

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ СКРИТНОСТІ СИГНАЛУ В КАНАЛІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

У статті авторами розглядається удосконалення методу підвищення скритності сигналу в каналі передачі даних безпілотного літального апарату з використанням хаотичного процесу як широкопasmової несучої. Аналізуються основні властивості хаотичної несучої, сформованої модифікованою нелінійною динамічною системою із затримкою: псевдофазовий портрет, амплітудно-частотний спектр та автоковаріаційна функція. Удосконалення методу здійснюється шляхом розробки нової математичної моделі передачі бінарної послідовності та її виділення за спостереженням хаотичного сигналу.

Ключові слова: *завадозахищеність, скритність, канал передачі даних, хаотична несуча, безпілотні літальні апарати*

Вступ

Постановка проблеми. Один із важливих вирішальних чинників, який впливає суттєво на результат досягнення мети бойового завдання під час застосування безпілотного літального апарату (БпЛА) [1], є завадозахищеність каналів радіозв'язку. Безумовно [2, 3], що такі канали повинні забезпечуватися скритністю, завадостійкістю, швидкістю та надійністю передачі інформації.

Однак, зростаюча актуальність застосування БпЛА, особливо під час функціонування комплексів радіоелектронної боротьби (РЕБ), сприяла до жорстких вимог ліній керування БпЛА [4], що подвигло дослідників до пошуку нових підходів в інформаційно-вимірjuвальних системах із застосуванням новітніх технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [5] аналізуються засоби радіотехнічної розвідки, які працюють в діапазоні радіоліній БпЛА. Як правило, в таких станціях низька вірогідність оцінювання параметрів складних сигналів БпЛА з використанням сучасних радіоелектронних засобів.

У роботі [6] звертають увагу питанням точності визначення просторових координат, з використанням безпілотних літальних апаратів, що підтверджується низкою наукових досліджень. Це дає змогу виявляти з високим рівнем ймовірності “нерухомі” БпЛА за наявності як пасивних завад, так і гармонічних акустичних сигналів, непов'язаних із шумом.

У [7] статті обґрунтовується необхідність створення універсального криптоалгоритму, який здатен вирішити усі задачі конфіденційності в БпЛА.

У роботі [8] було розглянуто метод виявлення БпЛА на основі спектрального аналізу в акустичному та радіолокаційному діапазонах. Метод забезпечує виявлення повітряної цілі з високим рівнем ймовірності.

У статті [9] описуються способи боротьби з БпЛА за допомогою спрямованого впливу потужним надвисоким випромінювачем частоти.

У роботі [10] запропоновані варіанти створення системи інформаційного забезпечення, шляхом комбінованого застосування елементів у локальній обчислювальній мережі окремого тактичного угруповання, під час протидії безпілотним літальним апаратам комплексних засобів радіоелектронної боротьби.

У статті [11] розглянуті основні види загроз для БпЛА. Досліджуються принцип обміну даних між наземною і бортовою апаратурою з використанням трансиверу на основі універсального асинхронного приймача-передавача. Розглядається варіант захисту від несанкціонованого втручання в канал зв'язку за допомогою розробленого шифратора.

У статті [2] розглянуті технології, які забезпечують автономність БпЛА на полі бою, методи підвищення ефективності їх каналів зв'язку в умовах функціонування комплексів радіоелектронної боротьби. Також розглянута тестова модель каналу зв'язку бездротових засобів передачі даних, яка призначена для відпрацювання технологій протидії комплексам РЕБ та навчання нейронної мережі.

У статті [12] проводиться аналіз варіанта перспективної моделі каналу зв'язку БпЛА, однак без урахування впливу адитивних завад.

У роботі [13] було запропоновано модель мережі із завадостійким передаванням зображень з подальшим візуальним ієрархічним

розпізнаванням. Метод здатний класифікувати зображення і забезпечувати надійність результатів, а також має широкий потенціал застосування, особливо на фоні шуму.

У статті [14] аналізуються сучасні методи управління БПЛА. Пропонуються варіанти щодо підвищення завадостійкості бойових БПЛА в умовах інтенсивних навмисних завад.

У статті [15] представлена система передачі зображення з високою роздільною здатністю від БПЛА до наземної станції. Реалізація спрямованої антени є важливою при розв'язанні цієї задачі, оскільки вона значно покращує результати пропускну здатності.

