

ВСЕУКРАЇНСЬКИЙ КОНКУРС СТУДЕНТСЬКИХ
НАУКОВИХ РОБІТ

СТУДЕНТСЬКА НАУКОВА РОБОТА

ШИФР “РОЗПІЗНАВАННЯ”

**НА ТЕМУ: РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО РОЗПІЗНАВАННЯ
КЛАСІВ ЦІЛЕЙ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ BDS-СТАТИСТИКИ.**

2020

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ	5
1.1 Аналіз розвитку методів розпізнавання радіолокаційних повітряних цілей	5
1.2 Постановка задачі радіолокаційного розпізнавання повітряних цілей за дальнісними портретами.....	8
Висновки за розділом 1.....	10
2 ЗАСТОСУВАННЯ BDS-СТАТИСТИКИ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ	11
2.1 Властивості BDS-статистики щодо виявлення сигналів на фоні білого шуму.....	11
2.2 Застосування BDS-статистики для розпізнавання крилатих ракет та артилерійських снарядів за дальнісними портретами.....	15
Висновки за розділом 2.....	21
3 ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ BDS-СТАТИСТИКИ В РЛС ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ.....	22
Висновки за розділом 3.....	25
ВИСНОВКИ.....	26
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	27

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ

АЦП	–	аналого-цифровий перетворювач;
БПЛА	–	безпілотний літальний апарат;
Гет.	–	гетеродин;
ЕОМ	–	електронна обчислювальна машина;
ЕПР	–	ефективна площа розсіювання;
ЗМ	–	змішувач;
ЛЧМ	–	лінійна частотна модуляція;
ПВЧ	–	підсилювач високої частоти;
ПМР	–	поляризаційна матриця розсіювання;
ППЧ	–	підсилювач проміжної частоти;
РЛДП	–	радіолокаційний дальнісний портрет;
РЛС	–	радіолокаційна станція;
РТВ	–	радіотехнічні війська;
ЦОС	–	цифрова обробка сигналу;
ЦУФ	–	цифровий узгоджений фільтр;
BDS	–	W. Brock, W. Dechert та J. Scheinkman.

ВСТУП

Розвитку теорії і техніки розпізнавання радіолокації повітряних цілей присвячена велика кількість робіт, наприклад [1 – 5]. Розробка алгоритмів і систем розпізнавання радіолокаційних повітряних цілей нині орієнтована на створення каталогу цілей або словника ознак, на мові яких робляться як апостеріорні описи класів об'єктів, так і їх апостеріорний опис.

Актуальність проблеми правильної класифікації цілей обумовлена тим, що інформація про клас або тип цілі дозволяє виявити пріоритетні цілі з множини інших при масованому нальоті або відокремити хибні цілі від істинних. Таким чином, ця інформація дозволяє оптимізувати завдання цілерозподілу, цілевказування, і адаптацію засобів поразки з урахуванням характеристик цього класу цілей. Відповідно, актуальним завданням є і розробка методів радіолокаційного розпізнавання, тобто вибір інформативних і стійких ознак і алгоритмів прийняття рішення про приналежність об'єктів до того або іншого класу (типу) цілей.

Одним з перспективних напрямів збільшення ознак розпізнавання є використання характеристик діаграми зворотного розсіяння і дальнісних портретів цілей [5]. Безумовно, визначення класу або типу літака по характеру його дальнісного портрету є проблематичним. Зміна ракурсу об'єкту, довжини хвилі РЛС, поляризації зондуючого випромінювання, наявність змінних або додаткових елементів конструкції або озброєння об'єкту веде до значної зміни дальнісного портрету і ускладнює створення ефективного алгоритму розпізнавання. Проте сама "форма" дальнісного портрету в часі дозволяє судити про лінійні розміри цілей, тобто характеристики, які без використання надвисокого розрізнення за дальністю отримати раніше було неможливо.

Атестаційна робота буде присвячена доповненню вже відомих підходів розпізнавання повітряних цілей за дальнісними портретами та ехо-сигналами на основі застосування непараметричної BDS-статистики.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ

1.1 Аналіз розвитку методів розпізнавання радіолокаційних повітряних цілей

Спроби вирішення завдання радіолокаційного розпізнавання повітряних цілей робилися з самого зародження практичної радіолокації. Вже в перших дослідках по активній радіолокації повітряних цілей з використанням безперервних сигналів була помічена характерна модуляція ехо-сигналу від обертання лопатей повітряного гвинта. Спектр таких амплітудних модуляцій (згодом названих «ротаційними», «пропелерними» або «турбінними») лежить в діапазоні звукових частот і дозволяє оператору «на слух» визначати клас супроводжуваної цілі. З появою імпульсних РЛС про це явище надовго забули. Завдання розпізнавання класів цілей в таких РЛС вирішувалася оператором на основі аналізу інтенсивності позначки ехо-сигналу на індикаторному пристрої та аналізу траєкторних ознак. Якість розпізнавання цілі в цьому випадку виявлялася невисокою.

Новий поштовх вирішенню завдання розпізнавання в імпульсних РЛС дав винахід Я.Д. Ширманом складних зондувальних сигналів з внутрішньо імпульсною модуляцією. Перші вітчизняні дослідження радіолокації літаків з використанням ефекту стиснення проводилися вже в 1957 – 1958 роках [1, 2] (практично одночасно з аналогічними роботами в США). Експериментальна установка була створена на базі РЛС П-12. Передавач РЛС міг випромінювати як не модульований імпульси тривалістю 6 мкс, так і ЛЧМ імпульси тієї ж тривалості з девіацією частоти 5 МГц. Приймальний пристрій містив два канали – вузькосмуговий і широкосмуговий. Широкасмуговий канал містив фільтр стиснення на лініях затримки. Експерименти підтвердили теоретичний висновок про можливість істотного поліпшення роздільної здатності РЛС без практичного зменшення дальності дії.

Поява математичної моделі виявилася зручним інструментом для продовження досліджень питань радіолокаційного розпізнавання за напрямками [3 – 4]:

1. Дослідження та проведення порівняльного аналізу якості розпізнавання типів і класів цілей при використанні траєкторних ознак та ознак розпізнавання доступних при вузькосмуговому зондуванні, таких як амплітуда відбитого сигналу, поляризаційні ознаки, спектри «турбінної» або «пропелерної» модуляції, поперечні портрети цілей, одержувані при інверсному синтезі апертури антени.

2. Дослідження та проведення порівняльного аналізу якості розпізнавання типів і класів цілей при використанні широкосмугових зондуючих сигналів. Досліджуються різні види сигналів (ЛЧМ, когерентні багаточастотні, некогерентні багаточастотні) при загальній ширині спектра від 30 МГц до 300 МГц.

