

В. О. Чмельов¹
О. В. Терещенко¹
М. В. Олійник¹

СПОСІБ ДЕКОРЕЛЯЦІЇ СИГНАЛІВ ПАСИВНИХ ЗАВАД В СИСТЕМІ СЕЛЕКЦІЇ РУХОМИХ ЦІЛЕЙ МАЛОЇ ШВИДКОСТІ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Широкий спектр малорозмірних безпілотних літальних апаратів, які мають можливість зависати у просторі, рухатися з малою швидкістю та на малих висотах, викликав появу нового класу складних радіолокаційних об'єктів. Зі свого боку це дало поштовх розробці нових радіолокаційних станцій, а точніше їхніх основних вузлів, таких як система селекції рухомих цілей малої швидкості. Її основне призначення — виокремлювати рухомі радіолокаційні об'єкти (безпілотні літальні апарати) на фоні пасивних завад, таких як: дерево, стовп, земляна поверхня, гідро- та метеоутворення тощо.

У статті проведено аналіз досліджень та публікацій, в яких показані підходи до розв'язання поставленої задачі. Розглянуто класичний підхід до реалізації системи селекції рухомих цілей на основі цифрового режекторного фільтра першого та другого порядку. Зазначено його переваги та недоліки. Запропоновано новий спосіб боротьби з пасивними завадами в радіолокаційній станції за допомогою дискретного перетворення Карунена–Лоева (Karhunen–Loève transform), на якому базується метод головних компонент аналізу даних (principal component analysis), що використовується для зменшення розмірності набору даних, зберігаючи при цьому максимальну енергію (інформацію) сигналу відбитого від рухомої цілі, під час вилучення інформації про нерухомі об'єкти (стиснення даних). Наведено алгоритм побудови системи селекції рухомих цілей малої швидкості. Досліджено та проілюстровано результат роботи такої системи на основі запропонованого способу та класичного підходу. Проведено порівняльний аналіз впливу системи селекції рухомих цілей на потужність ехо-сигналу цілі. Побудовано залежність потужності ехо-сигналу цілі від її швидкості для запропонованого способу селекції рухомих цілей. Проаналізовано ефективність роботи системи селекції рухомих цілей малої швидкості.

Ключові слова: черезперіодний компенсатор, система селекції рухомих цілей, перетворення Карунена–Лоева, метод головних компонент, власні числа, пасивна перешкода, цифрова обробка сигналів.

Вступ

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стало одним з основних джерел небезпеки для об'єктів критично-важливої інфраструктури. Широкий спектр моделей сучасних БПЛА, викликав появу нового класу складних радіолокаційних об'єктів, виявлення яких ускладнене через їхні малі розміри, малу швидкість руху та використання радіопрозорих матеріалів [1].

Тактика застосування БПЛА характеризується використанням апаратів на малих висотах та на фоні місцевих предметів. Можливість різкої зміни напрямку, швидкості руху, зависанням в просторі дуже ускладнює роботу наявних радіолокаційних систем (РЛС) щодо виявлення БПЛА, зокрема систему селекції рухомих цілей.

Метою роботи є визначення підходів до розв'язання задачі щодо створення системи селекції рухомих цілей (СРЦ), яка на відміну від наявних методів зможе відділити нерухомі об'єкти від радіолокаційних об'єктів, що рухаються з малою швидкістю 1...2 м/с. Показати працездатність системи на основі запропонованого способу. Новизною підходу є застосування перетворення Карунена–Лоева для декореляції радіолокаційних сигналів у системі селекції рухомих цілей у разі виявлення цілей з малою швидкістю.

Система селекції рухомих цілей

Показана вище задача є актуальним предметом наукової діяльності розробників сучасних радіолокаційних систем. Існують різні підходи до побудови ефективних систем СРЦ, які здатні виявляти цілі з малою швидкістю [1]. Запропоновано розв'язання задачі за допомогою дискретного перетворення Карунена–Лоева. Цей метод використовується для розв'язання задачі щодо виявлення малорозмірних цілей [2].

