Розвиток радіотехнічного забезпечення, АСУ та зв'язку Повітряних Сил

УДК 621.391

DOI: 10.30748/nitps.2021.43.18

К.С. Васюта¹, У.Р. Збежховська¹, В.В. Слободянюк¹, В.С. Загривий², В.І. Чистов¹

¹Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

²Національний університет оборони України ім. І. Черняхівського, Київ

МЕТОД ПРИХОВАНОЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ З ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (OFDM) МОДУЛЯЦІЄЮ

У статті проаналізовано можливості використання сигналів з Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) модуляцією для організації скритного радіозв'язку в системах спеціального призначення. Побудовано та проаналізовано “образ” сигналу з OFDM модуляцією в псевдофазовому просторі. Візуальний аналіз “образу” показав, що його структура є близькою до структури регулярних процесів. Дана оцінка скритності функціонування систем з OFDM модуляцією за допомогою непараметричної Brock Dechert Scheinkman (BDS) статистики. Запропоновано метод підвищення скритності сигналів з OFDM модуляцією за допомогою використання поліномів Чебишева. Проведено порівняльний аналіз Independent and Identically Distributed (IID) скритності хаотичних та гармонічних OFDM сигналів. Отримані результати показують, що запропонований метод формування OFDM сигналів дозволяє забезпечити вищий рівень IID скритності.

Ключові слова: система передачі інформації, скритність, OFDM модуляція, псевдофазовий простір, BDS статистика, IID-скритність.

Вступ

Постановка проблеми. Однією з найважливіших вимог до сучасних систем передачі інформації (СПІ) в умовах ведення радіоелектронної розвідки є їх скритність [1]. Далі під скритністю будемо розуміти здатність СПІ протидіяти засобам радіотехнічної розвідки [2–4] із заданою ймовірністю P_p . Звідси скритність можна визначити як ймовірність $P_{скр} = 1 - P_p$. У свою чергу радіотехнічна розвідка для успішного виконання завдання повинна послідовно вирішити три основні задачі із ймовірністю $P_p = P_{енер} P_{стр} P_{інф}$: виявлення факту роботи СПІ (виявлення сигналу з ймовірністю $P_{енер}$); визначення структури виявленого сигналу і його основних параметрів з ймовірністю $P_{стр}$, а також розкриття інформації, що міститься в сигналі з ймовірністю $P_{інф}$. Співмножники у виразі $P_p = P_{енер} P_{стр} P_{інф}$ враховують відповідно енергетичну, структурну та інформаційну скритність сигналу. Величина $P_{енер}$ характеризує умовну ймовірність виявлення сигналу при наявності шуму на вході приймача за умови, що цей сигнал дійсно є.

Сучасні цифрові засоби радіозв'язку мають достатній рівень інформаційної скритності ($P_{інф}$) завдяки криптографічним методам захисту інформації, але залишається невирішеним питання щодо забезпечення необхідного рівня структурної ($P_{стр}$), енергетичної ($P_{енер}$) та IID скритності СПІ (здатності сигналів маскуватися під шум) [4] в умовах їх функціонування в обмеженій смузі частот, дії пасивних та активних завад, які виникають при передачі інформації по радіоканалу та забезпечення високої швидкості передачі даних [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний момент одним з найбільш ефективних методів забезпечення інформаційної, енергетичної і спектральної ефективності сучасних систем зв'язку є сигнали з OFDM модуляцією. Використання таких сигналів дозволяє підвищити швидкість прийому-передачі даних та інформаційну ємність системи в умовах багатопроменевого поширення при обмеженій смузі пропускання [6–7]. Однак, незважаючи на ряд переваг сигналів з OFDM-модуляцією, їх скритність можна вважати незадовільною [8], що не дає змогу використовувати їх в системах захищеного зв'язку спеціального призначення.