3. Дослідження та проведення порівняльного аналізу якості розпізнавання типів і класів цілей при використанні широкосмугових зондуючих сигналів в поєднанні та вимірюванні в елементах розрізнення додаткових ознак: амплітуди, елементів поляризаційних матриць, спектрів модуляції. Такі поєднання дозволяють отримувати дальнісно-поляризаційні, дальнісно-частотні та двовимірні портрети повітряних цілей, істотно розширюючи можливості їх розпізнавання.

Математичне моделювання радіолокаційного розпізнавання повітряних цілей показало, що достовірність розпізнавання типу цілі за допомогою тільки вузькосмугових ознак невисока. Навіть при великому відношенні сигнал-шум і під час відсутності помилок вимірювання ймовірність розпізнавання типу цілі не перевищує 0,7 (моделювалося 13 типів цілей різних класів).

Достовірність та інформативність розпізнавання повітряних цілей при використанні широкосмугових сигналів досить висока і значно перевищує аналогічні показники вузькосмугових сигнальних ознак. При асимптотично великому відношенні сигнал-шум вони забезпечують практично достовірне

($P > 0,9$) розпізнавання типу цілі вже при ширині спектра сигналу 60 МГц і більше при одноразовому вимірі ознаки.

При ширині спектра понад 100 МГц та відношенні сигнал-шум більше 24 дБ забезпечується правильне розпізнавання типу цілі з імовірністю більше 0,85.

При широкосмуговому зондуванні можливо здійснити вимір ознак, зазвичай використовуваних при вузькосмуговому розпізнаванні (ЕПР цілі та елементів ПМР).

Спільне використання цих ознак дозволяє істотно поліпшити показники якості розпізнавання, особливо при помірній ширині спектра сигналу. Залежно від умов, інформативність розпізнавання може бути поліпшена від 5 % до 60 %. При додатковому залученні траєкторних ознак вдається забезпечити практично достовірне розпізнавання типу цілі вже при відношенні сигнал-шум 20 дБ.

Крім того, застосування широкосмугових сигналів принципово дозволяє отримувати радіозображення спостерігаючих цілей за рахунок інверсного синтезу апертури антени, про що є досить великі публікації в сучасній науковій літературі.

1.2 Постановка задачі радіолокаційного розпізнавання повітряних цілей за дальнісними портретами

Розвитку теорії і техніки розпізнавання радіолокації повітряних цілей присвячена велика кількість робіт, наприклад [5, 6]. Розробка алгоритмів та систем розпізнавання радіолокаційних повітряних цілей нині орієнтована на створення каталогу цілей або словника ознак, на мові яких робляться як апріорні описи класів об'єктів, так і їх апостеріорний опис. Пов'язано це з тим, що робочий каталог цілей або словник ознак визначає склад і технічні характеристики вимірювальних засобів системи ППО, яка вже сьогодні будується на мережецентричних принципах побудови [7].

Актуальність проблеми правильної класифікації цілей обумовлена тим, що інформація про клас або тип цілі дозволяє виявити пріоритетні цілі з множини інших при масованому нальоті або відокремити хибні цілі від істинних. Таким чином, ця інформація дозволяє оптимізувати завдання цілерозподілу, цілевказування, та адаптацію засобів поразки з урахуванням характеристик цього класу цілей. Відповідно, актуальним завданням є розробка методів радіолокаційного розпізнавання, тобто вибір інформативних і стійких ознак та алгоритмів ухвалення рішення про приналежність об'єктів до того або іншого класу (типу) цілей. Радіолокаційними характеристиками, які можливо використовувати при розпізнаванні цілей можуть являтися: ефективна площа розсіювання, спектральні та часові характеристики відбитих від цілі сигналів, що містять інформацію про параметри руху цілі, модуляція, викликана обертанням турбін, гвинтів, поляризаційні характеристики відбитих сигналів [5, 6].

На практиці в сучасних РЛС використовуються алгоритми розпізнавання, засновані на аналізі наступних інформаційних ознак цілі: траєкторні (висота, швидкість, параметр), величина ЕПР та наявність вторинної модуляції в спектрі відбитого сигналу. Рішення про клас цілі приймається на основі співставлення інформаційних даних з еталонними для кожного класу цілей. Ідентифікацію типу цілі радіолокаційні станції, які

стоять озброєнні ЗС України не проводять, через відсутність інформаційних ознак, що забезпечують рішення цієї задачі. Застосування подібного принципу розпізнавання в сучасних умовах стає усе більш ненадійним. Поява нових типів засобів повітряного нападу привела до того, що дуже складно чітко визначити ознаки, властиві тому або іншому класу (типу) цілей. Наприклад, тенденцією усього періоду розвитку авіації є зменшення ЕПР літаків. Тоді використання такої інформативної ознаки, як величина ЕПР цілі, може привести до того, що така пріоритетна ціль як малопомітний літак, виготовлений за технологією "stelth" може бути прийнятий за малорозмірний безпілотний літальний апарат (БПЛА). Аналогічно, БПЛА дуже швидко розвиваються і набувають все більшу різноманітність за призначенням [8]. Отже, траєкторні ознаки також не є достатніми для ефективного розпізнавання цілей.

У зв'язку з викладеним вище є актуальним формування каталогу (алфавіту) більшого розміру для класів радіолокаційних цілей на основі збільшення ознак розпізнавання. Одним з перспективних напрямів збільшення ознак розпізнавання є використання характеристик діаграми зворотного розсіяння та дальнісних портретів цілей. Безумовно, визначення класу або типу літака по характеру його дальнісного портрету є дуже проблематичним. Зміна ракурсу об'єкту, довжини хвилі РЛС, поляризації зондуючого випромінювання, наявність змінних або додаткових елементів конструкції або озброєння об'єкту веде до значної зміни дальнісного портрету і ускладнює створення ефективного алгоритму розпізнавання. Проте сама "форма" дальнісного портрету в часі дозволяє судити про лінійні розміри цілей, тобто характеристики, які без використання надвисокого розрізнення за дальністю отримати раніше було неможливо.

Метою цієї роботи є аналіз можливості застосування методів нелінійного аналізу часових рядів для розпізнавання (класифікації) радіолокаційних повітряних цілей.