Важливою складовою будь-якої РЛС є система селекції рухомих цілей (СРЦ), основне призначення якої у виділенні рухомих об'єктів на фоні пасивних завад. У системі селекції рухомих цілей цифровий режекторний фільтр виконує основну функцію подавлення (режекції) перешкод і повинен забезпечувати пропускання корисного сигналу у всьому динамічному діапазоні доплерівських частот [3].

Відповідно амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) режекторного фільтра $H(\omega)$ повинна бути обернена до енергетичного спектра перешкоди та при цьому мати максимальний коефіцієнт передачі в динамічному діапазоні доплерівських частот сигналів рухомих об'єктів.

Прикладом нерекурсивного режекторного фільтра може бути схема черезперіодного компенсатора (ЧПК) перешкоди. Через простоту реалізації він використовується в сучасних системах селекції рухомих цілей, але ЧПК не забезпечує ефективного виявлення цілей з малою швидкістю.

Розглянемо фільтр на основі однократного ЧПК [4], схема якого показана на рис. 1, а АЧХ зображена суцільною лінією на рис. 2. Отже, ЧПК1 має один нуль в точці $z_0 = 1$, а АЧХ має порівняно невелику зону режекції та нерівномірний коефіцієнт передачі (рис 2).

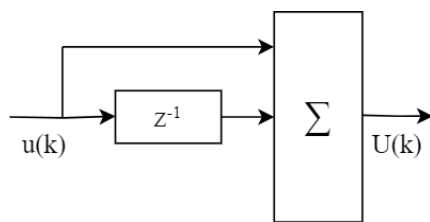


Рис. 1. Схема цифрового режекторного фільтра на основі однократного ЧПК

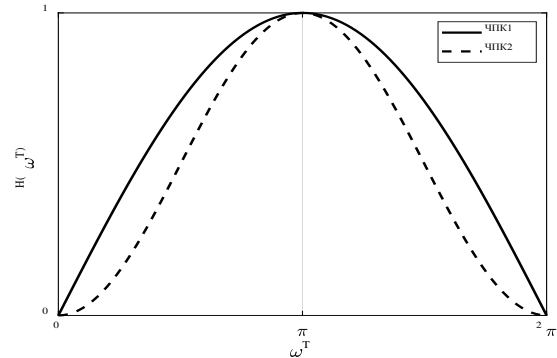


Рис. 2. АЧХ режекторних фільтрів ЧПК1 та ЧПК2

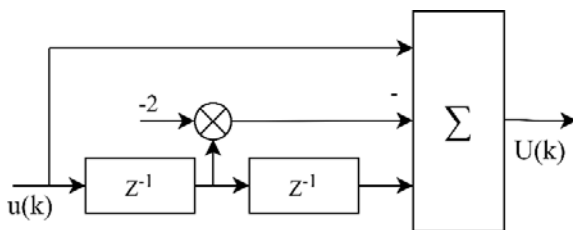


Рис. 3. Схема цифрового режекторного фільтра на основі двократного ЧПК

Для поліпшення АЧХ режекторного фільтра розглянемо двократний ЧПК2, схема якого показана на рис. 3.

Зображений фільтр має розширену полосу режекції перешкоди (рис. 2.). Однак, нерівномірність АЧХ в діапазоні доплерівських частот залишається, а коефіцієнт передачі має максимальне значення лише для об'єктів з великою швидкістю, таких як літак, ракета.

Унаслідок підвищення порядку компенсатора вдається підвищити ефективність подавлення пасивної завади, але через нерівномірність АЧХ не забезпечує найкращих умов для проходження радіолокаційного сигналу відбитого від дрону або іншої малорухомої цілі. Тому жоден з цих фільтрів не може вирішити проблему щодо виділення малошвидкісної цілі на фоні пасивної перешкоди.

Рішенням може бути використання способу декореляції (відбілення), сигналів пасивних завад, в системі селекції рухомих цілей малої швидкості, на основі дискретного перетворення Карунена–Лоева.

Система селекції рухомих цілей на основі дискретного перетворення Карунена–Лоева

Перетворення Карунена–Лоева використовується в процесі оброблення зображень та для їхнього стиснення [2].

