

УДК 621.391

П.Ю. Костенко, О.М. Барсуков, Є.В. Бернік, Р.Ю. Корнілін

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ПІДВИЩЕННЯ СКРИТНОСТІ АНАЛІТИЧНИХ ХАОТИЧНИХ СИГНАЛІВ

У статті розглядається розробка сигнальної конструкції, що використовує хаотичні послідовності властивості яких близькі до властивостей білого шуму. Для цих послідовностей розраховується IID-скритність. Вивчаються атрактори сконструйованих послідовностей та наводяться рекомендації що до їх використання у системах передачі конфіденційної інформації. Результати статті можуть бути використані для підвищення скритності радіотехнічних систем передачі інформації.

**Ключові слова:** хаотична послідовність, атрактор, аналітичний хаотичний сигнал, IID-скритність, BDS-статистика.

### Вступ

При розробці сучасних радіотехнічних систем (РТС) передачі конфіденційної інформації спостерігається тенденція до використання сигналів властивості, яких близькі до властивостей білого шуму. До таких сигналів можна віднести хаотичні послідовності.

Однак, володіючи ознаками випадковості, найпростіші математичні моделі хаотичних послідовностей мають структурований фазовий портрет, що відрізняє їх від звичайних білих шумів. Тому, безпосереднє використання хаотичних послідовностей для передачі інформації не вирішує завдання забезпечення скритності РТС.

Під скритністю, яка чисельно визначається відповідною імовірністю  $P_{\text{скр}} = 1 - P_p$ , розуміють здатність РТС протистояти діям радіотехнічної розвідки та засобам несанкціонованого доступу [1] із заданою ймовірністю  $P_p$ .

У свою чергу радіотехнічна розвідка передбачає послідовне рішення трьох основних задач: виявлення факту роботи РТС ПІ (виявлення сигналу з ймовірністю  $P_{\text{вияв}}$ ); визначення структури виявленого сигналу і його основних параметрів з ймовірністю  $P_{\text{стр}}$ , а також розкриття інформації, що міститься в сигналі з ймовірністю  $P_{\text{інф}}$ .

Таким чином імовірність розвідки враховує вирішення цих задач у вигляді співмножників  $P_p = P_{\text{вияв}} P_{\text{стр}} P_{\text{інф}}$ .

Є кілька властивостей сигналів, які тією чи іншою мірою обумовлюють їхню скритність [1–2]. Тут будемо під скритністю будемо розуміти близькість атрактора сигналу до атрактора білого шуму, тобто ступінь його маскуванню під шум. Чисельну міру якості маскуванню (скритності сигналу) визначимо значенням BDS-статистики сигналу. Її значення для незалежних однаково розподілених

(Independent and Identically Distributed) значень випадкових величин (білого шуму) перебувають в інтервалі  $(-1,96; 1,96)$ , який відповідає рівню значимості  $\alpha = 0,05$ . Назвемо його інтервалом IID, а відхиленням BDS-статистики сигналу від цього інтервалу можна характеризувати мірою скритності, який назвемо IID-скритністю.

У контексті розв'язку завдання забезпечення IID-скритності сигналів у роботі [3] запропонована сигнальна конструкція, що використовує концепцію аналітичного сигналу [4] і просту одномірну модель хаосу зі структурованим атрактором. Була отримана так звана аналітична хаотична послідовність (АХП) у вигляді звичному для коливальних процесів:

$$s_n = \text{Re}(\dot{A}_n e^{j\omega n}) = A_n \cos(\psi_n + \omega n),$$

де  $A_n = |\dot{A}_n|$ ;

$$\psi_n = \arg(\dot{A}_n);$$

$\omega$  – «несуча» частота;

$n$  – дискретний час.

Відліки  $\dot{A}_n = x_n + jH_n(x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$  комплексної амплітуди, визначаються за допомогою дискретного перетворення Гілберта  $H(\cdot)$ , яке руйнує структуру атрактора послідовності  $\{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$  [5]. Ця послідовність може бути отримана  $(N-1)$ -кратним ітеруванням початкового значення  $x_0$  з використанням наприклад, відображення Чебишова.

Дослідження значень BDS-статистики [6] АХП на безлічі частот  $\{\omega_i = 2\pi i\}$  та невеликих їх околиць  $\delta$  показало, що вони відрізняються від відповідних значень характерних для білого шуму тобто не потрапляють в інтервал  $\pm 1,96$ .

