

Теоретичні основи розробки та експлуатації систем озброєння

УДК 621.391

DOI: 10.30748/soivt.2019.59.06

Ф.Ф. Зоц

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

ЗАСТОСУВАННЯ BDS-СТАТИСТИКИ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ ЗА ДАЛЬНІСНИМИ ПОРТРЕТАМИ

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.

Ключові слова: розпізнавання повітряних цілей, дальнісний портрет, ехо-сигнал, BDS-статистика.

Вступ

Постановка проблеми. 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 ураження з урахуванням характеристик цього класу (типу) цілей. Відповідно, актуальним завданням є і розробка методів радіолокаційного розпізнавання, тобто вибір інформативних і стійких ознак і алгоритмів ухвалення рішення про приналежність об'єктів до того або іншого класу (типу) цілей. Радіолокаційними характеристиками, які можливо використовувати при розпізнаванні цілей можуть бути: ефективна площа розсіювання, спектральні і часові характеристики відбитих від цілі сигналів, що містять інформацію про параметри руху цілі, модуляція, викликана обертанням турбін, гвинтів, поляризаційні характеристики відбитих від цілі сигналів, тощо [1–2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка алгоритмів і систем розпізнавання радіолокаційних повітряних цілей нині орієнтована на створення каталогу цілей або словника ознак, на мові яких робляться як апіорні описи класів об'єктів, так і їх апостеріорний опис [2]. 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 [3].

На практиці в сучасних РЛС використовуються алгоритми розпізнавання, засновані, як правило, на аналізі наступних інформаційних ознак цілі: траєкторні (висота, швидкість, параметр), величина ефективної площі розсіювання (ЕПР) і наявність вторинної модуляції в спектрі відбитого сигналу. Рішення про клас цілі приймається на основі співставлення інформаційних даних з еталонними для кожного класу цілей. Застосування подібного принципу розпізнавання в сучасних умовах стає усе більш ненадійним [1–2]. 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 і, відповідно, тактико-технічними характеристиками [4]. Отже, траєкторні ознаки також не є достатніми для ефективного розпізнавання цілей.

У зв'язку з викладеним вище є актуальним фо-

рмування 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 і дальнісних портретів цілей [5; 6]. Безумовно, визначення класу або типу повітряної цілі по характеру його дальнісного портрету є дуже проблематичним. Зміна ракурсу об'єкту, довжини хвилі РЛС, поляризації зондувального сигналу, наявність змінних або додаткових елементів конструкції або озброєння об'єкту веде до значної зміни дальнісного портрету і ускладнює створення ефективного алгоритму розпізнавання. Проте саме "форма" дальнісного портрету в часі дозволяє судити про лінійні розміри цілей, тобто характеристики, які можна отримати за умови надвисокого розрізнення за дальністю.

Мета статті – доповнення вже відомих підходів розпізнавання повітряних цілей за дальнісними портретами та ехо-сигналами на основі застосування непараметричної BDS-статистики.

Виклад основного матеріалу

Набір відомих методик аналізу дальнісних портретів повітряних цілей для створення їх каталогу може бути доповнений нелінійним аналізом часових рядів [7–8]. 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 → залежність значень в часі → міра залежності. Мірою залежності виступає значення BDS-статистики розраховане для часового ряду x_i , яким буде являться дальнісний портрет цілі або ехо-сигнал від цілі.

BDS-статистика і побудована на її основі відносно нова процедура – BDS-тест були запропоновані Брокком, Дечертом і Шейнкманом (B. Brock, W. Dechert і J. Scheinkman) в 1987 році [9]. У його основі лежить властивість розпізнавати відмінність між незалежними і однаково розподіленими значеннями часового ряду і залежними (детермінованими). Тобто, значення BDS-статистики для незалежних значень часового ряду (розподілених за нормальним законом – білого шуму) лежить в інтервалі $[-1,96; 1,96]$, а для детермінованих процесів виходять за його межі, причому, як показано в роботах [8; 10] чим більша структурованість часового ряду тим більше значення BDS-статистики. Наприклад, для "хаотичних сигналів" значення BDS-статистики ≥ 200 , а для гармонійного сигналу ≥ 1000 [8].