З урахуванням стрімкого розвитку СПІ нового покоління виникає завдання розробки нових видів сигналів, які дозволять забезпечити високий рівень скритності. В роботах, присвячених вирішенню цього завдання, в якості носія інформації пропонується використовувати псевдовипадкові послідовності, властивості яких близькі до властивостей “білого” шуму. Для формування таких послідовностей можуть застосовуватись нелінійні динамічні системи, що генерують хаотичні сигнали. Такого виду сигнали можна використовувати в системах захищеного радіозв'язку спеціального призначення, оскільки засобами радіорозвідки не можна розрізнити такі сигнали від “білого” шуму при їх аналізі за кореляційними та спектральними ознаками. В якості ознак хаотичних сигналів використовують топологію множини точок сигналу в псевдофазовому просторі [4]. Важливою властивістю такої множини точок (“образу” сигналу), що відрізняє їх від “білого” шуму, є наявність структурованості та інших залежностей у топології множини, що обмежує їх використання з метою маскування під шум.

На даний час запропоновано ряд способів передачі інформації, які використовують хаотичну динаміку: хаотичне маскування, переключення хаотичних режимів, нелінійне підмішування інформаційного сигналу до хаотичного, метод хаотичного синхронного відклику та інші [9].

В роботі [10] авторами було приділено увагу можливості підвищення скритності сигнально-кодових конструкцій, що застосовуються у системах радіозв'язку спеціального призначення, за рахунок застосування базової псевдовипадкової послідовності чисел, сформованої за допомогою мультиплікативного конгруентного методу Лемера.

В роботі [11] авторами запропоновано метод передачі бінарного повідомлення, заснований на смуговій фільтрації хаотичних радіоімпульсів. Проведений в роботі аналіз статистичних і динамічних характеристик сформованих послідовностей показує, що вони подібні до характеристик шуму спостереження та можуть бути реалізовані для прихованих методів передачі цифрової інформації в системах широкосмугового радіозв'язку спеціального призначення. На практиці ці методи не знайшли широкого застосування, тому що мали ряд характерних недоліків:

- високі вимоги до ідентичності генераторів хаосу на приймальній та передавальній стороні;
- низька стійкість до шуму в каналі зв'язку;
- низький ступінь конфіденційності.

Також в роботах [4; 12–15] запропоновано метод, що дозволяє “зруйнувати” структуру “образів” хаотичних сигналів в псевдофазовому просторі та запропоновано доповнити існуючі види скритності, так звану IID – скритністю, що характеризує здатність системи працювати під шум [4; 13].

Тому враховуючи необхідність забезпечення якісного, швидкісного та скритного радіозв'язку для систем спеціального призначення, розробка нових та удосконалення існуючих методів передачі інформації являється актуальною науковою задачею.

Мета статті – розробка методу прихованої передачі інформації в системах з OFDM модуляцією з використанням дискретних моделей динамічного хаосу та дослідження їх IID скритності.

Виклад основного матеріалу

Аналіз IID скритності сигналів з OFDM модуляцією

Принцип роботи OFDM модуляції полягає в тому, що доступна смуга пропускання W ділиться на N_c підканалів, які зазвичай називаються піднесучими, шириною $\Delta f = W/N_c$ кожна. Передавач поділяє потік даних на велику кількість блоків, які передаються паралельно на N_c піднесучих. При цьому кожна піднесуча може модулюватися за допомогою різних видів цифрової модуляції (binary phase shift keying (BPSK), quadrature phase shift keying (QPSK), quadrature amplitude modulation (QAM)). В результаті сигнал $s(t)$ може бути записаний у вигляді великої кількості піднесучих:

$$s(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \operatorname{Re} \left(\dot{F}_n e^{2\pi f_n t} \right), \quad (1)$$

де $\dot{F}_n$ – комплексний інформаційний символ;

f_n – частота n -ї піднесучої;

N – кількість піднесучих у сигналі [16–18].

При частотному розділенні піднесучих необхідно, щоб з однієї сторони ширина кожної була достатньо вузькою для мінімізації викривлення сигналу в її межах, а з іншої – достатньо широкою для забезпечення необхідної швидкості передачі інформації. Крім цього, для економного використання всієї смуги пропускання каналу, розділеного на піднесучі, необхідно якнайближче розмістити їх одна біля одної, при цьому уникнути міжканальної інтерференції для забезпечення повної незалежності піднесучих одна від одної. В OFDM це реалізується за допомогою ортогональних частотних піднесучих, тобто виконується умова:

$$\int_0^T \sin 2\pi f_l(t) \sin 2\pi f_k(t) dt = 0, k \neq l, \quad (2)$$

де T – тривалість символу;

f_l і f_k – частоти l -ї та k -ї піднесучих відповідно.

