

УДК 621.396.26

О.О. Мартинчук<sup>1</sup>, О.Д. Флоров<sup>1</sup>, О.П. Гребенюк<sup>2</sup>, С.А. Волювач<sup>1</sup><sup>1</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків<sup>2</sup>Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова, Житомир

## МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕН НА ВІДМІННОСТІ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАСТЕЙ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ВЕКТОРІВ СИГНАЛІВ ТА ЗАВАД

*Представлено методику аналізу впливу поляризаційних характеристик антен на відмінності параметрів областей локалізації поляризаційних векторів сигналів та активних шумових завад у задачі покращення виявлення цілі в складній завадовій обстановці.*

*діаграма спрямованості, повне поляризаційне зондування, поляризаційний вектор, активна шумова завада, поляризаційна характеристика, область локалізації, поляризаційна діаграма, поляризаційна матриця розсіювання, коваріаційно-поляризаційна матриця*

### Вступ

**Постановка задачі.** На даний час викликає інтерес розгляд питань, пов'язаних з підвищенням ефективності виявлення сигналів в умовах, коли випромінювання завад перекривають сигнал у частотній та часовій областях і діють як по основному променю діаграми спрямованості (ДС) антени, так і в напрямку бокових пелюсток. У цьому випадку доцільним є використання наряду з просторовими ще й поляризаційні відмінності між сигналом та завадами. Для підвищення ефективності поляризаційної обробки прийнятих сигналів доцільно застосовувати в РЛС повне поляризаційне зондування (ППЗ) [1]. ППЗ та обробка відбитого сигналу у вигляді поляризаційного вектора (ПВ) надає можливість виділити суттєві поляризаційно-статистичні відмінності між сигналом та завадою і використати їх для виявлення цілі на фоні навіть хаотично поляризованої активної шумової завади (АШЗ). Однак у відомих дослідженнях методу ППЗ отримано результати без врахування впливу поляризаційних характеристик (ПХ) антени. Дослідження даного питання є актуальним, оскільки ПХ антен у межах ДС не є сталими, а відхилення променя від геометричної осі антени та неточність при орієнтації променя в напрямку на ціль призводять до порушення поляризаційної структури поля в дальній зоні антени. Внаслідок цього неможливо уникнути помилок при визначенні параметрів та характеристик областей локалізації (ОЛ) ПВ [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Метод ППЗ припускає опромінення цілей складними ортогональними сигналами на ортогональних поляризаціях та повний поляризаційний прийом усіх складових відбитих сигналів. В основу методу покладено використання статистичних закономірностей розподілу у багатовимірному просторі ПВ об'єктів різних класів, а також ПВ АШЗ. Так, на основі теоретичних та експериментальних досліджень [2] встановлено, що поляризаційні вектори об'єктів заданого класу, пасивних завад або ПВ АШЗ з певними поля-

ризаційними параметрами локалізуються у відповідних  $g$ -площинах, які можуть відрізнитись розмірністю та положенням у поляризаційному  $n$ -вимірному просторі ( $g < n$ ). Тобто існують суттєві відмінності в розподілах ПВ об'єктів різної форми та ПВ завад.

Отримані при вирішенні задачі виявлення цілі на фоні АШЗ результати досліджень свідчать про достатню ефективність та доцільність застосування у радіолокаційних засобах методу ППЗ. Так, наприклад, при дії в напрямку головної пелюстки ДС повністю поляризованих (ПП) АШЗ енергетичний виграш становить більше 20 дБ, а хаотично поляризованих (ХП) АШЗ до 16 дБ [3]. Разом з тим визначення та врахування поляризаційної структури поля антени необхідне для точного визначення елементів ПВ при вирішенні задач радіолокації в РЛС з ППЗ.

Аналіз робіт [4 – 9] дозволяє зробити висновок, що поляризаційні діаграми (ПД) антен обумовлюються конструктивними особливостями їх побудови, залежать від АФР електромагнітного поля, створеного в розкриві антени, а також від напрямку на точку спостереження в дальній зоні. Як правило, при переході від однієї точки у просторі до іншої поляризаційні параметри електромагнітних хвиль змінюються. Крім того, на ПД впливає певна кількість дестабілізуючих факторів, які вносять додаткові зміни в її структуру: це – конструктивні помилки, що виникли при розрахунку та виготовленні антен; спотворення АФР поля антен; взаємний вплив випромінювачів, та ін.

З вищевикладеного випливає, що поляризаційні параметри сигналу, який надходить до АС з кутового напрямку, що відрізняється від напрямку головного максимуму ДС, будуть відрізнитись від поляризаційних параметрів сигналу, випроміненого в напрямку нормалі. Об'єктивно постає задача врахування ПХ антени при прийомі й обробці ПВ сигналів та завад.