Висновки за розділом 1

Проведений аналіз методів радіолокаційного розпізнавання показав, що при використанні вузькосмугових сигналів в РЛС для класифікації цілей можна використовувати траєкторні ознаки, величину ефективної поверхні розсіювання та ефекти турбінної модуляції, які проявляються у спектрі ехо-сигналу. При використанні широкосмугових сигналів (ширина спектру сигналу від 100 до 150 МГц) додатково з'являється можливість розпізнавання за дальнісними та дальнісно-частотними портретами в поєднанні з тими ж траєкторними ознаками та за ЕПР цілей. При цьому відомо, що імовірність правильного розпізнавання за умови застосування широкосмугових сигналів вища, ніж при використанні вузькосмугових і складає 0.9.

Для ефективного розпізнавання необхідно мати дуже велику базу даних для всіх імовірних дальнісних портретів на різних ракурсах. При чому дальнісні портрети деяких цілей на різних ракурсах однакові. Тому пропонується не порівнювати дальнісні портрети цілі з еталонами, шляхом виявлення закономірностей у формі дальнісного портрету виробити алгоритм прийняття рішення для класифікації цілей. Відомо, що застосування методів нелінійної динаміки, наприклад, BDS-статистики при обробці сигналів дозволяє враховувати додаткову інформацію, закладену в його структуру. Тому в наступному розділі розглянемо особливості застосування BDS-статистики для розпізнавання класів цілей.

2 ЗАСТОСУВАННЯ BDS-СТАТИСТИКИ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ

2.1 Властивості BDS-статистики щодо виявлення сигналів на фоні білого шуму

В роботі [9] запропоновано непараметричні (нелінійні) методи виявлення хаотичних процесів на фоні білого шуму. Вони ґрунтуються на перевірці статистичних гіпотез: нульова гіпотеза H_0 припускає, що спостережувані дані незалежні і однаково розподілені – білий шум, а альтернативна гіпотеза H_1 – у спостережуваних даних проявляється залежність – детермінований процес, а вид розподілу невідомий. Як показано в [9], найбільш ефективним методом для вирішення задачі виявлення хаотичного процесу (сигналу), є метод, заснований на використанні властивостей непараметричної BDS-статистики. На основі властивостей даної статистики у 1987 році Брокком, Дечертом та Шейнкманом (W. Brock, W. Dechert та J. Scheinkman) був розроблений BDS-тест, який є потужним інструментом для виявлення залежності в часовому ряді. Так як будь який радіосигнал є процесом в часі, то при поданні його у вигляді дискретних відліків часового ряду даний тест застосовується, як метод виявлення сигналу на фоні білого шуму. Цей тест перевіряє нульову гіпотезу – аналізований сигнал являється білим шумом.

Значення BDS-статистики базується на обчисленні кореляційного інтеграла і має вигляд [10]:

$$w_{m,N}(\varepsilon) = \sqrt{N - m + 1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)}, \quad (2.1)$$

де m – розмірність псевдофазового простору;

N – кількість відліків (елементів) часового ряду (сигналу);

ε – радіус гіперсфери, якою покривається фазовий простір;

$C_{m,N}(\varepsilon)$ – кореляційний інтеграл;

$\sigma_{m,N}(\varepsilon)$ – середньоквадратичне відхилення чисельника

$$C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m$$

Кореляційний інтеграл визначає частоту попадання довільної пари точок фазового простору в гіперсфери радіусу:

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

$$I_{\varepsilon}(x_i^m, x_j^m) = \begin{cases} 1, & \|x_i^m - x_j^m\| \leq \varepsilon \\ 0, & \|x_i^m - x_j^m\| > \varepsilon \end{cases}, \quad (2.2)$$

де $I_{\varepsilon}(x_i^m, x_j^m)$ функція Хевісайда для всіх пар значень i та j , де $0 \leq i \leq N$ та $0 \leq j \leq N$; N – кількість елементів часового ряду $\{x_i\}_{i=1}^N$.

Функція $I_{\varepsilon}(x_i, x_j)$ розраховує, скільки точок знаходиться на відстані ε один від одного і приймає значення 1 або 0. При цьому радіус гіперсфери $\varepsilon = 0.5\sigma \div 2\sigma$, де σ - середньоквадратичне відхилення аналізованого спостереження.

Обчислення (2.2) вимагає знання того, як виглядає фазовий простір прийнятої реалізації. Використовуючи теорему Такенса [11, 12], можна відтворити фазовий простір, затримуючи прийняту часову реалізацію сигналу для кожної розмірності.

$$\vec{y}(t) = (y_i, y_{i+\tau}, \dots, y_{i+(m-1)\tau}), \quad (2.3)$$

де τ – часова затримка.

Таким чином, кореляційний інтеграл для розмірності m обчислює ймовірність того, що дві точки, які є частиною двох різних траєкторій в фазовому просторі, відстають один від одного на ε одиниць.

Значення $C_{m,N}(\varepsilon)$ з 100% імовірністю прагне до $C_{1,N}(\varepsilon)^m$ при $N \rightarrow \infty$, а $(C_{m,N}(\varepsilon) - (C_{1,N}(\varepsilon))^m) \cdot \sqrt{N - m + 1}$ є випадковою асимптотично нормально розподіленою величиною з нульовим середнім і середньоквадратичним відхиленням $\sigma_{m,N}(\varepsilon)$, яке визначається як:

$$\sigma_{m,N}(\varepsilon) = 2 \sqrt{k^m + 2 \sum_{j=1}^{m-1} k^{m-j} (C_{1,N}(\varepsilon))^{2j} + (m-1)^2 (C_{1,N}(\varepsilon))^{2m} - m^2 k (C_{1,N}(\varepsilon))^{2m-2}}, \quad (2.4)$$

$$\text{де } k = \frac{1}{(N-1)(N-2)N} \left\{ \sum_{t=1}^N \left[\sum_{s=1}^N I_{\varepsilon}(x_t, x_s) \right]^2 - 3 \sum_{s=1}^N \sum_{t=s+1}^N I_{\varepsilon}(x_t, x_s) + 2N \right\}.$$

Залежність структурованості аттрактора реалізації від відношення сигнал-шум, яка оцінюється за допомогою (2.1), можна оцінити візуально, аналізуючи її фазові портрети при різній інтенсивності білого шуму рисунок.2.1.

У РЛС бойового режиму α – це ймовірність помилкової тривоги F , яка задається в межах $10^{-3}..10^{-6}$. Тому при використанні BDS статистики довірчий інтервал, який визначається рівнем значущості α , тобто F , слід збільшити з $|2,0|$ до $|3,5|..|4,0|$. Тобто для забезпечення ймовірності хибної тривоги $F = 10^{-3}$ значення $w(\vec{x}) > |3,5|$. При цьому ймовірність правильного виявлення $D = 1 - F$, а ймовірність пропуску цілі – $1 - D$.

