

Кібернетика та системний аналіз

УДК 621.391

А.Н. Барсуков

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

ВЫДЕЛЕНИЕ БИНАРНОГО СООБЩЕНИЯ ПО НАБЛЮДЕНИЮ ХАОТИЧЕСКОГО СИГНАЛА, СФОРМИРОВАННОГО ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ИКЕДЫ

В статье рассматривается модель передающей системы, описываемой нелинейной динамической системой Икеды. Предлагается метод подмешивания бинарного сообщения в хаотическую несущую, сформированную системой с задержкой, и его выделение по наблюдению сигнала искаженного измерительным шумом.

Ключевые слова: хаотическая несущая, фазовое пространство, бифуркационная диаграмма, бинарное сообщение, шум, система Икеды.

Введение

На сегодняшний день известно достаточно большое разнообразие нелинейных динамических систем, с помощью которых можно сформировать хаотические несущие для повышения помехозащищенности в радиотехнических системах передачи информации (РТС ПИ) [1 – 3]. Такие передающие системы обладают рядом важных достоинств: возможностью выделять сообщения по наблюдению хаотического сигнала без предварительной синхронизации, приемлемой энергетической и структурной скрытностью [1 – 3].

Однако с развитием теории нелинейного анализа временных рядов стало понятно, что с помощью ее подходов можно решать задачи идентификации процессов с более высокой точностью, а именно: оценивать параметры динамической системы, породивший наблюдаемый процесс, размерность вложения, энтропию и т.д., при этом в обработке используя только наблюдаемую реализацию [1, 4, 5].

Вследствие этого, разработчиков заставило переосмыслить некоторые подходы, связанные с повышением помехозащищенности РТС ПИ. Очевидно, попытки изобретателей стали основываться на дополнительном усложнении структуры, «формы» аттрактора хаотической несущей за счет повышения порядка динамических систем, что существенно затруднило практическую реализацию в радиотехнических системах передачи информации.

Целью данной работы является разработка модели передающей системы на основе динамической системы Икеды.

Основная часть

Рассмотрим общее нелинейное дифференциальное уравнение с запаздывающим аргументом,

используемое для моделирования систем, поведение которых определяется не только текущим состоянием, но и значениями динамических переменных в предыдущие моменты времени. Такие динамические системы с задержкой широко распространены в природе и успешно применяются во многих областях радиопизики, биологии, физиологии, химии и т.д. [4, 6]. В общем случае системы с запаздыванием описываются в следующем виде:

$$\mu_n x^n(t) + \mu_{n-1} x^{n-1}(t) + \dots + \mu_1 \dot{x} = F(x(t), x(t - \tau_0), \dots, x(t - \tau_k)), \quad (1)$$

где τ_0, \dots, τ_k учитывают возможность существования нескольких причин запаздывания с разными характерными масштабами. Частными случаями уравнения (1) являются следующие эталонные модели: уравнение Маккея – Гласса (Mackey – Glass) [2], уравнение Икеды (Ikeda) [7].

Из вариаций моделей динамических систем с задержкой, как формирователя хаотической несущей в РТС ПИ, наше внимание привлекла система Икеды:

$$\dot{x}(t) = -x(t) + \mu \cdot \sin(x(t - \tau_0) - \psi), \quad (2)$$

где ψ – фазовый сдвиг, μ – коэффициент пропорциональности обратной связи, τ_0 – время задержки. Ниже по тексту предлагается, на основании уравнения (2), модель передающей системы информации, обусловленная практической значимостью для модификации РТС с возможным повышением скрытности сигнала, без существенного изменения ее конструкции, в отличие от других эвристических систем, рассмотренных в предыдущих статьях [2, 5].

