

УДК 621.391

А.Н. Барсуков

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ БИНАРНЫХ СООБЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХАОТИЧЕСКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ОТОБРАЖЕНИЕМ ИКЕДЫ

В статье анализируются свойства хаотической последовательности, сформированной дискретной нелинейной динамической системой Икеды. Предлагаются способы подмешивания бинарного сообщения в хаотическую несущую, сформированную отображением Икеды, и его выделение по наблюдению сигнала на фоне измерительного шума.

**Ключевые слова:** хаотическая последовательность, фазовый портрет, бифуркационная диаграмма, бинарное сообщение, отображение Икеды.

### Введение

Последнее десятилетие пристальное внимание разработчиков систем передачи бинарных сообщений сосредоточено на решении задач, связанных с повышением помехозащищенности, которая включает в себя скрытность (способность противостоять мерам радиотехнической разведки) и помехоустойчивость [1 – 3]. Как правило, решение задачи скрытности осуществляется за счет расширения спектра сигнала, основанное на следующих методах [2, 3]: непосредственной модуляцией гармонической несущей псевдослучайной последовательностью (ПСП), псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) фрагментов гармонической несущей, псевдо-временной импульсной модуляцией (ПВИМ) гармонической несущей, комбинировании различных методов расширения спектра гармонической несущей.

Кроме этого, в связи с развитием теории динамического хаоса [4] стало понятно, что с помощью ее достижений можно решать задачи по повышению скрытности систем передачи данных, используя хаотические процессы в качестве переносчика сообщений [1]. Перечислим важные характеристики хаотической несущей: широкий спектр, низкий уровень боковых лепестков функции автокорреляции, высокая чувствительность к точности задания начальных условий формирователя хаотических процессов (последовательностей), разнообразие вариантов подмешивания сообщения в хаотическую несущую, а также явление самосинхронизации на приемной и передающей сторонах.

В тоже время, несмотря на большое количество разработанных моделей систем передачи бинарных сообщений [5], остаются вопросы, связанные со сложностью их практической реализации, поскольку описываются сложными нелинейными динамическими системами высокого порядка и, как следствие исследования алгоритмов выделения сообщения они обладают низкой устойчивостью к шуму наблюдения [5, 6].

Поиск новых формирователей хаотических несущих привел исследователей к использованию динамических систем, которые описываются дифференциальными уравнениями первого порядка с запаздывающими аргументами [7]:

$$\mu \dot{x} = F(x(t), x(t - \tau_0), \dots, x(t - \tau_k)),$$

где  $\tau_0, \dots, \tau_k$  учитывают возможность существования нескольких причин запаздывания с разными характерными масштабами. Подобные динамические системы обладает бесконечно большим числом степеней свободы, так как для ее однозначного описания необходимо бесконечномерное фазовое пространство и знание начальных условий в интервале  $[x(t_0 - \tau), x(t_0)]$  [7]. Примерами частных случаев динамических систем с задержкой являются эталонные модели: уравнение Маккея – Гласса (Mackey – Glass)

$$\dot{x}(t) = -bx(t) + \frac{ax(t - \tau)}{1 + (x(t - \tau))^{10}} \quad [7, 8],$$

уравнение Икеды (Ikeda)

$$\dot{x}(t) = -x(t) + \mu \cdot \sin(x(t - \tau_0) - \psi) \quad [7, 9].$$

Однако разработчикам дискретных систем передачи данных с повышенной скрытностью стало очевидно о возможном переходе от потоковых систем к каскадным, с помощью которых получаем хаотическую несущую в виде последовательности [8]. Среди известных формирователей хаотических последовательностей наиболее часто применяются дискретные отображения вида:  $x_{i+1} = f(x_i)$  [1, 7], характеризующиеся наличием быстроменяющихся функций  $f$  [1], например, логистическое отображение  $x_{i+1} = \lambda x_i(1 - x_i)$  [1, 4]. Однако анализ систем передачи данных с применением хаотических последовательностей, сформированных нелинейными дискретными отображениями  $x_{i+1} = f(x_i)$ , показал существенные недостатки: наличие одного управляющего параметра и проявление структурированности в фазовом пространстве.

**Целью данной работы** предлагается повышение скрытности системы передачи бинарного сообщения с использованием хаотической последовательности, сформированной дискретным нелинейным отображением.

