

А.О. Романюк¹, М.М. Петрушенко²¹Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків²Військова академія, Одеса

МЕТОДИКА ОЦІНКИ І КІЛЬКІСНОГО ОПИСУ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАСТЕЙ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ВЕКТОРІВ РОЗСІЮВАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ

У статті показано, що одним із шляхів підвищення інформативності прийнятих радіолокаційних сигналів, у порівнянні з відомими, є застосування методу повного поляризаційного зондування. Зазначений метод дозволяє використовувати в якості ознак розпізнавання сам поляризаційний вектор розсіювання, в якому закладена сукупність властивостей об'єкта. Проведено аналіз досліджень і публікацій в області застосування методу повного поляризаційного зондування, який показав, що для вирішення задачі розпізнавання радіолокаційних об'єктів недостатньо вивчено питання оцінки параметрів області локалізації поляризаційного вектору розсіювання. Для вирішення даного питання були вивчені: поляризаційні властивості сигналів при повному поляризаційному зондуванні; геометрична інтерпретація і фізичний зміст області локалізації поляризаційного вектора розсіювання; розроблена методика оцінки та кількісного опису параметрів області локалізації поляризаційного вектора розсіювання радіолокаційних об'єктів. Отримані результати доцільно використовувати при модернізації існуючих або при створенні нових РЛС з метою розпізнавання радіолокаційних об'єктів.

Ключові слова: метод повного поляризаційного зондування, поляризаційний вектор розсіювання, поляризаційна матриця розсіювання, область локалізації, коваріаційно-поляризаційна матриця.

Вступ

Постановка проблеми. В даний час розвиток радіоелектронної техніки слід розглядати виходячи з перспектив модернізації засобів і сил повітряного нападу країн, з боку яких можливе застосування силових методів, а також концептуальних напрямів розвитку радіолокаційних систем. Тому необхідно вдосконалення радіолокаційних засобів в плані використання нових методів отримання і обробки локаційної інформації.

Одним з напрямків підвищення інформативності прийнятого сигналу є використання поляризаційних характеристик сигналів, котрі можуть бути отримані за рахунок використання методу повного поляризаційного зондування (ППЗ).

Метод ППЗ передбачає випромінювання двох ортогональних по структурі сигналів на двох ортогональних поляризаціях, з подальшим прийомом кожного сигналу на ортогональних поляризаціях [1–4].

Застосування методу ППЗ дозволяє використовувати в якості ознак розпізнавання поляризаційний вектор розсіювання (ПВР), в якому закладена сукупність властивостей об'єкта.

Наявність інформації про склад, клас, тип, стан і дії цілей в нальоті дозволяє реалізувати адаптивну систему ППО (рис. 1). У такій системі забезпечується [5]:

- раціональне призначення сил і засобів;
 - правильний вибір тактики дій;
 - адаптація параметрів зондування, систем обробки сигналів, контурів наведення, неконтактних детонаторів і бойових частин ЗУР;
 - першочергове знищення найбільш небезпечних та важливих цілей;
 - оперативні оцінки результатів стрільби і прийняття рішень на перенесення вогню;
 - селекція сигналів від природних об'єктів (птахів, гідрометеорів, неоднорідностей атмосфери – “ангелів”);
 - селекція хибних цілей, хибних “електронних” відміток, що відводять та імітують перешкоди і т.п.
- Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Використання ППЗ передбачає підвищення інформативності та перешкодозахищеності в порівнянні з відомими методами за рахунок [2–4]:
- використання багатовимірних (векторних) зондуючих сигналів, що відповідають задачі, яка вирішується;
 - спільної обробки компонентів векторів прийнятих сигналів;
 - врахування при обробці мінімально необхідної апріорної інформації про розсіюючі властивості об'єктів заданих класів цілей. Основні теоретичні та експериментальні результати, що склали основу методу ППЗ наступні [1–4; 6]:



Рис. 1. Зміст, шляхи та ефект використання інформації

– результати оцінки та дослідження параметрів законів розподілу ПВР об'єктів різних класів, а також векторних заважаючих сигналів на основі натурних даних, математичних і фізичних моделей;

– методи та пристрої генерування та випромінювання багатомірних зондуючих сигналів, прийому та обробки багатомірних відображених сигналів;

– варіанти алгоритмів виявлення, оцінки координат цілей заданих класів на фоні різних видів перешкод, включаючи підстилаючу поверхню.

Об'єктивні можливості для вирішення завдань по розпізнаванню радіолокаційних об'єктів можуть бути визначені на основі аналізу статистичних властивостей ПВР об'єктів. Статистичні властивості ПВР об'єктів можуть бути однозначно представлені певними характеристиками (параметрами) відповідних областей локалізації (ОЛ) ПВР об'єктів різної геометричної форми. Під ОЛ ПВР розуміється область початкового простору, всередині якої локалізується випадковий вектор [3–4].

З огляду на те, що відмінності ОЛ ПВР об'єктів являються передумовами для розпізнавання радіолокаційних об'єктів **метою статті** є методика оцінки і кількісного опису параметрів областей локалізації поляризаційних векторів розсіювання радіолокаційних об'єктів.

Виклад основного матеріалу

Визначення характеристик ОЛ ПВР можна проводити різними способами. Зокрема, можна аналітично визначити характеристики ОЛ ПВР різних об'єктів. Однак, аналітичний метод розрахунку може бути застосований для аналізу статистичних властивостей ПВР об'єктів, що мають просту геометричну форму, наприклад, тіл обертання (осьосиметричних об'єктів) [1; 3].