Ортогональність дозволяє на приймальній стороні виділити кожен піднесучу з загальної кількості, незважаючи на часткове перекриття їх спектрів. Завдяки цьому досягається висока спектральна ефек-

тивність сигналів з OFDM модуляцією [19–21]. Враховуючи переваги сигналів з OFDM модуляцією, особливу увагу слід приділити оцінці їх скритності.

Для більш повної оцінки скритності сигналу, традиційну міру його енергетичної скритності (ймовірності виявлення), необхідно провести візуальний аналіз топології “образу” сигналу в псевдофазовому просторі [22] та порівняти його з образом “білого” шуму, який вибрано за еталон скритності, та визначити їх відмітність.

В якості прикладу, на рис. 1 показано “образи” гармонічних сигналів з OFDM модуляцією в псевдофазовому просторі, на 16 та 64 піднесучих відповідно та “білого” шуму (рис. 2).

а

б

Рис. 1. “Образ” гармонічного сигналу з OFDM модуляцією у псевдофазовому просторі, утворений сумою:

а – 16 піднесучих; б – 64 піднесучих

Джерело: розроблено авторами.

Наявність траєкторій в псевдофазовому просторі (рис. 1) вказує на структурованість та залежність значень сигналу, що відрізняє його від “образу” “білого” шуму, який, як видно з рис. 2, являє собою неструктуровану множину точок. Ця обставина обмежує використання сигналів з OFDM модуляцією в системах захищеного радіозв’язку спеціального призначення. Тому необхідно переходити до використання складних сигналів, наприклад, хаоти-

чних процесів або псевдовипадкових послідовностей з властивостями близькими до “білого” шуму, що дозволить забезпечити їх ПД-скритність [22–25].

Рис. 2. “Образ” “білого” шуму у псевдофазовому просторі

Джерело: розроблено авторами.

Метод прихованої передачі даних в системах з OFDM модуляцією

Для формування хаотичної послідовності пропонується використовувати відображення поліномів Чебишева, оскільки відповідно до роботи [23] всі характеристики таких відображень є ідентичними незалежно від порядку поліному, а їх енергетичні спектри рівномірні, як у “білого” шуму. Ці властивості роблять поліноми Чебишева перспективними для застосування у прихованих хаотичних системах передачі даних.

Для формування хаотичної інформаційної послідовності $\left\{b_n\right\}_{n=1}^N$ $n \in (0,1)$, довжиною N скористаємось наступним законом:

$$x_n = \begin{cases} T_3(x), & n = 0; \\ T_4(x), & n = 1, \end{cases} \quad (3)$$

де $T_3(x) = 4x^3 - 3x$ – поліном Чебишева 1 роду 3 порядку;

$T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1$ – поліном Чебишева 1 роду 4 порядку, з параметрами $x_0 = 0,86$ та кількістю відліків $N = 512$. При цьому необхідно відмітити, що кількість відліків не повинна бути занадто маленькою, оскільки це впливає на динамічні та статистичні характеристики вихідної послідовності.

Реалізації фрагментів таких хаотичних послідовностей (ХП) x_n показані на рис. 3.

“Образи” ХП, сформованих за допомогою поліномів Чебишева до внесення інформації, в псевдофазовому просторі, в яких по осях координат відкладаються поточне та попереднє значення послідовностей, показано на рис. 4.

Рис. 3. Реалізації ХП:

а – для поліному Чебишева 1 роду 3 порядку;

б – для поліному Чебишева 1 роду 4 порядку

Джерело: розроблено авторами.

а

б

Рис. 4. “Образи” ХП в псевдофазовому просторі:

а – для поліному Чебишева 1 роду 3 порядку;

б – для поліному Чебишева 1 роду 4 порядку

Джерело: розроблено авторами.

