Розвиток радіотехнічного забезпечення, АСУ та зв'язку Повітряних Сил

УДК 621.391

DOI: 10.30748/nitps.2021.42.13

К.С. Васюта, О.Л. Кащишин, О.П. Ковальчук, О.Д. Підлісний

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

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ МЕТОД ОБРОБКИ СКЛАДЕНОГО ХАОТИЧНОГО СИГНАЛУ

В роботі аналізується можливість традиційної кореляційної (когерентної) обробки при виявленні складеного хаотичного радіолокаційного сигналу на фоні шумів та пасивних завад. Показано, що при виявленні та обробці складених хаотичних сигналів можливо застосовувати традиційну кореляційну обробку. Наявність флуктуацій параметрів сигналу (його викривленої форми), через поширення в неоднорідній атмосфері та перевідбиття від повітряного судна істотно знижує якість такої обробки. Вказано, що підвищення якості обробки хаотичних сигналів необхідно проводити за рахунок використання нетрадиційних методів, що враховують специфічну структуру складених хаотичних сигналів, через їх динамічні інваріанти.

Ключові слова: кореляційна обробка, складений хаотичний сигнал, зондувальний сигнал, доплерівська частота, дисперсія, повітряне судно.

Вступ

Постановка проблеми. Вперше концепції застосування надширокосмугових (НШС) сигналів в радіолокації були опубліковані понад сорок років тому [1–2]. Ці роботи стали базою для створення радіолокаційних систем різного призначення: виявлення та розпізнавання ракет та повітряних суден, надводних кораблів та підводних човнів, мін, тунелів, археологічних, геологічних та інших підземних об'єктів, побудови тривимірних радіолокаційних зображень та інше.

На сьогодні використання НШС [3] сигналів в радіолокації дозволяє:

- підвищити точність вимірювання відстані до цілі та роздільну здатність по дальності;
- зменшити розміри “мертвої зони” радіолокатора;
- провести розпізнавання класів та типів повітряних суден, а також отримати радіозображення повітряних суден;
- підвищити стійкість радіолокатора до впливу всіх видів пасивних перешкод (дощ, туман, аерозолі і т. д.);
- покращити стійкість радару до впливу зовнішніх електромагнітних випромінювань та перешкод;
- підвищити вірогідність виявлення та стійкість супроводження повітряних суден за рахунок збільшення ефективної поверхні розсіювання цілі та усунення пелюсткової структури вторинних діаграм спрямованості повітряних суден, що опромінюються;

- змінювати характеристики випромінювання (ширину та форму діаграми спрямованості), змінюючи параметри випромінюваного сигналу;
- підвищити скритність роботи радару.

Одним із способів досягнення вищеперерахованих переваг є використання складених хаотичних сигналів. Хаотичні сигнали (процеси, послідовності) представляють собою нерегулярні коливання, що володіють суцільним енергетичним спектром і швидко спадаючою автокореляційною функцією. Вони є шумоподібними сигналами, що широко використовуються в сучасній радіотехніці [4].

Використання хаотичних сигналів в радіолокації до недавнього часу було ускладнене через технічні та технологічні обмеження. Але на теперішній час розроблена велика кількість генераторів хаотичних коливань та широкосмугових підсилювачів, що дозволяє генерувати, підсилювати, приймати, та здійснювати обробку таких сигналів.

Для вирішення завдань підвищення скритності функціонування та роздільної здатності радіолокаційних засобів перспективним є використання шумоподібних сигналів, що формуються нелінійними динамічними системами та демонструють хаотичну поведінку. Такі сигнали мало чим відрізняються від спостережуваного шуму та володіють набором специфічних властивостей, що роблять їх доволі привабливими для побудови радіотехнічних систем [6]. В іноземних джерелах такі радары називають Low Probability of Intercept (LPI) Radar, тобто радар с ни-

зькою вірогідністю перехвату або з підвищеною скритністю функціонування [5].