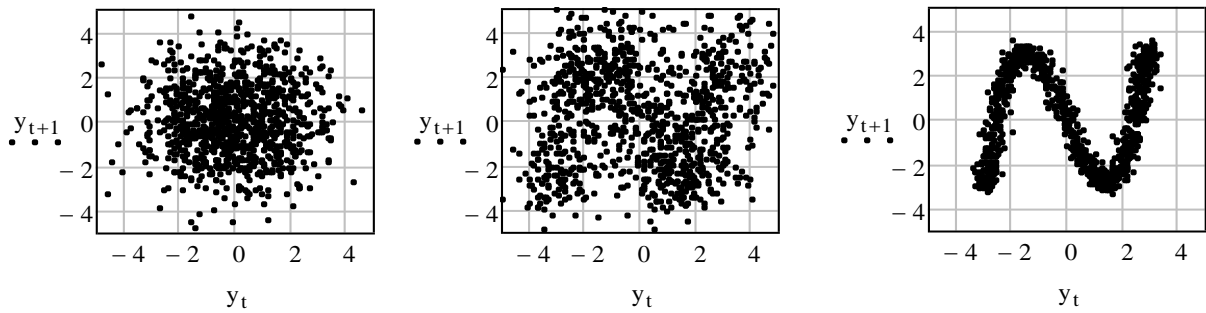


Рисунок 2.1 – Фазові портрети реалізації (2.1) при різних q^2 :

а) $q^2 = -6$ дБ; б) $q^2 = 6$ дБ; в) $q^2 = 20$ дБ

При вирішенні задачі виявлення сигналів на фоні білого шуму з застосуванням BDS статистики, слід відзначити важливу особливість. Ця особливість полягає в тому, що при розрахунку значення $w(\bar{x})$, де \bar{x} є вектором значень вкладення адитивної суміші сигналу і шуму в m мірний псевдо фазовий простір, відношення сигнал-шум задається на вході алгоритму, що реалізує BDS-тест. При цьому задане значення відношення сигнал-шум впливає на значення обчисленої $w(\bar{x})$, на підставі якої приймається рішення про наявність сигналу, причому з заданою довірчою ймовірністю. Як відомо на основі статистичної радіотехніки в РЛС ймовірність правильного виявлення сигналу (цілі) залежить від енергії сигналу і визначається відношенням сигнал-шум на виході узгодженого фільтра або корелятора, тобто після обробки, що і є відмінністю від викладеного вище методу. Також відмінною рисою є, то що, ймовірність виявлення визначається не енергією сигналу, а залежністю його значень у часі (його відмінною структурою від шуму), яка визначається за допомогою розрахунку BDS-статистики і тільки залежить від відношення сигнал-шум при його значеннях менше одиниці. Ці методи обробки сигналів стали доступними за рахунок розвитку цифрової обчислювальної техніки при підтримці відповідного програмного забезпечення.

2.2 Застосування BDS-статистики для розпізнавання крилатих ракет та артилерійських снарядів за дальнісними портретами

Набір відомих методик аналізу дальнісних портретів повітряних цілей для створення їх каталогу може бути доповнений нелінійним аналізом часових рядів [13]. Ці методи аналізу, засновані на представленні часових рядів у вигляді геометричних структур (образів) і служать інструментом для виявлення міри залежностей в спостережуваних даних (процесах). Тоді, дальнісний портрет цілі або прийнятий ехо-сигнал слід аналізувати, як часовий ряд, який можна формалізувати, користуючись наступною послідовністю перетворень: дальнісний портрет цілі \rightarrow залежність значень в часі \rightarrow міра залежності. Мірою залежності виступає значення BDS-статистики розраховане для часового ряду x_i , яким буде являтися дальнісний портрет цілі або ехо-сигнал від цілі.

З метою оцінки можливості застосування BDS-статистики для розпізнавання повітряних цілей обрано для аналізу дві крилаті ракети, а саме AGM-86C (довжина $L_1 = 6.32$ м, розмах крила $L_2 = 3.66$ м) та TAURUS KEPD 350 ($L_1 = 5.1$ м, $L_2 = 2.06$ м), а також два артилерійські снаряди: 9M22 ракетної системи залпового вогню "Град" калібру 122 мм ($L_1 = 2.87$ м, розмах стабілізаторів $L_2 = 0.25$ м) та осколково-фугасний снаряд ОФ25 калібру 152 мм ($L_1 = 0.709$ м). Розрахунок значень BDS-статистики здійснювався за дальнісними портретами обраних цілей, отриманими шляхом імітаційного моделювання [14, 15]. Портрети відповідають вертикальній та горизонтальній поляризації зондувального сигналу та ширині його спектру 300 МГц, який обирався у метровому діапазоні хвиль. Радіолокаційні дальнісні портрети розглянуто для основних азимутальних ракурсів обраних цілей – $\beta = 0^\circ$ (носовий ракурс), $\beta = 90^\circ$ (боковий ракурс) та проміжних ракурсів – $\beta = 20^\circ$, $\beta = 40^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $\beta = 110^\circ$,

$\beta = 130^\circ$ (для крилатих ракет) та $\beta = 30^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $\beta = 120^\circ$, $\beta = 150^\circ$, $\beta = 180^\circ$ (для артилерійських снарядів).

Розрахунок значень BDS-статистики проведено згідно виразу (2.1) при цьому обрано наступні початкові умови: розмірність псевдо фазового простору $m = 4$; кількість елементів кожного дальнісного портрету $N = 1024$, радіус гіперсфери $\varepsilon = 0.5\sigma$. Під час розрахунку значень BDS-статистики для дальнісних портретів усіх обраних цілей було виявлено, що значення для кожної цілі різні і залежать від ракурсу цілі, так як кожен дальнісний портрет має різну форму. Результати розрахунку значень BDS-статистики представлені в таблиці 2.1 та 2.2.

