

УДК 621.321.96

О.О. Мартинчук, І.Є. Ряполов, С.А. Волювач

Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

СПОСІБ ЗНИЖЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ МАТРИЦІ РОЗСІЮВАННЯ ЦІЛІ

Запропоновано спосіб зниження максимальної похибки вимірювання елементів поляризаційної матриці розсіювання для виявлення-розпізнавання цілі. Спосіб заснований на використанні лінійного поляризаційного базису антенної системи на випромінюванні і кругового поляризаційного базису на прийманні. Представлено результати дослідження похибок вимірювання елементів поляризаційної матриці розсіювання різних цілей, спостережуваних на фоні стаціонарного шуму і при різних поєднаннях вказаних поляризаційних базисів антенної системи при випромінюванні та прийманні.

поляризаційна матриця розсіювання, поляризаційний базис, похибки вимірювання

Вступ

Постановка проблеми. Одним з перспективних напрямів підвищення ефективності виявлення - розпізнавання цілей радіолокаторами огляду є використання поляризаційних матриць розсіювання (ПМР) при повному поляризаційному зондуванні простору (ППЗП) [1]. ППЗП припускає випромінювання двох складних ортогональних по внутрішній структурі сигналів на ортогональних за поляризацією та повний поляризаційний прийом всіх відбитих сигналів, обробка яких дозволяє отримати ПМР цілі в різній формі [2]

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \begin{pmatrix} \dot{s}_{11} & \dot{s}_{12} \\ \dot{s}_{21} & \dot{s}_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} \cdot e^{j\varphi_{11}} & s_{12} \cdot e^{j\varphi_{12}} \\ s_{21} \cdot e^{j\varphi_{21}} & s_{22} \cdot e^{j\varphi_{22}} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} s_{11} \cdot e^{j\Delta\varphi_1} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \cdot e^{j\Delta\varphi_2} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \operatorname{Re}(\dot{s}_{11}) + j\operatorname{Im}(\dot{s}_{11}) & \operatorname{Re}(\dot{s}_{12}) + j\operatorname{Im}(\dot{s}_{12}) \\ \operatorname{Re}(\dot{s}_{21}) + j\operatorname{Im}(\dot{s}_{21}) & \operatorname{Re}(\dot{s}_{22}) + j\operatorname{Im}(\dot{s}_{22}) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

де \dot{s}_{ik} – комплексний елемент ПМР, ($i, k = 1, 2$), причому, i – номер приймального поляризаційного каналу, j – каналу, що передає; s_{ik} – амплітуда елементу ПМР, причому, s_{ik}^2 – ефективна поверхня розсіювання цілі на основній ($i = k$) і перехресній ($i \neq k$) поляризації [3]; φ_{ik} – абсолютна фаза елементу ПМР [3]; $\Delta\varphi_1 = \varphi_{21} - \varphi_{11}$ і $\Delta\varphi_2 = \varphi_{12} - \varphi_{22}$ – відносні фази; $\operatorname{Re}(\dot{s}_{ik}) + j\operatorname{Im}(\dot{s}_{ik})$ – реальні і уявні частини комплексних елементів ПМР.

Взагалі, практичний інтерес для виявлення-розпізнавання з погляду інформативності представляють три амплітуди ПМР $s_{11}, s_{12} \approx s_{21}, s_{22}$ зважаючи на принцип взаємності в радіолокації [2] та дві відносні фази $\Delta\varphi_1 = \varphi_{21} - \varphi_{11}$ і $\Delta\varphi_2 = \varphi_{12} - \varphi_{22}$ після відкидання загального фазового множника

ПМР, що містить дальність до цілі, і враховуючи $\varphi_{12} = \varphi_{21}$ [4,5]. У такому разі ПМР представляється з відносними фазами і при цьому виникають труднощі опису сумісного багатовимірного закону розподілу ПМР. Остання форма представлення ПМР в (1) у вигляді складових квадратури є переважно для виявлення-розпізнавання при ППЗП з погляду похибок апроксимації сумісного закону розподілу багатовимірним нормальним [1]. Тому, саме цю форму уявлення розглядаємо далі.

