

01; 09

© 1993

СИНХРОННЫЙ ХАОТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК НЕЛИНЕЙНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КАК ПРИНЦИП ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ХАОСА

А.Р. Волковский, Н.Ф. Рудьков

Одним из перспективных направлений в приложениях нелинейной хаотической динамики радиофизических систем является использование хаотических сигналов для скрытой передачи информации. Возможность выделения информационной составляющей из широкополосного спектра хаотического сигнала связывается со способностью систем, обладающих хаотической динамикой, к взаимной и вынужденной синхронизации (см., например, [1-10]). Однако, несмотря на ряд работ в этом направлении [11-13], проблема выделения сигнала, несущего информацию, остается нерешенной.

В настоящем сообщении предлагается новый способ детектирования информационной компоненты хаотического сигнала, основанный на принципах синхронного отклика ведомой колебательной системы, и приводятся основные результаты экспериментального исследования процесса детектирования. В качестве генераторов хаотических сигналов в экспериментах использовался генератор кольцевого типа с 1.5 степенями свободы (см., например, [14-16]).

Функциональная схема, демонстрирующая принцип работы экспериментальной установки, приведена на рис. 1, где цифрами I и II отмечены ведущая (передающая) и ведомая (приемная) системы соответственно. Ведущая система представляет собой хаотический генератор кольцевого типа, у которого на входе нелинейного преобразователя 2 дополнительно включен сумматор 1. Если внешний информационный сигнал на входе сумматора 1 отсутствует, т.е. $\xi_{inf}(t)=0$, то $u_{tr}(t)=u_1(t)$. Хаотическая динамика такого генератора описана в работах [16-18]. Включение информационного сигнала, как правило, сохраняет хаотическое поведение генератора. В этом случае модель генератора будет описываться неавтономной системой нелинейных уравнений третьего порядка.

$$\frac{du_{tr}}{dt} = \frac{1}{C_1} i_1 + \frac{d}{dt} \xi_{inf}(t),$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_1} (u_1 - u_{tr}) - \frac{r_1}{L_1} i_1 + \frac{1}{L_1} \xi_{inf}(t), \quad (1)$$

$$\frac{du_1}{dt} = \frac{1}{R_1 C_1} [\alpha_1 F(u_{tr}) - u_1] - \frac{1}{C_1} i_1,$$

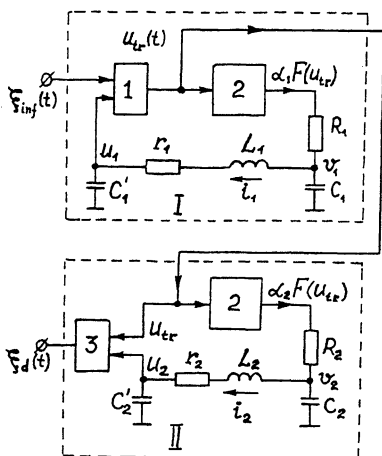


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. 1 - ведущая система, II - ведомая система. 1 - сумматор, 2 - нелинейный преобразователь, 3 - вычитающее устройство.

где $U_{tr} = U_1 + \xi_{inf}$ - напряжение на входе нелинейного преобразователя, которое одновременно служит выходным хаотическим сигналом ведущей системы; U_1 - напряжение на выходе фильтра нижних частот $R_1 C_1$; i_1 - ток в катушке L_1 ; функция нелинейного преобразователя приближенно может быть описана кусочно-нелинейной функцией вида

$$F(x) = \begin{cases} 0.528 & x < -1.2 \\ x(1-x^2) & -1.2 \leq x \leq 1.2 \\ -0.528 & x > 1.2 \end{cases}$$

α_1 - коэффициент усиления нелинейного преобразователя в точке $U_{tr} = 0$.