Для об'єктів більш складної форми такий аналіз на даний час не може бути проведений без використання експерименту або математичного моделювання [7–10]. Отримана в результаті цього інформація є основою для дослідження відмінностей статистичних властивостей ПВР радіолокаційних об'єктів різної геометричної форми.

1. Поляризаційні властивості сигналів при повному поляризаційному зондуванні

Для аналізу поляризаційних властивостей сигналів при повному поляризаційному зондуванні (ППЗ) розглянемо математичну модель ОЛ ПВР.

Під вхідним інформаційним вектором РЛС з ППЗ розуміється ПВР \dot{S} ,

$$\dot{S} = (\dot{s}_{11} \ \dot{s}_{21} \ \dot{s}_{12} \ \dot{s}_{22})^T = (\dot{s}_1 \ \dot{s}_2 \ \dot{s}_3 \ \dot{s}_4)^T, \quad (1)$$

де T – знак транспонування.

Комплексні елементи ПВР \dot{S} відповідають по-

ляризаційному вектору розсіювання (ПМР) \dot{S} , вимірюваному в деякому поляризаційному базисі [9–10]:

$$\dot{S} = \begin{pmatrix} |\dot{s}_{11}| \cdot e^{j\varphi_{11}} & |\dot{s}_{12}| \cdot e^{j\varphi_{12}} \\ |\dot{s}_{21}| \cdot e^{j\varphi_{21}} & |\dot{s}_{22}| \cdot e^{j\varphi_{22}} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де $|\dot{s}_{ik}|$ – модуль (амплітуда) елементу ПМР;

φ_{ik} – фаза елементу ПМР;

$i, k = 1, 2$.

Відповідність ПВР \dot{S} ПМР \dot{S} представлено наступним виразом:

$$\begin{pmatrix} \dot{s}_{11} \\ \dot{s}_{21} \\ \dot{s}_{12} \\ \dot{s}_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{s}_{11} & \dot{s}_{12} \\ \dot{s}_{21} & \dot{s}_{22} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

При використанні лінійного поляризаційного базису (ПБ) прийнято вважати [9–10], що елементи ПМР відповідають вимірювальному базису пристрою вимірювання елементів ПМР наступним чином:

$$\dot{s}_{11} = \dot{s}_{BB}; \ \dot{s}_{21} = \dot{s}_{GB}; \ \dot{s}_{12} = \dot{s}_{BG}; \ \dot{s}_{22} = \dot{s}_{GG},$$

де B, G – індекси, які відповідають вертикальній та горизонтальній поляризаціям, що становить лінійний ПБ, причому перший індекс відповідає поляризації сигналу на прийом, а другий на випромінювання.

Випадковий вектор \dot{S} повністю характеризується його функцією розподілу імовірностей або щільністю ймовірності. Однак, досить часто ці функції не можуть бути легко визначені або їх математичні вирази виявляються занадто складними для використання на практиці. Тому деколи краще скористатися не повними, але простіше обчислювальними характеристиками цього випадкового вектору \dot{S} в першому приближенні: вектора середніх значень $\dot{\mu}$ та його коваріаційно-поляризаційної матриці (КПМ) \dot{M} [11–16].

Відмітимо, що всі елементи випадкового вектору \dot{S} являються комплексними. Це справедливо для випадку вимірювання елементів ПМР з абсолютними фазами або квадратур її елементів, тобто так, як представлено в (2). Якщо ж елементи ПМР вимірюються з відносними фазами:

$$\dot{S} = \begin{pmatrix} |\dot{s}_{11}| \cdot e^{j\Delta\varphi_1} & |\dot{s}_{12}| \\ |\dot{s}_{21}| & |\dot{s}_{22}| \cdot e^{j\Delta\varphi_2} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де $\Delta\varphi_1 = \varphi_{11} - \varphi_{21}$, $\Delta\varphi_2 = \varphi_{22} - \varphi_{12}$ – відносні фази.

Важливим набором числових характеристик розподілу випадкового вектору є безліч елементів коваріаційної матриці, що характеризують дисперсії

розподілу і відповідні взаємні коваріації. Коваріаційна матриця комплексних складових визначається виразом [11–16]:

$$\dot{M} = \frac{1}{2} \left\langle \left(\dot{S} - \dot{\mu} \right) \cdot \left(\dot{S} - \dot{\mu} \right)^{T*} \right\rangle, \quad (5)$$

де $\dot{\mu} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \dot{S}_i$ – вектор середніх значень (математичне очікування компонентів ПВР \dot{S});

$\langle \dots \rangle$ – знак статистичного усереднення.

Вважаємо, що вимір елементів ПМР проводиться з абсолютними фазами і тому математичне очікування компонентів ПВР домовимося вважати рівними нулю, а їх закон розподілу – нормальним. Тому КПМ визначимо наступним чином:

$$\dot{M} = \frac{1}{2} \left\langle \dot{S} \cdot \dot{S}^{T*} \right\rangle. \quad (6)$$