Розрахунок значення BDS-статистики засновано на розрахунку кореляційного інтегралу та має вигляд:

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

де m – розмірність псевдофазового простору;
 N – кількість елементів часового ряду;
 ε – радіус гіперсфери, якою покривається фазовий простір;

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

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

Для розрахунку $C_{m,N}(\varepsilon)$ ($m > 1$) необхідно виконати "вкладення" часового ряду x_i в m -мірний псевдофазовий простір, елементами якого, на основі теореми Такенса (Takens) [11], є точки $x_i^m = (x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m})$ з координатами $\{x_{i+k}\}_{k=1}^m$ заданими m послідовними значеннями вихідного часового ряду. Кореляційний інтеграл визначає частоту попадання довільної пари точок фазового простору в гіперсферу радіусу ε :

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

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

сайда для всіх пар значень i та j ($0 \leq i \leq N$ та $0 \leq j \leq N$), яка визначає, скільки точок знаходяться на відстані ε одна від одної і приймає значення 1, або 0. При цьому радіус гіперсфери рекомендовано обирати так, щоб $\varepsilon = 0.5\sigma \div 2\sigma$, де σ - середньоквадратичне відхилення процесу, який аналізується.

Брок та ін. показали, що $C_{m,N}(\varepsilon) \Rightarrow C_{1,N}(\varepsilon)^m$ зі 100% достовірністю при $N \rightarrow \infty$, а $(C_{m,N}(\varepsilon) - (C_{1,N}(\varepsilon))^m) \cdot \sqrt{N-m+1}$ є випадковою асимптотичною нормально розподіленою величиною з нульовим середнім і середньоквадратичним відхиленням $\sigma_{m,N}(\varepsilon)$, яке визначається як:

$$\sigma_{m,N}(\varepsilon) = 2 \sqrt{k^m + 2 \sum_{j=1}^{m-1} k^{m-j} \cdot (C_{1,N}(\varepsilon))^{2j} + (m-1)^2 \times \sqrt{(C_{1,N}(\varepsilon))^{2m} - m^2 k (C_{1,N}(\varepsilon))^{2m-2}}, \quad (3)$$

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

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 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 [12; 13]. 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 (1) при цьому обрано наступні початкові умови: розмірність псевдофазового 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 1 та 2.

Таблиця 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

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) [8], було прийнято рішення здійснити розрахунок BDS-статистики не тільки для дальнісних портретів обвідної, а і для прийнятих радіосигналів.

На рис. 1 в якості прикладу представлено модель прийнятого сигналу, відбитого від крилатої ракети AGM-86C при $\beta = 0^\circ$, а на рис. 2 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.

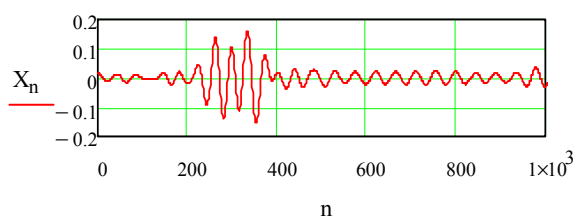


Рис. 1. Модель прийнятого сигналу відбитого від крилатої ракети AGM-86C

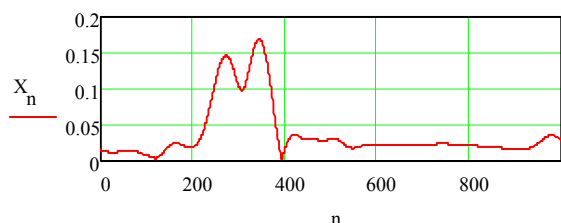


Рис. 2. Модель дальнісного портрету крилатої ракети AGM-86C

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 (табл. 3, табл. 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 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

Закінчення табл. 3

	Значення BDS (горизонтальна поляризація)						
AGM	153	93	162	217	32	267	93
KEPD	50	160	74	49	31	53	64

Таблиця 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 рис. 3, рис. 4 представлені графіки залежностей значень BDS-статистики крилатих ракет та артилерійських снарядів в залежності від ракурсу для вертикальної поляризації. З аналізу залежностей рис. 3 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 (рис. 4) боковий ракурс не викликає неоднозначності для розпізнавання, тобто можна визначити чіткий діапазон значень для всіх ракурсів цілей. 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 надрозрінення за дальністю.