Теорема Карунена–Лоева — це розкладання випадкового процесу у вигляді нескінченної лінійної комбінації ортогональних функцій, що є аналогом розкладання функції в ряд Фур'є на обме-

женому інтервалі. Це розкладання тісно пов'язане з методом головних компонент, який широко використовується в аналізі даних. Якщо розглядати стохастичний процес як випадкову функцію F , тобто процес, в якому функція на інтервалі $[a, b]$ набуває значення F , то ця теорема може розглядатися як випадкове ортонормоване розкладання F .

Важливість теореми Карунена–Лоева полягає в тому, що вона дає найкращий базис у сенсі мінімізації середньої квадратичної помилки.

На відміну від ряду Фур'є, де коефіцієнти є фіксованими числами і базис складається з періодичних гармонічних функцій (синуса та косинуса), коефіцієнти в теоремі Карунена–Лоева є випадковими величинами, а базис розкладання залежить від процесу. Фактично, ортогональні базисні функції, що використовуються в цьому розкладанні, визначаються коваріаційною функцією процесу.

Математична модель радіолокаційного сигналу

$$S(t) = S_0(t) + S_1(t) + n(t),$$

де $S_0(t)$ — зондувальний сигнал, відбитий від нерухомого об'єкта, $S_1(t)$ — ехо-сигнал рухомої цілі, $n(t)$ — гауссівський шум на вході приймача.

Математичне очікування шумового сигналу дорівнює нулю.

Після попередньої обробки, сигнал стає дискретизованим набором відліків X_1, X_2, \dots, X_n , таким чином отримуємо сигнал, представлений у вигляді вектора $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ [2].

Коли стохастичний процес скінченний і дискретизований, це випадковий вектор, що складається з N випадкових величин $x = [x[0], \dots, x[N-1]]^T$. Значимо, що сигнал центрований з $\mu_x = 0$, а його коваріаційна матриця $\Sigma_x = E(xx^*)$ з mn елементами $\sigma_{mn}^2 = e(x[m]\bar{x}[n]) = \langle x[m], x[n] \rangle$ [5].

Оскільки Σ_x визначена та Ермітова, всі її власні значення λ_k реальні та позитивні, а власні вектори $\phi_k = (k = 0, \dots, N-1)$ утворюють набір ортогональних базисних векторів, що охоплюють векторний простір N -розмірності. Будь-який випадковий вектор заданий в N -розмірному просторі може бути представлений як комбінація цих базисних векторів.

Нехай $\phi_k = (k = 0, \dots, N-1)$ — власний вектор, що відповідає власному значенню λ_k коваріаційної матриці Σ_x , тоді

$$\Sigma_x \phi_k = \lambda_k \phi_k, \quad (1)$$

де $k = 0, \dots, N-1$

Оскільки Σ_x Ермітова та позитивно визначена, всі її власні значення $\lambda_k > 0$ реальні та позитивні. При цьому N власних векторів ортогональні, $\langle \phi_k, \phi_l \rangle = \delta[k-l]$, де $k = 0, \dots, N-1$, та формують $N \times N$ унітарну матрицю $\Phi = [\phi_0, \dots, \phi_{N-1}]$, що задовольняє $\Phi^{-1} = \Phi^*$ та $\Phi^* \Phi = \Phi \Phi^* = I$. N власних виразів (1) об'єднаємо

$$\Sigma_x \Phi = \Sigma_x [\phi_0, \dots, \phi_{N-1}] = [\phi_0, \dots, \phi_{N-1}] \begin{bmatrix} \lambda_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_{N-1} \end{bmatrix} = \Phi \Lambda, \quad (2)$$

де $\Lambda = \text{diag}(\lambda_0, \dots, \lambda_{N-1})$ діагональна матриця. Домножимо на $\Phi^* = \Phi^{-1}$ з обох сторін, коваріаційна матриця Σ_x стане діагональною [5].

$$\Phi^* \Sigma_x \Phi = \Phi^* \Phi \Lambda = \Lambda. \quad (3)$$

Дискретне перетворення вектора X можемо записати так:

$$X = \begin{bmatrix} X[0] \\ \vdots \\ X[N-1] \end{bmatrix} = \Phi^* x = \begin{bmatrix} \phi_0^* \\ \vdots \\ \phi_{N-1}^* \end{bmatrix} x, \quad (4)$$