**Метою даної статті** є розробка методики аналізу впливу ПХ антен на параметри ПВ сигналів та АШЗ для подальшого врахування при обробці.

### Основна частина

Як фіксовані параметри відбитих сигналів будемо розглядати всі елементи поляризаційної матриці розсіювання (ПМР) (1): чотири амплітуди і відповідні фази (які утворюють елементи поляризаційного вектора (ПВ) (2)) та будемо досліджувати їх спільний закон розподілу.

$$\dot{S} = \begin{pmatrix} |\dot{S}_{11}|e^{j\varphi_{11}} & |\dot{S}_{12}|e^{j\varphi_{12}} \\ |\dot{S}_{21}|e^{j\varphi_{21}} & |\dot{S}_{22}|e^{j\varphi_{22}} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $\dot{S}_{il} = |\dot{S}_{il}|e^{j\varphi_{il}}$  – відповідно модуль (амплітуда) та фаза  $i, l$ -го комплексного елемента ПМР ( $i, l = 1, 2$ ).

$$\vec{S} = (\dot{S}_{11}, \dot{S}_{21}, \dot{S}_{12}, \dot{S}_{22})^T. \quad (2)$$

Якщо припустити, що закон розподілу елементів ПМР наближається до нормального, то розгляд щільності ймовірності спільного закону розподілу фіксованих параметрів можна обмежити відповідними вектором середніх значень і коваріаційною матрицею даних параметрів:

$$\dot{M} = \frac{1}{2} E \left\{ \left( \vec{S} - \vec{\mu} \right) \cdot \left( \vec{S} - \vec{\mu} \right)^{T*} \right\}, \quad (3)$$

де  $E\{\cdot\}$  – оператор статистичного усереднення;  $\vec{S}$  – чотирикомпонентний ПВ;  $\vec{\mu}$  – чотирикомпонентний вектор середніх значень елементів ПВ  $\vec{S}$ .

Коваріаційні матриці різних об'єктів та заводових сигналів є відмінними. Коваріаційні матриці можуть також називатись коваріаційно-поляризаційними матрицями (КПМ). Їх характеристики складають спектр матриці (її власні числа) та власні вектори.

Відомо, що вибірки нормально розподіленої випадкової величини мають тенденцію попадати в одну область – область локалізації (ОЛ) [10]. Центр області визначається вектором середніх значень  $\vec{\mu}$ , а форма – коваріаційною матрицею  $\dot{M}$ , при цьому елементи випадкового вектора  $\vec{S}$  утворюють  $r$ -вимірний ( $r < 4$ ) еліпсоїд однакової щільності ймовірності [10], рівняння якого має вигляд:

$$\left( \vec{S} - \vec{\mu} \right)^{T*} \cdot M^{-1} \cdot \left( \vec{S} - \vec{\mu} \right) = d^2, \quad (4)$$

де  $d > 0$ .

Головні осі цього еліпсоїда задаються власними векторами КПМ  $\dot{M}$ , причому довжина напівоосей визначається власними значеннями

$$a_i = d \cdot \sqrt{\lambda_i}, \quad (5)$$

де  $\lambda_i$  – власні числа КПМ  $\dot{M}$  [11].

Фізичний зміст ОЛ ПВ полягає в тому, що її розмірність, розміри та форма відображають ступінь поляризаційно-статистичного взаємозв'язку елементів випадкового вектора.

Оскільки ОЛ довільного ПВ описується виразом (4), то звідси випливає, що форма ОЛ ПВ визначається КПМ  $\dot{M}_1$ , а  $\dot{M}_2$  – коваріаційна матриця іншої ОЛ, ступінь подібності якої до заданої необхідно оцінити. Для аналізу відмінностей параметрів ОЛ ПВ об'єктів та завод використовуємо вирази, сутність яких полягає в сумісній оцінці як розкиду елементів ПВ усередині області локалізації, так і оцінці відмінностей за формою, розмірністю, орієнтацією між цими областями. Виразом критерію “J” є функція від матриць  $\dot{M}_1$  та  $\dot{M}_2$ , які характеризують параметри ОЛ ПВ об'єктів [12],

$$J = \text{Sp} \left( \dot{M}_1^{-1} \cdot \dot{M}_2 \right), \quad (6)$$

де Sp – слід добутку двох матриць.

