подсистеме сигнал $q(t) = \delta_y(y(t) - v(t))$ достаточно точно повторяет информационный сигнал $s(t)$. На рис. 1 приведен пример передачи простого бигармонического сигнала

$$s(t) = 0.01 \sin(t) + 0.02 \sin(0.5t) \quad (5)$$

в системе из двух связанных генераторов хаоса (2) при 1% расстройке параметров подсистем $y_1 = 1$, $g_2 = 1.01$, $h_1 = 0.1$, $h_2 = 0.101$, $\mu_1 = 0.1$, $\mu_2 = 0.101$, начальных условиях $x(0) = z(0) = 0.1$, $y(0) = 1$, $u(0) = 0.2$, $v(0) = 1.1$, $w(0) = 0.1$

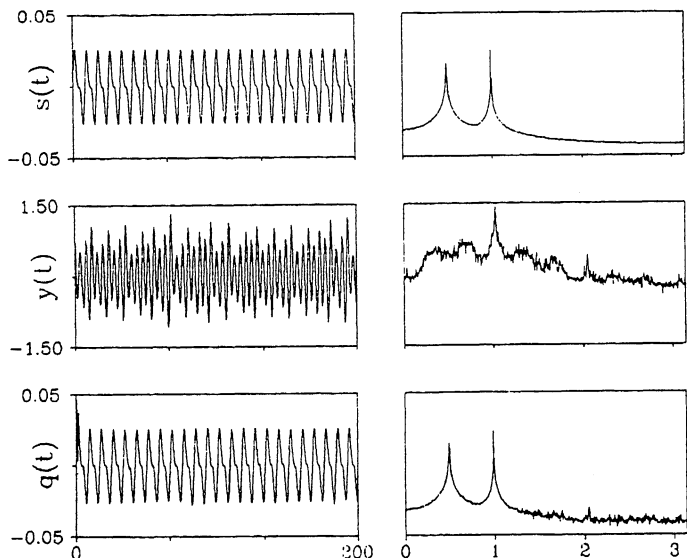


Рис. 1. Передача информации с помощью детерминированного хаоса: $s(t)$ — информационный сигнал (5); $y(t)$ — хаотическая реализация, содержащая $s(t)$; $q(t)$ — сигнал, выделенный из хаоса при 1% расстройке параметров приемной и передающей подсистем (2).

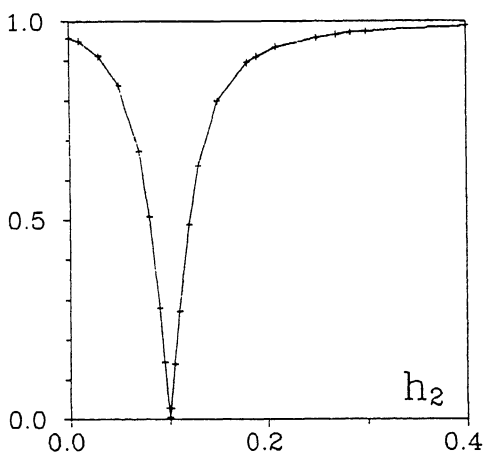


Рис. 2. Зависимость ошибки выделения информационного сигнала из хаоса от параметра h_2 в системе (2) при $h_1 = 0.1$.

и значениях параметров связи $\delta_y = 100$, $\delta_z = 0.95$. Приведенные осциллограммы и соответствующие им спектры мощности иллюстрируют эффективность сокрытия инфор-

мационного сигнала при генерации хаотических колебаний и возможность его выделения из хаоса с помощью синхронизованного генератора. Точность воспроизведения информационного сигнала в принимающей (u, v, w) -подсистеме зависит от точности установки параметров. На рис. 2 приведена зависимость ошибки выделения информационного сигнала из хаоса в системе (2) от параметра h_2 при $h_1 = 0.1$, $g_1 = g_2 = 1$, $\mu_1 = \mu_2 = 0.1$, $\delta_y = 100$, $\delta_z = 0.95$. По вертикальной оси на рис. 2 отложена нормированная дисперсия разности информационного и выделяемого сигналов $(s(t) - q(t))$:

$$\epsilon = \frac{\sigma_s - q}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_q^2}},$$

где σ_s, σ_q — дисперсии сигналов $s(t)$ и $q(t)$ соответственно.

Рассмотренный способ выделения информационной компоненты из хаоса с помощью вынужденной синхронизации генераторов отличается от предложенных ранее [6,7] и расширяет возможности нелинейной обработки детерминированных сигналов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 93-02-15424).

Список литературы

- [1] Афраймович В.С., Веричев Н.Н., Рабинович М.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. № 9. С. 1050-1060.
- [2] Pecora L.M., Carroll T.L. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. N 8. P. 821-824.
- [3] Chen G. // IEEE Trans. Circ. Syst. — I: Fundamental Theory and Applications. 1993. V. 40. N 11. P. 829-832.
- [4] Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Постнов Д.Э., Сафонова М.А. // Радиоэлектроника и электроника. 1991. Т. 36. В. 2. С. 338-351.
- [5] Kocarev Lj., Halle K.S., Eckert K., Chui L.O. // Int. J. Bifurcation and Chaos. 1992. V. 2. N 3. P. 709-713.
- [6] Волковский А.Р., Рувльов Н.Ф. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 3. С. 71-75.
- [7] Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С. // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. В. 7. С. 1310-1315.
- [8] Козлов А.К., Шалфеев В.Д. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 23. С. 82-85.
- [9] Cuomo K.M., Oppenheim A.V., Strogatz S.H. // IEEE Trans. Circ. Syst. — II: Analog and Digital Signal Processing. 1993. V. 40. N 10. P. 626-633.
- [10] Кислов В.Я. // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. В. 10. С. 1793-1815.

- [11] *Ликовский А.С., Рабинович М.И.* // ДАН СССР. 1978. Т. 239. № 2. С. 301-304.
- [12] *Кияшко С.В., Ликовский А.С., Рабинович М.И.* // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. В. 2. С. 336-343.
- [13] *Андрушкевич А.В., Кипчатов А.А., Красичков Л.В., Короновский А.А.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1993. Т. 1. N 1-2. С. 93-103.

Поступило в Редакцию
9 мая 1994 г.