Таблиця 2.1 – Значення BDS-статистики, розраховані для дальнісних портретів крилатих ракет в залежності від ракурсу цілі β та поляризації хвилі

β	0°	20°	40°	60°	90°	110°	130°
Ціль	Значення BDS (вертикальна поляризація)						
AGM	51	59	103	104	36	92	78
KEPD	58	79	69	74	34	87	75
	Значення BDS (горизонтальна поляризація)						
AGM	130	116	67	71	35	127	108
KEPD	64	201	142	61	35	68	90

Таблиця 2.2 – Значення BDS-статистики, розраховані для дальнісних портретів артилерійських снарядів в залежності від ракурсу цілі β та поляризації хвилі

β	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	Значення BDS (вертикальна поляризація)						
“Град”	55	58	55	33	59	64	54
ОФ25	39	38	36	35	36	38	39
	Значення BDS (горизонтальна поляризація)						
“Град”	50	34	77	33	61	33	53
ОФ25	39	39	45	46	47	45	39

При цьому слід відзначити, що діапазон значень BDS-статистики для крилатих має більші значення ніж для артилерійських снарядів. Тобто значення BDS-статистики залежать від складності повітряної цілі (форми дальнісного портрета). В той же час виявлено, що при бокових ракурсах $\beta = 90^\circ$, значення BDS-статистики для всіх обраних цілей майже однакові і мають мінімальне значення $BDS \approx 35$. Це пояснюється тим, що при опроміненні цілей під кутом $\beta = 90^\circ$ крилаті ракети і артилерійські снаряди представляють собою форму циліндра, а їх дальнісні портрети мають один яскраво виражений пік. В той же час в залежності від поляризації хвилі значення BDS-статистики відрізняються при чому при вертикальній поляризації вони мають менший розкид значень. Також, якщо враховувати боковий ракурс особливим, то артилерійські снаряди на всіх інших ракурсах при вертикальній поляризації мають діапазони значень, які не перекриваються, тобто їх можна розпізнавати з високою достовірністю.

Отже, при відомих значеннях BDS-статистики для конкретних цілей в залежності від ракурсу можливе здійснення класифікації цілей.

Оскільки BDS-статистика дозволяє виявляти закономірності в структурі сигналу (наприклад відрізнити хаотичні сигнали від гармонійних), було прийнято рішення здійснити розрахунок BDS-статистики не тільки для дальнісних портретів обвідної, а і для прийнятих радіосигналів.

На рисунку 2.2 в якості прикладу представлено модель прийнятого сигналу, відбитого від крилатої ракети AGM-86C при $\beta = 0^\circ$, а на рисунку 2.3 її дальнісний портрет, який по суті являється обвідною цього сигналу. Для візуального аналізу зручніше розглядати дальнісний портрет, бо він більш інформативний з точки зору наочності. Однак при демодуляції сигналу (виділенні його обвідної) втрачається частина структури (форми) сигналу, яка несе інформацію про ціль.

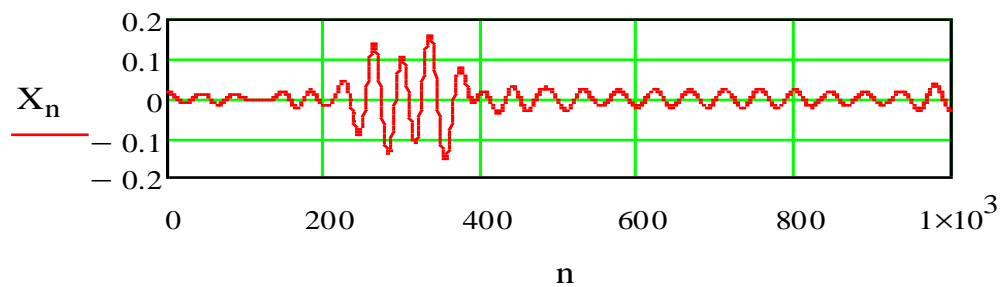


Рисунок 2.2 – Модель прийнятого сигналу відбитого від крилатої ракети AGM-86C

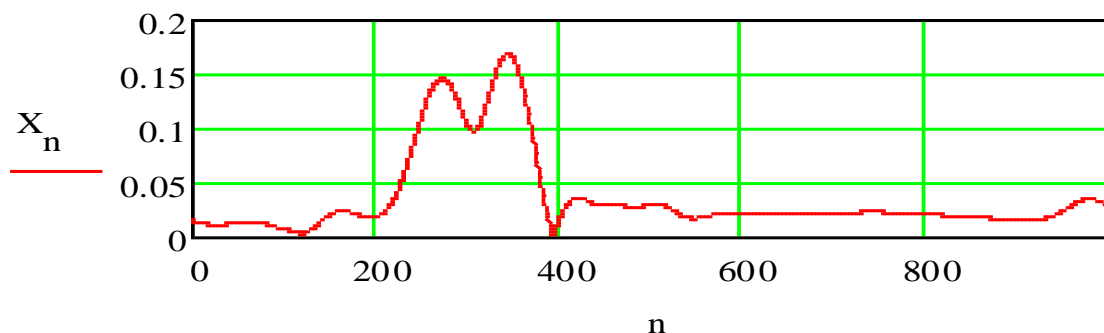


Рисунок 2.3 – Модель дальнісного портрету крилатої ракети AGM-86C

Результати розрахунків значень BDS-статистики для моделей відбитих сигналів від крилатих ракет та артилерійських снарядів показали, що отримані значення для кожної цілі (сигналу) при вертикальній поляризації мають діапазон значень, який не перекликається з діапазоном значень іншої цілі (таблиці 2.3, 2.4). Зокрема для артилерійських снарядів, а саме типу “Град” діапазон значень BDS-статистики для всіх ракурсів лежить від 39 до 82, а для ОФ25 від 31 до 33, тобто дані цілі можна розпізнавати незалежно від ракурсу. Однак для крилатих ракет діапазон значень BDS-статистики AGM-86C лежить від 40 до 348, а для KEPD 350 від 31 до 54, при чому значення 40 відповідає боковому ракурсу $\beta = 90^\circ$, враховуючи цю особливість дані цілі на всіх ракурсах можна розпізнавати. При аналізі значень BDS-статистики отриманих при горизонтальній поляризації видно, що при окремих різних ракурсах значення двох цілей співпадають, тобто необхідно при розпізнаванні враховувати ракурс. Виходячи з отриманих даних для більш достовірного розпізнавання цілей на основі розрахунку значень BDS-статистики доцільно використовувати сигнали, відбиті від цілей з вертикальною поляризацією.

Таблиця 2.3 – Значення BDS-статистики, розраховані для моделей сигналів відбитих від крилатих ракет в залежності від ракурсу цілі β та поляризації хвилі

β	0°	20°	40°	60°	90°	110°	130°
Ціль	Значення BDS (вертикальна поляризація)						
AGM	181	185	109	348	40	232	277
KEPD	50	52	53	51	31	54	53
	Значення BDS (горизонтальна поляризація)						
AGM	153	93	162	217	32	267	93
KEPD	50	160	74	49	31	53	64

Таблиця 2.4 – Значення BDS-статистики, розраховані для моделей сигналів відбитих від артилерійських снарядів в залежності від ракурсу цілі β та поляризації хвилі

β	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	Значення BDS (вертикальна поляризація)						
“Град”	39	42	39	82	42	42	39
ОФ25	33	32	31	31	31	33	33
	Значення BDS (горизонтальна поляризація)						
“Град”	36	74	72	33	59	73	38
ОФ25	32	33	35	36	36	36	33

На рисунках 2.4, 2.5 представлені графіки залежностей значень BDS-статистики крилатих ракет та артилерійських снарядів в залежності від ракурсу для вертикальної поляризації. З аналізу залежностей рисунку 2.4 видно, що графіки для двох крилатих ракет не перетинаються і мають чіткий діапазон значень, специфічним залишається лише боковий ракурс, як і при аналізі дальнісних портретів. В той же час при аналізі залежностей отриманих для артилерійських снарядів рисунку 2.5 боковий ракурс не викликає неоднозначності для розпізнавання, тобто можна визначити чіткий діапазон значень для всіх ракурсів цілей.