Також будемо використовувати функціонал, який є похідним від виразу (6), а саме:

$$J_m = \left[ 1 - \frac{1}{n} \text{Sp} \left( \dot{M}_1^{-1} \cdot \dot{M}_2 \right) \right] \cdot 100\%. \quad (7)$$

Взаємна орієнтація двох ОЛ може бути оцінена за допомоги комплексних кутів між відповідними власними векторами [13]  $\vec{b}_i$  та  $\vec{b}'_i$ :

$$\dot{Q}_i = \arccos \left\langle \vec{b}_i, \vec{b}'_i \right\rangle = -j \text{Ln} \left[ \left\langle \vec{b}_i, \vec{b}'_i \right\rangle + \sqrt{\left\langle \vec{b}_i, \vec{b}'_i \right\rangle^2 - 1} \right] \quad (8)$$

де  $\langle \cdot \rangle$  – знак скалярного добутку векторів;

$\text{Ln}(\cdot)$  – обернене відображення натуральної логарифмічної функції на всій комплексній площині.

Для дослідження впливу ПХ антен на параметри ОЛ ПВ сигналів та завод використовувались значення КПМ, а також параметри і характеристики ОЛ ПВ, що отримані як у результаті використання математичної моделі розрахунку елементів ПМР, так і на основі експериментальних даних [2]. Вирішення цієї задачі має на увазі отримання поляризаційно-статистичних характеристик ПВ розсіювання в новому поляризаційному базисі.

Розрахунки виконувались для всіх можливих значень, на які можуть змінюватись параметри  $\alpha$  та  $\beta$ , що визначають поляризаційний базис антени. Так, кут еліптичності  $\alpha$  може набувати значень у межах від  $0^\circ$  до  $45^\circ$  ( $-45^\circ$ ), що відповідає зміні поляризації від лінійної до кругової з правим та лівим напрямком обертання. Кут нахилу еліпса поляризації  $\beta$  набуває значення від  $-90^\circ$  до  $90^\circ$ . Для визначення КПМ у новому поляризаційному базисі використано вираз:

$$\dot{M}_{\beta\alpha} = \left[ Q_{\beta}^* \otimes \dot{Q}_{\alpha}^* \right] \cdot \dot{M}_L \cdot \left[ \dot{Q}_{\alpha}^{T*} \otimes Q_{\beta}^{T*} \right], \quad (9)$$

де  $\dot{M}_L$  – КПМ, визначена у початковому лінійному базисі;  $\otimes$  – знак змішаного кронекерівського множення;  $\dot{Q}_{\alpha}$ ,  $Q_{\beta}$  – відповідно матриці перетворення кута еліптичності та матриця повороту будь-якого ПВ на кут  $\beta$  у фазовій площині хвилі:

$$\dot{Q}_\alpha = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -j \sin \alpha \\ -j \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$Q_\beta = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Як критерії, за якими проведено оцінку ступеня відмінності отриманих значень поточної КПМ від початкової КПМ, обрано J критерій та його різновид Jm.

Методика аналізу впливу ПХ антен на параметри ОЛ ПВ включає в себе виконання таких етапів:

1. Визначення КПМ сигналів або АШЗ у початковому базисі (3).

2. Перерахунок КПМ з урахуванням можливих значень змін параметрів  $\Delta\alpha$  і  $\Delta\beta$  відносно  $\alpha$ ,  $\beta$  (9) та розрахунок критеріїв J (6) і Jm (7).

3. Аналіз отриманих результатів і визначення поляризаційних параметрів, при яких значення J і Jm будуть максимальними.

4. Розрахунок параметрів ОЛ ПВ та їх характеристик для визначених  $\alpha$  та  $\beta$ . Побудова ОЛ для початкової КПМ та КПМ, що враховує вплив  $\alpha$  і  $\beta$ .

5. Порівняльний аналіз характеристик ОЛ, визначених при початковому поляризаційному базисі та з урахуванням впливу поляризаційних параметрів антени  $\alpha$  і  $\beta$ .

У результаті було досліджено вплив ПХ антен на параметри ОЛ ПВ об'єктів - сфера, конус, циліндр – та ряду аеродинамічних об'єктів, а також повністю, частково та хаотично поляризованих АШЗ. Результати аналізу впливу ПХ антен на параметри ОЛ ПВ покажемо на прикладі об'єкта типу циліндр, що визначає загальні тенденції задачі дослідження.

Розраховані відповідно до методики дослідження залежності параметрів J та Jm від  $\Delta\alpha$  і  $\Delta\beta$  свідчать, що максимальні зміни статистичних властивостей КПМ, у порівнянні з випадком, при якому відсутній вплив ПХ антени ( $\Delta\alpha = 0^\circ$   $\Delta\beta = 0^\circ$ ), відбуваються, коли поляризаційний базис змінюється на величину  $\Delta\alpha = 0^\circ$   $\Delta\beta = 90^\circ$ .