Необхідно зауважити, що сформована ХП є дискретною, тому для подальшої передачі такої послідовності по радіоканалу слід здійснити її перетворення в аналоговий сигнал в заданій смузі частот у діапазоні від 0 до деякої верхньої граничної частоти

ти $f_g = F$. Для цього можна використати відомий метод інтерполяції Шеннона-Котельникова. При цьому слід зауважити, що безліч точок “образу” аналогового сигналу в псевдофазовому просторі проявляє більшу структурованість, ніж аналогічна безліч для дискретного хаотичного сигналу.

Як наслідок, ПД-скритність аналогового хаотичного сигналу падає [13].

Передбачається, що вираз (3) представляє собою вузькосмуговий процес з обмеженим спектром ($f_1 = F$). Він повністю визначається послідовністю своїх значень $\{x_n = x(nT_0), n = 0, \pm 1, \dots, \pm N-1\}$ в моменти часу, які відстають один від одного на інтервал $T_0 \leq 1/2F$, який називають періодом дискретизації, в тому розумінні, що його значення можуть бути абсолютно точно відновлені за допомогою базису Котельникова:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \gamma_n(t), \quad (4)$$

$$\text{де } \gamma_n(t) = \frac{\sin(2\pi F(t - nT_0))}{2\pi F(t - nT_0)}.$$

Вираз (4) узагальнюється на часову дискретизацію вузькосмугових сигналів [13]:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \gamma_n(t) \cos(2\pi f_1(t - nT_0)) - \sum_{n=0}^{N-1} x_{\perp n} \gamma_n(t) \sin(2\pi f_1(t - nT_0)), \quad (5)$$

де $x_{\perp n}$ – відліки, що отримані в результаті застосування дискретного перетворення Гільберта до вхідної послідовності x_n .

При цьому $x_{\perp n}$ та x_n будуть приймати значення відповідно до виразу (3).

В контексті вирішення задачі забезпечення скритності сигналів з OFDM модуляцією необхідно вирішити питання щодо одночасної передачі інформації на великій кількості піднесучих. Кожна з них формується відповідно до виразу (5), тоді результуючий сигнал, який буде передаватися по радіоканалу, можна записати в наступному вигляді:

$$x(t) = \sum_a \begin{pmatrix} \sum_n x_{a,n} \gamma_n \cos(2\pi f_a(t - nT_0)) - \\ - \sum_n x_{\perp a,n} \gamma_n \sin(2\pi f_a(t - nT_0)) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

де $f_a = a \cdot F$, $f_1 = F$, $a = 1 \dots A$ – номери переданих хаотичних піднесучих.

При моделюванні було сформовано інформаційні послідовності (піднесучі) по 16 біт в кожній, при цьому кожен біт інформації мав наступні параметри $x_0 = 0,86$ та кількість відліків $N = 512$. Фрагмент

часової реалізації хаотичного сигналу з OFDM модуляцією на 8 піднесучих показаний на рис. 5.

Рис. 5. Часова реалізація хаотичного сигналу з OFDM модуляцією на 8 піднесучих
Джерело: розроблено авторами.

Візуальний аналіз часової реалізації (рис. 5) та енергетичного спектру (рис. 6) змодельованого хаотичного сигналу з OFDM модуляцією, в порівнянні зі гармонічним, вказує на його псевдовипадковий характер.

Рис. 6. Спектр хаотичного сигналу з OFDM модуляцією
Джерело: розроблено авторами.

При цьому, вигляд структури “образу” в псевдофазовому просторі сформованого хаотичного сигналу з OFDM модуляцією (рис. 7), дає підставу вважати про підвищення його рівня IID – скритності, про що свідчить відсутність регулярних траєкторій в “образі”.

Рис. 7. “Образ” в псевдофазовому просторі сформованого хаотичного сигналу з OFDM модуляцією
Джерело: розроблено авторами.