Враховуючи, що кросові елементи ПМР в лінійному базисі s_{12} і s_{21} можуть істотно, на 10 – 20 дБ, бути меншими основних елементів s_{11} і s_{22} , то при вимірюванні всіх елементів ПМР слід добиватися високих енергетичних відносин сигналу до шуму [3]

$$q_{ik}^2 = \frac{2 \cdot s_{ik}^2 \cdot \tau_c}{N_0}, \quad (2)$$

де q_{ik}^2 – енергетичний параметр, або параметр виявлення; τ_c – тривалість сигналу; N_0 – спектральна щільність потужності шуму; q_0^2 – поріг виявлення.

Поріг виявлення і вимірювання ПМР при цьому повинен бути високим, наприклад, 20 дБ і більше. Корисний сигнал, що відповідає елементам ПМР цілі, спостерігається на фоні шуму, який вважати мемо адитивним, стаціонарним і незалежним відносно всіх поляризаційних каналів вимірювання. У таких умовах потенційні похибки вимірювання елементів ПМР цілі визначаються енергетичними відносинами корисного сигналу до шуму, або параметром виявлення [2, 3]. Тому, нормовані середньоквадратичні похибки (СКП) вимірювання квадратури елементів ПМР цілі можна оцінити відповідно до виразу [3].

$$\sigma_{nik} = \frac{\sigma_{S_{ik}}}{S_{ik}} \approx \frac{1}{2 \cdot q_{ik}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де $\sigma_{\text{нік}}$ – нормовані СКП елементів ПМР.

У таких умовах, виявляється, що похибки вимірювання всіх елементів ПМР можуть бути різними. Похибки вимірювання кросових елементів ПМР можуть виявитися великими, особливо, якщо поточний енергетичний параметр при цьому буде менше порогу виявлення. Це і обумовлює часом низьку інформативність кросових елементів ПМР порівняно з інформативністю основних, особливо для цілей зі слабкою деполяризацією [3]. Різні похибки вимірювання ПМР, зокрема максимальна відносно всіх елементів ПМР, вносять істотний вплив на процес виявлення-розпізнавання цілей при ППЗП, особливо при помірних значеннях параметра виявлення, скажімо, 6 дБ, коли передбачається виконання процедур виявлення цілі, вимірювання ПМР, і, нарешті, використання тих або інших алгоритмів розпізнавання.

Запропонований спосіб зниження максимальної похибки вимірювання ПМР засновано на використанні лінійного поляризаційного базису (ПБ) антенної системи (АС) на випромінювання і кругового ПБ на прийом, який далі названий змішаним ПБ при вимірюванні ПМР. Такий змішаний ПБ АС характеризується відносною простотою реалізації в порівнянні з адаптивним управлінням поляризацією в АС.

Даний напрям дослідження вивчений недостатньо, тому, завдання дослідження відносно розробки способу зменшення максимальної похибки вимірювання елементів ПМР цілі зі слабкою деполяризацією, є актуальним.

Аналіз літератури. Вимірювання елементів ПМР цілі може бути вироблено як в лінійному, так і в будь-якому іншому ортогональному базисі. При цьому, змірявши, елементи ПМР цілі в одному базисі, можна розрахунковим шляхом отримати її елементи в будь-якому іншому базисі РЛС [3]. Одним з основних чинників, що впливають на похибки вимірювання елементів ПМР цілі при високих енергетичних параметрах, є відмінність характеристик поляризаційного вимірювального базису РЛС заданому, що досліджено в [3]. Проте в цьому джерелі вимірюванню ПМР при низькому енергетичному параметрі приділено недостатньо уваги. У [3] також проведені дослідження за оцінкою середньоквадратичної похибки вимірювання елементів ПМР, проте можливість вимірювання ПМР в різних базисах на випромінювання і прийом не досліджувалося. Можливість одночасного застосування різних ПБ АС, кругового і лінійного, розглянуто в [4], проте помилки вимірювання елементів ПМР при цьому не розглядалися. У [5] проведено дослідження за оцінкою виявлення і селекції цілі з використанням ПМР, проте можливі похибки вимірювання елементів ПМР цілі в лінійному і круговому поляризаційному базисах не розглянуті. У [6] показано застосування поляризаційних параметрів цілі для завдань розпізнавання, проте похибкам вимірювання елементів ПМР при низькому енергетичному параметрі приділено мало уваги.