Підставимо елементи ПВР \dot{S} згідно (1) і знайдемо КПМ \dot{M} :

$$\dot{M} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \langle \dot{S}_1 \cdot \dot{S}_1^* \rangle & \langle \dot{S}_1 \cdot \dot{S}_2^* \rangle & \langle \dot{S}_1 \cdot \dot{S}_3^* \rangle & \langle \dot{S}_1 \cdot \dot{S}_4^* \rangle \\ \langle \dot{S}_2 \cdot \dot{S}_1^* \rangle & \langle \dot{S}_2 \cdot \dot{S}_2^* \rangle & \langle \dot{S}_2 \cdot \dot{S}_3^* \rangle & \langle \dot{S}_2 \cdot \dot{S}_4^* \rangle \\ \langle \dot{S}_3 \cdot \dot{S}_1^* \rangle & \langle \dot{S}_3 \cdot \dot{S}_2^* \rangle & \langle \dot{S}_3 \cdot \dot{S}_3^* \rangle & \langle \dot{S}_3 \cdot \dot{S}_4^* \rangle \\ \langle \dot{S}_4 \cdot \dot{S}_1^* \rangle & \langle \dot{S}_4 \cdot \dot{S}_2^* \rangle & \langle \dot{S}_4 \cdot \dot{S}_3^* \rangle & \langle \dot{S}_4 \cdot \dot{S}_4^* \rangle \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Оскільки

$$\langle \dot{S}_i \cdot \dot{S}_k^* \rangle = \dot{\sigma}_{ik}^2, \quad (i, k = \overline{1, 4}), \quad (8)$$

то

$$\dot{M} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \dot{\sigma}_{11}^2 & \dot{\sigma}_{12}^2 & \dot{\sigma}_{13}^2 & \dot{\sigma}_{14}^2 \\ \dot{\sigma}_{21}^2 & \dot{\sigma}_{22}^2 & \dot{\sigma}_{23}^2 & \dot{\sigma}_{24}^2 \\ \dot{\sigma}_{31}^2 & \dot{\sigma}_{32}^2 & \dot{\sigma}_{33}^2 & \dot{\sigma}_{34}^2 \\ \dot{\sigma}_{41}^2 & \dot{\sigma}_{42}^2 & \dot{\sigma}_{43}^2 & \dot{\sigma}_{44}^2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \dot{\sigma}_{11}^2 & \dot{\sigma}_{12}^2 & \dot{\sigma}_{13}^2 & \dot{\sigma}_{14}^2 \\ \left(\dot{\sigma}_{12}^2 \right)^* & \dot{\sigma}_{22}^2 & \dot{\sigma}_{23}^2 & \dot{\sigma}_{24}^2 \\ \left(\dot{\sigma}_{13}^2 \right)^* & \left(\dot{\sigma}_{23}^2 \right)^* & \dot{\sigma}_{33}^2 & \dot{\sigma}_{34}^2 \\ \left(\dot{\sigma}_{14}^2 \right)^* & \left(\dot{\sigma}_{24}^2 \right)^* & \left(\dot{\sigma}_{34}^2 \right)^* & \dot{\sigma}_{44}^2 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Діагональними елементами коваріаційної матриці є дисперсії окремих випадкових величин, а недіагональні – коваріації пари випадкових величин \dot{S}_i і \dot{S}_k^* , причому $\dot{\sigma}_{ik}^2 = \left(\dot{\sigma}_{ki}^2 \right)^*$, тобто КПМ є ермітовою, а значить і позитивно визначеною [11–16].

Істотну інформацію про статистичні взаємозв'язки між елементами випадкового вектора несе кореляційна матриця \dot{K} , котра отримується шляхом

нормування елементів коваріаційної матриці за формулою:

$$k_{ik} = \frac{\dot{\sigma}_{ik}^2}{\sqrt{\dot{\sigma}_{ii} \cdot \dot{\sigma}_{kk}}}, \quad (i, k = \overline{1, 4}). \quad (10)$$

Тоді

$$\dot{K} = \begin{pmatrix} 1 & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{12}^* & 1 & k_{23} & k_{24} \\ k_{13}^* & k_{23}^* & 1 & k_{34} \\ k_{14}^* & k_{24}^* & k_{34}^* & 1 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Елементи КПМ відображають ступінь статистичного взаємозв'язку елементів вихідного випадкового вектора \dot{S} між собою. Іншими словами, елементи КПМ є характеристиками тісноти розподілу елементів випадкового вектора.

2. Геометрична інтерпретація та фізичний зміст областей локалізації поляризаційних векторів розсіювання

Визначимо початковий n -мірний ($n = 4$) комплексний поляризаційний простір КПП [12; 15–16] як простір, направляючі комплексні орти котрого $\dot{c}_1, \dot{c}_2, \dot{c}_3, \dot{c}_4$ ортонормовані, причому кожен із ортів відповідає визначеному комплексному елементу ПВР \dot{S} (1). Поставимо у відповідність ці комплексні орти комплексним елементам ПМР \dot{S} і ПВР \dot{S} відповідно:

$$\dot{c}_1^o \equiv \dot{s}_{11} \equiv \dot{s}_1; \quad \dot{c}_2^o \equiv \dot{s}_{21} \equiv \dot{s}_2;$$

$$\dot{c}_3^o \equiv \dot{s}_{12} \equiv \dot{s}_3; \quad \dot{c}_4^o \equiv \dot{s}_{22} \equiv \dot{s}_4.$$

Для такого 4-х-мірного початкового КПП приймемо позначення C^4 , або в загальному випадку C^n , так як приведені нижче судження справедливі для будь-якого n .

Маючи в своєму розпорядженні коваріаційну матрицю (5), можливо визначити ту область початкового простору, всередині якого локалізується випадковий вектор \dot{S} , компоненти якого розподілені нормально [15; 17]. Іншими словами, можна визначити параметри еліпсоїда розсіювання елементів випадкового вектора. Для цього використовуємо геометричну інтерпретацію багатовимірного нормального розподілу [15; 17].