Однак візуальний аналіз “образів” сигналів в псевдофазовому просторі не являється достатнім для об’єктивної оцінки скритності сигналів, тому його необхідно доповнювати чисельною мірою нерегулярності сигналів (ступень маскування сигналу під шум). В якості чисельної міри якості маскування

(IID – скритності сигналу), необхідно використовувати значення BDS статистики w^{BDS} . За допомогою статистичної величини w^{BDS} перевіряється нульова гіпотеза про незалежність та однаковий розподіл IID значень часового ряду за наступним виразом:

$$w_{m,N}(\varepsilon) = \sqrt{N-m+1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)}, \quad (7)$$

де m – розмірність псевдофазового простору;

N – кількість елементів часового ряду (сигналу); ε – радіус гіперсфери, якою покривається фазовий простір;

$C_{m,N}$ – кореляційний інтеграл;

$\sigma_{m,N}(\varepsilon)$ – середньоквадратичне відхилення чисельника $C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m$.

Для незалежних однаково розподілених випадкових величин (“білого” шуму) значення BDS статистики перебувають в інтервалі $(-1,96; 1,96)$, який відповідає рівню значимості $\alpha = 0,05$ і дозволяє прийняти для них гіпотезу H_0 про незалежність і тотожний розподіл часового ряду $s = (s_1, s_2, \dots, s_N)$. BDS статистика базується на статистичних властивостях кореляційної розмірності процесу в фазовому (псевдофазовому) просторі і визначається кореляційним інтегралом. Його обчислення дозволяє визначити ймовірність появи пар точок в псевдофазовому просторі, що знаходяться один від одного на відстанях, які попадають в інтервал $\varepsilon = 0,5\sigma \div 2\sigma$, де σ – дисперсія процесу [12–15, 22]. Кореляційний інтеграл визначається виразом:

$$C_{m,N}(\varepsilon) = \frac{2}{(N-m+1)(N-m)} \times \sum_{s=m}^N \sum_{t=s+i}^N \prod_{j=0}^{m-1} I_{\varepsilon}(s_{s-j}^m, s_{t-j}^m), \quad (8)$$

$$\text{де } I_{\varepsilon}(s_n^m, s_j^m) = \begin{cases} 1, & \|s_n^m - s_j^m\| \leq \varepsilon \\ 0, & \|s_n^m - s_j^m\| > \varepsilon \end{cases} \quad \text{– функція Хевісайда}$$

да для всіх пар значень n і j , де $0 \leq n \leq N$ і $0 \leq j \leq N$;

m – розмір простору вкладення (псевдофазового простору);

N – число елементів часового ряду $\{s_n\}_{n=1}^N$.

BDS статистика показує, що $C_{m,N}(\varepsilon) \Rightarrow C_{1,N-m}(\varepsilon)^m$ з ймовірністю 100% при $N \rightarrow \infty$, а $(C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m) \cdot \sqrt{N}$ є випадковою нормально розподіленою величиною з нульовим середнім і дисперсією $\sigma_{m,N}^2(\varepsilon)$, яка визначається як [22]:

$$C_{m,N}^2(\varepsilon) = 4 \left[R_{1,N}^m + 2 \sum_{j=1}^{m-1} R_{1,N}^{m-j} C_{1,N}^{2j} + \right. \\ \left. + (m-1)^2 C_{1,N}^{2m} - m^2 R_{1,N} C_{1,N}^{2m-2} \right], \quad (9)$$

$$\text{де } R_{1,N} = \frac{\sum_{t=1}^N \left[\sum_{s=1}^N I_{\varepsilon}(s_t, s_s) \right]^2 - 3 \sum_{s=1}^N \sum_{t=s+1}^N I_{\varepsilon}(s_t, s_s) + 2N}{N(N-1)(N-2)}$$

Як зазначалось вище, за еталон IID-скритності вибрано “білий” шум. Розрахунки значень BDS статистик для гармонічних сигналів з OFDM модуляцією та сформованих хаотичних, в залежності від кількості піднесучих наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення BDS статистик для гармонічних сигналів з OFDM модуляцією та сформованих хаотичних, в залежності від кількості піднесучих

Кількість піднесучих	Значення BDS статистик ($w(\bar{s})$)	
	Гармонічні сигнали з OFDM модуляцією	Хаотичні сигнали з OFDM модуляцією
8	85,174	-6,927
16	123,767	-7,771
32	188,962	-8,987

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз оцінок BDS статистик (табл. 1) показує, що для хаотичних сигналів з OFDM модуляцією їх

значення знаходяться ближче до інтервалу $(-1,96; 1,96)$, ніж у гармонічних сигналів з OFDM модуляцією, що може свідчити про можливе підвищення їх IID – скритності.