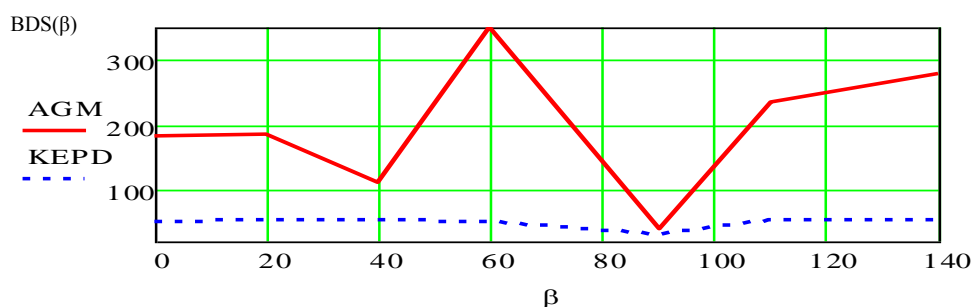


Рисунок 2.4 – Графік залежності значень BDS-статистики від ракурсу для крилатих ракет AGM-86C (суцільна лінія) та KEPD (пунктирна лінія)

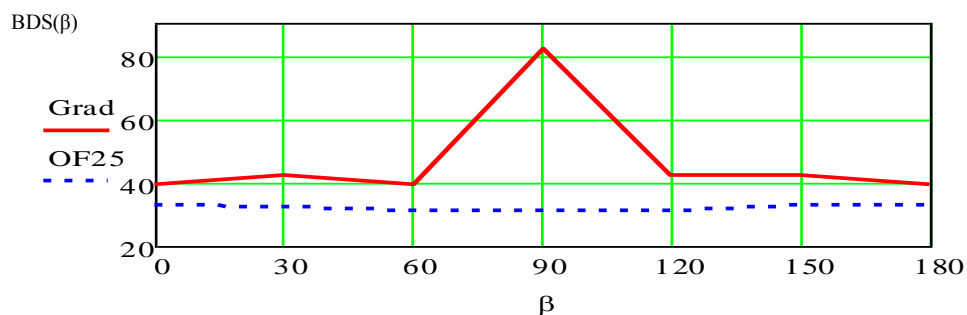


Рисунок 2.5 – Графік залежності значень BDS-статистики від ракурсу для артилерійських снарядів типу “Град” (суцільна лінія) та ОФ25 (пунктирна лінія)

Висновки за розділом 2

Таким чином, визначивши діапазон значень BDS-статистики для кожного типу цілі можна здійснювати їх розпізнавання. З аналізу проведених розрахунків видно, що значення BDS-статистики пропорційні розмірам та складності форми повітряної цілі, яка проявляється в структурі ехо-сигналу за умови надрозрізнення за дальністю.

Отримано залежність значень BDS-статистики для дальністних портретів (ехо-сигналів) крилатих ракет (AGM-86C і TAURUS KEPD 350) та артилерійських снарядів (системи “Град” калібру 122 мм і ОФ25 калібру 152 мм) в залежності від ракурсу цілей при вертикальній і горизонтальній поляризації. Значення BDS-статистики при горизонтальній поляризації сильно залежать від ракурсу цілі, що ускладнює розпізнавання, так як діапазони значень BDS-статистики для різних цілей перекриваються. Показано, що при вертикальній поляризації розраховані значення BDS-статистики для ехо-сигналів кожної цілі відповідають конкретному діапазону незалежно від ракурсу. Розраховані дані про діапазон значень для кожного типу цілі, свідчать про потенційну можливість розпізнавання цілі з високою достовірністю, незалежно від ракурсу цілі. Особливим і неоднозначним в окремих випадках є боковий ракурс цілі.

3 ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ BDS-СТАТИСТИКИ В РЛС ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ

У таких РЛС, як 19Ж6, 36Д6, П-18МА, П-18МУ, 79К6 для обробки ехо-сигналів застосовується узгоджена фільтрація [16 – 18]. Приймальні пристрої побудовані за супергетеродинною схемою, але після перенесення на проміжну частоту здійснюється цифрова обробка сигналу (ЦОС). Оскільки в цих РЛС застосовуються складні ЛЧМ і ФКМ сигнали (окрім 19Ж6), то для виділення корисного сигналу використовуються цифрові узгоджені фільтри, реалізовані на програмованих логічних інтегральних схемах, для стиснення складного сигналу. Узагальнена структурна схема приймального тракту даних РЛС приведена на рисунку 3.1. Основними елементами схеми є: підсилювач високої частоти (ПВЧ), змішувач (ЗМ), гетеродин (Гет), підсилювач проміжної частоти (ППЧ), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), цифровий узгоджений фільтр (ЦУФ), електронна обчислювальна машина (ЕОМ).

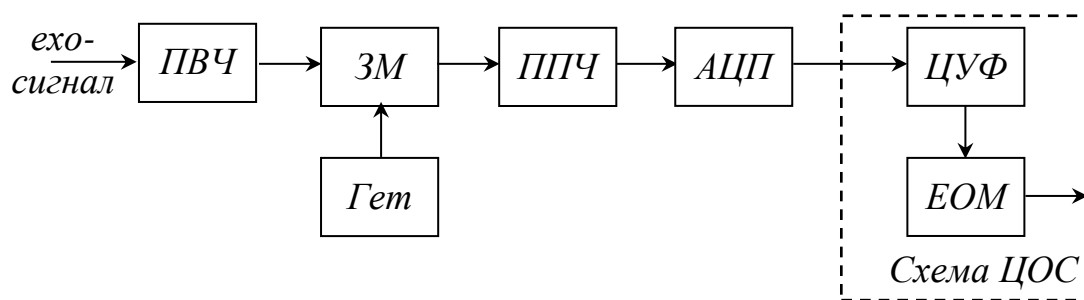


Рисунок 3.1 – Узагальнена структурна схема приймального пристрою РЛС: 19Ж6, 36Д6, П-18МА, П-18МУ, 79К6