### Основная часть

Предлагается использовать в качестве формирователя хаотических последовательностей одну из модельных систем нелинейной динамики – отображение Икеды [10]:

$$x_{i+1} = \lambda \sin(x_i + \varphi). \quad (1)$$

Следует подчеркнуть, что отображение Икеды (1), несмотря на простое выражение, имеет три управляющих параметра и возможность переносить одномерное отображение на двумерное и далее на потоки и наоборот [11]. В радиофизике системой описываются нелинейный осциллятор с внешним воздействием или оптическая (акустооптическая) система с запаздыванием [12].

Рассмотрим свойства хаотической последовательности, сформированной дискретной нелинейной динамической системой, описываемой отображением Икеды (1).

Проведем анализ бифуркационной диаграммы [13], позволяющей получить важную информацию об изменении режимов отображения Икеды (1) при вариации его параметров с последующим определением интервалов их значений в хаотическом режиме, а так же находить сложно-структурированные аттракторы [1]. На рис. 1 представлена бифуркационная диаграмма зависимости  $x_i(\lambda_i)$ , рассчитанная при вариации параметра  $\lambda_i = i \cdot 20/N$ , где  $i = 0 \dots N = 100000$  при  $\psi = \pi/2$  и начальным значением  $x_0 = 0,01$ .

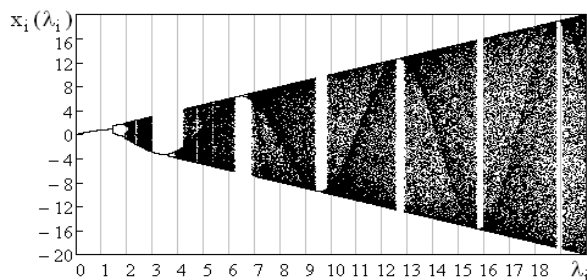


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма  $x_i(\lambda_i)$

Легко заметить (рис. 1), что переход к хаотическому режиму происходит через каскады бифуркаций удвоения периода, также на всем интервале вариации параметра  $\lambda$  отчетливо наблюдаются «окна» устойчивого режима системы Икеды.

В качестве примера на рис. 2 приведен фазовый портрет хаотической последовательности сформированной отображением Икеды (1) при следующих

параметрах:  $\psi = \pi/2$ ,  $\lambda = 9$  и начальным значением  $x_0 = 0,01$ , где  $n = 0 \dots N = 20000$ .

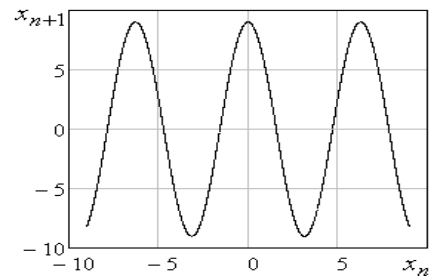


Рис. 2. Фазовый портрет отображения Икеды ( $\lambda = 9$ )

Не меняя общности, ниже по контексту проводится анализ основных статистических характеристик [1] хаотической последовательности (рис. 2), таких как спектр Фурье и автокорреляционная функция. На рис. 3 и 4 показаны результаты расчета амплитудно-частотного спектра  $G(\omega_n)$  и автоковариационной функции  $C(k_n)$  соответственно.

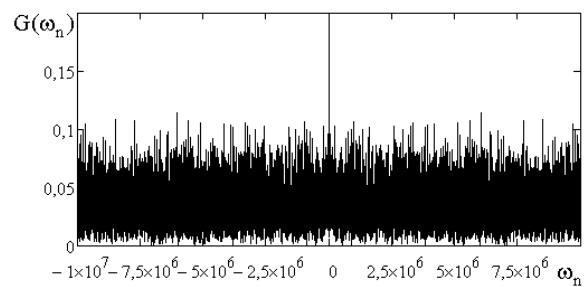


Рис. 3. Амплитудно-частотный спектр  $G(\omega_n)$

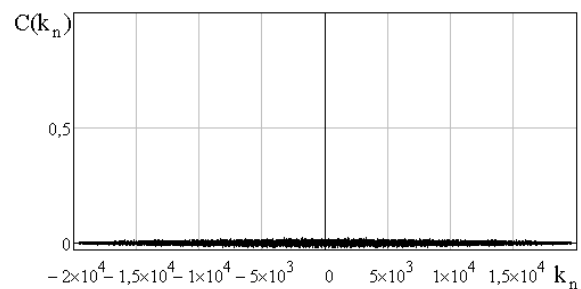


Рис. 4. Автоковариационная функция  $C(k_n)$

Из рисунка 3 видно, что хаотическая последовательность обладает широкополосным спектром  $G(\omega_n)$ , а ее автоковариационная функция  $C(k_n)$  (рис. 4) имеет дельтаобразную форму отождествляемую с шумом.