Таким чином, отримані оцінки BDS статистик, “образ” сигналу в псевдофазовому просторі та енергетичний спектр сформованих хаотичних сигналів з OFDM модуляцією підтверджує їх близькість до “білого” шуму. Необхідно також відмітити, що зі збільшенням кількості піднесучих IID – скритність хаотичних та гармонічних сигналів з OFDM модуляцією зменшується.

Висновки

Виходячи з проведених розрахунків та моделювання можна зробити висновок, що використання хаотичних сигналів з OFDM модуляцією дозволяє підвищити IID – скритність, в порівнянні з гармонічними сигналами з OFDM модуляцією. Це вказує на необхідність проведення подальших досліджень властивостей хаотичних сигналів з OFDM модуляцією і можливостей використання таких сигналів при організації скритного радіозв'язку в системах передачі інформації спеціального призначення.

Однак слід врахувати, що на практиці на вхід приймального пристрою надходить адитивна суміш корисного сигналу та шуму, тобто в подальшому обробку необхідно здійснювати відомими методами статистичної теорії радіотехнічних систем, в залежності від апріорної інформації про сигнально-завадову обстановку [27].

Список літератури

1. Васюта К.С. Стеганографическая сеть передачи данных на основе MIMO-технологии и хаотических несущих / К.С. Васюта, С.В. Озеров // Проблемы телекоммуникаций. – 2013. – № 2(11). – С. 56-65.
2. Васюта К.С. Особенности построения стеганографических систем радиосвязи / К.С. Васюта, С.В. Озеров, А.Н. Королюк // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 3(8). – С. 94-104.
3. Кувшинов О.В. Оцінка структурної скритності широкосмугових сигналів / О. В. Кувшинов, Р.М. Вознюк // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2011. – № 1(3). – С. 106-111.
4. Костенко П.Ю. Скрытность аналитических хаотических сигналов / П.Ю. Костенко, В.В. Слободянюк, А.Н. Барсуков // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2017. – № 3(12). – С. 166-176. <https://doi.org/10.20535/S0021347017030050>.
5. Основні тенденції та перспективи розвитку військового радіорелейного зв'язку / О.І. Кушнір, К.С. Васюта, С.В. Озеров, А.В. Литвин, А.В. Северілов // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2017. – № 4(53). – С. 7-11.
6. Єрохін В.Ф. Застосування технології OFDM у широкосмугових бездротових мережах / В.Ф. Єрохін, Б.А. Гиндич // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2012. – № 2(2). – С. 29-36.
7. Власов В.А. OFDM в современных технологиях связи / В.А. Власов // Журнал “Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт”. – 2011. – № 9(12). – С. 56-59.
8. Анализ структурной скрытности многочастотных сигналов широкополосных систем связи / А.И. Цопа, Д.Г. Ганшин, А.А. Дудка, А.Н. Битченко // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2016. – № 184. – С. 127-134.
9. Дмитриев А.С. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи / А.С. Дмитриев, А.І. Панас. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2002. – 252 с.
10. Дослідження можливості підвищення скритності сигнально-кодових конструкцій в системах радіозв'язку шляхом впровадження псевдовипадкової послідовності Лемера / С.В. Озеров, А.В. Литвин, С.В. Жежеря, В.Ю. Зимогляд, В.І. Ляховський // Системи озброєння і військова техніка. – 2018. – №4(56). – С. 121-127. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.56.17>.