Для розпізнавання класів повітряних цілей за їх дальнісними портретами запропоновано використовувати BDS-статистику. При цьому дальнісний портрет цілі слід аналізувати, як часовий ряд і розглядати, як лінгвістичну характеристику, яку можна формалізувати, користуючись наступним алгоритмом перетворень: дальнісний портрет цілі → залежність значень в часі → міра залежності. Виходячи із цього, для модернізації схеми

цифрової обробки сигналів РЛС РТВ пропонується додатково паралельно включити схему обробки сигналів на основі застосування BDS-статистики з метою розпізнавання класів повітряних цілей. На рисунку 3.2 наведена синтезована функціональна схема системи розпізнавання класів цілей з застосуванням BDS-статистики за умови використання в РЛС широкосмугових сигналів, які забезпечать отримання дальнісних портретів. Вона складається з ліній затримки для вкладення сигналу в псевдофазовий простір, блоку розрахунку значень BDS-статистики та блоку визначення класу цілі шляхом співставлення значень з відомими діапазонами для відомих класів цілей.

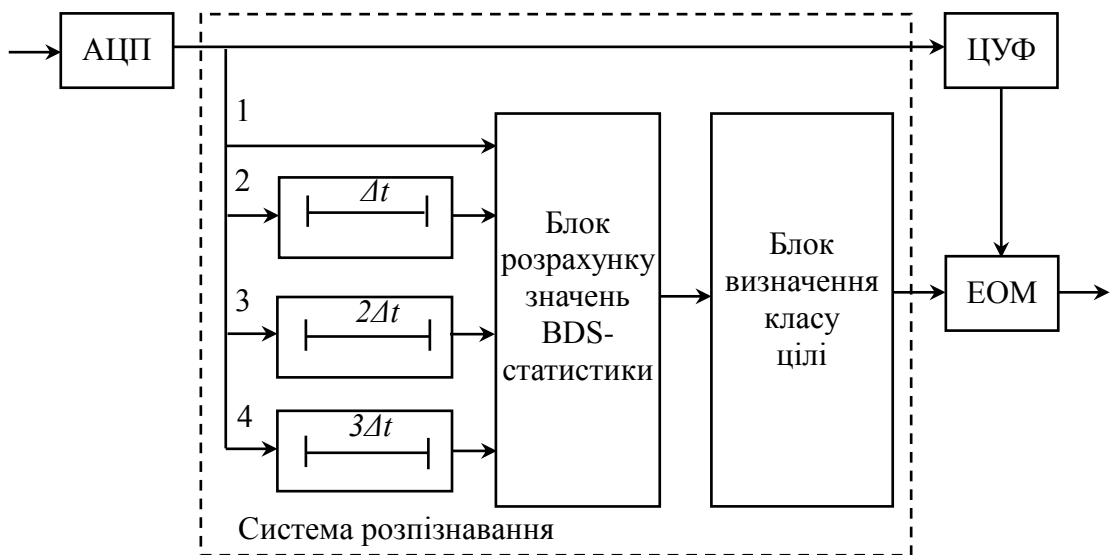


Рисунок 3.2 – Функціональна схема системи розпізнавання класів цілей з застосуванням BDS-статистики

Завдання класифікації повітряних цілей розглядається, як оцінка міри взаємозв'язків елементів спостережуваного дальнісного портрету (часового ряду). Ця міра взаємозв'язку проявляється в значенні BDS-статистики, тобто її значення виступає мірою залежності. У такій інтерпретації класи цілей можна шкалювати. Результати імітаційного моделювання процесу класифікації приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Класифікація повітряних цілей на основі розрахунку значень BDS-статистики

У таблиці приведені класи аналізованих цілей і відповідні ним середні значення BDS-статистики, які було розраховано за моделями дальнісних

Клас повітряної цілі	Дальнісний портрет цілі	Середнє значення BDS-статистики
<p>Бомбардувальник</p> 		1060
<p>Транспортний літак</p> 		840
<p>Гелікоптер</p> 		630
<p>Винищувач</p> 		410
<p>Крилата ракета</p> 		150

портретів. При цьому кожному класу цілі відповідає певний діапазон значень BDS-статистики, який залежить від кількості елементів розрізнення цілі та її протяжності. З таблиці видно, що застосування BDS-статистики для аналізу дальнісних портретів повітряних цілей дає можливість розпізнавати їх клас з високою достовірністю.

Висновки за розділом 3

Завдання класифікації повітряних цілей вирішується, як оцінка міри взаємозв'язків елементів спостережуваного ехо-сигналу (часового ряду). Ця міра взаємозв'язку проявляється в значенні BDS-статистики. У такій інтерпретації певному діапазону значень BDS-статистики відповідає заданий тип цілі, тобто можна здійснювати розпізнавання цілі на основі розрахованого значення BDS-статистики. Основною відмінністю від відомих методів є те, що здійснюється не порівняння еталонних дальнісних портретів, частотних спектрів ехо-сигналів, які різні в залежності від ракурсу цілі, а визначення діапазону значень BDS-статистики для конкретного повітряного об'єкту, який враховує зміну за ракурсом. При чому, отримані дані про діапазон значень для кожного типу цілі, свідчать про потенційну можливість розпізнавання цілі з високою достовірністю, незалежно від ракурсу цілі.

Розроблено функціональну схему системи розпізнавання класів цілей з застосуванням BDS-статистики, яка може бути використана під час створення перспективних РЛС.

ВИСНОВКИ

Робота присвячена питанням, що пов'язані з розробкою та удосконаленням сучасних перспективних зразків озброєння РТВ, які дозволяють не тільки виявляти, супроводжувати повітряні цілі, а і виконувати завдання розпізнавання класів (типів) повітряних цілей .

Для розпізнавання класів цілей запропоновано використовувати BDS-статистику. Дальнісний портрет цілі або ехо-сигнал доцільно аналізувати, користуючись наступними перетвореннями: залежність значень в часі; діапазон значень BDS-статистики; клас цілі. Отримано залежність значень BDS-статистики для дальнісних портретів (ехо-сигналів) крилатих ракет (AGM-86C и TAURUS KEPD 350) та артилерійських снарядів (системи “Град” калібру 122 мм и ОФ25 калібру 152 мм) в залежності від ракурсу цілей при вертикальній і горизонтальній поляризації. Значення BDS-статистики пропорційні розмірам та складності форми цілі, яка проявляється в структурі ехо-сигналу за умови надвисокої розрізняювальної здатності за дальністю (близької до 1 м). Значення BDS-статистики при горизонтальній поляризації сильно залежать від ракурсу цілі, що ускладнює розпізнавання, так як діапазони значень BDS-статистики для різних цілей перекриваються. Показано, що при вертикальній поляризації розраховані значення BDS-статистики для ехо-сигналів кожної цілі відповідають конкретному діапазону незалежно від ракурсу. Особливим та неоднозначним в окремих випадках є боковий ракурс цілі $\beta = 90^\circ$, але навіть за таких умов можна здійснювати розпізнавання цілей на основі розрахунку значень BDS-статистики.

