

# Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ

УДК 621.396.96

Є.Л. Казаков<sup>1</sup>, А.В. Коломійцев<sup>1</sup>, В.В. Посохов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

<sup>2</sup> Академія внутрішніх військ Міністерства внутрішніх справ, Харків

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ МАТРИЦІ РОЗСІЮВАННЯ В ОРТОГОНАЛЬНОМУ БАЗИСІ ПРИ УПРАВЛІННІ ПОЛЯРИЗАЦІЄЮ ПОЛЯ АНТЕН РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ

Викладається метод розрахунку елементів поляризаційної матриці розсіювання (ПМР) цілі в ортогональному поляризаційному базисі по вимірних комплексних амплітудах відбитих сигналів при довільних базисах передавальної і приймальної антен радіолокаційної станції (РЛС). Наводяться приклади розрахунків.

**Ключові слова:** поляризаційна матриця розсіювання цілі, поляризаційний вимірювальний базис, комплексні амплітуди відбитих сигналів.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Відомий ряд науково-технічних задач, який потребує підвищення скритності роботи РЛС, або – збільшення її потенціалу. Для цього слід випромінювати зондуючі сигнали на довільних еліптичних поляризаціях.

Завадозахищеність РЛС також вимагає в загальному випадку використання різного еліптичного базису приймальної антени. В цьому випадку отримання і використання для розпізнавання цілі поляризаційних ознак, які визначаються при довільному базисі антен, стає неможливим, оскільки навчання алгоритму розпізнавання робиться в заздалегідь відомому поляризаційному базисі.

Таким чином отримання елементів ПМР в ортогональному (заздалегідь заданому) поляризаційному базисі по вимірних комплексних амплітудах відбитих від цілі сигналів при довільних базисах передавальної і приймальної антен РЛС є важливою та актуальною задачею.

**Аналіз публікацій.** У науково-технічній літературі до теперішнього часу детально розглянуті методи набуття ознак розпізнавання цілі по її поляризаційній матриці розсіяння [1 – 3]. Проте, ці методи застосовані до елементів ПМР, які вимірюються в ортогональному поляризаційному базисі РЛС. Часто, відповідно до вирішуваних РЛС завданнями виникає необхідність змінити поляризаційний базис як передавальною так і приймальні антен.

**Метою статті** є отримання елементів поляризаційної матриці розсіювання в ортогональному поляризаційному базисі по вимірних комплексних амплітудах відбитих від мети сигналів при довільних базисах передавальної і приймальної антен радіолокаційної станції.

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо гіпотетичну РЛС, що випромінює сигнали у базисі  $p(\bar{p}_1, \bar{p}_2)$  та виробляє прийом цих сигналів у базисі  $q(\bar{q}_1, \bar{q}_2)$ . У загальному випадку  $\bar{p}_1, \bar{p}_2$  і  $\bar{q}_1, \bar{q}_2$  можуть бути довільними комплексними числами. В цьому випадку необхідно отримати ПМР цілі в ортогональному лінійному базисі  $(y, x)$ . Тут і надалі перший символ означає базис приймальної антени РЛС, а другий – передавальної. Тоді матриця комплексних амплітуд відбитих сигналів  $E_0^{(y)}$ , через матрицю комплексних амплітуд сигналів, що випромінюють  $E_n^{(x)}$  і ПМР цілі  $S^{(y,x)}$  у базисі  $(y, x)$ , може бути записана аналогічно [4] у вигляді:

$$E_0^{(y)} = S^{(y,x)} \times E_n^{(x)}. \quad (1)$$

Матриця комплексних амплітуд сигналів, що випромінюють і прийнятих, у базисі  $(y, x)$  з урахуванням базису  $(q, p)$  можна також записати у виді:

$$E_n^{(x)} = F_n^{(x,p)} \times E_n^{(p)}, \quad E_0^{(y)} = F_0^{(y,q)} \times E_0^{(q)}, \quad (2)$$

де  $F_n^{(x,p)}$ ,  $F_0^{(y,q)}$  – матриці переходу від базису  $(\bar{p})$  до базису  $(x)$  і від базису  $(q)$  до базису  $(y)$ .

Зробимо матричні перетворення (2) та використовуючи їх в (1), отримаємо:

$$E_0^{(q)} = F_0^{(y,q)^{-1}} \times S^{(y,x)} \times F_n^{(x,p)} \times E_n^{(p)}, \quad (3)$$

або

$$E_0^{(q)} = S^{(p,q)} \times E_n^{(p)}, \quad (4)$$

де

$$S^{(p,q)} = F_0^{(y,q)^{-1}} \times S^{(y,x)} \times F_n^{(x,p)} \quad (5)$$

індекс «-1» означає отримання зворотної матриці.