11. Васюта К.С. Повышение скрытности передачи бинарного сообщения в прямохаотической системе радиосвязи за счет фильтрации хаотической несущей / К.С. Васюта, С.В. Озеров, А.А. Малышев // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2013. – № 2(35). – С. 71-74.
12. Підвищення скритності аналітичних хаотичних сигналів / П.Ю. Костенко, О.М. Барсуков, Є.В. Бернік, Р.Ю. Корнілін // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2017. – № 3(52). – С. 84-87.
13. Аналіз IID-скритності безперервних хаотичних сигналів / П.Ю. Костенко, В.В. Слободянук, С.В. Волинець, М.Л. Крючка // Системи обробки інформації. – 2018. – № 1(152). – С. 20-26. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.152.03>.
14. Скрытность передачи в системах связи с хаотическими сигналами / Н.В. Захарченко, С.М. Горохов, В.В. Корчинский, Б.К. Радзимовский // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 3(4). – С. 161-164.
15. Оценка структурной скрытности хаотических сигналов / П.Ю. Костенко, С.Н. Симоненко, А.Н. Барсуков, А.В. Антонов // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2012. – Т.55, № 11. – С. 3-10.
16. Li H. OFDM Based Broadband Wireless Networks. Design and Optimization / H. Li, G. Li. – New York: John Wiley, 2005. – 264 p.
17. Новітні технології та засоби зв'язку у Збройних Силах України: шлях трансформації та перспективи розвитку / О.О. Лаврут, Т.В. Лаврут, О.К. Климович, Ю.М. Здоренко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2019. – №1(34). – С. 91-101. <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.34.13>.
18. Зайцев С.В. Математична модель каналу зв'язку з сигналами OFDM та навмисними завадами / С.В. Зайцев // Математичні машини і системи. – 2011. – № 4(4). – С. 166-175.
19. Dahlman E. 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband / E.Dahlman, S.Parkvall, J.Skold – Oxford UK: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2011. – 431 p.
20. Глинянов А.О. Моделювання системи передачі даних з OFDM модуляцією / А.О. Глинянов, В.А. Головін // Вісник Національного технічного університету України “КПІ”. Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2007. – №2(2). – С. 34-38. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2007.35.34-38>.
21. Берлин А.Н. Цифровые сотовые системы связи / А.Н. Берлин. – М.: Эко-Трендз, 2007. – 296 с.
22. Оценка скрытности функционирования радиотехнических систем передачи информации военного назначения при помощи BDS статистики / К.С. Васюта, С.В. Озеров, А.Н. Королюк, Д.С. Комин // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 2(38). – С. 67-69.
23. Захарченко І.В. Аналіз вибору дискретного відображення нелінійної динамічної системи для побудови хаотичних систем передачі даних / І.В. Захарченко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2016. – № 3(48). – С. 86-91.
24. Макаров С.А. Оцінка стійкості системи зв'язку та радіотехнічного забезпечення / С.А. Макаров, С.П. Беляк, О.В. Висоцький // Системи озброєння і військова техніка. – 2020. – № 1(61). – С. 44-50. <https://doi.org/10.30748/soi.2020.61.05>.
25. Система передачі та відображення інформації із захистом числових даних / О.А. Борисенко, О.В. Бережна, А.І. Новгородцев, В.В. Сердюк, М.М. Яковлев // Системи обробки інформації. – 2019. – № 2(157). – С. 103-108. <https://doi.org/10.30748/soi.2019.157.14>.
26. Кислов В.Я. Применение хаотических сигналов в информационных технологиях / В.Я. Кислов, В.В. Колесов, Р.В. Беляев // Радиоэлектроника, наносистемы, информационные технологии. – 2009. – Т.1, № 1-2. – С. 23-32.
27. Фалькович С.Е. Основы статистической теории радиотехнических систем / С.Е. Фалькович, П.Ю. Костенко. – Х.: НАУ ХАИ, 2005. – 390 с.