де k -й компонент $X[k]$ вектора X в області перетворення — це проекція x на k -й базисний вектор ϕ_k

$$X[k] = \phi_k^* x = \langle x, \phi_k \rangle. \quad (5)$$

Завдяки декореляції сигналу та ущільненню енергії, перетворення Карунена–Лоева можна використовувати для зменшення розмірності набору даних, зберігаючи при цьому максимальну енергію (інформацію) сигналу відбитого від рухомої цілі, під час вилучення інформації про нерухомі об'єкти (стиснення даних). Компоненти сигналу $X[k]$ після перетворення Карунена–Лоева називаються головними компонентами, а метод аналізу даних на його основі є методом головних компонент. Щоб перейти до методу головних компонент, оцінимо коваріаційну матрицю вектора X , та знайдемо усі N власних значень. Сигнали, дисперсія яких мінімальна, будуть мати найменше значення власних чисел. Така характеристика притаманна сигналам відбитим від нерухомих радіолокаційних об'єктів (пасивні завади). Відсортуємо значення власних чисел λ в порядку зменшення

$$\lambda_0 \geq \dots \geq \lambda_{N-1}. \quad (6)$$

Визначимо зменшену розмірність $M < N$ так, щоб частка енергії

$$\frac{\sum_{n=0}^{M-1} \lambda_n}{\sum_{n=0}^{N-1} \lambda_n} \geq T \quad (7)$$

була б не меншою за попередньо визначене порогове значення T (наприклад, 99 %). Тепер побудуємо матрицю перетворення (8) розміром $N \times M$, що складається з M власних векторів, які відповідають M найбільшим власним значенням $\lambda_0, \dots, \lambda_{M-1}$ коваріаційної матриці Σ_x

$$\Phi_M = [\phi_0, \dots, \phi_{M-1}]_{N \times M}. \quad (8)$$

Виконаємо перетворення Карунена–Лоева на основі Φ_M

$$X_M = \begin{bmatrix} X[0] \\ \vdots \\ X[M-1] \end{bmatrix}_{M \times 1} = \Phi_M^* x = \begin{bmatrix} \phi_0^* \\ \vdots \\ \phi_{M-1}^* \end{bmatrix}_{M \times N} \begin{bmatrix} x[0] \\ \vdots \\ x[N-1] \end{bmatrix}_{N \times 1}, \quad (9)$$

де k -й елемент X_M , це $X[k] = \phi_k^* x = \langle x, \phi_k \rangle$.

Оскільки розмірність M вектора X_M менша за розмірність N вектора X , досягається стиснення даних. Це метод стиснення з визначеним мінімальним значенням втрати енергії $\sum_{k=M}^{N-1} \lambda_k$. Оскільки λ_k є найменшими власними значеннями, то втрати при зворотному перетворенні мінімальні.

Виконаємо зворотне перетворення Карунена–Лоева (10), та отримаємо набір оброблених ехо-сигналів з декорельованими (відбіленими) сигналами від пасивних завод.

$$x = \Phi X = [\phi_0, \dots, \phi_{N-1}] \begin{bmatrix} X[0] \\ \vdots \\ X[N-1] \end{bmatrix} = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \phi_k. \quad (10)$$

Таким чином, застосування запропонованого способу для обробки радіолокаційних сигналів, забезпечує виявлення цілей з малою швидкістю на фоні декорельованих сигналів від пасивних завод. У випадку зупинки (зависання) цілі вона буде сприйматися системою СРЦ як пасивна завада, а ехо-сигнал від неї буде декорельований. У разі відновлення руху цілі, на швидкості 1 м/с вона системою буде виявлена.

Аналіз отриманих результатів

В моделі роботи РЛС малої дальності використано запропонований спосіб декореляції сигналів пасивних завод в системі селекції рухомих цілей малої швидкості. Під час формування заводо-цільової обстановки створено три цілі, одна з яких нерухома. Застосовано некогерентний накопичувач ехо-сигналів $M = 20$. Перша ціль рухається зі швидкістю 1 м/с на відстані 655 метрів; друга ціль з нульовою швидкістю — пасивна перешкода, на відстані 1200 м; третя ціль — зі швидкістю 20 м/с на відстані 200 м. Потужність прийнятих ехо-сигналів сигналів -57 dB; $-68,7$ dB; $-75,6$ dB відповідно. Побудовано доплерівську карту дальність-швидкість роботи РЛС без застосування системи СРЦ (рис. 4).