При цьому атрактори АХП будуть близькими до атрактора початкової ХП, що можна трактувати, як зниження його скритності.

**Метою роботи** є конструювання хаотичного сигналу, скритність якого не буде залежати від «несучої» частоти та повинна забезпечуватися навіть у відсутності шуму.

### Виклад основного матеріалу

Також як і в роботі [3] для визначення комплексної амплітуди та фази ХП використаємо комплекснозначну послідовність. Її дійсною й уявною компонентами будуть перетворені по Гілберту множини  $\{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$  (у роботі [3] ця послідовність не перетворювалась) і  $\{y_0, y_1, \dots, y_{N-1}\}$ , сформовані одним відображенням, але з різними початковими значеннями:

$$\dot{A}_{2H_n} = H_n(x_0, x_1, \dots, x_{N-1}) + jH_n(y_0, y_1, \dots, y_{N-1}).$$

Після переносу комплексної амплітуди  $\dot{A}_{2H_n} = |\dot{A}_{2H_n}| e^{j\psi_{2H_n}}$  на частоту  $\omega$  одержимо послідовність:

$$s_{2H_n} = \text{Re}(\dot{A}_{2H_n} e^{j\omega n}) = A_{2H_n} \cos(\psi_{2H_n} + \omega n),$$

яку назвемо ХП(2Н).

На рис. 1 показана реалізація ХП(2Н), з ускладненою структурою атрактора, отриманої з використанням полінома Чебишова першого роду 6-го порядку з параметрами  $x_0 = 0,6$  й  $x_0 = 0,67$ ,  $N = 300$ ,  $\omega = 2,75$ .

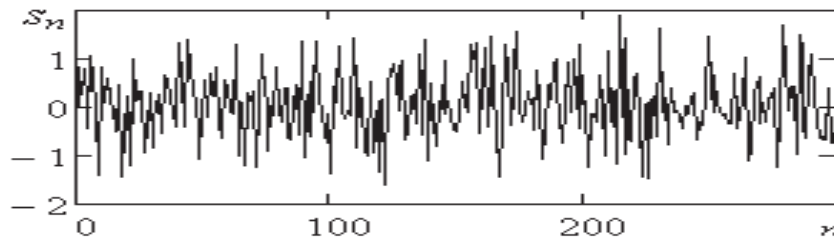


Рис. 1. Реалізація ХП(2Н)

Фазовий портрет (атрактор) ХП(2Н) показаний на рис. 2.

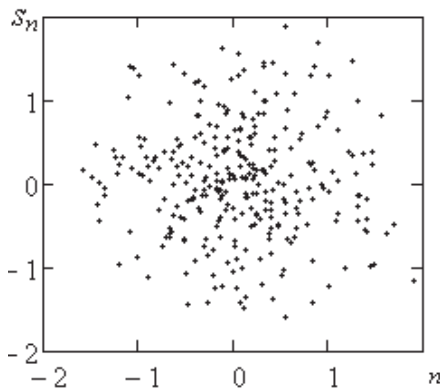


Рис. 2. Фазовий портрет (атрактор)

Легко помітити, що його атрактор візуально близький до атрактора білого шуму, тобто не демонструє ознак структурованості (періодичності або інший вид упорядкованості й закономірності).

Візуальний аналіз атрактора сконструйованого ХП(2Н) дає підставу вважати, що він має високу скритність у згаданому вище змісті. Для підтвердження цього висновку розрахуємо для ХП(2Н) BDS-статистику на безлічі можливих значень її параметра (радіуса покриття атрактора ХП(2Н) у фазовому просторі) Нагадаємо, що значення BDS-статистики прийняте в якості міри скритності.

BDS-статистика  $w(\bar{s})$  визначається функцією наступного виду [6]:

$$w_{m,N}(\varepsilon) = \sqrt{N-m+1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)} \quad (1)$$

(для простоти запису аргумент  $\bar{s}$  цієї функції, що задає вектор даних, опущений) і припускає «вкладення» часового ряду в  $m$ -мірне псевдофазовий простір.

У чисельнику (1) маємо функції  $C_{m,N}(\varepsilon)$  й  $C_{1,N}(\varepsilon)$ , що визначають частоту влучення довільної пари крапок фазового простору в гіперсфери радіуса  $\varepsilon$ , а в знаменнику, середньоквадратичне відхиленням  $\sigma_{m,N}(\varepsilon)$  чисельника.