Джерело [7] містить оглядовий матеріал щодо поляризації радіохвиль, проте похибки вимірювання ПМР при повному поляризаційному зондуванні не розглядаються. Потенційні похибки вимірювання амплітудних складових ПМР відображено в [8], проте не приділяється уваги при цьому аналізу відмінностей цих похибок.

Таким чином, можливість використання різних ПБ АС на випромінювання і прийом з метою зменшення максимальної похибки вимірювання ПМР представляється вивченим недостатньо.

Метою статті є розробка способу зниження максимальної похибки вимірювання ПМР цілі зі слабкою деполяризацією на основі використання лінійного поляризаційного базису антенної системи на випромінювання і кругового на прийом.

Основна частина

При проведенні поляризаційних досліджень, як правило, обмежуються розкладанням повністю поляризованих електромагнітних хвиль по двох ортогональних комплексних ортам, які знаходяться у фазовій площині хвилі в дальній зоні АС. В даному випадку, пара ортонормованих комплексних векторів \vec{e}_1, \vec{e}_2 , називається ПБ і позначається $\{\vec{e}_1, \vec{e}_2\}$ [5].

Розглянемо методику перетворення лінійного ПБ в довільний ПБ АС. Для переходу від одного довільного ПБ до іншого (від $\{\vec{e}_1, \vec{e}_2\}$ до $\{\vec{e}'_1, \vec{e}'_2\}$) проводиться перетворення ортогонально-поляризованих компонент вектора \vec{E} шляхом множення на комплексну унітарну матрицю перетворення

$$\vec{E}' = \dot{Q} \vec{E}, \quad (4)$$

$$\text{де } \dot{Q} = \begin{pmatrix} \dot{q}_{11} & \dot{q}_{12} \\ \dot{q}_{21} & \dot{q}_{22} \end{pmatrix}; \quad (5)$$

\dot{Q} – комплексна унітарна матриця перетворення ПБ [5].

Матриця перетворення векторів електромагнітного поля, заданих в довільному лінійному ПБ, при переході до еліптичного ПБ, головні осі ортів якого співпадають з ортами початкового ПБ, має вигляд:

$$\dot{Q}_\alpha = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -j \sin \alpha \\ -j \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (6)$$

де α – кут еліптичності ПБ ($-\pi/4 \leq \alpha \leq \pi/4$) [4].

У матриці повороту лінійного ПБ на кут β компоненти електромагнітного поля піддаються лінійному перетворенню обертання, визначуваному матрицею:

$$Q_\beta = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}, \quad (7)$$

де β – кут орієнтації ($-\pi/2 \leq \beta \leq \pi/2$) [4].

ПМР цілі в круговому ПБ ($\alpha = \pi/4, \beta = 0$) може бути представлена як в [4]:

$$\dot{S}_{\text{кр}} = \dot{Q}_{\alpha_{\text{пр}}}^* \cdot \dot{S}_{\text{л}} \cdot \dot{Q}_{\alpha_{\text{випр}}}^*, \quad (8)$$

де * – знак комплексного сполучення; $\dot{S}_л$ – ПМР цілі в лінійному ПБ; $\dot{Q}_{\alpha пр}, \dot{Q}_{\alpha випр}$ – матриці переходу від лінійного ПБ до кругового, яка враховує вплив кута еліптичності α на прийом і на випромінювання відповідно [4].