Подано роботу класичних підходів, щодо реалізації системи селекції рухомих цілей, таких як,

ЧПК першого та другого порядку. На рис. 5 показано результат роботи системи селекції рухомих цілей на основі однократного ЧПК.

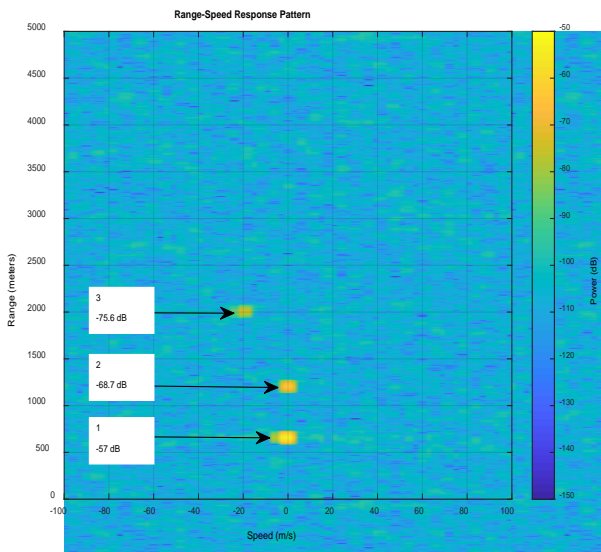


Рис. 4. Карта дальність-швидкість з вимкненою системою СРЦ

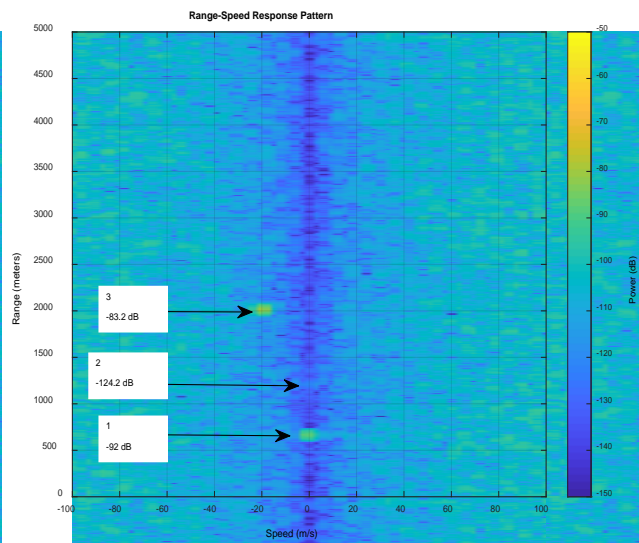


Рис. 5. Карта дальність-швидкість з системою СРЦ на основі ЧПК першого порядку

За результатами роботи ЧПК першого порядку рис. 5, сигнал пасивної завади придушений на 55,5 dB, але за рахунок нерівномірності АЧХ режекторного фільтра, що показано на рис. 2, спостерігаємо зменшення рівня сигналу другої цілі на 4,6 dB, а особливо зменшення рівня сигналу від першої, малошвидкісної, цілі на 35 dB.

Результати роботи системи СРЦ, на основі ЧПК2 з амплітудно-частотною характеристикою режекторного фільтра наведеного на рис. 2, показано на рис. 6. Режекторний фільтр, що лежить в основі зазначеної СРЦ, має ширшу смугу режекції в порівнянні з ЧПК1. Внаслідок чого, разом з пасивною завадою, система придушує ехо-сигнал малошвидкісної цілі, до $-112,3$ dB. Таким чином, радіолокаційна станція не зможе виявити цю малошвидкісну ціль (див. рис. 6).

Результати моделювання роботи РЛС з системою СРЦ, в якій застосований запропонований спосіб декореляції сигналів від пасивних завод, показано на рис. 7. За описаним методом виконали перетворення Карунена–Лоева, перейшли до методу головних компонент та на його основі виконали декореляцію пасивних завод.