Рассмотрим свойства нелинейной динамической системы с задержкой (2). Для того чтобы сгенерировать с помощью системы колебания в хаотическом режиме, соответственно необходимо знать

значения ее параметров. В таком случае рекомендуется построить карту режимов или бифуркационную диаграмму, позволяющие получить важную информацию об использовании конкретного режима, на определенном диапазоне существования, при надлежащих параметрах [1, 3, 8]. В теории нелинейных колебаний бифуркация – это изменение структуры фазового пространства, которое происходит в результате изменения какого-нибудь параметра рассматриваемой системы при его переходе через некоторое критическое значение [8].

Рассмотрим на рис. 1 бифуркационную диаграмму $x(t_i, \mu_i)$, рассчитанную при вариациях значений параметра $\mu_i = i \cdot 80 / N$, где $i = 0 \dots N = 8000$. Дифференциальное уравнение Икеды (2) решалось численным методом Рунге – Кутты четвертого порядка с шагом интегрирования $h = 0,01$ и начальными значениями $x(t_0 \div t_\tau) = 0,01$, при параметрах системы: $\tau = 1, \psi = \pi / 2$.

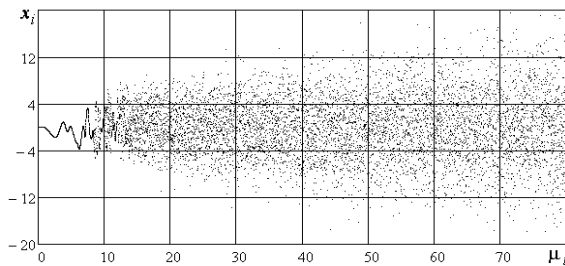


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма $x(t_i, \mu_i)$

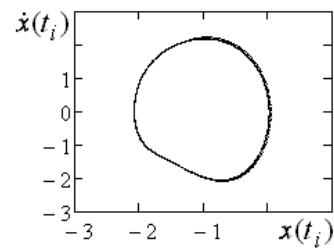
Легко заметить, что в интервале значений $\mu \approx 0 \dots 10$ (см. рис. 1) диаграмма указывает на устойчивые решения уравнения Икеды.

Не меняя общности вышесказанного ниже по тексту, в качестве примера, приводятся на рисунках 2 и 3 фазовые портреты $[\dot{x}(t_i), x(t_i)]_{i=0}^{5000}$, определяющие состояния системы (2), при значениях параметров: $\tau = 1, \psi = \pi / 2$ и вариациях коэффициента пропорциональности связи μ .

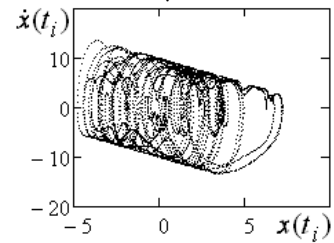
На рис. 2, а представлен фазовый портрет $[\dot{x}(t_i), x(t_i)]$, полученный при значении $\mu = 3$, который демонстрирует замкнутую траекторию, что характерно периодическому колебанию.

Дальнейшее увеличение значения коэффициента связи $\mu = 10$ приводит к появлению в фазовом портрете $[\dot{x}(t_i), x(t_i)]$ «кольцевых вихрей» (рис. 2, б), принадлежащих квазипериодическому режиму системы Икеды (2).

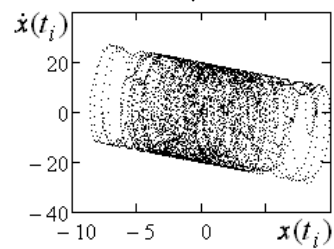
В следующем случае фазовый портрет $[\dot{x}(t_i), x(t_i)]$ (рис. 2, в) построенный при значении $\mu = 20$ определяется как хаотический режим нелинейной динамической системы (2).



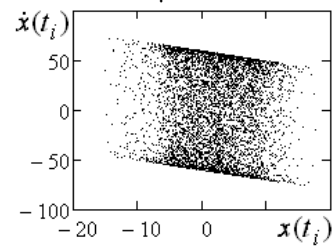
а – $\mu = 3$



б – $\mu = 10$



в – $\mu = 20$



г – $\mu = 60$

Рис. 2. Фазовые портреты системы Икеды.