На рис. 3 показана залежність значення BDS-статистики ХП(2Н) від частоти на безлічі  $\{\omega_i = i\Delta_\omega\}_{i=1}^{200}$ , які при моделюванні змінювалися із кроком  $\Delta_\omega = 0,05$ .

Аналіз значень BDS-статистики від частоти ХП(2Н) показує, що практично всі її значення попадають в інтервал IID. Таким чином, розрахунки BDS-статистики так само, як і візуальний аналіз атрактора (фазового портрета) ХП(2Н), підтверджує його нерозрізненість від атрактора білого шуму.

Як приклад можна запропонувати наступний варіант скритної передачі бінарного повідомлення з використанням АХП(2Н). Символами «0» повідом-

лення маніпулюється перша  $X\Pi(2H)_0$  отримана з використанням відображення Чебишева 6-го порядку. При цьому відлікам послідовності що потрапляють до фрагментів, які відповідають часу передачі символу «1» присвоюється нульові значення.

Аналогічні перетворення виконуються для передачі символу «1», але вже над другим  $X\Pi(2H)_1$  для формування якого використовується відображення Чебишева 4-го порядку. Потім обидві послідовності складаються та передаються по каналу зв'язку. При санкціонованому доступі приймання такого сигналу можна виконати відомими методами статистичної обробки спостережень.

На рис. 4 показано бінарне повідомлення  $W$ , а також відповідні фрагменти  $S1W$  ( $X\Pi(2H)_0$ ) та  $S2W$  ( $X\Pi(2H)_1$ ).

Відліки такого дискретного хаотичного сигналу поступають на цифро-аналоговий перетворювач і далі в передавальний пристрій.

У приймальному пристрої до нього додається шум.

Обробка прийнятого сигналу виконується відомими методами статистичної теорії радіотехнічних систем [4] в залежності від апріорної інформації про сигнально-завадову обстановку.

