

Васюта К. С., Казьміров І. В.

## МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД ГЕНЕРАЦІЇ ГІПЕРХАОТИЧНИХ КОЛИВАНЬ ДЛЯ СКРИТНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

**Анотація.** В роботі запропоновано модифікований метод генерації шумоподібних сигналів для радіотехнічних систем зі скритним режимом функціонування. Метод базується на каскадному поєднанні 4D гіперхаотичного осцилятора Чуа та глибокого нелінійного перетворення на основі ітеративного логістичного відображення. Проведене моделювання демонструє повне руйнування детермінованої структури вихідного атратора та отримання сигналу з кореляційними властивостями близькими до дельта-функції. Підтверджено можливість надійного виявлення сигналу кореляційним приймачем при відношенні сигнал/шум - 18 дБ.

**Ключові слова:** LPI радар, гіперхаос Чуа, кореляційний приймач, шумоподібний сигнал.

**Abstract.** This paper proposes a modified method for generating wideband noise-like signals for radio engineering systems with a stealth mode of operation. The method is based on a cascade combination of a 4D hyperchaotic Chua's oscillator and a deep nonlinear transformation using an iterative logistic map. Numerical simulations are conducted, demonstrating the complete destruction of the deterministic structure of the original attractor and the generation of a signal with correlation properties close to a delta-function. The possibility of reliable signal detection by a correlation receiver at a signal-to-noise ratio down to -18 dB is confirmed.

**Keywords:** LPI radar, Chua's hyperchaos, correlation receiver, noise-like signal.

Сучасні вимоги до радіолокаційних станцій (РЛС) зумовлюють необхідність їх функціонування в скритному режимі, що досягається застосуванням радарів з низькою ймовірністю перехоплення (Low Probability of Intercept, LPI) [1]. Сигнали, що використовуються в класичних LPI-радарх, мають детерміновану структуру, що робить їх вразливими до засобів радіоелектронної розвідки. Використання сигналів на основі детермінованого хаосу є перспективною альтернативою, проте їхня залишкова структура, пов'язана з геометрією атратора, може бути виявлена методами нелінійного аналізу [2]. Це обумовлює завдання розробки нових методів генерації сигналів, що поєднують складність хаосу з властивостями, невідмінними від випадкового шуму, залишаючись при цьому придатними для когерентної обробки.

В даній роботі розроблено та досліджено модифікований метод генерації шумоподібних сигналів, який шляхом каскадного поєднання гіперхаотичної динаміки та глибокого нелінійного перетворення усуває структурні особливості детермінованого хаосу. Запропонований метод складається з двох етапів.

На першому етапі генерується базове коливання за допомогою 4D гіперхаотичного осцилятора Чуа [3], що описується системою рівнянь (1):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha \times (y - x - f(x)) \\ \frac{dy}{dt} = x - y + z \\ \frac{dz}{dt} = -\beta \times y \\ \frac{dw}{dt} = -\gamma \times z \end{cases} \quad (1)$$

де  $f(x)$  – кусково-лінійна характеристика нелінійного елемента. Варто зазначити, що його попередником гіперхаосу є канонічний (класичний) осцилятор Чуа [4], що демонструє хаотичну поведінку в трьох вимірах (3D). Однак для сучасних задач, що вимагають підвищеної скритності,

складність 3D-хаосу може бути недостатньою. Тому в даній моделі використовується варіант чотиривимірної (4D) гіперхаотичної системи шляхом додавання ще одного стану, що призводить до значно складнішої динаміки. Таким чином, використання гіперхаотичної системи забезпечує високу початкову складність базового сигналу  $S_{Chua}(t)$ .

На другому етапі вихідний сигнал  $S_{Chua}(t)$  проходить глибоке нелінійне перетворення для руйнування його детермінованої структури, а результаті чого формується фінальний модифікований сигнал згідно з виразом (2):

$$S_{Modified} = L^k \left( \frac{S_{Chua}(t) - \min(S_{Chua})}{\max(S_{Chua}) - \min(S_{Chua})} \right) \quad (2)$$

де сигнал нормалізується до діапазону  $[0, 1]$ , а  $L^k$  позначає  $k$ -кратне застосування ітеративної функції логістичного відображення  $L(y) = r \times y(1-y)$  при  $r=4$ . В роботі використано  $k=20$  ітерацій.