В последнем случае, полученный фазовый портрет $[\dot{x}(t_i), x(t_i)]$ (рис. 2, г), при значении параметра уравнения (2) $\mu = 60$, отличается своим изотропным «заполнением», что обуславливает его сложную структуру аттрактора состояний системы, характеризующую хаотический режим.

Кроме этого были изучены другие бифуркационные диаграммы $x(t_i, \psi_i)$ и $x(t_i, \tau_i)$, по которым также определились интервалы значений $\psi \geq \pi / 8$ и $\tau \geq 1$ соответствующие хаотическому режиму данной системы.

Ниже по контексту анализируются автоковариационная функция и амплитудно-частотный спектр хаотического процесса, сформированного системой (2) со значениями параметров указанных в предыдущем абзаце. На рис. 3 представлена автоковариационная функция $C(n)$.

Заметим, что на рис. 3 автоковариационная функция быстро осциллирует, медленно убывает к

нулю, отсутствуют мощные боковые выбросы и близка к дельтаобразной форме.

Вместе с тем, на рис. 4 изображен амплитудно-частотный спектр $G(\omega)$.

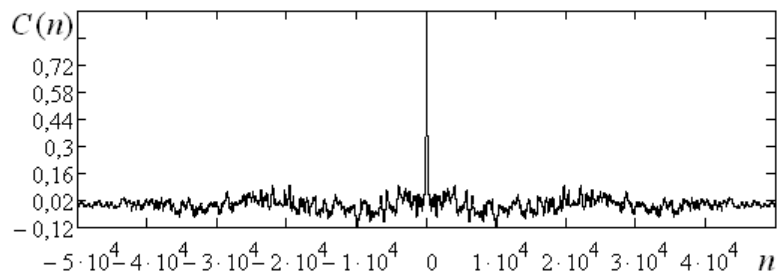


Рис. 3. Автоковариационная функция $C(n)$

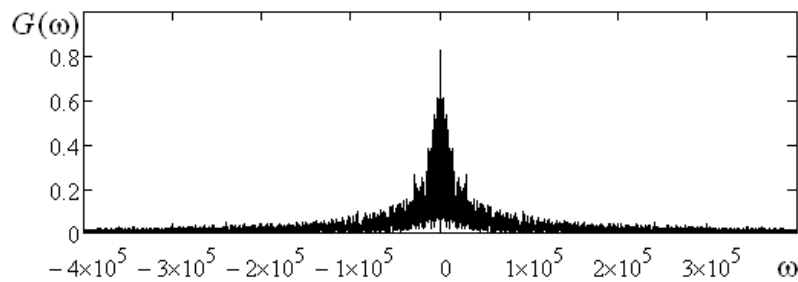


Рис. 4. Амплитудно-частотный спектр $G(\omega)$

Спектральный анализ процесса Икеды показывает наличие ярко выраженных низкочастотных гармоник (рис. 4), что характерно для узкополосного хаотического процесса.

Ниже предлагаются алгоритмы передающей системы, описываемые нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка с запаздывающим аргументом (2). Рассматриваются два способа подмешивания бинарного сообщения $s(t_i)$ в хаотическую несущую, осуществляемые добавлением к параметру μ :

$$\dot{x}(t) = -x(t) + (\mu + s(t_i) \cdot c) \cdot \sin(x(t - \tau_0) - \psi) \quad (3)$$

и, к динамической переменной $x(t)$:

$$\dot{x}(t) = -(x(t) + s(t_i) \cdot c) + \mu \cdot \sin(x(t - \tau_0) - \psi), \quad (4)$$

где c – уровень сообщения $s(t_i)$.