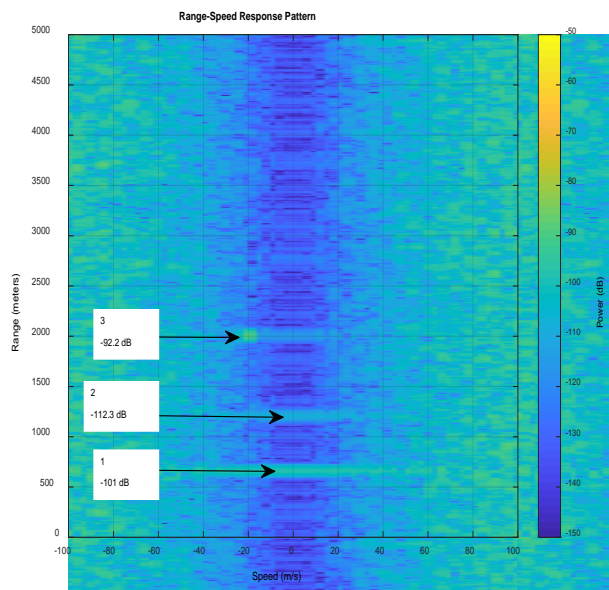


Рис. 6. Карта дальність-швидкість з системою СРЦ на основі ЧПК другого порядку

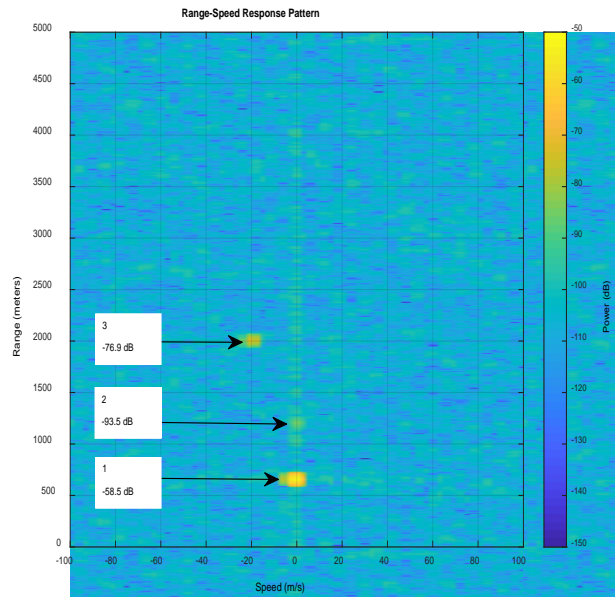


Рис. 7. Карта дальність-швидкість з системою СРЦ на основі запропонованого способу

За допомогою способу декореляції на основі перетворення Карунена–Лоева, рівень потужності сигналу від пасивної завади зменшився на 24,8 dB (до рівня $-93,5$ dB), з мінімальним впливом на ехо-сигнал малошвидкісної цілі, а саме на 1,5 dB. Що на 33,5 dB краще у порівнянні з результатами роботи класичної системи СРЦ на основі ЧПК. Потужність ехо-сигналу третьої цілі зменшилася всього на 1,3 dB.

На основі запропонованого методу досліджено вплив системи СРЦ на рівень потужності ехо-сигналу рухомої цілі та отримано, так звану, амплітудно-частотну характеристику системи, показану на рис. 8.

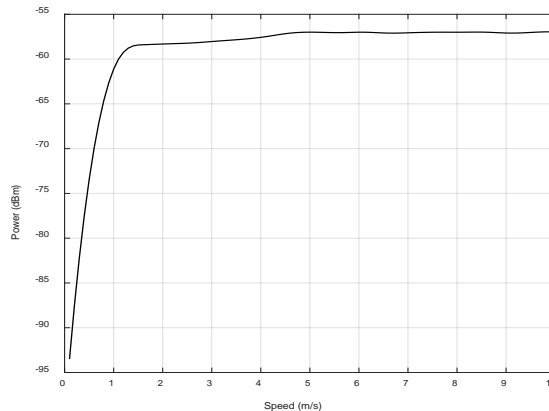


Рис. 8. Вплив системи СРЦ на рівень потужності ехо-сигналу рухомої цілі

Таким чином, РЛС здатна ефективно виявити рухомі цілі, швидкість яких більша 1 м/с.