Оскільки можливість використання хаотичних сигналів в радіолокації ще не достатньо вивчена, тому нижче розглядаються особливості виявлення та обробки таких сигналів традиційними методами без урахування їх специфічної структури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В попередніх роботах [7–9] авторами було проведено аналіз існуючих вітчизняних та іноземних радіолокаційних систем посадки (РСП), що забезпечують безпеку повітряного руху в районі аеродрому. Проаналізовано завдання РСП, які потрібно вирішувати під час посадки повітряних суден на злітно-посадкову смугу, для забезпечення більш високого рівня безпеки польотів, на етапі посадки повітряного судна.

Метою статті є вирішення задачі обробки складеного хаотичного сигналу на фоні пасивних перешкод при застосуванні традиційних методів обробки, та селекції рухомих повітряних суден кореляційним методом.

Виклад основного матеріалу

Для формування зондувального сигналу x_t застосуємо складену хаотичну послідовність [9], яка сформована за допомогою поліному Чебишева 1-го роду 3-го порядку (рис. 1):

$$x_{t+1} = 4(x_t)^3 - 3x_t, \quad (1)$$

де $t = 0, 1, 2, \dots, n$.

Рис. 1. Часова реалізація хаотичного радіоімпульсу
Джерело: розроблено авторами.

Окремі хаотичні ортогональні сигнали з різними початковими параметрами формуються за допомогою апроксимації полінома Чебишева I-го роду 3 порядку, як показано на рис. 2.

Під час вивчення кореляційних властивостей сформованого сигналу було встановлено, що рівень бічних пелюсток хаотичного сигналу породжуваного поліномом Чебишева змінюється при зміні початкових значень x_t , з кроком 0,001 де $t \in (0..1)$. Під час моделювання складеного хаотичного сигналу довжиною $T = 1000$, були використані послідовності з різними початковими параметрами ($x_{10} = 0,26$; $x_{20} = 0,36$; $x_{30} = 0,46$; $x_{40} = 0,56$; $x_{50} = 0,66$). Також можна відмітити, що для формування хаоти-

чного радіоімпульсу можуть бути використані також поліноми Чебишева I-го роду 3-го і вищих порядків, при цьому вищевказані властивості отриманого складеного хаотичного радіоімпульсу зберігаються.

$x_{10} = 0,26$

$x_{20} = 0,36$

$x_{30} = 0,46$

$x_{40} = 0,56$

$x_{50} = 0,66$

Рис. 2. Часова реалізація окремих хаотичних радіоімпульсів з різними початковими параметрами
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 3 показаний запропонований складений хаотичний сигнал $x(t, a)$, сформований за допомогою полінома Чебишева I роду та 3 порядку з різними початковими параметрами, що є сумою окремих хаотичних сигналів:

$$Sx_t = Sx1_t + Sx2_t + Sx3_t + Sx4_t + Sx5_t, \quad (2)$$

де $Sx1_t, Sx2_t, Sx3_t, Sx4_t, Sx5_t$ – окремі хаотичні ортогональні сигнали з різними початковими параметрами.

Рис. 3. Часова реалізація складеного хаотичного радіоімпульсу
Джерело: розроблено авторами.

Розглянемо виявлення одиночного складеного хаотичного радіоімпульсу (рис. 4), на прикладі найпростішого одноканального кореляційного пристрою виявлення (рис. 5).

Рис. 4. Часова реалізація вхідного сигналу $y(t)$
Джерело: розроблено авторами.

Рис. 5. Структурна схема найпростішого кореляційного пристрою виявлення
Джерело: розроблено авторами.

Прийняте коливання $y(t)$ (рис. 4) являє собою адитивну суміш білого шуму $n(t)$ і корисного сигналу з інформаційним параметром α :

$$y(t) = n(t) + x(t, \alpha). \quad (3)$$

Після проведення чисельного моделювання алгоритму виявлення, що представлено на рис. 5, для ідеалізованого випадку виявлено, що корисний сиг-

нал $x(t, a)$ на виході інтегратору кореляційного пристрою виявлення успішно накопичується (рис. 6). Це говорить про те, що для вирішення задачі радіолокації правильного виявлення, при відомому очікуваному сигналі, традиційні методи обробки дозволяють легко виявляти складені хаотичні сигнали.