Более того, при анализе свойств хаотических последовательностей учитывались значения их базы  $B$ . Известно, что увеличение базы приводит к расширению спектра, а значит, выше становится энергетическая и параметрическая скрытность [1]. В результате вычислений получили следующие значения

базы В: для хаотических последовательностей порожденных отображением Икеды  $B \approx 335$  при значении параметра  $\lambda = 399$  и  $B \approx 230$  ( $\lambda = 9$ ), логистического отображения –  $B \approx 253$ , а также фазовой манипуляцией гармонической несущей кодовой М-последовательностью –  $B \approx 115$ . Вычисления В проводились при уровне интервала корреляционной функции равным 0,05.

Тем не менее, учет зависимости данных, присущий хаотическим процессам, увеличивает вероятность их правильной классификации и приводит к снижению потенциальной скрытности хаотической несущей до уровня, обусловленного шумом ее наблюдения.

Один из методов для классификации стохастических нелинейных зависимостей по временному ряду предложил W. D. Dechert [14] непараметрический «Dt-тест», основанный на Dt-статистике [14]:

$$w_{m,N}^{Dt}(\varepsilon, \varepsilon 1) = \sqrt{N-m} \times \frac{C_{m,N-m}(\varepsilon, \varepsilon 1) - C_{1,N-m}(\varepsilon)C_{1,N-m}(\varepsilon 1)}{\hat{\sigma}_{m,N}(\varepsilon, \varepsilon 1)}, \quad (2)$$

где  $\hat{\sigma}_{m,N}(\varepsilon, \varepsilon 1)$  оценка среднеквадратичного отклонения случайной величины. Dt-тест может быть использован для принятия гипотезы  $H_0$ , предполагая, что значения принадлежат генеральной совокупности независимы и тождественно распределены (independent and identically distributed – I.I.D.) [14].

Рассмотренная структура обнаружителя, основанная на Dt-статистике [15], принципиально отличается от традиционной  $\chi^2$ -статистики [1, 15]. Поскольку классы случайных и хаотических процессов не различаются по энергетическому признаку, то они «метрируются» с помощью числовых показателей их «корреляционных интегралов»  $C_{m,N}(\varepsilon, \varepsilon 1)$  [14] с двойным интервалом «покрытий»  $\varepsilon, \varepsilon 1$  и m-histories (m-истории) временным изменением данных  $x_i^m = (x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1})$  для  $m \geq 1$  [14].

Ниже по тексту приводятся результаты расчета мощности критерия  $1-\beta$  ( $\beta = P(\xi_i \in G_\alpha | H_1)$ ) [15],  $G_\alpha$  – критическая область уровня значимости  $\alpha$  – вероятности ошибки первого рода,  $\beta$  – вероятность ошибки второго рода, полученные при использовании Dt-статистик от вариации значения отношения сигнал/шума  $\delta = \sigma_f / \sigma_n$ , где  $\sigma_f$  – среднеквадратичное отклонение хаотической последовательности  $x_i$  и,  $\sigma_n$  – белого гауссова шума  $n_i$  с нулевым математическим ожиданием [15]. Проверялась гипотеза  $H_0$  об отсутствии в наблюдении  $\{\xi_i\}_{i=1}^{N-m} = x_i + n_i$  хаотической последовательности  $x_i$ , т.е. принимается неравен-

ства  $|w_{m,N}^{Dt}(\varepsilon, \varepsilon 1)| \leq 1,96$ , что соответствует уровню значимости  $\alpha$  и тогда с 95% уверенностью можно принять гипотезу  $H_0$  о независимом и тождественном распределении (I.I.D.) [15]. В случае отклонения  $H_0$  данные не I.I.D, что соответствует появлению на фоне белого шума хаотического сигнала, поскольку изменяются вероятностные свойства не только наблюдения  $\{\xi_i\}_{i=1}^{N-m}$  [15], но и Dt-статистики.