Для побудови ОЛ та визначення її параметрів використаємо розраховану з урахуванням зміни поляризаційних параметрів на величину  $\Delta\alpha$  та  $\Delta\beta$  КПМ. На основі отриманих значень, відповідно до пункту п'ятого методики, проведемо порівняльний аналіз характеристик ОЛ ПВ об'єкта за умови як повної відсутності, так і максимального впливу ПХ антени. Для оцінки взаємної просторової орієнтації отриманих ОЛ обчислимо вектор комплексних кутів  $\dot{Q}$  (8), а числову оцінку відмінності даних ОЛ за формою, розмірністю та орієнтацією отримаємо, обчисливши J та Jm критерії.

Об'єкт типу циліндр у початковому лінійному ортогональному базисі характеризується наступними КПМ (12), кореляційною матрицею (13) та такими

параметрами ОЛ, як матриця власних чисел (14) з відповідними нормованими власними векторами (15), а також вектором процентних відношень (16), який характеризує розподіл компонентів ПВ циліндра:

$$\dot{M}_{ц} = \begin{pmatrix} 0,486 & 0 & 0 & 0,495 - j0,27 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,495 + j0,27 & 0 & 0 & 0,509 \end{pmatrix}; \quad (12)$$

$$\dot{K}_{ц} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,98e^{-j3^\circ} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,98e^{-j3^\circ} & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (13)$$

$$\lambda_{ц} = \begin{pmatrix} 0,98 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (14)$$

$$\dot{B}_{ц} = \begin{pmatrix} 0,698 - j0,038 & 0,716 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0,716 & -0,698 - j0,038 \end{pmatrix}; \quad (15)$$

$$\bar{P}_{ц} = (98;2;0;0)^T, \%. \quad (16)$$

Ранг КПМ циліндра дорівнює двом (14), це означає, що ОЛ ПВ двовимірна і є витягнутим еліпсом ( $\Omega(\vec{S}_{ц1})$ ) на рис. 1).

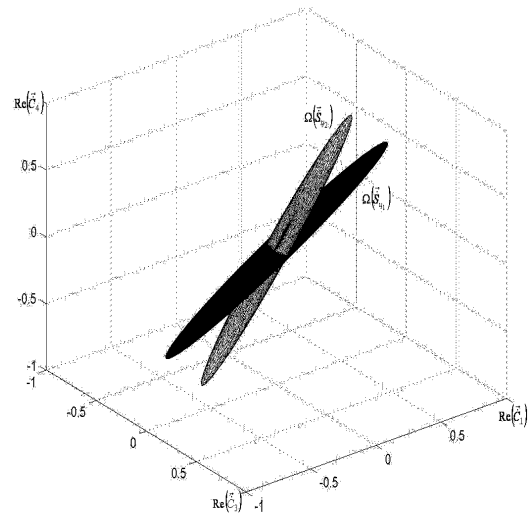


Рис. 1. Геометрична інтерпретація ОЛ ПВ об'єкта типу циліндр

При зміні параметрів початкового поляризаційного базису на величину  $\Delta\alpha = 0^\circ$   $\Delta\beta = 90^\circ$  отримано КПМ та значення параметрів ОЛ ПВ циліндра:

$$\dot{M}'_{ц} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0,489 - j0,026 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,489 - j0,026 & 0 & 0 & 0,5 \end{pmatrix}; \quad (17)$$

$$\dot{K}'_{\Pi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,979 - j0,051 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,979 - j0,051 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (18)$$

$$\lambda'_{\Pi} = \begin{pmatrix} 0,979 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,021 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (19)$$

$$\dot{B}'_{\Pi} = \begin{pmatrix} 0,707 & 0,707 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0,707 & -0,707 \end{pmatrix}; \quad (20)$$

$$\bar{P}'_{\Pi} = (98; 2; 0; 0)^T, \% \quad (21)$$

Ранг матриці (17) дорівнює двом. Тобто ОЛ ПВ також може бути представлена еліпсом у комплексному поляризаційному просторі, кожна з півосей якого відповідає орієнтації власних векторів матриці (20), а розміри півосей еліпса визначаються власними числами матриці (19). Область локалізації циліндра ( $\Omega(\vec{S}_{\Pi 2})$ ) на рис. 1), яка отримана з врахуванням максимального впливу ПХ антени, так само як і ОЛ циліндра, що розрахована у власному базисі ( $\Omega(\vec{S}_{\Pi 1})$ ), що являє собою витягнутий еліпс. Основна частина потужності ОЛ циліндра (98 %) розподілена в напрямку першого власного вектора і тільки деяка частка, близько 2 %, розподілена вздовж другого власного вектора. Ступінь розкиду параметрів досліджуваних ОЛ ПВ характеризують значення  $J=3.58 \times 10^6$  та  $J_m=23$  %. При цьому комплексний вектор кутів становить