Бинарное сообщение $s(t_i)^p$ представлено в алфавите $p = 0; 1$ с длительностью ее элемента $M = N / K$, где $N = 2 \cdot 10^5$ и $K = 1000$ – число элементов (импульсов). Решения уравнений (3) и (4) выполнялись численным методом Рунге – Кутты четвертого порядка с шагом интегрирования $h = 0,001$ и начальными значениями $x(t_0 + \tau_r) = 0,01$. Таким образом, передаваемый хаотический сигнал $\bar{x}(t_i, s(t_i))$ формировался при значениях параметров динамической системы: $\mu = 60$, $\psi = \pi / 2$ и $\tau = 1$, соответствующих хаотическому режиму, а также с уровнем сообщения $c = 40$.

Постановка задачи заключалась в оценке бинарного сообщения $\hat{s}(t_i)$ по наблюдению, состоящего из аддитивной смеси хаотического сигнала $\bar{x}(t_i, s(t_i))$ со среднеквадратичным отклонением σ_x и гауссова шума $n(t)$ с нулевым математическим ожиданием m_0 , и среднеквадратичным отклонением σ_n :

$$\bar{\xi} = \{\xi_i\}_{i=0}^N = \bar{\xi}(t_i) = \bar{x}(t_i, s(t_i)) + n(t_i),$$

при условии, что параметры системы на приемной стороне известны.

Оценка сообщения $\hat{s}(t_i)$ определялась обращением уравнения (3) относительно $s(t_i)$ и в результате этого получили выражение оценки $\hat{s}(t_i)$:

$$\hat{s}(t_i) = \left(\frac{\dot{\xi}(t) + \xi(t)}{\sin(x(t - \tau_0) - \psi)} - \mu \right) \cdot \frac{1}{c}. \quad (5)$$

А также аналогично для второго уравнения (4):

$$\hat{s}(t_i) = (\mu \cdot \sin(x(t - \tau_0) - \psi) - \xi(t) - \dot{\xi}(t)). \quad (6)$$

Поскольку в выражениях (5) и (6) производная хаотического процесса неизвестна, однако учитывая, что доступно наблюдение $\xi(t_i)$, тогда воспользовавшись численным методом приближенного дифференцирования $\dot{\xi}(t_i)$ по четырем дискретным отсчетам, получили недостающую производную.

С целью более объективного анализа процедуры выделения $s(t_i)$, расчет оценки одного и того же сообщения проводился по 20 наблюдениям с раз-

личними реализациями измерительного шума

$$\bar{\xi}(t_i)^k = \bar{x}(t_i, s(t_i)) + n(t_i)^k,$$

где $k=1, \dots, 20$, при отношениях сигнал/шум приближенно равными $\delta_k = \sigma_x / \sigma_n^k \approx 100$.

Качественное выделение $s(t_i)$ определялось вероятностью правильной оценки сообщения $P_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{ош}}$, где величина $P_{\text{ош}} = d_H / K$ определяет долю ошибок в оценках элементов сообщения, которая равна отношению значения расстояния Хемминга $d_H(s(t), \hat{s}(t))$ между передаваемой бинарной последовательностью $s(t)$ и её оценкой $\hat{s}(t)$ к общему числу K ее элементов.

В результате выделения сообщения $s(t_i)$, с использованием выражения (5), были получены 20 значений вероятности правильной оценки бинарного сообщения: $P_{\text{пр}}=1$ девять раз, $P_{\text{пр}}=0,999$ девять раз, $P_{\text{пр}}=0,998$ один раз и $P_{\text{пр}}=0,996$ тоже один раз. Во втором случае, с применением выражения (6), значения вероятности $P_{\text{пр}}=1$ получились двадцать раз одинаковые.