На рис. 5 представлена характеристика обнаружения хаотической последовательности  $p_\beta(\delta, \varepsilon)$ , которая рассчитывалась при следующих значениях:  $\psi = \pi/2$ ,  $x_0 = 0,01$ ,  $\lambda = 9$  и  $N = 1000$ . Интервалы «покрытий» принимались со значениями  $\varepsilon 1 = 2\varepsilon_i$ :  $\varepsilon_1 = 0,2\sigma_\xi$ ;  $\varepsilon_2 = 0,4\sigma_\xi$ ;  $\varepsilon_3 = 0,6\sigma_\xi$ ,  $\varepsilon_4 = 0,8\sigma_\xi$ ,  $\varepsilon_5 = 0,4\sigma_\xi$  и  $\varepsilon_6 = 0,4\sigma_\xi$  (кривые 1 – 6 соответственно), где  $\sigma_\xi$  – среднеквадратичное отклонение наблюдения  $\xi_i$ . Кривая 5 характеризует зависимость обнаружения  $p_\beta(\delta, \varepsilon)$  хаотической последовательности, сформированной логистическим отображением  $x_{i+1} = \lambda x_i(1-x_i)$  [1] при значении  $\lambda = 3,9999$  и начальным условием  $x_0 = 0,06$ , а кривая 6 для сложного сигнала с фазовой манипуляцией гармонической несущей кодовой М-последовательности. Аддитивная смесь наблюдения  $\xi_i$  формировалась из 100 реализаций гауссова шума с различной интенсивностью  $\{\sigma_n\}_{i=1}^{100}$ , которые добавлялись к хаотической последовательности, что позволило получить выборку из 100 значений  $w^{Dt}$  Dt-статистик.

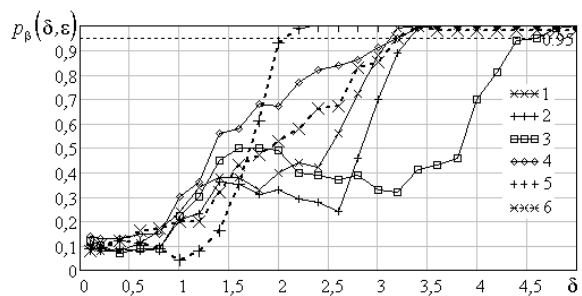


Рис. 5. График обнаружения  $p_\beta(\delta, \varepsilon)$  хаотической последовательности ( $\lambda = 9$ )

Легко заметить на рис. 5, что кривые 1, 2, 4 и 6 пересекают уровень, соответствующий значению вероятности обнаружения равному  $p_\beta \approx 0,95$  при отношении сигнал/шум приблизительно  $\delta_n \approx 3,5$ , т.е. можно несанкционированно обнаружить передаваемый сигнал при  $\delta_n$  большем, чем  $\delta_n \geq 3,5$ , поскольку в наблюдении  $\xi_i$  начинают проявляться между ее значениями нелинейные зависимости в

фазовом портрете. Кривая 5 (рис. 5) характеризует появление зависимостей в фазовом портрете при меньшем значении отношении сигнал/шум  $\delta_{\text{до}} \approx 2$ . В результате можно подчеркнуть, что скрытность хаотической последовательности, сформированной отображением Икеды в  $\delta_{\text{и}}/\delta_{\text{до}} = 3,5/2 = 1,75$  раз больше, чем последовательности логистического отображения.

На рис. 6 приводится аналогичная характеристика обнаружения хаотической последовательности  $p_{\beta}(\delta, \varepsilon)$ , при значении параметра  $\lambda = 399$ .

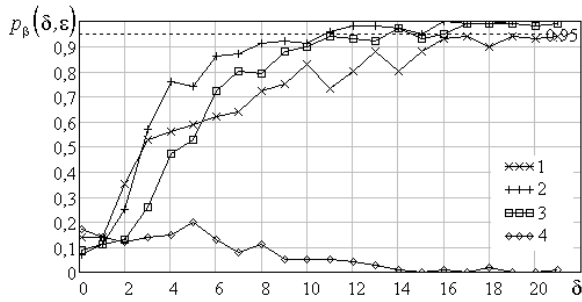


Рис. 6. График обнаружения  $p_{\beta}(\delta, \varepsilon)$  хаотической последовательности ( $\lambda = 399$ )

Несложно увидеть точки пересечений кривых 2, 3 (рис. 6) с уровнем вероятности обнаружения сигнала при значении  $p_{\beta} \approx 0,95$ , надлежащих значению отношения сигнал/шум приблизительно равному  $\delta_{\text{и}} \approx 16$ , что соответствует меньшей интенсивности шума  $\delta_{\text{и}}$ . Наблюдаемое перемещение кривых вправо (см. рис. 6) обусловлено усложнением структуры аттрактора в псевдофазовой плоскости хаотической последовательности отображения Икеды, что позволило уменьшить в  $\delta_{\text{и}}/\delta_{\text{до}} \approx 16/2 = 8$  раз вероятность обнаружения передаваемого сигнала, в сравнении с последовательностью порожденной логистическим отображением.