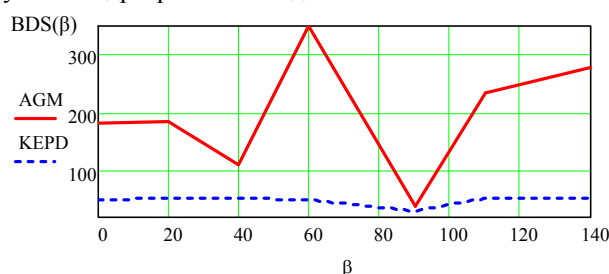


Рис. 3. Графік залежності значень BDS-статистики від ракурсу для крилатих ракет AGM-86C (суцільна лінія) та KEPD (пунктирна лінія)

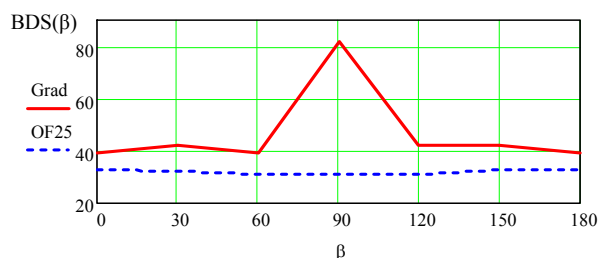


Рис. 4. Графік залежності значень BDS-статистики від ракурсу для артилерійських снарядів типу "Град" (суцільна лінія) та OF25 (пунктирна лінія)

Висновки

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. Особливим і неоднозначним в окремих випадках є боковий ракурс цілі, але навіть за таких умов можна здійснювати розпізнавання на основі розрахунку значень BDS-статистики. Результати роботи можуть бути використані при розробці алгоритмів розпізнавання класів (типів) повітряних цілей в радіолокаційних системах, в яких застосовуються надширококусові сигнали.

У подальшому автором будуть розглянуті можливості застосування запропонованого підходу до розпізнавання більш широкого спектру класів цілей.

Список літератури

1. Лещенко С.П. Развитие теории и техники радиолокационного распознавания воздушных целей / С.П. Лещенко // Прикладная радиоэлектроника. – 2009. – № 4(8). – С. 490-496.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. High resolution range profile based extraction of radar target length / K. Liao, G. Gui, Z. Chen, W. Yang // International Journal of the Physical Sciences. – 2011. – № 6(23). – P. 5503-5510. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.461>.
6. Space Precession Target Classification Based on Radar High-Resolution Range Profiles [Електронний ресурс] / Y. Wang, C. Feng, Y. Zhang, S. He // International Journal of Antennas and Propagation. – 2019. – P. 1-9. – Режим доступу: <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2019/8151620/>.
7. 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.
8. Васюта К.С. Классификация процессов в инфокоммуникационных радиотехнических системах с применением BDS-статистики [Електронний ресурс] / К.С. Васюта // Проблемы телекоммуникаций – 2012. – № 4(9). – С. 63-71. – Режим доступу: https://nbuv.gov.ua/UJRN/prtel_2012_4_7.
9. Akintunde M.O. Detection of Non-Linearity in the Time Series Using BDS Test [Електронний ресурс] / M.O. Akintunde, J.O. Oyekunle, G.A. Olalude // Science Journal of Applied Mathematics and Statistics. – 2015. – № 4(3). – P. 184-187. – Режим доступу: <http://sjams.org/article?journalid=149&doi=10.11648/j.sjams.20150304.13>.
10. Васюта К.С. Алгоритм оценки времени запаздывания хаотического сигнала отраженного от цели с применением BDS-статистики в радиолокационных системах / К.С. Васюта, Ф.Ф. Зоц // Системи обробки інформації. – 2013. – № 5(112). – С. 17-21.
11. Baranski K. A probabilistic Takens theorem [Електронний ресурс] / K. Baranski, Y. Gutman, A. Spiewak // Dynamical Systems. – 2018. – № 1. – С. 1-25. – Режим доступу: <http://arxiv.org/abs/1811.05959>.
12. Sukharevsky O.I. Modeling of Ultrawideband (UWB) Impulse Scattering by Aerial and Subsurface Resonant Objects Based on Integral Equation Solving [Електронний ресурс] / 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. – № 5. – С. 195-235. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1201/9781315374130>.
13. 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. – № 7(62). – P. 356-367. <https://doi.org/10.3103/S0735272719070033>.

