

О. О. Гребенюк

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИГНАЛУ ІЗ ЗАДАНИМИ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИМИ ПАРАМЕТРАМИ В ОРТОГОНАЛЬНОМУ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОМУ БАЗИСІ

Досвід ведення бойових дій в умовах широкомасштабного вторгнення російської федерації проти України свідчить, що сучасний рівень розвитку радіоелектронного озброєння характеризується великою різноманітністю видів та типів радіоелектронних засобів, а також застосуванням багатофункціональних засобів зі змінюваними в широких межах параметрами сигналів та режимами роботи. Так, у сучасних (новітніх) наземних, повітряних та морських радіолокаційних станціях за різних режимів бойової роботи, залежно від завдань та умов складної радіоелектронної обстановки, здійснюється навмисна зміна частотно-часових, а також поляризаційних параметрів випромінюваних сигналів. Наявність відмінностей у поляризаційних параметрах сигналів об'єктивно створює передумови для їх урахування в обробці для покращення показників виявлення, розпізнавання та пеленгування системами радіомоніторингу. В основі підходу лежить застосування антен з ортогональними за поляризацією антенними елементами, що дозволяє подавати сигнали у вигляді поляризаційних векторів. У ході оброблення необхідно враховувати вплив поляризаційних характеристик антенної системи на параметри поляризаційного вектора (зміну поляризаційного базиса), що є актуальним, оскільки сигнали надходять до антенної системи з різних кутових напрямків.

Важливою умовою отримання об'єктивних результатів у дослідженні ефективності алгоритмів поляризаційної обробки є застосування коректної математичної моделі сигналів із заданими поляризаційними параметрами в окресленому ортогональному поляризаційному базисі, а також використання сигналів від реальних радіотехнічних засобів, поляризаційні параметри яких можуть бути визначені в поляризаційному базисі, відмінному від заданого. У статті запропоновано математичну модель, яка дозволяє виразити складові поляризації через параметри еліпса поляризації, а також наведено вирази, які описують взаємозв'язок поляризаційних векторів та їх коваріаційних матриць у різних поляризаційних базисах антенної системи.

**Ключові слова:** поляризаційний еліпс; поляризаційні характеристики; ступінь поляризації; ортогональний поляризаційний базис; матриця перетворення.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Використання в сучасних радіотехнічних засобах (РТЗ) сигналів зі змінюваними поляризаційними параметрами обумовлює необхідність застосування в засобах радіомоніторингу (РМ) антен з ортогональними за поляризацією елементами та розроблення алгоритмів обробки, які враховують поляризаційну структуру виділених антеною складових сигналів (поляризаційних векторів (ПВ)) у відповідному їй поляризаційному базисі (ПБ). Відомо, що поляризаційні характеристики антен у межах діаграми спрямованості (ДС) не

є сталими, це є причиною викривлення ПБ у разі надходження сигналу з напрямку, відмінного від максимуму ДС [1, 4].

Оскільки роль поляризаційного фільтра на вході систем РМ виконують різні за типом, параметрами та характеристиками антенні системи, то сформованому на виході антени ПВ буде відповідати ПБ, який забезпечує антена. У зв'язку із цим під час дослідження алгоритмів просторової обробки об'єктивно виникає необхідність перерахунку ПВ та їх коваріаційних матриць у потрібний ПБ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню поляризаційної теорії електромагнітних хвиль та антен присвячено велику кількість зарубіжних і вітчизняних наукових робіт. У контексті цієї статті можна виділити такі напрямки:

загальні аналітичні вирази теорії поляризації радіохвиль, опис радіохвиль в ортогональних ПБ [1–3];

результати досліджень характеристик поляризаційних діаграм опромінювачів та антен, які використовуються в радіолокації та РМ [1, 4];

розкладання антенною системою електромагнітної хвилі на ортогонально поляризовані складові [1, 5, 6];

врахування неортогональності поляризаційного вимірювального базису для обчислення коваріаційних матриць ПВ [7].

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є розроблення математичної моделі сигналу із заданими поляризаційними параметрами та ступенем поляризації в ортогональному ПБ.