Тоді шукану матрицю в ортогональному базисі  $(y, \bar{x})$  з виразу (5) можна записати у вигляді:

$$S(y, x) = F_0^{(y, q)} \times S^{(p, q)} \times F_{\Pi}^{(x, p)^{-1}} \quad (6)$$

Таким чином використовуючи вираз (6) можна отримати ПМР цілі в ортогональному базисі РЛС та використати її надалі для вирішення завдання розпізнавання.

Для визначення матриць перерахунку  $F_0^{(y, q)}$  та  $F_{\Pi}^{(x, p)}$  скористуємось рис. 1.

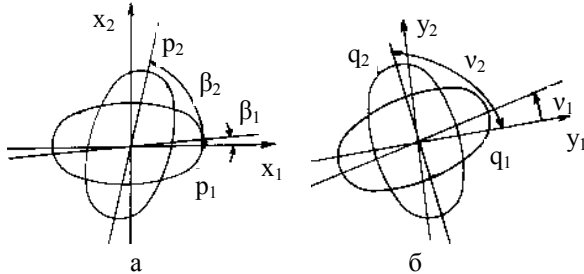


Рис. 1. Базиси передавальної (а) та приймальної (б) антен РЛС

З нього виходить, що базові еліптичні поляризації на передачу характеризуються кутами нахилу еліпсів поляризації  $\beta_1, \beta_2$  і кутами еліпсності  $\epsilon_1, \epsilon_2$ , а на прийом – кутами нахилу еліпсів поляризації  $v_1, v_2$  і кутами еліпсності  $\alpha_1, \alpha_2$ . Тоді матриці перерахунку мають вигляд:

$$F_0^{(y, q)} = \begin{pmatrix} \cos v_1 \cos \alpha_1 - j \sin v_1 \sin \alpha_1 & \cos v_2 \cos \alpha_2 - j \sin v_2 \sin \alpha_2 \\ \sin v_1 \cos \alpha_1 - j \cos v_1 \sin \alpha_1 & \sin v_2 \cos \alpha_2 - j \cos v_2 \sin \alpha_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$F_{\Pi}^{(x, p)} = \begin{pmatrix} \cos \beta_1 \cos \epsilon_1 - j \sin \beta_1 \sin \epsilon_1 & \cos \beta_2 \cos \epsilon_2 - j \sin \beta_2 \sin \epsilon_2 \\ \sin \beta_1 \cos \epsilon_1 - j \cos \beta_1 \sin \epsilon_1 & \sin \beta_2 \cos \epsilon_2 - j \cos \beta_2 \sin \epsilon_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Зворотна матриця  $F_{\Pi}^{(x, p)^{-1}}$  відповідно до [6] має вигляд:

$$F_{\Pi}^{(x, p)^{-1}} = \frac{1}{D_{\Pi}} \begin{pmatrix} \sin \beta_2 \cos \epsilon_2 + j \cos \beta_2 \sin \epsilon_2 & \cos \beta_2 \cos \epsilon_2 + j \sin \beta_2 \sin \epsilon_2 \\ -\sin \beta_1 \cos \epsilon_1 - j \cos \beta_1 \sin \epsilon_1 & \cos \beta_1 \cos \epsilon_1 - j \sin \beta_1 \sin \epsilon_1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

де  $D_{\Pi} = \sin(\beta_2 - \beta_1) \cos(\epsilon_1 + \epsilon_2) - j \cos(\beta_1 + \beta_2) \sin(\epsilon_1 + \epsilon_2)$

Розглянемо в якості прикладів деякі можливі окремі випадки управління поляризацією поля антен РЛС і проаналізуємо отримані при цьому вирази для матриць перерахунку  $F_0^{(y, q)}$  та  $F_{\Pi}^{(x, p)}$ .

По-перше, нехай базис приймальної антени є лінійним ортогональним, але його базові поляризації не співпадають з ортами  $\bar{y}_1$  і  $\bar{y}_2$ , тобто  $v_1=0$ , а  $v_2-v_1=90^\circ$ , рис. 2.