Колебания в системе II являются вынужденными колебаниями, вызванными внешним воздействием $U_{tr}(t)$, и описываются неавтономной системой уравнений:

$$\frac{dU_2}{dt} = \frac{1}{C_2'} i_2,$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{1}{L_2} (U_2 - U_2) - \frac{r_2}{L_2} i_2, \quad (2)$$

$$\frac{dU_2}{dt} = \frac{1}{R_2 C_2} [\alpha_2 F(U_{tr}) - U_2] - \frac{1}{C_2} i_2,$$

где u_2 — напряжение на емкости C_2' (см. рис. 1).

Нетрудно показать, что если значения одноименных реактивных и активных линейных элементов, а также параметры нелинейных преобразователей в ведомой и ведущей системах одинаковы, то (1) и (2) имеют решения, обладающие свойством $u_{tr}(t) = u_2(t) + \xi_{inf}(t)$. Такие решения соответствуют траекториям в объединенном фазовом пространстве динамических систем (1) и (2), целиком лежащим на интегральном многообразии

$$u_1 = u_2,$$

$$i_1 = i_2,$$

$$v_1 = v_2.$$

В работе [19] доказывается, что это многообразие является асимптотически устойчивым как для регулярных, так и для хаотических траекторий систем. Установившиеся колебания ведомой системы II, вызванные хаотическим воздействием ведущей I и удовлетворяющие соотношениям (3), называются синхронным хаотическим откликом [19].

Поскольку в рассмотренном выше режиме синхронного хаотического отклика $u_2(t) = u_1(t)$, а, следовательно, $u_2(t) = u_{tr}(t) - \xi_{inf}(t)$, то с помощью вычитающего устройства 3 в ведомой системе II (см. рис. 1) можно выделить сигнал $\xi_d(t) = \xi_{inf}(t)$. При этом качество восстановленного сигнала $\xi_d(t)$ не зависит от его характерных частот, и соответственно сигнал $\xi_{inf}(t)$ может быть эффективно скрыт в широкополосном непрерывном спектре хаотического сигнала $u_{tr}(t)$.

На рис. 2 приведены результаты восстановления сигнала $\xi_{inf}(t)$, полученные в физическом эксперименте. Параметры ведомой и ведущей систем в эксперименте выбирались равными $C_1 \cong C_2 \cong 1.056 \mu F$, $C_1' \cong C_2' \cong 0.768 \mu F$, $L_1 \cong 72.3 \text{ мГ}$, $R_1 \cong R_2 \cong 780 \Omega$, $r_1 \cong r_2 \cong 38 \Omega$ с точностью до 1%. Значение параметра α_1 выбиралось таким, чтобы в автономном ведущем генераторе устанавливался режим хаотических автоколебаний, образом которых в фазовом пространстве генератора является симметричный странный аттрактор. Подробнее режимы автоколебаний данного генератора рассматриваются в работах [16–18]. Осциллограммы и спектры мощности информационного сигнала $\xi_{inf}(t)$, передаваемого хаотического сигнала $u_{tr}(t)$ и восстановленной информационной компоненты $\xi_d(t)$ приведены на рис. 2 для случая $\xi_{inf} = A \sin \omega_0 t$. Несмотря на то, что $\xi_{inf}(t)$ в $u_{tr}(t)$ полностью перекрывается шумами хаотического генератора, ведомая система, принимающая хаотический сигнал $u_{tr}(t)$, способна с достаточной степенью точности восстановить информационную компоненту.

Рассмотренный эффект вынужденного синхронного хаотического отклика нелинейной системы может быть использован для скрытой передачи сигнала $\xi_{inf}(t)$, поскольку восстановить сигнал удается лишь с помощью ведомой (приемной) системы, структура которой