У роботі [16] було запропоновано модель спільного управління групою БПЛА в діапазоні надвисоких частот. Цей метод здатний забезпечувати кооперативне управління, однак обмежений на великій відстані.

У роботі [17] розглянутий метод розрахунку розсіювальної здатності конструкції БПЛА. Пропонується заміна металевих компонентів на композитні, що, в свою чергу, підвищить скритність БПЛА.

Отже, **мета статті** полягає в удосконаленні методу підвищення скритності лінії передачі даних безпілотного літального апарату, з використанням хаотичної несучої, сформованої модифікованою нелінійною динамічною системою із затримкою.

Виклад основного матеріалу

Пропонується дослідити математичну модель хаотичної несучої, сформованої модифікованою динамічною системою із затримкою [18], яка описується нелінійним диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t_i) = & \alpha \sin(x(t_i - \tau) - \psi_1) - \\ & - \beta x(t_i) \sin(x(t_i - 2\tau) - \psi_2)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Слід підкреслити, що диференціальне рівняння (1), незважаючи на простий вираз $\dot{x}(t_i, \alpha, \beta, \psi_1, \psi_2, \tau)$, має п'ять параметрів: α , β , ψ_1 , ψ_2 та τ , які впливають на структуру динамічного стану.

Властивості хаотичної несучої нелінійної динамічної системи (1) були розглянуті у роботі [18]. Аналіз біфуркаційних діаграм $x(\alpha_i)$ та $x(\beta_i)$ [18], дав змогу отримати інформацію про якісну зміну режимів нелінійної динамічної системи, а також знайти відповідність хаотичному режиму, особливо в складно-структурованому аттракторі.

Нижче за контекстом розглядається запропонований алгоритм передачі інформації $i(t_i)$ з підмішуванням в хаотичний процес (несуча) $x(t_i)$, сформований модифікованою нелінійною динамічною системою із затримкою (1):

$y(t_i) = x(t_i) + i(t_i)$, де $y(t_i)$ – передавальний хаотичний сигнал, $i(t_i)$ – складається із кодової комбінації послідовності бінарних імпульсів.

Я інформація $i(t_i)$ використовується зображення місцевості розміром 357x207 пікселів, представлено на рис. 1.



Рис. 1. Зображення місцевості $i(t_i)$.

Джерело: розроблено авторами.

Крім цього, на рис. 2 представлена часова реалізація залежності $y(t_i)$ з довжиною $i=0\dots75000$, при значеннях параметрів: $\alpha=99$, $\beta=30$, $\tau=1$, $\psi_1=\pi/2,1$; $\psi_2=\pi/2,2$ та початковим значенням $x(t_0)=0,1$, яке розв'язувалося чисельним методом Рунге-Кутта 4-го порядку з кроком дискретизації $h=0,05$.

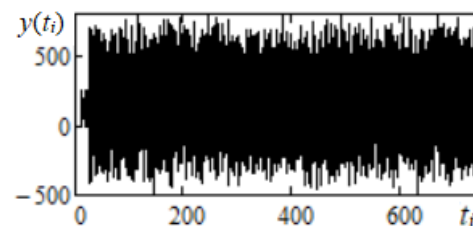


Рис. 2. Часова реалізація $y(t_i)$.

Джерело: розроблено авторами.

Слід зазначити, що форма реалізації $y(t_i)$ має тотожну форму шумоподібного процесу.

Не змінюючи сенс дослідження властивостей алгоритму, нижче по тексту розглядається псевдофазовий портрет $y(t_i)y(t_{i+1})$, який наведений на рис. 3.

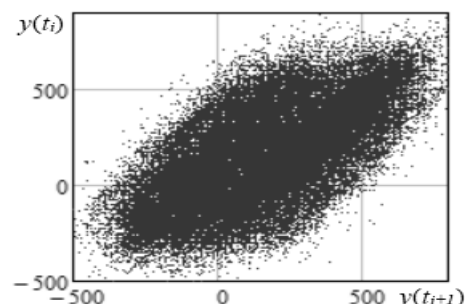


Рис. 3. Псевдофазовий портрет $y(t_i)y(t_{i+1})$.

Джерело: розроблено авторами.

Отже, досліджуючи структуру псевдофазового портрету $y(t_i)y(t_{i+1})$ без використання статистичних математичних апаратів, візуально

легко помітити його ізотропну структурованість, що свідчить про належність до випадкового процесу.