Ниже по контексту предлагаются алгоритмы подмешивания бинарного сообщения  $i(t_i)$  в хаотическую последовательность сформированную отображением Икеды (1), осуществляемые манипуляцией одного из ее параметров:  $\varphi$ ,  $\lambda$  и  $\lambda \sin(x_i + \varphi)$ ;

$$x_{i+1} = \lambda \sin(x_i + \varphi) + (i(t_i)c); \quad (3)$$

$$x_{i+1} = (\lambda + i(t_i)c) \sin(x_i + \varphi); \quad (4)$$

$$x_{i+1} = \lambda \sin(x_i + \varphi + i(t_i)c), \quad (5)$$

где  $c=1$  – амплитуда сообщения  $i(t_i)$ .

В качестве примера на рис. 7 приводится псевдофазовый портрет хаотического сигнала, полученного с использованием алгоритма 3 при предлагаемых параметрах системы:  $\lambda = 399$  и  $\psi = \pi/2$ .

На рис. 7 хорошо просматривается в структуре псевдофазового портрета второй контур, что указывает на неприродное происхождение передаваемого сигнала. Аналогичная тенденция наблюдается также для алгоритма (4).

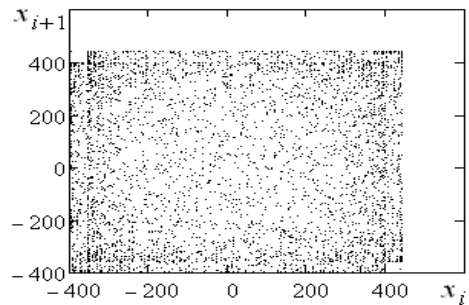


Рис. 7. Псевдофазовый портрет хаотического сигнала (алгоритм (3))

Не меняя общности вышесказанного на рис. 8 приводится псевдофазовый портрет хаотического сигнала, полученного с использованием алгоритма 5 при аналогичных параметрах системы (1).

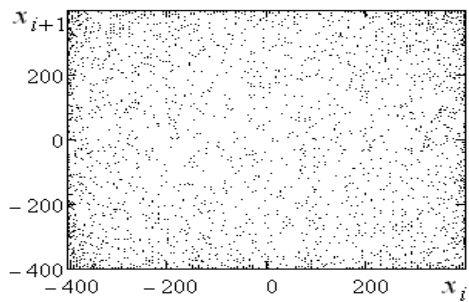


Рис. 8. Псевдофазовый портрет хаотического сигнала (алгоритм (5))

Следует отметить, что псевдофазовый портрет, представленный на рис. 8, характеризует изотропную структуру передаваемого сигнала. Вследствие этого, очевидно целесообразное использование алгоритма (5) для обеспечения структурной скрытности передаваемого хаотического сигнала.

Оценка сообщения  $\hat{i}(t_i)$  определялась обращением уравнения (5) относительно  $i(t_i)$  и в результате чего получили выражение:

$$\hat{i}(t_i) = \left( \frac{\xi_{i+1}}{\lambda} - \sin(\xi_i + \varphi) \right) \frac{1}{c}$$

по наблюдению хаотического сигнала  $\xi_i$  искаженного измерительным шумом. Исследование модели вышерассмотренной приемопередающей системы на основе алгоритма (5) показало возможность качественного выделения бинарного сообщения  $i(t_i)$  по наблюдению сигналу  $\xi_i$  при значении отношения сигнал/шум  $\sigma_f/\sigma_n \geq 50$ , без дополнительной фильтрации.

## Выводы

Таким образом, использование хаотической последовательности, порожденной нелинейным отображением Икеды (1), позволяет обеспечить скрытность системы передачи данных, обоснованное использованием Dt-статистики при сравнительном анализе вероятностей обнаружения наблюдаемых хаотических сигналов.

Формирование хаотической последовательности с использованием отображения Икеды (1) рекомендуется при значении ее параметров:  $\lambda \geq 20$ ,  $\psi \geq \pi/8$  и  $\tau \geq 1$ .