Для дослідження властивостей згенерованого сигналу було проведено моделювання. На рис. 1 показано порівняння фазових портретів, реконструйованих методом затримок. Фазовий портрет вихідного сигналу Чуа (рис. 1, а) має чітку детерміновану структуру, тоді як портрет модифікованого сигналу (рис. 1, б) являє собою щільну, рівномірно заповнену хмару точок, візуально невідмінну від портрета білого шуму.

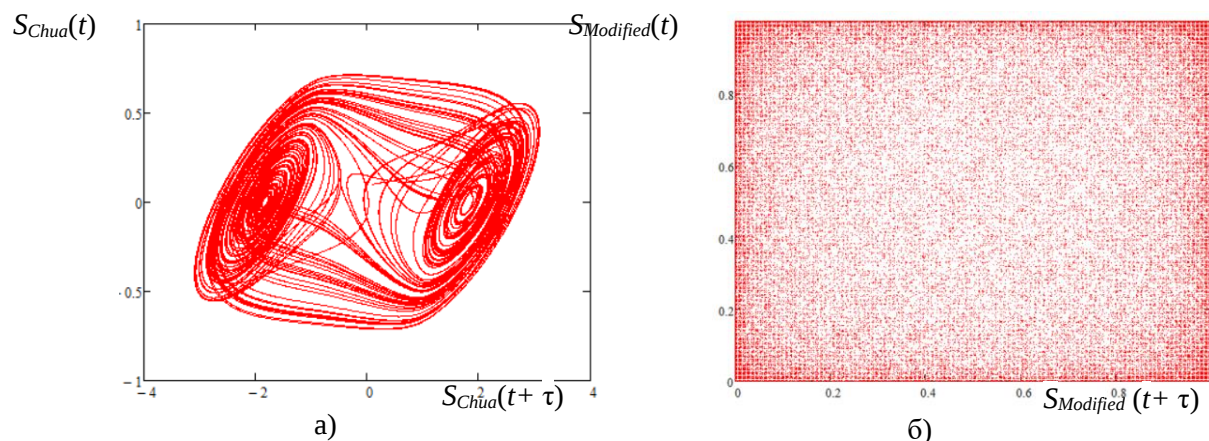


Рис. 1. Фазові портрети: а) вихідного сигналу осцилятора Чуа;  
б) модифікованого сигналу.

Аналіз автокореляційних функцій (АКФ) (рис. 2) свідчить про явні шумоподібні властивості модифікованого сигналу, адже його АКФ має виражену дельта-подібну ("голчасту") форму з надзвичайно низьким рівнем бічних пелюсток.

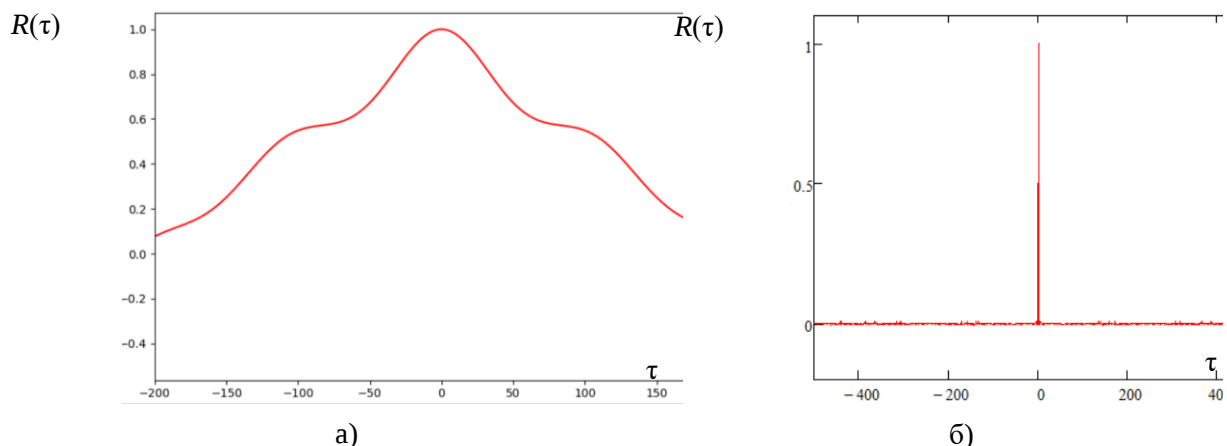


Рис. 2. Автокореляційні функції: а) вихідного сигналу осцилятора Чуа;  
б) модифікованого сигналу.