У межах дослідження моделі передавача далі розглядається автоковаріаційна функція $K(r_i)$ (див. рис. 4) та амплітудно-частотний спектр $G(\omega_i)$ (див. рис. 5) передаючого хаотичного сигналу $y(t_i)$.

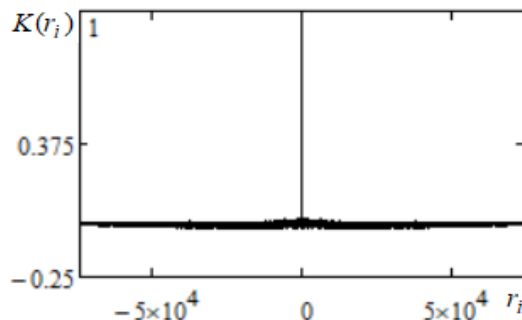


Рис.4. Автоковаріаційна функція $K(r_i)$.

Джерело: розроблено авторами.

Не знижуючи спільності викладу, на рис. 4 видно, що автоковаріаційна функція $K(r_i)$ передавального сигналу $y(t_i)$ тотожна з вузькосмуговим шумом, обґрунтовано бічними викидами в межах $\pm 0,016$ без прояви регулярності.

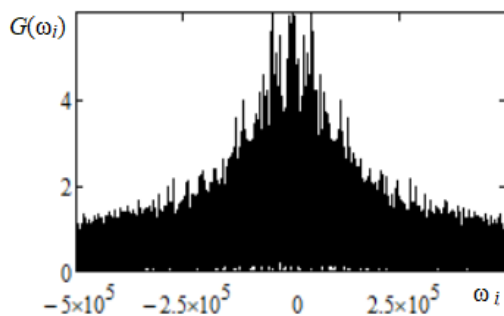


Рис.5. Амплітудно-частотний спектр $G(\omega_i)$.

Джерело: розроблено авторами.

Разом з цим, форма амплітудно-частотного спектру $G(\omega_i)$ (див. рис. 5) також підтверджує природу структури вузькосмугового шуму.

На приймальному боці оцінювання інформації $\hat{i}(t_i)$ здійснювалось шляхом віднімання опорного хаотичного процесу $x_{оп}(t_i)$, сформованого модифікованою нелінійною системою із затримкою:

$$\dot{x}_{оп}(t_i) = \alpha_{оп} \sin(x_{оп}(t_i - \tau_{оп}) - \psi_{1_{оп}}) - \beta_{оп} x_{оп}(t_i) \sin(x_{оп}(t_i - 2\tau_{оп}) - \psi_{2_{оп}})^2,$$

при значеннях параметрів: $\alpha_{оп}=99$, $\beta_{оп}=30$, $\tau_{оп}=1$, $\psi_{1_{оп}}=\pi/2,1$; $\psi_{2_{оп}}=\pi/2,2$ та початковим значенням $x_{оп}(t_0)=0,1$ від сигналу спостереження $\xi(t_i) = y(t_i) + n(t_i)$, де $n(t_i)$ – нормальний гаусів шум

з нульовим математичним сподіванням та з одиничною дисперсією.

На рис. 6 наведено відновлене зображення місцевості, яке було прийняте каналом зв'язку БпЛА.



Рис.6. Відновлене зображення місцевості.

Джерело: розроблено авторами.

Дослідження запропонованої моделі радіотехнічної системи передачі інформації з використанням хаотичної несучої підтверджує можливість передачі даних каналом радіозв'язку БпЛА. Крім цього, під час практичної реалізації слід враховувати вплив ефекту Доплера на стабільність функціонування синхронізації в системі передачі даних.

Висновки

Таким чином, у результаті дослідження запропонованого удосконалення методу шляхом підвищення скритності сигналу (маскування “під шум”) в каналі передачі даних БпЛА, слід зазначити такі висновки:

метод задовольняє розв'язанню задачі, пов'язаної з підвищенням завадозахищеності каналу радіозв'язку в умовах впливу комплексів радіоелектронної боротьби;

математичне моделювання системи передачі інформації за допомогою програми MathCad продемонструвало можливість використання хаотичного процесу $x(t_i)$, сформованого модифікованою нелінійною динамічною системою із затримкою як носія інформації;

аналіз кількісних характеристик, передавального хаотичного сигналу свідчить про його тотожність із вузькосмуговим шумом, що забезпечує структурну та енергетичну скритність сигналу;

при неточних заданих значеннях параметрів опорного генератора хаотичного процесу, з похибкою приблизно 10^{-6} , призводить до повної втрати інформації, це суттєво зменшує можливість оцінки параметрів системи під час перехоплення інформації з боку стороннього спостерігача.