$$\dot{Q} = (90^\circ + j0,0^\circ; 44,33^\circ - j0,036^\circ).$$

### Висновки

1. Запропонована методика забезпечує можливість аналізу впливу ПХ антен на параметри ОЛ ПВ окремо як сигналів, так і завад та на характер зміни відмінностей ПВ сигналів відносно до ПВ завад.

2. Аналіз отриманих результатів дозволяє дійти висновку, що вплив поляризаційних характеристик антен полягає у зміні лінійного ортогонального поляризаційного базису вимірювача і призводить до зміни поляризаційно-статистичних характеристик ПВ, а значить і КПМ сигналів та завад. При цьому розмірність областей локалізації об'єктів та АШЗ не змінюється. Зазнають змін тільки форма та положення ОЛ у комплексному поляризаційному просторі.

**Рекомендації щодо застосування.** Необхідність врахування ПХ антен при обробці пов'язана з їх впливом на точність визначення елементів поляризаційного вектора, і, як наслідок, на якість вияв-

лення цілі на фоні завад, що діють по бокових пелюстках ДС антени. Врахування впливу поляризаційних характеристик антен на параметри ОЛ ПВ об'єктів та АШЗ має на увазі одержання характеристик відповідних ОЛ ПВ з урахуванням зміни поляризаційних параметрів (коефіцієнта еліптичності та кута нахилу великої осі еліпса поляризації), тобто полягає у проведенні перерахунку елементів ПВ до початкового поляризаційного базису.

### Список літератури

1. Храбростин Б.В. Метод полного поляризаационного зондирования пространства // Научные ведомости БелГУ, сер. Информатика, прикладная математика, управление. – 2004. – Т. 1, вып. 1 (19). – С. 111-130.
2. Храбростин Б.В. Основные статистические свойства поляризаационных векторов рассеяния радиолокационных объектов различных классов // Сб. НММ, вып. 26. Х.: – ВИРТА. – 1990. – С. 344-353.
3. Храбростин Б.В., Мартыничук А.А., Зубрицкий Г.Н. Применение метода полного поляризаационного зондирования в РЛС // Сб. науч. тр. 6 Междунар. НТК. – Х.: Изд. ХГПУ. – 1998. – Вып.6, ч.1. – С. 351-354.
4. Коренберг Е.Б. О некоторых обших свойствах характеристик направленных антенн // Радиотехника, 1959. – Т. 14, №9. – С. 13-16.
5. Иен Р. Поляризаационные характеристики параболических зеркальных антенн // Радиотехника и электроника. – 1968. – Том 13, №2. – С. 212-218.
6. Шишкова Г.В. Спрямовані та поляризаційнй характеристики випромінювання з відкритого кінця круглого хвилеводу: Автореф. дис... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.03 / Харківський національний ун-т ім. В.Н. Каразіна. – Х.: ХНУ, 2001. – 16 с.
7. Айзин Ф.Л. Влияние взаимосвязи излучателей решетки на поляризаацию излучаемого поля // Радиотехника. – 1974. – Т.7, №7. – С. 42-45.
8. Шубарин Ю.В., Горобец Н.Н. Зависимость поляризаационной диаграммы от амплитудно-фазового распределения поля в раскрыте антенны // Изв. вузов. Радиотехника. – 1965. – Т.11, вып. 1. – С. 172-186.
9. Гребенюк О.П. Дослідження поляризаційнй характеристик деяких слабконаправлених випромінювачів // Вісник ЖІТІ. Житомир, ЖІТІ. – 1999. – № 9. – С. 201-203.
10. Либенсон М.Н., Хесин А.Я., Янсон Б.А. Автоматизация распознавания телевизионных изображений. – М.: Энергия, 1975. – 160 с.
11. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 655 с.
12. Горелик А.Л., Барабаш Ю.Л., Кривошеев О.В., Эпштейн С.С. Селекция и распознавание на основе локационной информации / Под ред. А.Л. Горелика. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.
13. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике / Под ред. Г.Гроше и В.Циглера. – М.: Наука, 1981. – 718 с.

Надійшла до редколегії 2.04.007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.В. Єрмаков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.