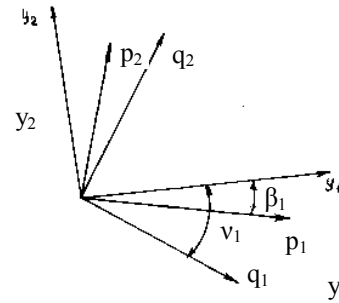


Рис. 2. Базис приймальної антени РЛС – лінійний ортогональний

Тоді матриця перетворення  $F_0$  перетвориться на звичайну матрицю повороту:

$$F_0 = \begin{pmatrix} \cos v_1 & \cos v_2 \\ \sin v_1 & \sin v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos v_1 & -\sin v_1 \\ \sin v_1 & \cos v_1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Якщо базис передавальної антени  $p$  буде ортогональним ( $\beta_2 \neq 0, \beta_2 - \beta_1 = 90^\circ$ ), то матриця перетворення  $F_0^{-1}$  також буде матрицею повороту

$$F_0^{-1} = \begin{pmatrix} \sin \beta_2 & \cos \beta_2 \\ -\sin \beta_1 & \cos \beta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta_1 & \sin \beta_1 \\ -\sin \beta_1 & \cos \beta_1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Тоді вираз для отримання ПМР у базисі  $(y, x)$  набере вигляду:

$$S(y, x) = \begin{pmatrix} \cos v_1 & -\sin v_1 \\ \sin v_1 & \cos v_1 \end{pmatrix} S^{(q, p)} \begin{pmatrix} \cos \beta_1 & \sin \beta_1 \\ -\sin \beta_1 & \cos \beta_1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Отримане співвідношення особливо наочне, коли базис передавальної антени  $(p)$  є поверненим на деякий кут базисом  $(x)$  та базисом приймальної антени  $(q)$  також повернений на такий же кут базис  $(y)$ . Тоді співвідношення (12) буде звичайними перетвореними ПМР цілі при повороті початкового базису  $(y, x)$ . Для випадку, коли базис приймальної антени  $(y)$  буде поєднаний з базисом передавальної антени  $(x)$ , вираз (12) перетворюється на відоме співвідношення [5].

По-друге, розглянемо випадок, коли базис передавальної антени  $p$  і базис приймальної антени  $q$  є круговими. Тоді, щоб визначити матрицю розсіяння  $S^{(y, x)}$  в початковому базисі  $(y, x)$  необхідно вичислити матриці перерахунку  $F_0$  та  $F_{\Pi}^{-1}$ .

Для визначеності при знаходженні матриці  $F_0$  вважаємо, що  $v_1=0^\circ, v_2=90^\circ, \alpha_1=-45^\circ, \alpha_2=45^\circ$ .

Тоді:

$$F_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

При відшукуванні матриці  $F_{\Pi}^{-1}$  покладемо, що  $\beta_1=0^\circ, \beta_2=90^\circ, \epsilon_1=-45^\circ, \epsilon_2=45^\circ$ . В такому чині маємо:

$$F_0^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

В цьому випадку вираз для знаходження шуканої матриці набирає вигляду:

$$S^{(y,x)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{pmatrix} \times S^{(p,q)} \begin{pmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Отримане співвідношення (15) є відоме перетворення ПМР цілі з кругового базису в лінійний базис. Таким чином, з розглянутих прикладів виходить, що отримані результати не суперечать результатам, приведеним в роботах [4, 5]. Проте необхідно помітити, що у випадках, коли в РЛС використовуються довільні поляризаційні базиси антен, слід звертати увагу на помилки при визначенні елементів ПМР цілі в шуканому базисі (у, х), які виникають при відхиленні базисних векторів від ортогональних.

Розглянемо, як приклад, випадок, коли поляризаційний базис передавальної антени (р) є лінійним, але не ортогональним. Положення базисних векторів визначається кутами  $\beta_1$  і  $\beta_2$ , а прийом відбитого сигналу робиться в лінійному ортогональному базисі, співпадаючому з базисом, рис. 3. Необхідно визначити ПМР цілі у базисі (х) за умови, що вона вимірюється у базисі (х, р).

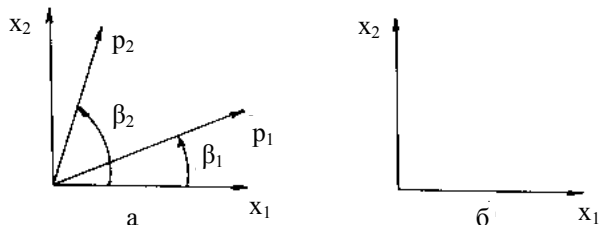


Рис. 2. Базис передавальної (а) та приймальної (б) антен РЛС – лінійний неортогональний

Для цього знайдемо аналітичні вирази для матриць перерахунку  $F_0$  та  $F_{\Pi}^{-1}$ , а також скористаємося виразом (9). Очевидно, що матриця перерахунку  $F_0$  дорівнює одиничній матриці. Для знаходження матриці перерахунку  $F_{\Pi}^{-1}$  скористаємось рис. 3, а.