Вплив кута орієнтації β на параметри ПМР в круговому ПБ визначається:

$$\dot{S}_{кр} = Q_{\beta пр} \cdot \dot{S}_л \cdot Q_{\beta випр}^T, \quad (9)$$

де T – знак транспонування; $Q_{\beta пр}, Q_{\beta випр}$ – матриці переходу від лінійного ПБ до кругового, яка враховує вплив кута орієнтації β на прийом і на випромінювання відповідно [4].

Тоді ПМР цілі в довільному ПБ можна представити як сполучення ПМР цілі в лінійному ПБ і відповідних матрицях перетворення:

$$\dot{S} = Q_{\beta пр} \cdot \dot{Q}_{\alpha пр}^* \cdot \dot{S}_л \cdot \dot{Q}_{\alpha випр}^* \cdot Q_{\beta випр}^T. \quad (10)$$

Для отримання ПМР цілі в змішаному ПБ АС матриця кута еліптичності $\dot{Q}_{\alpha випр}$ на випромінювання як і матриця повороту $\dot{Q}_{\beta випр}$ приймуть наступний вигляд:

$$\dot{Q}_{\alpha випр} = Q_{\beta випр} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = I, \quad (11)$$

де I – одинична матриця.

Таким чином, вираз для ПМР цілі в змішаному ПБ прийме вигляд:

$$\dot{S}_{зм} = Q_{\beta пр} \cdot \dot{Q}_{\alpha пр}^* \cdot \dot{S}_л \cdot I \cdot I. \quad (12)$$

Матриця похибок, відповідна ПМР цілі в необхідному ПБ АС:

$$\Sigma_A = \begin{pmatrix} \sigma_{н11} & \sigma_{н12} \\ \sigma_{н21} & \sigma_{н22} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

де $\sigma_{нік}$, ($i, k = 1, 2$) – є відносною нормованою середньоквадратичною похибкою вимірювання елементів ПМР (3).

Максимальна похибка вимірювання ПМР визначається як найбільша з похибок вимірювання всіх її елементів

$$\delta S_{\max} = \max\{\sigma_{н11}, \sigma_{н12}, \sigma_{н21}, \sigma_{н22}\}. \quad (14)$$

Розглядати також будемо величину середньої нормованої похибки вимірювання елементів ПМР цілі відповідно до виразу:

$$\sigma_{н ср} = \sqrt{\frac{\sigma_{н11}^2 + \sigma_{н12}^2 + \sigma_{н21}^2 + \sigma_{н22}^2}{4}}. \quad (15)$$

Вплив лінійного, кругового і змішаного ПБ АС на похибки вимірювання елементів ПМР проведемо з використанням даних, отриманих методом математичного і фізичного моделювання. При цьому розглядалося математична модель ПМР цілі зі слабкою деполаризацією, тобто об'єкту типу сфера (ета-

лонний відбивач, елемент конструкції літального апарату, лінза Луненберга), результати фізичного моделювання об'єкту типу крилата ракета (КР) і дані математичного моделювання ПМР цілі МіГ-29 при її спостереженні у кругову. Об'єм вибірки складав величину від 180 (КР, МіГ-29) до 1000 (Сфера) відліків результатів вимірювань ПМР [3]. Оцінювалася максимальна і середня помилки вимірювання елементів ПМР даних об'єктів при використанні лінійного, кругового і змішаного ПБ.

Результати моделювання і дослідження залежності максимальних потенційних похибок вимірювання за наслідками обробки всієї вибірки ПМР об'єкту типу сфера від середнього значення відношення сумарної енергії сигналу до сумарного шуму, тобто середнього значення параметра виявлення у вигляді:

$$q^2 = \frac{2 \cdot \sum_{i,k} s_{ik}^2 \cdot \tau_c}{4 \cdot N_0}, \quad (16)$$

наведені на рис. 1.