Рис. 6. Складений хаотичний сигнал на виході інтегратору
Джерело: розроблено авторами.

В подальшому розглянемо можливість виявлення складених хаотичних сигналів на фоні пасивних перешкод.

Відомо, що при виявленні сигналу, відбитого від повітряного судна, необхідно враховувати часо-частотні параметри сигналу (час затримки сигналу t_3 та доплерівський зсув частоти F_d).

Нехай реалізація, що приймається $Y(t)$, є сумою комплексних амплітуд відбитого сигналу та перешкоди:

$$Y(t) = U(t - t_{30})e^{-j2\pi F_{D0}t} + N(t), \quad (4)$$

де t_{30} та F_{D0} – істинні значення затримки та доплерівської частоти;

$U(t)$ – комплексна амплітуда зонduючого сигналу.

Комплексна амплітуда очікуваного сигналу $X(t)$ з урахуванням затримки t_3 та доплерівської поправки частоти F_d має вигляд:

$$X(t) = U(t - t_3)e^{-j2\pi F_d t}. \quad (5)$$

Тоді кореляційний інтеграл Z , що описує алгоритм оптимальної обробки когерентного сигналу, буде функцією двох перемінних:

$$Z(t_3, F_d) = \frac{1}{2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} U(t)U^*(t - t_3)e^{j2\pi F_d t} dt \right|. \quad (6)$$

Для виявлення складеного хаотичного сигналу відбитого від повітряного судна в діапазоні значень t_3 та F_d та вирішення задачі селекції рухомих цілей скористаємось багатоканальною кореляційною схемою виявлення сигналів з різними значеннями часу затримки та доплерівської частоти (рис. 7.)

[10]. Елементами схеми є корелятори з квадратурними каналами (ККК) [5], які описуються наступним виразом:

$$Z_{ij}(t_{3i}, F_{Дj}) = \frac{1}{2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} U(t)U^*(t-t_{3i})e^{j2\pi F_{Дj}t} dt \right|. \quad (7)$$

Для прийняття рішення про наявність повітряного судна, необхідно для кожної пари очікуємих значень t_{3i} та $F_{Дj}$ порівняти величину $Z = Z_{ij}(t_{3i}, F_{Дj})$ з деяким порогом.

Рис. 7. Багатоканальна кореляційна схема обробки складеного хаотичного сигналу з різними значеннями часу затримки та доплерівської частоти
Джерело: [10, С. 312].

На рис. 8 наведено результат чисельного моделювання накопичення складеного хаотичного сигналу, відбитого від нерухомого об'єкту з $F_{Д} = 0$ та від рухомого з $F_{Д} \neq 0$.

Рис. 8. Складений хаотичний сигнал на виході багатоканальної схеми кореляційної обробки
Джерело: розроблено авторами.

Враховуючі те, що кожний канал схеми обробки по частоті Доплера накопичує сигнал для заданого значення $F_{Д}$, то для реалізації селекції рухо-

мих повітряних суден потрібно закрити вихід каналу, що відповідає $F_{Д} = 0$.

На рис. 9 представлена модель вхідної часової реалізації СХС, що складається з суміші складеного хаотичного сигналу, відбитого від місцевих предметів (МП) (пасивна перешкода) та від 3-х повітряних суден, що рухаються з різними швидкостями. При цьому повітряне судно (ПвС) №1 знаходиться на фоні місцевих предметів (сірим кольором відображений сигнал, що відбитий від місцевого предмету, а чорним – від повітряних суден).

Рис. 9. Вхідна реалізація складеного хаотичного сигналу, відбитого від МП і від повітряних суден при $q = 10$

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 10 демонструється накопичення сигналу (рис. 8) на виході корелятора (рис. 7). З цього видно, що сигнали, відбиті від рухомих повітряних суден, виявляються традиційним алгоритмом (7), а сигнал, що відбитий від місцевого предмету, подавляється.