Практична реалізація запропонованого удосконаленого методу підвищення скритності сигналу передбачається можливістю створення додаткового радіомодулю на основі

мікропроцесорів, наприклад, при удосконаленні каналу передачі даних БпЛА.

Проте, поза рамками даної роботи залишилися питання, що пов'язані з дослідженням впливу різної інтенсивності шуму спостереження на якість

відновлення сигналу, з використанням статистичної математики. Розв'язання цих питань і є **напрямом подальших досліджень.**

Список літератури

1. Певцов Г.В., Олещук М.М. Аналіз спроможностей оглядових РЛС РТВ щодо виявлення, супроводження та ідентифікації безпілотних літальних апаратів. *Системи озброєння і техніка*. 2021 № 3(67). С. 24-30. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.03>.
2. Семендай С. Підвищення ефективності безпроводних систем передачі даних в умовах застосування засобів радіоелектронної боротьби. *Технічні науки та технології*. 2023 № 2(32) С. 224-234 [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-224-234](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-224-234).
3. Костенко П. Ю., Фалькович С. Я. Основи статистичної теорії інформаційно-вимірювальних радіотехнічних систем : підручник. Харків : ХНУПС, 2021. 612 с.
4. Молодцов В.А., Писарев А.В., Радченко І.О., Лисенко О.В. Підвищення ролі радіоелектронної боротьби Збройних Сил США в асиметричних діях повномасштабної сетецентричної війни. *Молодий вчений*. 2022. № 1(101) С. 128-134. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2022-1-101-27>.
5. Волков А.Ф., Лезік О.В., Корсунов С.І., Левагін Г.А., Яновський О.В., Івахненко К.В. Аналіз застосування БпЛА у Вірмено-Азербайджанському воєнному конфлікті та можливі шляхи боротьби з ними. *Система озброєння і військова техніка*. 2020. № 4(64). С. 7-17. <https://doi.org/10.30748/sovit2020.64.01>.
6. Глотов В., Фис М., Пашетник О. Розробка методики підвищення точності визначення просторових координат точок об'єктів при аерозніманні з БпЛА. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2020. № 92. С. 45-54. <https://doi.org/10.23939/istcscap2020.92.045>.
7. Гнатюк С.О., Кінзерявий В.М., Поліщук Ю.Я., Нечипорук О.П., Горбаха Б.М. Аналіз методів забезпечення конфіденційності даних, які передаються з БпЛА. *Кибербезпека: освіта, наука, техніка*. 2022 № 1(17) С. 167-168. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2022.17.167186>.
8. Даник Ю.Г., Пулеко І.В., Бугайов М.В. Виявлення безпілотних літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів. *Вісник ЖДТУ*. 2014. С. 71-81.
9. Корольов Р.В., Корольок Н.О., Петров О.В., Сюлев К.В. Аналіз сучасних засобів знищення безпілотних літальних апаратів. *Зб. наук. праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2017. № 4(53) С. 17-21.
10. Лещенко С.П., Адаменко А.А., Лупандін В.А., Мегельбей Г.В. Система інформаційного забезпечення протидії безпілотним літальним апаратам противника при комплексному застосуванні засобів радіоелектронної боротьби. *Зб. наук. праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2022. № 3(73) С. 31-37 <https://doi.org/10.30748/zhups.2022.73.05>.
11. Навроцький Д.О. Криптографічна система захисту радіоканалів БпЛА від несанкціонованого втручання. *Ukrainian scientific journal of information security*. 2014. Vol.20. С. 248-252.
12. Bing L. Study on Modeling of Communication Chanel of UAV. *Procedia computer science*. 2017. P. 550-557. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.03.129>.
13. Cong. M., Xi J., Ding M., Ren C., Han L., Yang W., Tao Y., Xu M. Two-pathway anti-interference neural network based on the retinal perception mechanism for classification of remote sensing images from unmanned aerial vehicles. *Journal applied remote sensing*. 2020. Vol. 14(2) P. 1-20. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.026511>.
14. Sierzputowska R., Polak R., Wojtyra D., Laskowska D. Advanced protection methods of unmanned aircraft vehicle against attack by radio techniques. *Radioelectronic system conference*. 2019. Vol. 11442. P. 1-8. <https://doi.org/10.1117/12.2565296>.
15. Papic V., Solic P., Milan A., Gotovac S., Polic M. High-resolution image transmission from UAV to ground station for search and rescue missions planning. *Applied sciences*. 2021. P. 1-19. <https://doi.org/10.3390/app11052105>.
16. Ryan A., Zennaro M., Howell A., Sengupta R., Hedrick K., An overview of emerging results in cooperative UAV control. *Conference paper in proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. 2005. <https://doi.org/10.1109/CDC.2004.1428700>.
17. Sukharevsky O., Vasylets V., Orlenko V., Ryapolov I. Radar scattering characteristics of a UAV model in X-band. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2020. Vol. 14. P. 532- 537. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0243>.
18. Барсуков О.М., Бойко М.М. Підвищення скритності хаотичної несучої, сформованої модифікованою нелінійною динамічною системою зі затримкою. *Системи обробки інформації*. 2023. № 3(174). С. 14-18. <https://doi.org/10.30748/soi.2023.174.02>.