Висновки

За результатами дослідження ефективності роботи системи селекції рухомих цілей малої швидкості на основі запропонованого способу декореляції сигналів пасивних завад з використанням методу Карунена–Лоева та методу головних компонент дійшли висновку, що забезпечується ефективно виявлення цілей зі швидкістю більше 1 м/с на фоні пасивних завад від нерухомих об'єктів. Коефіцієнт придушення сигналів від пасивних завад становив не менше 24 dB. В подальшому, будуть проведені дослідження роботи системи СРЦ в складніших умовах завадо-цільової обстановки. До того ж, здійснюватиметься робота щодо оптимізації параметрів запропонованої системи СРЦ, таких як рівень порогу для вилучення інформації про нерухомі об'єкти, проводитиметься оптимізація параметрів алгоритму стабілізації хибної тривоги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Д. І. Леховицький, В. П. Рябуха, Г. А. Жуга, Д. С. Рачков, и В. Н. Лаврентьев «СДЦ в импульсных РЛС: 6. Полунатурные исследования адаптивных систем МПО сигналов на фоне пассивных помех на основе адаптивных решетчатых фильтров,» *Прикладна радіоелектроніка*, ХНУРЕ, 2011.
- [2] V. Aristov, "Karhunen –Loeve transform as a tool to eliminate signal's redundancy, when small targets detection," *SCIENCES OF EUROPE*, 2016.
- [3] Mark A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, Second Ed., McGraw-Hill Education, 2014, 656 p.
- [4] Merrill I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, Second Ed., Published by McGraw Hill, NY, 1980, 581 p.
- [5] R. Wang, *Introduction to Orthogonal Transforms*, Cambridge University Press, 2012, 590 p.

Рекомендована кафедрою інфокомунікаційних систем і технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 14.03.2024

Чмельов Вячеслав Орійович — канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехнічних систем, e-mail: viacheslavchmelov@gmail.com ;

Терещенко Олександр Володимирович — аспірант кафедри радіотехнічних систем, e-mail: alexandr.t.v.188@gmail.com ;

Олійник Максим Віталійович — аспірант кафедри радіотехнічних систем, e-mail: oliinyk.ak@gmail.com .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

V. O. Chmelov¹
O. V. Tereshchenko¹
M. V. Oliinyk¹

Decorrelation Method for Passive Interference Signals in the Selection System of Slow-Moving Targets

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

The wide range of small unmanned aerial vehicles (UAVs) capable of hovering in space, moving at low speeds and at low altitudes, has led to the emergence of a new class of complex radar objects. This, in turn, has led to the development of new radar stations, specifically their main nodes, such as the system for selecting slow-moving targets. Its main purpose is to distinguish moving radar objects (UAVs) against the background of passive interference, such as trees, poles, the earth's surface, hydro and meteorological formations, and so on.

This article analyzes research and publications demonstrating the approaches to solving the stated problem. The classical approach to implementing a moving target selection system based on first and second-order digital rejection filters is considered. Its advantages and disadvantages are outlined. New method for combating passive interference in a radar station using the Karhunen-Loève transform, which forms the basis of the principal component analysis data analysis method, is proposed. This method is used to reduce the dimensionality of the data set while retaining maximum energy (information) from the signal reflected from the moving target, while extracting information about stationary objects (data compression). An algorithm for building a moving target selection system for slow-moving targets is provided. The results of the operation of the moving target selection system based on the proposed method and the classical approach are investigated and illustrated. A comparative analysis of the impact of the moving target selection system on the power of the target echo signal is conducted. The dependence of the power of the target echo signal on its speed for the proposed method of selecting moving targets is plotted. Conclusions are drawn regarding the effectiveness of the system for low speeds.

Keywords: interperiodic compensator, system for selecting moving targets, Karhunen-Loève transform, principal component method, eigenvalues, passive interference, digital signal processing.

Chmelov Viacheslav O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Radio Engineering Systems, e-mail: viacheslavchmelov@gmail.com ;

Tereshchenko Oleksandr V. — Post-Graduate Student of the Chair of Radio Engineering Systems, e-mail: alexandr.t.v.188@gmail.com ;

Oliinyk Maksym V. — Post-Graduate Student of the Chair of Radio Engineering Systems, e-mail: oliinyk.ak@gmail.com