Якщо вважати, що визначник КПМ не нульовий, тобто $|\dot{M}| \neq 0$, то виявиться можливим записати рівняння n -мірного еліпсоїда рівній щільності ймовірностей:

$$\left(\dot{S} - \dot{\mu} \right)^{T*} \cdot \dot{M}^{-1} \cdot \left(\dot{S} - \dot{\mu} \right) = d^2, \quad (12)$$

для будь-якого $d > 0$.

Вхідна в (12) матриця, зворотня до коваріаційної матриці \dot{M} , передбачає існування останньої. Якщо визначник КПМ дорівнює нулю, то в цьому випадку рівняння n -мірного еліпсоїда в КПП C^n записати не представляється можливим.

В силу принципу взаємності у суміщеній радіолокації можна вважати, що $\dot{s}_{12} \cong \dot{s}_{21}$ [1; 3]. У результаті два рядки і два стовбчики матриці \dot{M} будуть близькі між собою. Тому матриця \dot{M} буде погано обумовленою. Тоді значення ПВР \dot{S} будуть в основному локалізуватися у просторі меншої розмірності C^r , де r – ранг КПМ ($r < n$).

Область дискретних значень кожної зі складових незалежних в часі відліків поляризаційного вектора (ПВ) будемо описувати r -мірною ($r < 4$) щільністю розподілу $P(\dot{S})$, котру будемо вважати такою, яка наближається до нормального закону [15; 17]:

$$P(\dot{S}) = \left((2\pi)^r |\dot{M}| \right)^{-\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\dot{S} - \dot{\mu} \right)^{T*} \dot{M}^{-1} \left(\dot{S} - \dot{\mu} \right) \right\}, \quad (13)$$

де $\dot{\mu}$ – вектор середніх значень;

\dot{M}^{-1} – матриця, зворотня коваріаційно-поляризаційній матриці (КПМ) елементів ПВ;

r – ранг КПМ \dot{M} .

Як показано в [11], випадковий вектор \dot{S} , котрий не має розподілу в C^n , переводиться в підпростір меншої розмірності C^r :

$$\dot{S}_r = B^{T*} \left(\dot{S} - \dot{\mu} \right). \quad (14)$$

При цьому випадковий вектор \dot{S}_r являється r -мірним в r -мірному підпросторі C^r та його коваріаційна матриця \dot{M}_r уже не вироджена. Для нього вже може бути визначена щільність імовірності:

$$\dot{\mu} = \dot{B}\dot{\mu}_r; \quad \dot{M} = \dot{B}\dot{M}_r\dot{B}^{T*}. \quad (15)$$

За допомогою унітарного лінійного перетворення КПМ (9) можна представити у вигляді [11; 15; 17]:

$$\dot{M} = \dot{B} \cdot \Lambda \cdot \dot{B}^{T*}, \quad (16)$$

де Λ – матриця власних значень (чисел), розміщених в порядку убутання, тобто $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_n$, λ_i складають спектр матриці \dot{M} [13–14]:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_n \end{pmatrix}. \quad (17)$$

\dot{B} – матриця власних векторів КПМ \dot{M} , кожен із яких відповідає визначеному власному числу

$$\dot{B} = \begin{pmatrix} \dot{b}_1 & \dot{b}_2 & \dot{b}_3 & \dot{b}_4 \\ \dot{b}_{11} & \dot{b}_{12} & \dot{b}_{13} & \dot{b}_{14} \\ \dot{b}_{21} & \dot{b}_{22} & \dot{b}_{23} & \dot{b}_{24} \\ \dot{b}_{31} & \dot{b}_{32} & \dot{b}_{33} & \dot{b}_{34} \\ \dot{b}_{41} & \dot{b}_{42} & \dot{b}_{43} & \dot{b}_{44} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Тоді еліпсоїд розсіяння ПВР \dot{S} , або область локалізації сигналів можна визначити як r -мірний еліпсоїд ($r < n$) в КПП \dot{M} [15; 17].

Положення еліпсоїду в КПП \dot{M} визначають компоненти вектору математичного очікування $\dot{\mu}$, напрямлення його напіввісей у C^n визначають відповідні власні вектори матриці власних векторів \dot{B} , а розміри його піввісей будуть визначатися власними значеннями матриці \dot{M} [13–14]:

$$a_i = d \sqrt{\lambda_i}, \quad (19)$$

де d – число, що визначає ймовірність потрапляння координат випадкового вектора \dot{S} всередину такого еліпсоїда. Відомо, для одновимірного нормального закону розподілу правило 3σ (трьох сигм), згідно з яким ймовірність того, що випадкова величина x із законом розподілу $N(\mu_x; \sigma_x)$ не вийде за межі інтервалу $[\mu_x - 3\sigma_x; \mu_x + 3\sigma_x]$ рівна 0,997. При цьому можна стверджувати, що практично всі значення випадкової величини x локалізуються в зазначеному інтервалі [15; 17].

За аналогією з одновимірною випадковою величиною визначимо ОЛ багатовимірної випадкової величини \dot{S} , ймовірність попадання в яку дорівнює 0,997. При цьому число d в (12) буде визначатися в залежності від числа компонентів випадкового вектора \dot{S} (незалежних) n . Тим самим будуть визначені розміри півосей еліпсоїда, а отже, буде визначена ОЛ випадкового вектора \dot{S} в C^n , тобто ОЛ ПВР \dot{S} . На рис. 2 представлена геометрична інтерпретація ОЛ ПВР \dot{S} еліпсоїдом $\Omega'(\dot{S})$. Таке зобра-

ження ОЛ ПВР \dot{S} в тривимірному просторі (R3) може претендувати тільки на схематичність, так як з метою наочного геометричного показу проекції ОЛ ПВР \dot{S} на комплексні направляючі орти C^4 замінені відповідними їм дійсними проекціями на напрямні орти тривимірного дійсного простору R3. Звичайно, що при цьому частина відмінних ознак області локалізації буде загублена.