Застосування розробленої схеми системи розпізнавання класів повітряних цілей при розробці перспективних РЛС дозволить отримувати додаткову інформації, що в свою чергу оптимізує завдання цілерозподілу і прийняття рішень щодо враження повітряних цілей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Радиоэлектронные системы : Основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я. Д. Ширмана. – 2-е изд. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.
2. Леховицький Д.І., Лещенко С.П. З історії радіолокації//Збірник наукових праць ХВУ. 2001. Випуск 4 (34).
3. Орленко В.М., Лещенко С.П., Братченко Г.Д., Ширман Я.Д. Сигнально-траекторная «оболочка» модели вторичного излучения// Электромагнитные волны и электронные системы. – 1999. – №3, т. 4. – С. 38-43.
4. Shirman Ja. D., Gorshkov S.A., Leshenko S.P., Orlenko V.M. Aerial Target Backscattering Simulation and Study of Radar Recognition, Detection and Tracking// IEEE International Radar Conference Radar 2000. - Alexandria, Virginia USA. – 2000.
5. Лещенко С.П. Развитие теории и техники радиолокационного распознавания воздушных целей ./ Прикладная радиоэлектроника. – Х.: ХНУРЕ. – 2009. – № 4(8). – С.490-496.
6. Распознавание целей по сигнальной информации в однопозиционных и многопозиционных локаторах: монография / Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, А.В. Коломийцев, К.В. Садовый. – Х.: “Міськдрук”, 2015. – 459 с.
7. Котов О. Б. Погляди щодо побудови майбутньої системи протиповітряної оборони країни на основі мережецентричних технологій / О. Б. Котов, Г. В. Певцов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2012. – №2(8). – С. 7–14.
8. Сучасний стан та проблеми протидії маловисотним, низькошвидкісним та малорозмірним БПЛА. / А.С. Дудуш, В.О. Тютюнник, О.А. Резніченко, С.Ю. Гогоняц // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2018. – № 1(31). – С. 121-131.

9. Костенко П. Ю. Обнаружение хаотического процесса искаженного белым шумом с использованием BDS-статистик / П. Ю. Костенко, А. Н. Барсуков, К. С. Васюта, С. Н. Симоненко // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2009. – Т. 52, № 11. – С. 41–50.
10. Kanzler L. Very Fast and Correctly Sized Estimation of the BDS Statistic / Ludwig Kanzler. – Christ Church and Department of Economics University of Oxford, 1999. – 95 p.
11. Kantz H. Nonlinear Time Series Analysis / H. Kantz, T. Schreiber – United Kingdom : Cambridge University Press, 2004. – 388 p.
12. Shirman Ya. D. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering Recognition, Detection and Tracking / Ya. D. Shirman ed. – Norwood, USA : Artech House, 2002. – 382 p.
13. Васюта К.С. Развитие методов радиолокационного распознавания воздушных целей с применением рекуррентного анализа / К.С. Васюта // Системи обробки інформації. – 2013. – №7(114). – С. 55-57.
14. Sukharevsky O. I. Modeling of Ultrawideband (UWB) Impulse Scattering by Aerial and Subsurface Resonant Objects Based on Integral Equation Solving / O. I. Sukharevsky, G. S. Zalevsky, V. A. Vasilets // Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications / Edited by J. D. Taylor. — Boca Raton London New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016. — Chapter 5. — P. 195–235. — : <https://doi.org/10.1201/9781315374130>.
15. Estimation of Radar Scattering Characteristics of Artillery Shells in Meter, Decimeter and Centimeter Wavelength Ranges / G. S. Zalevsky, O. I. Sukharevsky, V. A. Vasilets, M. V. Surgai // Radioelectronics and Communications Systems. – 2019. – Vol. 62, No. 7. – P. 356–367. – <http://doi.org/10.3103/S0735272719070033>.
16. Радиолокационная станция 36Д6. Эксплуатация и техническое обслуживание : учеб. пособие / [И. Д. Май, А. Г. Каспирович, В. А. Винник и др.]. – Запорожье : Искра, 2003. – 144 с.

17. Изделие 79К6. Руководство по технической эксплуатации. Описание и работа. Часть 8. вЮ0.123.040 РТЭ7 / 017.00.00 – 019.00.00 Приемная система, приемная цифровая система, цифровая диаграммообразующая система, 2006. – 132 с.

18. Подвижная радиолокационная станция обнаружения и целеуказания. РЛС П-18МУ. Формуляр ААЖВ.461314.001 ФО, 2006. – 60 с.

АНОТАЦІЯ

Наукова робота: 26 с., 3 розділи, 7 рисунків, 5 таблиць, 18 джерела.

Наукова робота присвячена розробці пропозицій щодо розпізнавання класів цілей на основі застосування BDS-статистики.

Метою роботи є розробка функціональної схеми системи розпізнавання повітряних цілей на основі застосування BDS-статистики.

У роботі запропоновано для розпізнавання класів (типів) повітряних цілей застосування BDS-тесту, який є інструментом для виявлення міри залежностей в спостережуваних процесах. Отримано залежність значень BDS -статистики для дальнісних портретів (ехо-сигналів) крилатих ракет та артилерійських снарядів в залежності від ракурсу цілей при вертикальній та горизонтальній поляризації. Проведено порівняльний аналіз результатів розрахунку значень BDS-статистики для дальнісних портретів та ехо-сигналів повітряних цілей. Показано, що при вертикальній поляризації ехо-сигналів кожній цілі відповідає конкретний діапазон значень BDS -статистики, що дає можливість здійснювати розпізнавання типів цілей. Неоднозначність розпізнавання цілей може виникати при боковому ракурсі цілі, але і за таких умов можна здійснювати розпізнавання.

Отримані в роботі результати можуть бути використані при проведенні науково-дослідних робіт, що спрямовані на модернізацію існуючих та створення перспективних РЛС.

РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ, ДАЛЬНІСНИЙ ПОРТРЕТ, ЕХО-СИГНАЛ, BDS-СТАТИСТИКА.