References

1. Leshchenko, S.P. (2009), "Razvitie teorii i tehniki radiolokatsionnogo raspoznavaniya vozduchnykh tselei" [Development of radar theory and technology Recognition of air targets], *Applied Radioelectronics*, No. 4(8), pp. 490-496.
2. Kazakov, E.L., Kazakov, A.E., Kolomiicev, A.V. and Sadovyi, K.V. (2015), "Raspoznavanie tselei po signalnoi informatsii v odnopozitsionnykh i mnogopozitsionnykh lokatorah" [Targets recognition by signal information in the single-position and

multi-position radars], Miska drukarnya, Kharkiv, 459 p.

3. Kotov, O.B. and Pievtsov, H.V. (2012), "Poglyady schodo pobudovy maibutnoyi systemy protypovitryanoi oborony krainy na osnovi merezhetsentrychnykh tehnologii" [Views on the construction of the country's future air defense system based on network-centric technologies], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 2(8), pp. 7-14.

4. Dudush, A.S., Tyutyunnik, V.A., Reznichenko, A.A. and Hohoniants, S.U. (2018), "Suchasnyi stan ta problemy protydyi malovysotnym, nyzkoshvydkisnyh ta molorozmirnyh BPLA" [State of the art and problems of defeat of low, slow and small unmanned aerial vehicles], *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, No. 1(31), pp. 121-131.

5. Liao, K., Gui, G., Chen, Z. and Yang, W. (2011), High resolution range profile based extraction of radar target length, *International Journal of the Physical Sciences*, No. 6(23), pp. 5503-5510. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.461>.

6. Wang, Y., Feng, C., Zhang, Y. and He, S. (2019), Space Precession Target Classification Based on Radar High-Resolution Range Profiles, *International Journal of Antennas and Propagation*, pp. 1-9, available at: www.hindawi.com/journals/ijap/2019/8151620/.

7. Vasyuta, K.S. (2013), "Razvitie metodov radiolokatsionnogo raspoznavaniya vozduschnykh tselei s primeneniem rekurrentnogo analiza" [Development of air targets radar recognition methods using recurrent analysis], *Information Processing Systems*, No. 7(114), pp. 55-57.

8. Vasyuta, K.S. (2012), "Klasifikatsiya protsesov v infokomunikatsionnykh radiotekhnicheskikh sistemah s primeneniem BDS-statistiki" [Classification of processes in the infocommunication radio engineering systems using BDS-statistics], *Problems of Telecommunications*, No. 4(9), pp. 63-71, available at: www.nbu.gov.ua/UJRN/prtel_2012_4_7.

9. Akintunde, M.O., Oyekunle, J.O. and Olalude, G.A. (2015), Detection of Non-Linearity in the Time Series Using BDS Test, *Science Journal of Applied Mathematics and Statistics*, No. 4(3), pp. 184-187, available at: www.sjams.org/article?journalid=149&doi=10.11648/j.sjams.20150304.13.

10. Vasyuta, K.S. and Zots, F.F. (2013), "Algoritm otsenki vremeni zapazdyvaniya haoticheskogo signala otrazhennogo ot tseli s primeneniem BDS-statistiki v radiolokatsionnykh sistemah" [Algorithm for estimating the delay time of chaotic signal reflected from the target using BDS-statistics in radar systems], *Information Processing Systems*, No. 5(112), pp. 17-21.

11. Baranski, K., Gutman, Y. and Spiewak, A. (2018), A probabilistic takens theorem, *Dynamical Systems*, No. 1, pp. 1-25, available at: www.arxiv.org/abs/1811.05959.

12. Sukharevsky, O.I., Zalevsky, G.S. and Vasilets, V.A. (2016), Modeling of Ultrawideband (UWB) Impulse Scattering by Aerial and Subsurface Resonant Objects Based on Integral Equation Solving, *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications*, Vol. 5, pp. 195-235. <https://doi.org/10.1201/9781315374130>.

13. Zalevsky, G.S., Sukharevsky, O.I., Vasilets, V.A. and Surgai, M.V. (2019), Estimation of Radar Scattering Characteristics of Artillery Shells in Meter, Decimeter and Centimeter Wavelength Ranges, *Radioelectronics and Communications Systems*, No. 7(62), pp. 356-367. <https://doi.org/10.3103/S0735272719070033>.