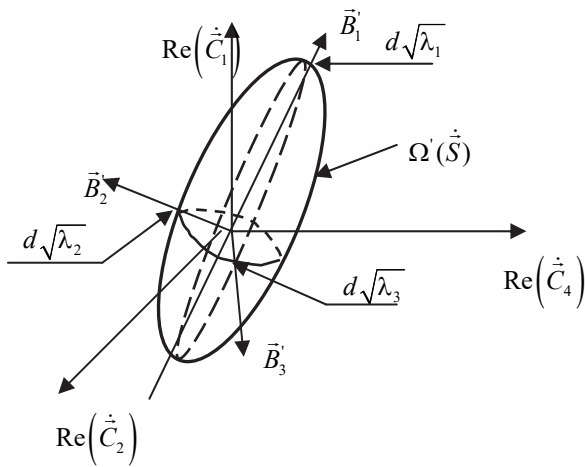


Рис.2. Геометрична інтерпретація області локалізації ПВР об'єкта

Фізичний сенс ОЛ ПВР \dot{S} полягає в тому, що розмірність, так само як і її форма, відображають ступінь статистичного взаємозв'язку окремих елементів ПВР \dot{S} між собою, тобто їх попарну корельованість.

Таким чином, геометрична інтерпретація і фізичний зміст ОЛ ПВР \dot{S} дозволяє відобразити основні статистичні властивості ПВР як випадкових векторів.

3. Методика оцінки та кількісного опису параметрів області локалізації поляризаційних векторів розсіювання радіолокаційних об'єктів

Для аналізу різних характеристик областей локалізації ПВР \dot{S} об'єктів різної форми необхідно визначити методику їх оцінки та кількісного опису. З (5) випливає, що форма, розмір і орієнтація деякого еталонного об'єкта визначається його КПМ \dot{M}_{u1} . Коваріаційно-поляризаційну матрицю іншої, порівняльної області позначимо як \dot{M}_{u2} .

В якості критерію оцінки відмінностей ОЛ ПВР використовуємо критерій J , сутність якого полягає в спільній оцінці як розкиду ПВР всередині ОЛ ПВР, так і оцінки відмінностей за формою, розмірністю та орієнтацією між цими областями.

Кількісним виразом цього критерію є функція від матриць \dot{M}_{u1} і \dot{M}_{u2} , що характеризують параметри ОЛ ПВР \dot{S} об'єктів [18–20]:

$$J = \left[1 - \frac{1}{n} Sp(\dot{M}_{u1} \dot{M}_{u2}^{-1}) \right] \cdot 100\%, \quad (20)$$

де n – розмірність КПМ.

Для оцінки близькості двох еліпсоїдів використовується відстань Махаланобіса [18–20]:

$$d_M = (\dot{\mu}_2 - \dot{\mu}_1)^* \dot{M}_\Sigma^{-1} (\dot{\mu}_2 - \dot{\mu}_1), \quad (21)$$

де $\dot{\mu}_1, \dot{\mu}_2$ – відомі різні середні ПВР \dot{S} ;

\dot{M}_Σ^{-1} – загальна середня КПМ.

Як показник просторових відмінностей двох областей локалізації використовується вектор $\dot{\Theta}$ комплексних кутів $\dot{\Theta}_i, (i = \overline{1, r})$ між відповідними власними векторами матриць власних векторів [15; 17]:

$$\dot{\Theta} = (\dot{\Theta}_1, \dot{\Theta}_2, \dot{\Theta}_3, \dot{\Theta}_4), \quad (22)$$

де $\dot{\Theta}_i$ – комплексний кут між ненульовими векторами \dot{b}_{iu1} і \dot{b}_{iu2}' :

$$\begin{aligned} \dot{\Theta}_i &= \arccos \left(\frac{\dot{b}_{iu1} \cdot \dot{b}_{iu2}'}{\|\dot{b}_{iu1}\| \|\dot{b}_{iu2}'\|} \right) = \\ &= -j \operatorname{Ln} \left(\frac{\dot{b}_{iu1} \cdot \dot{b}_{iu2}'}{\|\dot{b}_{iu1}\| \|\dot{b}_{iu2}'\|} + \sqrt{\left(\frac{\dot{b}_{iu1} \cdot \dot{b}_{iu2}'}{\|\dot{b}_{iu1}\| \|\dot{b}_{iu2}'\|} \right)^2 - 1} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

де (\dots, \dots) – знак скалярного добутку векторів;

$\operatorname{Ln}(\dots)$ – зворотнє відображення натуральної показової функції у всій комплексній площині.

Чим ближчі елементи вектора $\dot{\Theta}$ до $(0^\circ + j0^\circ)$, тим більша ступінь близькості розглянутих ОЛ, і навпаки, чим ближче до $(90^\circ + j0^\circ)$, тим більше відмінностей по орієнтації ОЛ ПВР в КПМ.