Надійшла до редколегії 10.12.2023

Схвалена до друку 30.12.2023

Відомості про авторів:

Барсуков Олександр Миколайович

кандидат технічних наук
доцент
начальник кафедри
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9129-2285>

Бойко Микола Михайлович

Старший викладач
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0748-5349>

Шевчук Олексій Юрійович

Слухач штатний навчального курсу
інженерно-авіаційного факультету
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0009-0009-1295-3566>

Лукашенко Тимофій Сергійович

Слухач штатний навчального курсу
інженерно-авіаційного факультету
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0009-0000-1605-7077>

Information about the authors:

Oleksandr Barsukov

Candidate of Technical Sciences
Associate Professor
Head of Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9129-2285>

Mykola Boiko

Senior Lecturer
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0748-5349>

Oleksii Shevchuk

Student of a full-time training course
at the Faculty of Aviation Engineering
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0009-1295-3566>

Tymofii Lukashenko

Student of a full-time training course
at the Faculty of Aviation Engineering
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-1605-7077>

**METHOD OF INCREASING SIGNAL STEALTHINESS IN THE INFORMATION
TRANSMISSION CHANNEL OF AN UNMANNED AIRCRAFT**

O. Barsukov, M. Boiko, O. Shevchuk, T. Lukashenko

In this article, the authors consider a method of improvement that promotes the stealth of the signal in the data transmission channel of an unmanned aerial vehicle from the background of the chaotic process as a broadband carrier. One of the important decisive factors, that significantly affect the result of achieving the goal of a combat mission during the use of an unmanned aerial vehicle, is the immunity of radio communication channels. The main properties of a chaotic carrier formed by a modified nonlinear dynamic system with a delay are analyzed: pseudo-phase portrait, amplitude-frequency spectrum and autocovariance function. The mathematical model of the transmission of a binary sequence and its selection based on the observation of a chaotic signal is considered. The purpose of the article is to improve the method of increasing the stealth of the data transmission line of an unmanned aerial vehicle, using a chaotic carrier formed by a modified nonlinear dynamic system with a delay. The method satisfies the solution of the problem, which is related to increasing the immunity of the radio communication channel, under the influence of radio-electronic warfare complexes. In addition, if inaccurate parameter values with an error of approximately 10^{-6} are set in the reference generator of the chaotic process, then this can lead to a complete loss of information, as a result of which it will significantly reduce the possibility of estimating the system parameters during the interception of information by an outside observer. The analysis of the quantitative characteristics of the transmitting chaotic signal indicates its identity with narrow-band noise accordingly it will ensure the structural and energetic concealment of the signal. The practical implementation of the proposed method of increasing signal stealth is provided by the possibility of creating an additional radio module based on microprocessors, for example, when improving the unmanned aerial vehicle data transmission channel. However, issues related to the study of the influence of different intensity of observation noise on the quality of signal restoration, using statistical mathematics, remained outside the scope of this work.

Keywords: immunity, stealth, data transmission channel, chaotic carrier, unmanned aerial vehicles.