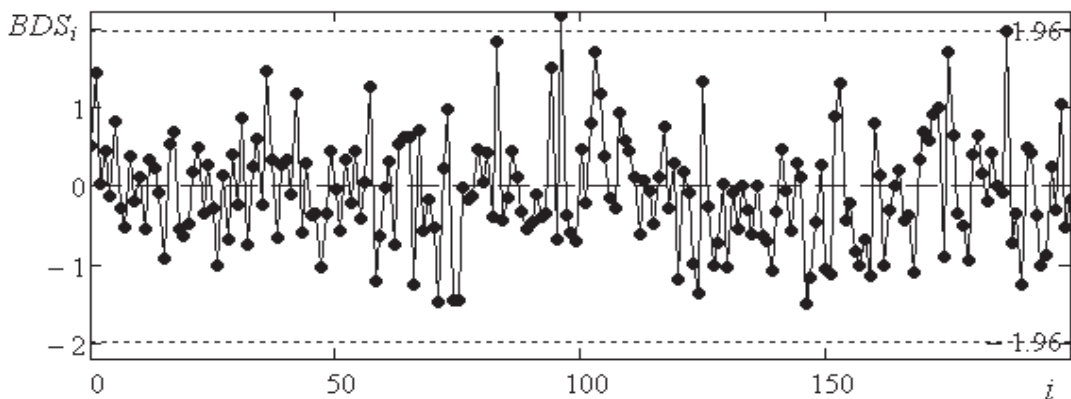


Рис. 3. Залежність значення BDS-статистики  $X\Pi(2H)$  від частоти

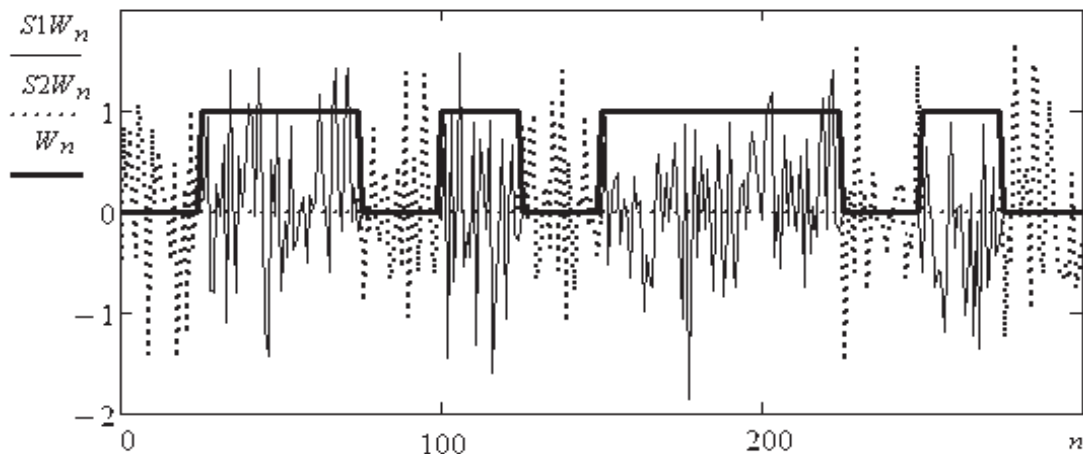


Рис. 4. Бінарне повідомлення  $W$

## Висновки

Таким, чином, передача бінарних повідомлень з використанням  $X\Pi(2H)$  має IID-скритність навіть у відсутності шуму. Крім того, як відзначається в роботі [2], при наявності шуму в спостереженні, оцінки параметрів таких сигналів (розкриття їх структури) не можливо у фізично доступний час їх виміру системами радіотехнічної розвідки або при несанкціонованому прийманні сигналу. Тобто такі сигнали володіють необмеженою структурною скритністю.

Автори сподіваються, що результати, представлені в цій статті, стимулюють подальші дослідження властивостей хаотичних сигналів і можливості їх використання в сучасних системах передачі інформації.

## Список літератури

1. *Основи теорії скритності: учеб. посіб. / З.М. Каневський, В.П. Литвиненко, Г.В. Макаров и др. – Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 2006. – 202 с.*
2. *Оценка структурной скритности хаотических сигналов / П.Ю. Костенко, С.Н. Симоненко, А.Н. Барсуков,*

А.В. Антонов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2012. – Т. 55. – № 11. – С. 3-10.

3. Костенко П.Ю. Скрытность аналитических хаотических сигналов / П.Ю. Костенко, В.В. Слободянюк, А.Н. Барсуков // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2017. – Т. 60, № 3. – С. 166-176.

4. Фалькович С.Е. Основы статистической теории радиотехнических систем: учеб. пособ. / С.Е. Фалькович, П.Ю. Костенко // Х.в: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 390 с.

5. Костенко П.Ю. Динамические и статистические характеристики линейно-преобразованной хаотической последовательности / П.Ю. Костенко, К.С. Васюта, В.И.Сторожев, С.А. Олейник // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – Т. 49. – № 7-8, [ч. 1]. – С. 32-41.

6. Костенко П.Ю. Использование BDS-статистики для оценки скрытности сигнала полученного перемешиванием хаотической несущей / П.Ю. Костенко, С.Н. Симо-

ненко, А.Н. Барсуков, К.С. Васюта // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2010. – Т. 53. – № 5. – С. 41-45.

Надійшла до редколегії 4.04.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук доц. В.І. Васишин, Харківський Національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

### ПОВЫШЕНИЯ СКРЫТНОСТИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

П.Ю. Костенко, А.Н. Барсуков, Е.В. Берник, Р.Ю. Корнилин

*В статье рассматривается вариант повышения аналитических хаотических последовательностей, обладающих статистическими и динамическими характеристиками близкими к характеристикам белого шума. Для этих последовательностей вводится понятие скрытности и задается её мера. Изучаются аттракторы сконструированных последовательностей и их взаимные корреляционные функции. Результаты статьи могут быть использованы для повышения скрытности радиотехнических систем передачи информации.*

**Ключевые слова:** хаотическая последовательность, аттрактор, аналитический хаотический сигнал, IID-скрытность, BDS-статистика.

### INCREASING THE STEALTH ANALYTICAL CHAOTIC SIGNALS

P. Kostenko, A. Barsukov, E. Bernik, R. Kornilin

*The article considers a variant of increasing analytical chaotic sequences possessing statistical and dynamic characteristics close to the characteristics of white noise. For these sequences, the concept of stealth is introduced and its measure is given. The attractors of the constructed sequences and their mutual correlation functions are studied. The results of the article can be used to increase the secrecy of radio communication systems.*

**Keywords:** chaotic sequence, attractor, analytical chaotic signal, IID-stealth, BDS-statistics.