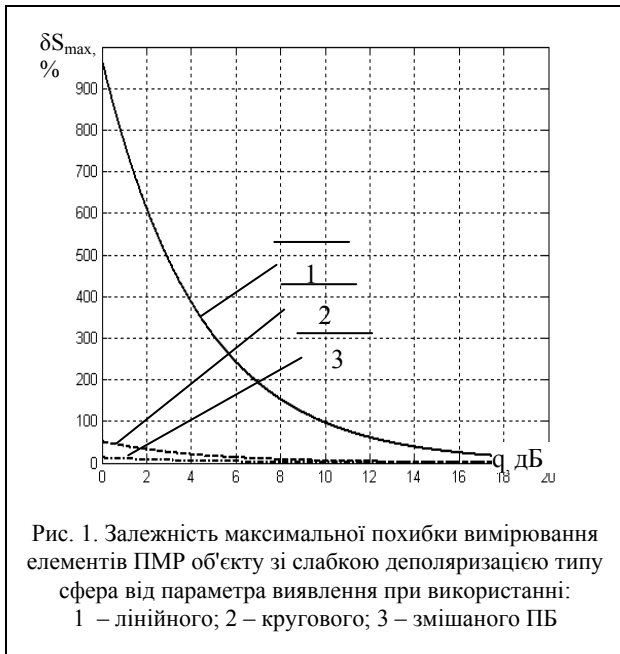


Рис. 1. Залежність максимальної похибки вимірювання елементів ПМР об'єкту зі слабкою деполаризацією типу сфера від параметра виявлення при використанні: 1 – лінійного; 2 – кругового; 3 – змішаного ПБ

Слід зазначити, що при низькому значенні параметра виявлення, наприклад, 6 дБ, максимальна похибка вимірювання ПМР в лінійному ПБ складає величину 245 %, у круговому 22 %, а в змішаному – 7 %, що свідчить про зниження максимальної похибки вимірювання ПМР об'єкту зі слабкою деполаризацією в змішаному ПБ.

На рис. 2 представлені аналогічні графіки для об'єкту типу крилатої ракети, які також свідчать про зниження максимальної похибки вимірювання ПМР в змішаному ПБ.

На рис. 3 представлені результати оцінки максимальної похибки вимірювання ПМР об'єкту типу МіГ-29, які підтверджують факт зниження максимальної похибки вимірювання ПМР при змішаному ПБ.

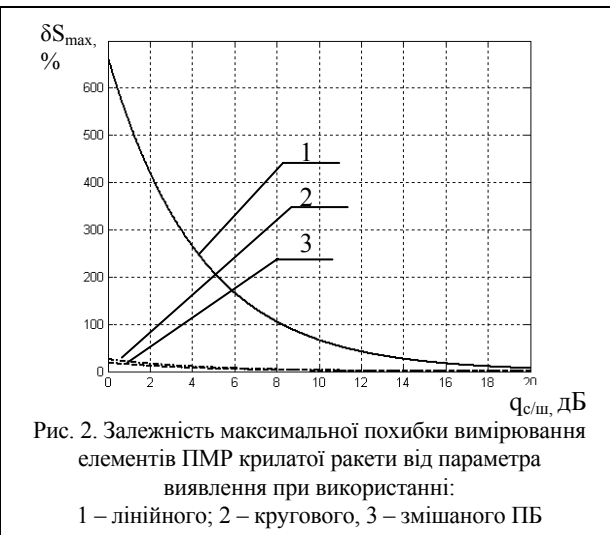


Рис. 2. Залежність максимальної похибки вимірювання елементів ПМР крилатої ракети від параметра виявлення при використанні: 1 – лінійного; 2 – кругового, 3 – змішаного ПБ