Рис. 10. Складений хаотичний сигнал на виході багатоканальної схеми кореляційної обробки
Джерело: розроблено авторами.

Наведені результати, що отримані чисельним моделюванням для ідеалізованих умов прийому когерентного складеного хаотичного сигналу, без урахування його спотворень (флуктуаційних похибок).

Але в реальних умовах сигнально-перешкодової обстановки будуть виникати істотні спотворення форми радіолокаційного сигналу, що приймається. На рис. 11 показано виявлення складеного хаотичного сигналу виразом (7) при наявності флуктуацій його параметрів.

Рис. 11. Складений хаотичний сигнал на виході багатоканальної схеми кореляційної обробки при наявності флуктуацій його параметрів
Джерело: розроблено авторами.

Після проведеного порівняння рис. 10–11 стає видно, що спотворення форми складеного хаотично-

го сигналу приводить до значного зниження якості його виявлення. Тому для обробки такого сигналу потрібно застосовувати нетрадиційні методи аналізу та обробки хаотичних процесів, що враховують їх специфічні властивості через динамічні інваріанти: показники Ляпунова, кореляційну розмірність та інше.

Висновки

Таким чином, при проведенні математичного моделювання встановлено, що для обробки та виявлення складених хаотичних сигналів на фоні пасивних перешкод можливо застосовувати традиційну кореляційну обробку. Але при наявності флуктуацій параметрів сигналу (спотворенні його форми) через поширення в неоднорідній атмосфері та перевідбитті від повітряних суден, якість такої обробки істотно знижується. Тому для обробки та виявлення складених хаотичних сигналів необхідно застосовувати нетрадиційні методи їх обробки, що враховують їх специфічну структуру. Такі методи прийому та обробки складених хаотичних сигналів для вирішення задач радіолокаційних систем посадки будуть досліджені в наступних роботах.

Список літератури

1. Moffatt D.L. Subsurface electromagnetic pulse radars / D.L. Moffatt, R.J. Puskas // *Geophysics*. – 1976. – Vol. 41, Iss. 3. – P. 506-518.
2. Кенно Е.М. Аппроксимации переходных и импульсных переходных характеристик / Е.М. Кенно, Д.Л. Моффатт // *ТИИЭР*. – 1965. – Т. 53, № 8. – С. 1025-1034.
3. Лазоренко О.В. Надширокосмугові сигнали та процеси / О.В. Лазоренко, Л.Ф. Черногор. – Х.: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2009. – 576 с.
4. Васюта К.С. Анализ влияния флуктуаций параметров хаотического сигнала на качество его корреляционной обработки в измерительных радиотехнических системах / К.С. Васюта, Ф.Ф. Зоц, С.В. Озеров // *Системы обработки информации*. – 2012. – № 7(105). – С. 60-63.
5. Pace P.E. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar / P.E. Pace. – London: Artech house, 2009. – 862 p.
6. Васюта К.С. Анализ корреляционных свойств хаотических радиоимпульсов / К.С. Васюта, А.А. Малышев, Ф.Ф. Зоц // *Системы обработки информации*. – 2012. – № 3(101). – С. 22-25.
7. Сучасний стан та перспективи розвитку радіолокаційних систем посадки / О.Л. Кащишин, К.С. Васюта, О.А. Ківшар, М.П. Долина // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2019. – № 1(34). – С. 39-45. <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.34.05>.
8. Vasyuta K.S. Correlation Properties of a Composite Chaotic Radio Pulse / K.S. Vasyuta, O.L. Kashchishyn // *IEEE Ukrainian Microwave Week*. – 2020. – P. 1022-1025. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252597>.
9. Васюта К.С. Метод генерування складеного хаотичного сигналу радіолокаційних систем / К.С. Васюта, О.Л. Кащишин // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2020. – № 3(40). – С. 7-10. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.40.00>.
10. Теоретичні основи радіолокації / Я.Д. Ширман, В.Н. Голіков, І.Н. Бусигін, В.Н. Манжос та інш.; за заг. ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
11. Локаційна системотехніка / В.Б. Алмазов, Г.С. Богословський, П. А. Брандис та інш.; за заг. ред. В. Б. Алмазова. – Х.: ВИРТА, 1993. – 620 с.
12. Фалькович С.Е. Основы статистической теории радиотехнических систем / С.Е. Фалькович, П.Ю. Костенко. – Х.: ХАИ, 2005. – 389 с.
13. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – М.: Советское радио, 1970. – 384 с.