Однако за рамками данной работы остались вопросы, связанные с анализом влияния неточно заданных параметров системы на качество выделенные 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. Макаренко С.И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: моногр. / С.И. Макаренко, М.С. Иванов, С.А. Попов. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.
3. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев и др. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
4. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров / Ф. Мун; пер. с англ. Ю.А. Данилова, А.М. Шукурова. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
5. Романов И.В. Генерация и приём хаотических сигналов высокочастотного диапазона динамической системой с нелинейностью в виде композиции парабол / И.В. Романов // Радиотехника. Телекоммуникации. Антенны. Микроволновые устройства. Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24), часть 1. – С. 64-68.
6. Корчинский В.В. Метод формирования группового сигнала на основе псевдослучайной перестановки реализа-

ций хаотических сигналов / В.В. Корчинский // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – № 1/1(9). – С. 22-24.

7. Безручко Б.П. Математическое моделирование и хаотические временные ряды / Б.П. Безручко, Д.А. Смирнов. – Саратов: ГосУНЦ "Колледж", 2005. – 320 с.

8. Костенко П.Ю. Использование дискретного отображения, порожденного разностной схемой для дифференциального уравнения Маккея-Гласса, для скрытной передачи бинарного сообщения / П.Ю. Костенко А.Н. Барсуков // Изв. вузов. Радиотехника. – 2009. – Т. 52, №3. – С. 37-45.

9. Барсуков А.Н. Выделение бинарного сообщения по наблюдению хаотического сигнала, сформированного динамической системой Икеды / А.Н. Барсуков // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2013. – Вып. 2(35). – С. 67-70.

10. Ikeda K. Optical turbulence: Chaotic behavior of transmitted light from a ring cavity/ K. Ikeda, H. Daido, O. Akimoto // Phys. Rev. Lett. – 1980. – Vol. 45. – 709 p.

11. Кузнецов А.П. Особенности динамики почти консервативного отображения Икеды / А.П. Кузнецов, А.В. Савин, Д.В. Савин // Письма ЖТФ. – 2007. – Т. 33, № 3. – С. 57-63.

12. Кузнецов А.П. Динамические системы разных классов как модели нелинейного осциллятора с импульсным воздействием / А.П. Кузнецов, Л.В. Тюрюкина // Изв. вузов «ПНД». – 2000. – Т. 8, № 2. – С. 31-41.

13. Бутенин Н.В. Введение в теорию нелинейных колебаний / Н.В. Бутенин, К.И. Неймарк, Н.А. Фурфав. – М.: Наука, 1976. – 384с.

14. Dechert W.D. An application of chaos theory to stochastic and deterministic observations // Working paper, University of Houston. – 1995. – P. 1-24.

15. Барсуков А.Н. Использование Dt-статистики в задаче обнаружения хаотического сигнала искаженного шумом / А.Н. Барсуков В.Ж. Яценко, В.В. Парфило // Наука і техніка Повітряних Сил України ЗСУ. – 2012. – №3(9). – С. 102-105.

Поступила в редколлегию 13.11.2013

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

## ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОДОЗАХИЩЕНОСТІ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ БІНАРНОГО ПОВІДОМЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ХАОТИЧНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ, ЩО СФОРМОВАНО ВІДОБРАЖЕННЯМ ІКЕДИ

О.М. Барсуков

У статті аналізуються властивості хаотичної послідовності, сформованої дискретної нелінійної динамічної системою Ікеди. Пропонуються способи підмішування бинарного повідомлення в хаотичну несучу, що сформовано відображенням Ікеди, і його виділення зі спостереження сигналу на фоні вимірювального шуму.

**Ключові слова:** хаотична послідовність, фазовий портрет, біфуркаційна діаграма, бинарне повідомлення, відображення Ікеди.

## THE IMPROVING ANTIJAMING OF SYSTEMS TRANSMISSION BINARY OF MESSAGES BY USING CHAOTIC SEQUENCE OF GENERATED MAPPING IKEDA

A.N. Barsukov

The paper analyzes the properties of chaotic sequence generated discrete nonlinear dynamical system Ikeda. Provides methods for mixing the binary message in a chaotic carrier formed Ikeda map and its allocation to monitor the signal on the background of the measurement noise.

**Keywords:** chaotic sequence, the phase space, bifurcation diagram, a binary message, the mapping Ikeda.