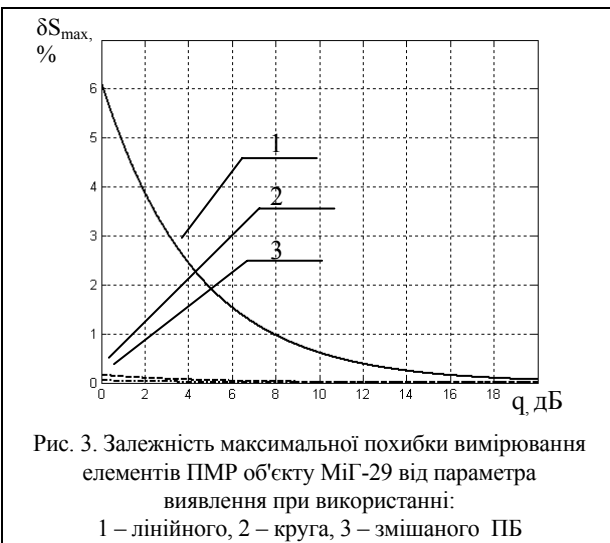


Рис. 3. Залежність максимальної похибки вимірювання елементів ПМР об'єкту МіГ-29 від параметра виявлення при використанні: 1 – лінійного, 2 – круга, 3 – змішаного ПБ

Табл. 1 містить результати використання різних сполучень ПБ АС на максимальні і середні похибки вимірювання елементів ПМР об'єктів при середньо-му значенні параметра виявлення 10 дБ.

Таблиця 1
Максимальні і середні похибки вимірювання елементів ПМР цілі при різних ПБ АС

Об'єкт \ Похибка	Середня похибка елементів ПМР цілі, %	Максимальна похибка елементів ПМР цілі, %
Лінійний базис		
Сфера	75	100
Крилата ракета	49	70
МіГ-29	0.4	0,65
Круговий базис		
Сфера	12	10
Крилата ракета	8	5
МіГ-29	0.1	0,1
Змішаний базис		
Сфера	3	5
Крилата ракета	2	2
МіГ-29	0,03	0,01

Отримані результати свідчать про те, що похибки вимірювання елементів ПМР істотно залежать від типу цілі і ПБ, що використовується як на випромінювання, так і на прийом. При переході від використання лінійного ПБ до використання змішаного ПБ максимальна і середня похибки вимірювання елементів ПМР зменшуються.

Висновки

Результати моделювання свідчать про те, що використовуваний ПБ АС істотно впливає на потенційні похибки вимірювання ПМР різних цілей, а саме, на максимальну і середню похибки вимірювання.

Використання змішаного ПБ АС у вигляді лінійного на випромінювання і кругового на прийом для цілей зі слабкою деполаризацією є доцільним з погляду зниження максимальних і середніх потенційних похибок вимірювання ПМР.

Представлене застосування змішаного поляризаційного базису антенної системи, тобто лінійного на випромінювання і кругового на прийом, можна трактувати як спосіб зниження максимальної потенційної похибки вимірювання ПМР цілей зі слабкою деполаризацією.

Запропонований спосіб доцільно використовувати для підвищення ефективності виявлення-розпізнавання різних об'єктів, зокрема сучасних засобів повітряного нападу.

Список літератури

1. Храбростин Б.В., Мартыничук А.А., Зубрицкий Г.Н. Применение метода полного поляризационного зондирования пространства в РЛС // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование. Сб. научн. тр. ХГПУ. – Х.: ХГПУ, 1998. – Вып.6., ч.1. – С. 230-232.
2. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
3. Характеристики рассеяния радиолокационных целей / Е.Л. Казаков, В.Б. Бзот, А.Е. Казаков, В.Л. Павлов, Ю.М. Шишкин; Под ред. Е.Л. Казакова. – Х., 2006. – 185 с.
4. Канарейкин Д.Б., Потехин В.А., Шишкин И.Ф. Морская поляриметрия. – Л.: Судостроение, 1968. – 327 с.
5. Родимов А.П., Поповский В.В. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
6. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин, В.Е. Дулевич / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.
7. Козлов Н.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Поляризационная структура радиолокационных сигналов. – М.: Радиотехника, 2005. – 704 с.
8. Справочник по радиолокации (в 4 т.) / Под ред. М. Скольника; Пер. с англ. под общ. ред. К.Н. Трофимова. – Нью-Йорк, 1970. – Т. 1. Основы радиолокации / Под ред. Я.С. Ицхоки. – М.: Сов. радио, 1976. – 456 с.

Надійшла до редколегії 16.10.2006

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