Надійшла до редколегії 19.07.2019

Схвалена до друку 10.09.2019

Відомості про автора:

Зоц Федір Федорович

кандидат технічних наук
старший викладач
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6070-2862>

Information about the author:

Fedir Zots

Candidate of Technical Sciences
Senior Instructor
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6070-2862>

ПРИМЕНЕНИЕ BDS-СТАТИСТИКИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ ПО ДАЛЬНОСТНЫМ ПОРТРЕТАМ

Ф.Ф. Зоц

Набор известных методик анализа дальностных портретов воздушных целей для их распознавания может быть дополнен нелинейным анализом временных рядов. Одним из эффективных методов выявления зависимости значений временных рядов является BDS-статистика. В работе предложено для распознавания классов (типов) воздушных целей применение BDS-теста, который является инструментом для выявления меры зависимостей в наблюдаемых процессах. Дальностный портрет цели или принятый эхо-сигнал следует анализировать, как временной ряд, который можно формализовать, пользуясь следующей последовательностью преобразований: эхо-сигнал или дальностный портрет цели; зависимость значений во времени; диапазон значений BDS-статистики; тип цели. Получена зависимость значений BDS-статистики для дальностных портретов (эхо-сигналов) крылатых ракет (AGM-86C и Taurus KEPD 350) и артиллерийских снарядов (системы "Град" калибра 122 мм и ОФ25 калибра 152 мм) в зависимости от ракурса целей при вертикальной и горизонтальной поляризации. Значения BDS-статистики пропорциональны размерам

и сложности формы цели, которая проявляется в структуре эхо-сигнала при условии сверхразрешения. Проведен сравнительный анализ результатов расчета значений BDS-статистики для дальностных портретов и эхо-сигналов воздушных целей. Значения BDS-статистики при горизонтальной поляризации сильно зависят от ракурса цели, что усложняет распознавание, так как диапазоны значений BDS-статистики перекрываются. Показано, что при вертикальной поляризации рассчитанные значения BDS-статистики для эхо-сигналов каждой цели соответствуют конкретному диапазону, который дает возможность осуществлять распознавание типов целей независимо от ракурса. Особенным и неоднозначным в отдельных случаях является боковой ракурс цели $\beta = 90^\circ$, но даже при таких условиях можно осуществлять распознавание целей на основе расчета значений BDS-статистики. Результаты работы могут быть использованы при разработке алгоритмов распознавания классов (типов) воздушных целей в радиолокационных системах, в которых применяются сверхширокополосные сигналы.

Ключевые слова: распознавание воздушных целей, дальностный портрет, эхо-сигнал, BDS-статистика.

APPLICATION OF BDS-STATISTICS FOR RECOGNITION OF AIR TARGETS BY THE RANGE PROFILES

F. Zots

The known methods of analysis range profile aerial targets for their recognition can be complemented by nonlinear time series analysis. One of the effective methods of detecting the dependence of time series values is the BDS-statistics. In the work proposed for the recognition of classes (types) of aerial targets application of the BDS test, which is a tool for identifying measures of dependencies in the observed process. Range profile of the target or the reflected signal should be analyzed as a time series, which can be formalize using the following sequence of transformations: reflected signal or range profile of the target; dependence of values over time; range of values of BDS statistics; type of target. The dependence of the BDS statistics for range profiles (reflected signals) of cruise missiles (AGM-86C and Taurus KEPD 350) and artillery shells ("Grad" systems of caliber 122 mm and OF25 caliber 152 mm) is obtained depending on the angle of targets with vertical and horizontal polarization. The values of BDS statistics are proportional to the size and complexity of the shape of the target, which manifests itself in the structure of the reflected signal under the condition of High-Resolution. A comparative analysis of the results of calculating the values of BDS statistics for range profiles and reflected signals of air targets is carried out. The values of BDS statistics with horizontal polarization strongly depend on the aspect angle of the target, which complicates the recognition, since the ranges of the values of BDS statistics overlap. It is shown that with vertical polarization, the calculated values of the BDS statistics for the reflected signals of each target correspond to a specific range, which makes it possible to recognize target types regardless of the aspect angle. The lateral aspect angle of the target $\beta = 90^\circ$ is special and ambiguous in some cases, but even under such conditions, it is possible to recognize targets based on the calculation of BDS statistics. The results of the work can be used in the development of recognition algorithms for classes (types) of air targets in radar systems in which ultra wideband signals are used.

Keywords: air target recognition, range profiles, reflected signal, BDS-statistics.