Тоді:

$$F_{\Pi}^{(x,p)} = \begin{pmatrix} \cos\beta_1 & \cos\beta_2 \\ \sin\beta_1 & \sin\beta_2 \end{pmatrix}$$

$$F_{\Pi}^{(x,p)^{-1}} = \frac{1}{\sin(\beta_2 - \beta_1)} \begin{pmatrix} \sin\beta_2 & -\cos\beta_2 \\ -\sin\beta_1 & \cos\beta_1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

В цьому випадку отримуємо остаточний вираз для шуканої матриці у вигляді:

$$S^{(x)} = S^{(x,p)} \times F_{\Pi}^{(x,p)^{-1}} =$$

$$= \frac{1}{\sin(\beta_2 - \beta_1)} \begin{pmatrix} \dot{S}_{11}^{(x,p)} & \dot{S}_{12}^{(x,p)} \\ \dot{S}_{21}^{(x,p)} & \dot{S}_{22}^{(x,p)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin\beta_2 & -\cos\beta_2 \\ -\sin\beta_1 & \cos\beta_1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

З виразу (17) виходить, що в розглянутому прикладі, при  $\beta_2 \rightarrow \beta_1$  матриця перерахунку  $F_{\Pi}^{-1}$ , стає погано обумовленою. Це може привести до великих помилок визначення елементів ПМР  $S^{(x)}$  в шуканому базисі (х), навіть при незначних відхиленнях кутів  $\beta_1$  і  $\beta_2$  від істинних. Такі випадки необхідно розглядати особливо.

Таким чином, при управлінні поляризацією поля антен РЛС та відомими характеристиками поляризаційного базису на випромінювання і прийом по вимірних елементах матриці розсіяння в цьому базисі можуть бути розраховані елементи ПМР цілі в заданому ортогональному базисі по яких надалі можуть бути визначені ознаки розпізнавання цієї цілі.

## Висновки

Таким чином, розглянуто метод розрахунку елементів ПМР цілі в ортогональному базисі РЛС при управлінні поляризацією поля антен, який дозволяє визначити поляризаційні ознаки розпізнавання цієї цілі.

## Список літератури

1. Казаков Е.Л. Поляризационные методы распознавания радиолокационных целей / Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: АНПРЭ, 2002. – № 1. – С. 155 – 164.
2. Бабаков М.Ф. Применение поляризационно-модулированных сигналов для селекции и распознавания радиолокационных объектов / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов // Зарубежная радиоэлектроника. – № 11. – 1999. – С. 42 – 49.
3. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория // Под ред. Я.Д. Ширмана. Справочник. – М.: Радиотехника, – 2007. – 510 с.
4. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиоэлектронных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин. – М.: Сов. Радио, 1966. – 440 с.
5. Лоуэншус О. Применение матрицы рассеяния / О. Лоуэншус // ТИИЭР. – 1965. – Т. 53, № 8. – С. 1132 – 1137.
6. Корн Г.А. Справочник по математике / Г.А. Корн, Т.М. Корн. Пер. с англ. – М.: Наука, 1973. – 831 с.

Надійшла до редколегії 10.02.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. О.І. Сухаревський, Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ РАССЕИВАНИЯ В ОРТОГОНАЛЬНОМ БАЗИСЕ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ПОЛЯ АНТЕН РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Е.Л. Казаков, А.В. Колосов, В.В. Посохов

Излагается метод расчета элементов поляризационной матрицы рассеивания (ПМР) цели в ортогональном поляризационном базисе по измеренным комплексным амплитудам отраженных сигналов при произвольных базисах передающей и приемной антенн РЛС. Приводятся примеры подобных расчетов.

**Ключевые слова:** поляризационная матрица рассеивания цели, поляризационный измерительный базис, комплексные амплитуды отраженных сигналов.

**METHOD OF DETERMINATION OF ELEMENTS OF POLARIZATION MATRIX OF DISPERSION  
IN AN ORTOGONAL BASE AT A MANAGEMENT BY POLARIZATION OF THE FIELD  
OF AERIALS OF THE RADIO-LOCATION SYSTEM**

E.L. Kazakov, O.V. Kolomitsev, V.V. Posohov

*The method of calculation of elements of polarization matrix of dispersion (PMD) of aim is expounded in an ortogonal polarization base on the measured complex amplitudes of the reflected signals at arbitrary bases transmitter and receiving aerials radio-location system (RLS). Examples of similar calculations are made.*

**Keywords:** *polarization matrix of dispersion of aim, polarization measuring base, complex amplitudes of the reflected signals.*