Для аналізу форми ОЛ ПВР використовується вектор процентних співвідношень кожного власного числа до її сліду і характеризує розподіл елементів поляризаційного вектору уздовж напрямних ортів ОЛ ПВР \dot{S} [18–20]:

$$\dot{P} = \frac{1}{Sp(\dot{M})} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{pmatrix} \cdot 100\%. \quad (24)$$

В КПМ центр цього еліпсоїда визначається компонентами вектора $\dot{\mu}$, напрямки його головних осей збігаються з власними векторами $\dot{b}_i, i = \overline{1, n}$, матриці власних векторів \dot{B} , довжини a_i напіввісей рівні $a_i = d\sqrt{\lambda_i}, i = \overline{1, n}$, де λ_i – власні числа КПМ M , котрі створюють спектральну матрицю Λ . У випадку, якщо $\operatorname{rang} \dot{M} = r < n$, можна отримати рівняння r -мірного еліпсоїда постійної щільності ймовірності, напрямки головних осей якого співпадуть з власними векторами $\dot{b}_i, i = \overline{1, n}$ матриці M , відповідним ненульовим власним значенням.

Вибираючи відповідним чином d , можна так задати розміри n -мірного (в загальному випадку) еліпсоїда, щоб ймовірність попадання випадкового вектора \dot{S} всередину еліпсоїда була не меншою заданої. Вважаючи цю задану ймовірність досить близькою до одиниці, можна отримати еліпсоїд, який може слугувати наближеною моделлю ОЛ ПВР \dot{S} [15; 17; 19].

Відмінності статистичних властивостей ПВР (або образів об'єктів в КПП), а значить, і самих об'єктів, що розрізняються розмірами і формою, при такому геометричному трактуванні поняття "області локалізації" набувають наочності та конкретного змісту.

Таким чином, геометрична інтерпретація ОЛ ПВР \dot{S} спільно з фізичним змістом визначає методику оцінки параметрів ОЛ ПВР радіолокаційних об'єктів складної форми. Ця методика включає:

- оцінку елементів вектору математичного очікування $\dot{\mu}$ та КПМ \dot{M} (5);
- визначення власних значень і власних векторів КПМ (16);
- аналіз залежності параметрів ОЛ ПВР \dot{S} від геометричних характеристик досліджуваних об'єктів, їх орієнтації в просторі;
- порівняння розмірності, орієнтації, розмірів і форми ОЛ ПВР \dot{S} різних об'єктів (19–23).

Висновки

Аналіз відомих досліджень показав, що використання поляризаційних характеристик сигналів для вирішення завдань виявлення та розпізнавання розглянуто не в повній мірі.

Одним із шляхів підвищення інформативності прийнятих радіолокаційних сигналів, по порівнян-

ню з відомими, є застосування методу повного поляризаційного зондування.

Метод ППЗ дозволяє використовувати в якості ознак розпізнавання сам ПВР, в якому закладено сукупність властивостей об'єкта.

Показано, що:

- елементи КПМ відображають ступінь статистичного взаємозв'язку елементів вихідного випадкового вектора \dot{S} між собою. Іншими словами, елементи КПМ являються характеристиками взаємозв'язку розподілу елементів випадкового вектору;

- фізична суть ОЛ ПВР \dot{S} заключається в тому, що розмірність, рівно як і її форма, відображають ні що інше, як ступінь статистичного взаємозв'язку окремих елементів ПВР \dot{S} між собою, тобто їх попарну корельованість.

Таким чином, геометрична інтерпретація ОЛ ПВР \dot{S} сумісно з фізичним змістом визначає методику оцінки параметрів ОЛ ПВР радіолокаційних об'єктів складної форми, яка включає:

- оцінку елементів вектору математичного очікування $\dot{\mu}$ і КПМ \dot{M} ;
- визначення власних значень і власних векторів КПМ;
- аналіз залежності параметрів ОЛ ПВР \dot{S} від геометричних характеристик досліджуваних об'єктів, їх орієнтації в просторі;
- порівняння розмірності, орієнтації, розмірів і форми ОЛ ПВР \dot{S} різних об'єктів.

Отримані результати доцільно використовувати при модернізації існуючих або при створенні нових РЛС з метою розпізнавання радіолокаційних об'єктів.

Список літератури

1. Спосіб вимірювання поляризаційної матриці розсіювання об'єкта: А.с. 98126624 Україна, МПК 6G01S7/36 /Храбростін Б.В., Кравченко А.И., Мартинчук О.О.(Україна). – № 98126624; Заявлено 02.03.99; Опубл. 07.08.99, Бюл. № 54.
2. Мартинчук О.О. Поляризаційно-просторова обробка сигналів на фоні активних шумових перешкод в радіолокаційних станціях з різними поляриметричними режимами обробки / О.О. Мартинчук, Г.М. Зубрицький, М.І. Рожков // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2009. – № 2(2). – С. 53-58.
3. Мартинчук О.О. Спосіб зниження максимальної похибки вимірювання елементів поляризаційної матриці розсіювання цілі / О.О. Мартинчук, І.С. Ряполов, С.А. Волвач // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 4(8). – С. 26-29.
4. Мартинчук О.О. Методика вибору поляризаційного режиму роботи радіолокаційного засобу розвідки повітряного простору в залежності від сигнально-завадової обстановки / О.О. Мартинчук, О.Д. Флоров, О.П. Гребенюк // Системи обробки інформації. – 2009. – № 2(76). – С. 68-71.
5. Слюсарь Н.М. Радиолокационное распознавание, контроль действий и состояний целей с использованием эффекта вторичной модуляции первые разработки и внедрения в вооружение ПВО [Электронный ресурс] / Н.М. Слюсарь // Наука и военная безопасность. – 2004. – № 2. – С. 36-40. Режим доступу: <http://militaryarticle.ru/nauka-i-voennaya-bezopasnost/2004/11884-radiolokacionnoe-raspoznovanie-kontrol-dejstvij-i>.
6. Казаков Е.Л. Радиолокационное распознавание космических объектов по поляризационным признакам / Е.Л. Казаков. – Одесса: ОИУМ, 1999. – 230 с.
7. Поздняк С.И. Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн / С.И. Поздняк, В.А. Мелитицкий. – М.: Сов.радио, 1973. – 278 с.
8. Родимов С.П. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех в линиях связи / С.П. Родимов, В.В. Поповский. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.

9. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин, В.Е. Дулевич – М.: Сов.радио, 1966. – 440 с.
10. Канарейкин Д.Б. Морская поляриметрия / Д.Б. Канарейкин, В.А. Потехин, И.Ф. Шишкин. – Л.: Судостроение, 1968. – 327 с.
11. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. Изд. / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин / Под ред. С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
12. Куликов Е.И. Методы измерения случайных процессов / Е.И. Куликов. – М.: Радио и связь, 1986. – 212 с.
13. Сухаревский И.В. Матричный анализ / И.В. Сухаревский. – Х.: ВИРТА, 1987. – 478 с.
14. Красногоров С.И. Матричный анализ в задачах отыскания экстремумов / С.И. Красногоров. – Ногинск: Научно-исследовательский центр 30 ЦНИИ МО, 1998. – 100 с.
15. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 760 с.
16. Гирко В.Л. Спектральная теория случайных матриц / В.Л. Гирко. – М.: Наука, 1988. – 376 с.
17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.
18. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов / К. Фукунага. – М.: Наука, 1979. – 387 с.
19. Либенсон М.Н. Автоматизация распознавания телевизионных изображений / М.Н. Либенсон, А.Я. Хесин, Б.А. Янсон. – М.: Энергия, 1975. – 160 с.
20. Фомин Я.А. Статистическая теория распознавания образов / Я.А. Фомин, Г.Р. Тарловский. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.

References

1. Khrabrostin, B.V., Kravchenko, A.I. and Martynchuk, O.O. (1999), “Sposib vimiryuvannya polyarizacijnoi matrici rozsiyuvannya obyektu”, [Method for measuring object's polarization scattering matrix]: A.s. 98126624 Ukraine, МРК 6G01S7/36 /, № 98126624; Claimed 02.03.99; Posted 07.08.99, Bulletin № 54.
2. Martynchuk, O.O., Zubrytskyi, H.M. and Rozhkov, M.I. (2009), “Polyarizacijno-prostorova obrobka signaliv na foni aktivnih shumovih pereshkod v radiolokacijnih stanciyah z riznimi polyarimetrichnimi rezhimami obrobki” [Polarization and spatial signal processing against the background of active noise interference in radar stations with different polarimetric modes], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 2(2), pp. 53-58.
3. Martynchuk, O.O., Ryapolov, I.Ye. and Voliuvach, S.A. (2006), “Sposib znyzhennia maksimalnoi pokhybky vymiryuvannya elementiv poliaryzatsiinoi matrytsi rozsiyuvannya tsili” [A method of reducing the maximum measurement error of the elements of the polarization matrix of the scattering of the target], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 4(8), pp. 26-29.
4. Martynchuk, O.O., Florov, O.D. and Hrebenuk, O.P. (2009), “Metodyka vyboru poliaryzatsiinoho rezhymu roboty radiolokatsiinoho zasobu rozvidky povitrianoho prostoru v zalezhnosti vid syhnalno-zavadovoi obstanovky” [Methods of choosing the polarization mode of operation of radar means of exploration of airspace depending on the signal-interference situation], *Information Processing Systems*, Vol. 2(76), pp. 68-71.
5. Sliusar, N.M. (2004), “Radiolokacionnoe raspoznavanie, kontrol' dejstvij i sostoyanij celej s ispol'zovaniem efekta vtorichnoj moduljacji pervye razrabotki i vnedreniya v vooruzhenie PVO” [Radar recognition, control of actions and state of targets using the effect of secondary modulation, the first development and implementation of air defense weapons], *Science and Military Security*, No. 2, pp. 36-40, available at: <http://militaryarticle.ru/nauka-i-voennaya-bezopasnost/2004/11884-radiolokacionnoe-raspoznavanie-kontrol-dejstvij-i>.
6. Kazakov, Ye.L. (1999), “Radiolokacionnoe raspoznavanie kosmicheskikh ob'ektov po polyarizacionnym priznakam” [Radar recognition of space objects by polarization features], OIUM, Odessa, 230 p.
7. Pozdnyak, S.I. and Melititsky, V.A. (1973), “Vvedenie v statisticheskuyu teoriyu polyarizacii radiovoln” [Introduction to the statistical theory of polarization of radio waves], Sov.radio, Moscow, 278 p.
8. Rodimov, S.P. and Popovsky, V.V. (1984), “Statisticheskaya teoriya polyarizacionno-vremennoj obrabotki signalov i pomekh v liniyah svyazi” [Statistical theory of polarization-time processing of signals and noise in communication lines], Radio and Communication, Moscow, 272 p.
9. Kanareikin, D.B., Pavlov, N.F., Potekhin, V.A. and Dulevich, V.E. (1966), “Polyarizaciya radiolokacionnyh signalov” [Radar Polarization], Sov.radio, Moscow, 440 p.
10. Kanareikin, D.B., Potekhin, V.A. and Shishkin, I.F. (1968), “Morskaya polyarimetriya” [Marine polarimetry], Sudostroenie, Leningrad, 327 p.
11. Ayvazyan, S.A., Buchstaber, V.M., Enyukov, I.S. and Meshalkin, L.D. (1989), “Prikladnaya statistika: Klassifikaciya i snizhenie razmernosti” [Applied Statistics: Classification and Dimension Reduction], Finance and Statistics, Moscow, 607 p.
12. Kulikov, E.I. (1986), “Metody izmereniya sluchajnyh processov” [Methods for measuring random processes], Radio and Communication, Moscow, 212 p.
13. Sukharevsky, I.V. (1987), “Metody izmereniya sluchajnyh processov” [Matrix analysis], VIRTА, Kharkiv, 478 c.
14. Krasnogorov, S.I. (1998), “Matrichnyj analiz v zadachah otyskaniya ekstremumov” [Matrix analysis in problems of finding extrema], Nauchno-issledovatel'skij centr 30 CNII MO, Noginsk, 100 p.
15. Korn, G. and Korn, T. (1970), “Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov” [Math reference book for scientists and engineers], Nauka, Moscow, 760 p.
16. Girko, V.L. (1988), “Spektral'naya teoriya sluchajnyh matric” [Spectral theory of random matrices], Nauka, Moscow, 376 p.
17. Ventcel, E.S. and Ovcharov, L.A. (1988), “Teoriya veroyatnostej i ee inzhenernye prilozheniya” [Probability Theory and Its Engineering Applications], Nauka, Moscow, 480 p.
18. Fukunaga, K. (1979), “Vvedenie v statisticheskuyu teoriyu raspoznavaniya obrazov” [Introduction to the statistical theory of pattern recognition], Nauka, Moscow, 387 c.
19. Libenson, M.N., Hесin, A.Ya. and Yanson, B.A. (1975), “Avtomatizaciya raspoznavaniya televizionnyh izobrazhenij” [Automation of recognition of television images], Energiya, Moscow, 160 p.