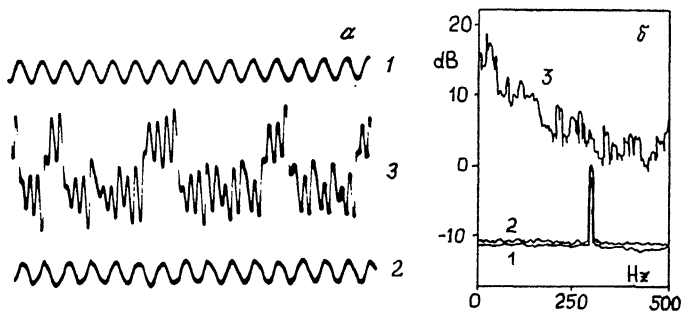


Рис. 2. Осциллограммы (а) и спектры мощности сигналов (б) для случая $\xi_{inf}(t) = A \sin \omega_0 t$, при $A = 50 \text{ mV}$, $\omega_0 = 300 \text{ Hz}$. 1 - сигнал $\xi_{inf}(t)$, 2 - $\xi_d(t)$, 3 - $U_{tr}(t)$.

соответствует ведущей (передающей), при достаточно точной настройке всех параметров системы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А ф р а й м о в и ч В.С., В е р и ч е в Н.Н., Р а б и н о в и ч М.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 19. № 9. С. 1050-1060.
- [2] F u j i s a k a H., Y a m a d a T. // Prog. Theor. Phys. 1983. V. 69. P. 32-74.
- [3] В е р и ч е в Н.Н. Методы качественной теории дифференциальных уравнений. Горький, 1986. С. 47-57.
- [4] В е р и ч е в Н.Н., М а к с и м о в А.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 8. С. 962-965.
- [5] В о л к о в с к и й А.Р., Р у л ь к о в Н.Ф. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 7. С. 5-10.
- [6] А н и ш е н к о В.С., В а д и в а с о в а Т.Е., П о с т н о в Д.Е., С а ф о н о в а М.А. // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36. С. 338-351.
- [7] W i n f u l H.G., R a h m a n L. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 65. P. 1575-1578.
- [8] В а д о л а Р., К у м а р V.R., К у л к а р н и В.Д. // Phys. Lett. 1991. V. 155A. P. 365-372.
- [9] Р е с о р а L.M., С а р р о л T.L. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. P. 821-824.
- [10] В о л к о в с к и й А.Р., Р у л ь к о в Н.Ф. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 13. С. 22-26.
- [11] Р е с о р а L.M., С а р р о л T.L. // Phys. Rev. 1991. V. 44A. P. 2374-2383.
- [12] R u l ' k o v N.F., V o l k o v s k i i A.R. // 1993, to be appear.

- [13] К о с а р е в Lj., H a l l e K.S., E s k e r t K.,
P a r l i t z U., C h u a L.O. // Int. J. Bifurca-
tion and Chaos, 1992. V. 2. N. 3. P. 709-713.
- [14] Д м и т р и е в А.С., С т а р к о в С.О. // Радиотехника
и электроника. 1986. Т. 31. № 12. С. 2396-2405.
- [15] Д м и т р и е в А.С., С т а р к о в С.О. // Изв. вузов.
Радиофизика. 1986. Т. 29. № 4. С. 419-427.
- [16] В о л к о в с к и й А.Р., Р у л ь к о в Н.Ф. // Письма в
ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 16. С. 1508-1513.
- [17] Р а б и н о в и ч М.И., Р е й м а н А.М., Р у л ь-
к о в Н.Ф. // Препринт № 200. ИПФ АН СССР. Горький,
1988. 22 с.
- [18] R u l ' k o v N.F., V o l k o v s k i i A.R.,
R o d r i g u e z - L o z a n o A., d e l R i o E.,
V e l a r d e M.G. // Int. J. of Bifurcation and
Chaos. 1992. V. 2. N. 3. P. 669-676.
- [19] R u l ' k o v N.F., V o l k o v s k i i A.R.,
R o d r i g u e z - L o z a n o A., d e l R i o E.,
V e l a r d e M.G. // 1993, to be appear.

Нижегородский
государственный
университет им. Н.И. Лобачевского

Поступило в Редакцию
19 января 1993 г.