Выводы

Таким образом, исследование модели передающей системы на основе нелинейной динамической системы с задержкой (Икеды) (2) показало следующие результаты. Формирование хаотической несущей с помощью системы Икеды (2) необходимо при значениях ее параметров: $\mu \geq 20$, $\psi \geq \pi/8$ и $\tau \geq 1$. Достоверное выделение бинарного сообщения из хаотического сигнала, искаженного гауссовым шумом, допустимо при отношении сигнал/шум не менее чем $\delta = 100$, без дополнительной фильтрации.

Наряду с этим, процедура выделения сообщения показала чувствительность к неточно заданным значениям параметров динамической системы с задержкой, что способствует повышению противостояния мерам идентификации динамической системы

Икеды и измерению ее параметров. Однако за рамками данной работы остались вопросы, связанные с анализом влияния параметров системы на качество выделения сообщения.

Список литературы

1. Фалькович С.Е. Основы статистической теории радиотехнических систем. Учеб. пособие. / С.Е. Фалькович, П.Ю. Костенко. – Х.: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 390 с.
2. Костенко П.Ю. Использование дискретного отображения, порожденного разностной схемой для дифференциального уравнения Маккея-Гласса, для скрытой передачи бинарного сообщения. / П.Ю. Костенко А.Н. Барсуков // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2009. – Т.52, №2 – С. 102-105.
3. Стасев Ю.В. Інформаційні системи на основі динамічного хаосу / Ю.В. Стасев, К.С. Васюта, С.В. Женьжера // Системи озброєння і військова техніка. – 2009. – №1 (17). – С. 134-138.
4. Пономаренко В.И. Метод восстановления систем с задержкой по временным рядам, учитывающий вид модельного уравнения / В.И. Пономаренко, М.Д. Прохоров, Е.В. Сидак // Известия Саратовского университета, Сер. Физика. – 2011. – Т. 11, № 2. – С.72-78.
5. Костенко П.Ю. Оценка структурной скрытности хаотических сигналов / П.Ю. Костенко, С.М. Симошенко, А.Н. Барсуков, А.В. Антонов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2012. – Т. 55, № 11. – С.3-10.
6. Larger Laurent. From Flow to Map in an Experimental High-Dimensional Electro-Optic Nonlinear Delay Oscillator / Laurent Larger, Pierre-Ambroise Lacourt, Stephane Poinsot, Marc Hanna // PHYSICAL REVIEW LETTERS PRL 95. – 2005. – 043903. – P. 043903-(1-4).
7. Ikeda K. Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light by a ring cavity system / K. Ikeda // Opt. Commun. – 1979. – V. 30. – P. 257-261.
8. Бутенин Н.В. Введение в теорию нелинейных колебаний / Н.В. Бутенин, К.И. Неймарк, Н.А. Фурфаев. – М.: Наука, 1976. – 384 с.

Поступила в редколлегию 12.02.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.Ю. Костенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ВИДІЛЕННЯ БІНАРНОГО ПОВІДОМЛЕННЯ ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМ ХАОТИЧНОГО СИГНАЛУ, СФОРМОВАНОГО ДИНАМІЧНОЮ СИСТЕМОЮ ІКЕДИ

О.М. Барсуков

У статті розглядається модель передавальної системи, що описується нелінійною динамічною системою Ікеди. Пропонується метод підмішування бинарного повідомлення в хаотичний несучу, яка сформована системою із затримкою, і його виділення за спостереженням сигналу, що спотворений вимірвальним шумом.

Ключові слова: хаотична несуча, фазовий простір, біфуркаційна діаграма, бинарне повідомлення, шум, система Ікеди.

RECOVERY OF BINARY INFORMATION FROM OBSERVER OF CHAOTIC SIGNAL GENERATED BY DYNAMIC SYSTEM IKEDA

A.N. Barsukov

In this paper, we consider model of the transmission system described by a nonlinear dynamical system Ikeda. Propose a method of mixing the binary message in a chaotic carrier generated by system with a delay and its recovery from observation of distorted signal measurement noise.

Keywords: chaotic carrier, the phase space, bifurcation diagram, a binary message, the noise, the system Ikeda.