20. Fomin, Ya.A. and Tarlovskij, G.R. (1986), “Statisticheskaya teoriya raspoznavaniya obrazov” [Statistical Pattern Recognition Theory], Radio and Communication, Moscow, 264 p.

Надійшла до редколегії 14.05.2019

Схвалена до друку 18.06.2019

Відомості про авторів:

Романюк Алла Олександрівна
науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5882-6962>

Петрушенко Микола Миколайович
доктор технічних наук
професор кафедри Військової академії (Одеса),
Одеса, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2490-9572>

Information about the authors:

Alla Romaniuk
Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5882-6962>

Mykola Petrushenko
Doctor of Technical Sciences
Professor of the Department of Odessa Military Academy,
Odessa, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2490-9572>

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПИСАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ОБЛАСТЕЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ВЕКТОРОВ РАССЕЙЕНИЯ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ**

А.А. Романюк, Н.Н. Петрушенко

В статье показано, что одним из путей повышения информативности принятых радиолокационных сигналов, по сравнению с известными, является применение метода полного поляризационного зондирования. Указанный метод позволяет использовать в качестве признаков распознавания сам поляризационный вектор рассеяния, в котором заложена совокупность свойств объекта. Проведен анализ исследований и публикаций в области применения метода полного поляризационного зондирования, который показал, что для решения задачи распознавания радиолокационных объектов недостаточно остался изучен вопрос оценки параметров области локализации поляризационного вектора рассеяния. Для решения данного вопроса были изучены: поляризационные свойства сигналов при полном поляризационном зондировании; геометрическая интерпретация и физический смысл области локализации поляризационного вектора рассеяния; разработана методика оценки и количественного описания параметров области локализации поляризационного вектора рассеяния радиолокационных объектов. Полученные результаты целесообразно использовать при модернизации существующих или при создании новых РЛС с целью распознавания радиолокационных объектов.

Ключевые слова: метод полного поляризационного зондирования, поляризационный вектор рассеяния, поляризационная матрица рассеяния, область локализации, ковариационно-поляризационная матрица.

**METHOD OF ASSESSMENT AND QUANTITATIVE DESCRIPTION OF PARAMETERS
AREAS OF LOCALIZATION AREAS OF POLARIZATION VECTORS
RADIO LOCATION OBJECTS**

A. Romaniuk, M. Petrushenko

Nowadays, the development of electronic equipment should be considered from the perspective of modernization of means and forces of air attack of countries from which side it is possible to use force methods, as well as conceptual directions of development of the radar system. Therefore, it is necessary to improve radar facilities in terms of the use of new methods of obtaining and processing location information. One of the ways to increase the informativeness of the received signal is to use polarization signal processing, which can be attributed to the method of full polarization sounding. The full polarization sounding method involves the emission of two orthogonal signals in the structure at two orthogonal polarizations, followed by the reception of each signal at the coordinated and cross polarizations. With full polarization sounding, the radar maps the set of object properties to a set of signals, in particular, to the elements of the object's polarization scattering vector. The use of the method of full polarization probing makes it possible to use the polarization scattering vector itself, which contains the set of properties of the object, as recognition features. The article shows that one of the ways to increase the informativeness of received radar signals, in comparison with the known ones, is to use the method of full polarization sounding. This method allows to use as a recognition feature the polarization scattering vector, which contains the set of properties of the object. The analysis of studies and publications in the field of application of the method of full polarization sounding is carried out. Which showed that to solve the problem of recognition of radar objects remained insufficiently studied the question of estimating the parameters of the localization domain of the polarization scattering vector. To address this issue, the following were studied: polarization properties of signals with full polarization sounding; geometric interpretation and physical meaning of the localization domain of the polarization scattering vector; the method of estimation and quantitative description of parameters of the localization domain of the polarization scattering vector of radar objects has been developed. It is advisable to use the obtained results when upgrading existing radars or creating new radars in order to identify radar objects.

Keywords: full polarization sounding method, scattering polarization vector, scattering polarization matrix, localization region, covariance-polarization matrix.