Для демонстрації можливості надійного виявлення сигналу в зашумленому каналі змодельовано роботу кореляційного приймача в каналі з адитивним білим гаусівським шумом. Приймач обчислює взаємну кореляційну функцію  $R(\tau)$  між прийнятим сигналом, що складається з суміші корисного сигналу та шуму, і збереженою локальною копією випроміненого сигналу. Результати моделювання (рис. 3) показують, що навіть при відношенні сигнал/шум (SNR) на вході -18 дБ, на виході корелятора спостерігається гострий та однозначний пік, що значно перевищує рівень шуму. Це підтверджує високий коефіцієнт стиснення сигналу та можливість його виявлення в складних умовах.

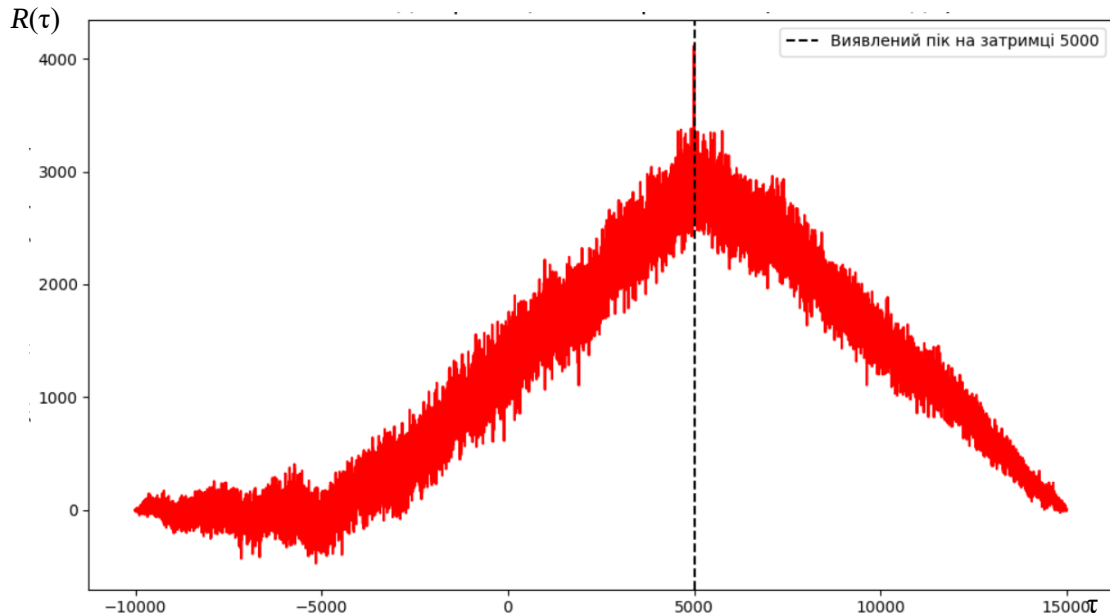


Рис. 3. Вихід кореляційного приймача при SNR = -18 дБ.

Таким чином, запропонований модифікований метод дозволяє генерувати сигнали з шумоподібними властивостями, ефективно руйнуючи детерміновану структуру вихідного хаосу. За результати моделювання доцільно надалі використовувати такі модифіковані сигнали для розробки LPI-радарів нового покоління та систем захищеного зв'язку.

#### Список використаних джерел:

1. Pace P. E. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar. Norwood : Artech House, 2009. 634 p.
2. Abarbanel H. D. I. Analysis of Observed Chaotic Data. New York : Springer-Verlag, 1996. 272 p.
3. Matsumoto T., Chua L. O., Kobayashi K. Hyperchaos in a four-dimensional electric circuit. 1986 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. San Jose, CA, USA, 1986. P. 849-852.
4. Chua L. O., Lin G.-N. Canonical Realization of Chua's Circuit Family. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 1984. Vol. 31, no. 9. P. 765-790.

**Васюта Костянтин Станіславович** – доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, заступник начальника Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, e-mail: kohafish@ukr.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1978-3717>

**Казьміров Іван Васильович** – ад'юнкт Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, e-mail: [i.v.kazmirov@gmail.com](mailto:i.v.kazmirov@gmail.com), ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0897-8922>

***Kostiantyn Stanislavovych Vasiuta*** – Doctor of Engineering Science, Professor, Honoured Worker of Science and Engineering of Ukraine, Deputy Head in Science of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: kohafish@ukr.net, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1978-3717>

***Ivan Vasylovych Kazmirov*** – Post-Graduate of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: [i.v.kazmirov@gmail.com](mailto:i.v.kazmirov@gmail.com), ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0897-8922>