Надійшла до редколегії 06.11.2020

Схвалена до друку 15.12.2020

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>

Кашишин Олександр Леонтійович

ад'юнк
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4447-9415>

Ковальчук Олександр Петрович

заступник начальника факультету
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1860-1720>

Підлісний Олександр Дмитрович

заступник начальника циклової комісії Військового
коледжу сержантського складу
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7805-8232>

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>

Oleksandr Kashchyshyn

Doctoral Student
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4447-9415>

Oleksandr Kovalchuk

Deputy Head of the Faculty
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1860-1720>

Oleksandr Pidlisnyi

Deputy Head of the Cycle Commission
of Military College of Sergeants
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7805-8232>

**КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ
СОСТАВНОГО ХАОТИЧЕСКОГО СИГНАЛА**

К.С. Васюта, А.Л. Кашишин, О.П. Ковальчук, А.Д. Подлесный

В работе анализируется возможность традиционной корреляционной (когерентной) обработки при обнаружении составного хаотического радиолокационного сигнала на фоне шумов и пассивных помех. Показано, что при обнаружении и обработке составных хаотических сигналов можно применять традиционную корреляционную обработку. Наличие флуктуаций параметров сигнала (его искаженной формы), из-за распространения в неоднородной атмосфере и переотражения от воздушного судна существенно снижает качество такой обработки. Указано, что повышение качества обработки хаотических сигналов необходимо проводить за счет применения нетрадиционных методов, учитывающих специфическую структуру составных хаотических сигналов, из-за их динамических инвариантов.

Ключевые слова: корреляционная обработка, составной хаотический сигнал, зондирующий сигнал, доплеровская частота, дисперсия, воздушное судно.

**CORRELATION PROCESSING METHOD
COMPOSITION CHAOTIC SIGNAL**

K. Vasyuta, O. Kashchyshyn, O. Kovalchuk, O. Pidlisnyi

The use of chaotic signals in radar has until recently been complicated by technical and technological limitations. But currently a large number of chaotic oscillators and broadband amplifiers have been developed, which allows them to be used to amplify chaotic signals, their reception and processing.

The purpose of using chaotic signals is to increase the secrecy of their operation and the resolution of radar facilities.

The purpose of this publication is to solve the problem of detecting a complex chaotic signal against the background of white noise and selection of moving aircraft by the correlation method.

After numerical simulation of the detection algorithm, for the idealized case, when there are no fluctuation distortions of the reflected signal, it became known that the useful signal at the output of the integrator of the correlation detection device, successfully accumulates. This suggests that to solve the problem of radar, with a known expected signal, traditional methods make it easy to detect complex chaotic signals.

Thus, during the simulation it was found that when detecting complex chaotic signals on the background of passive interference, it is possible to apply traditional correlation processing. However, in the presence of fluctuations in signal parameters (distortion of its shape) due to propagation in a heterogeneous atmosphere and reflection from aircraft, the quality of such processing is significantly reduced. Therefore, to detect complex chaotic signals, it is necessary to use non-traditional methods of their processing, taking into account their specific structure through dynamic invariants. Such methods of receiving and processing complex chaotic signals to solve the problems of radar landing systems will be described in the following works.

Keywords: correlation processing, composite chaotic signal, sounding signal, Doppler frequency, dispersion, aircraft.