Надійшла до редколегії 17.03.2021

Схвалена до друку 13.04.2021

Відомості про авторів:

Васюта Костянтин Станіславович
доктор технічних наук професор
заступник начальника
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба
з навчальної роботи,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1978-3717>

Збежховська Уляна Романівна
ад'юнк
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6213-5531>

Information about the authors:

Konstantyn Vasiuta
Doctor of Technical Sciences Professor
Deputy Chief
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University
in Academic Work,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1978-3717>

Uliana Zbezhkowska
Doctoral Student
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6213-5531>

Слободянюк Валерій Валерійович

кандидат технічних наук
викладач Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8291-8194>

Valeriy Slobodyanuk

Candidate of Technical Sciences
Instructor of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8291-8194>

Загрийвий Володимир Сергійович

слухач
Національного університету оборони України
ім. І. Черняхівського,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0138-4646>

Volodymyr Zahryvyi

Student Officer
of Ivan Chernyakhovsky National Defense
University of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0138-4646>

Чистов Валерій Ігорович

начальник навчального курсу
Харківського національного університету Повітряних
Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4401-3773>

Valerii Chystov

Company Commander
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4401-3773>

**МЕТОД СКРЫТОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ
В СИСТЕМАХ С ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING МОДУЛЯЦИЕЙ**

К.С. Васюта, У.Р. Збежховская, В.В. Слободянюк, В.С. Загрийвий, В.И. Чистов

В статье проанализированы возможности использования сигналов с Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) модуляцией для организации скрытной радиосвязи в системах специального назначения. Построен и проанализирован "образ" сигнала с OFDM модуляцией в псевдофазовом пространстве. Визуальный анализ "образа" показал, что структура близка к структуре регулярных процессов. Дана оценка скрытности функционирования систем с OFDM модуляцией с помощью непараметрической Brock Dechert Scheinkman (BDS) статистики. Предложен метод повышения скрытности сигналов с OFDM модуляцией посредством использования полиномов Чебышева. Проведен сравнительный анализ Independent and Identically Distributed (IID) скрытности хаотических и гармонических сигналов с OFDM модуляцией. Полученные результаты показывают, что предложенный метод формирования OFDM сигналов обеспечивает выше уровень IID-скрытности.

Ключевые слова: система передачи информации, скрытность, OFDM модуляция, псевдофазовое пространство, BDS статистика, IID-скрытность.

**METHOD OF STEALTH INFORMATION TRANSMISSION IN SYSTEMS
WITH ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (OFDM) MODULATION**

K. Vasiuta, U. Zbezhkhovska, V. Slobodyanuk, V. Zahryvyi, V. Chystov

Today, stealth is one of the most important requirements for modern information transmission systems (SPI) in conditions of radioelectronic intelligence. Therefore, with account for the rapid development of information and telecommunication systems of the new generation, the task of finding and developing new methods to ensure a high level of secrecy of the SPI. For example, by using as information subcarriers chaotic processes and sequences. One of the most effective methods of information, energy and spectral efficiency of modern communication systems is signals with OFDM modulation (Orthogonal frequency division multiplexing). Signals with OFDM modulation allows to increase the speed of data transmission and information capacity of the system under conditions of multipath propagation with limited bandwidth.

The Independent and Identically Distributed (IID)-stealth of signals with OFDM modulation using non-parametric Brock Dechert Scheinkman (BDS) - statistics has been analyzed in the paper. According to obtained results such signals do not have signs of IID-secrecy, because their values are outside the interval $(-1.96; 1.96)$. The closed trajectories in the "shapes" of harmonic signals with OFDM modulation in the pseudo-phase space, shows structuring and dependence of the signal values and differentiates them from the "shape" of "white" noise.

Therefore, for further using OFDM signals in the special radiocommunication systems, method of increasing their stealth, using chaotic sequences with properties close to "white" noise is proposed. Thus, chaotic subcarriers using Chebyshev's polynomials of the 1st genre 3rd and 4th order have been formed. Then, the received subcarriers have been converted into analog signal limited in some bandwidth and each of them is transferred to its subcarrier frequency. Analysis of BDS statistics of the obtained chaotic signals with OFDM modulation showed that their values are closer to the interval $(-1.96, 1.96)$ than the values of harmonic signals with OFDM modulation. This may indicate a possible increase of the IID-stealth. Also, the "shape" of the signal in the pseudo-phase space and the energy spectrum of the generated chaotic signals with OFDM modulation approves their proximity to "white" noise.

Keywords: the information transmission system, stealth, OFDM modulation, pseudo-phase space, BDS statistics, IID-stealth.