**Виклад основного матеріалу.** Поляризація електромагнітної хвилі (ЕМХ) є її просторово-часовою характеристикою, що визначається видом траєкторії, яку описує кінець проєкції вектора електричного поля  $\vec{E}$ . Фігуру, що утворюється кінцем вектора  $\vec{E}$  за період коливання високої частоти, прийнято називати поляризаційною діаграмою або поляризаційним еліпсом [1].

Розрізняють поляризацію простого виду, складну та випадкову. До поляризації простого виду належать еліптична, колова та лінійна. Складний вид включає поляризацію, що змінюється в часі за довільним, але певним чином визначеним законом. Складний вид отримують шляхом модуляції поляризації простого виду [2]. За випадкової поляризації вектор  $\vec{E}$  описує в просторі фігуру невизначеної форми.

Для кількісної характеристики поляризації хвиль використовують геометричні параметри поляризаційної діаграми (поляризаційного еліпса). Абсолютне значення коефіцієнта еліптичності  $k_e$  визначається як відношення малої  $b$  та великої  $a$  напівосей еліпса:

$$k_e = b/a. \quad (1)$$

Значення модуля  $k_e$  обмежуються очевидними межами  $0 \leq |k_e| \leq 1$ . Залежно від напрямку обертання вектора  $\vec{E}$  коефіцієнту еліптичності надають той чи інший знак.

Разом із коефіцієнтом  $k_e$  для характеристики форми еліпса й напрямку обертання вектора  $\vec{E}$  використовують кут еліптичності  $\alpha = \text{arctg } k_e$ , за умови  $-0,25\pi \leq \alpha \leq 0,25\pi$ . Орієнтацію еліпса знаходять за значенням кута  $\beta$ , утвореного віссю  $Ox$  обраної системи координат і великою віссю еліпса. При однозначному визначенні положення еліпса значення  $\beta$  лежать у межах  $-0,5\pi \leq \beta \leq 0,5\pi$ .

Залежно від того, змінюються параметри поляризаційної діаграми з часом чи залишаються постійними, ЕМХ поділяють на три групи: повністю поляризовані, частково поляризовані й неполяризовані. Повністю поляризованою називається хвиля з незмінними в часі параметрами поляризації. За наявності безперервних відносно повільних змін параметрів поляризаційної діаграми ЕМХ називають частково поляризованою. Неполяризована чи хаотично поляризована хвиля характеризується швидкими флуктуаціями вектора  $E$  як за модулем, так і за напрямком обертання. У цьому разі поляризаційна діаграма набуває всіх можливих форм й орієнтацій [2].

Проекції  $e_x$  і  $e_y$  вектора  $E$  на ортогональні осі координат  $Ox$  і  $Oy$  можна подати у такому вигляді:

$$e_x = E_x \cos(\omega_o t + \phi_x), \quad (2)$$

$$e_y = E_y \cos(\omega_o t + \phi_y). \quad (3)$$

Для розрахунків значень складових сигналу (2) і (3) використовують вирази, що дозволяють описати складові поля через параметри еліпса поляризації  $a$ ,  $k_e$  і  $\beta$  [1]:

$$E_x = a(\cos^2 \beta + k_e \sin^2 \beta)^{0,5}, \quad (4)$$

$$E_y = a(\sin^2 \beta + k_e \cos^2 \beta)^{0,5}, \quad (5)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \text{arctg} \frac{2k_e}{(1 - k_e^2) \sin 2\beta}. \quad (6)$$

Для реалізації моделей сигналів, різних за ступенем поляризації, необхідно, щоб поляризаційні параметри приймали значення:

- а) для повністю поляризованого сигналу:  $a = \text{const}$ ,  $\beta = \text{const}$ ;
- б) для хаотично поляризованого сигналу:  $a \neq \text{const}$ ,  $0 \leq k_e \leq 1$ ,  $-0,5\pi \leq \beta \leq 0,5\pi$ .

Суттєво, що частково поляризований сигнал можливо подати у вигляді суми двох статистично незалежних компонентів:

$$E_{\text{ч}} = m_p E_{\text{п}} + (1 - m_p) E_{\text{х}}, \quad (7)$$

які визначають регулярну (повністю поляризовану)  $E_{\text{п}}$  і хаотично поляризовану  $E_{\text{х}}$  складові сигналу, при цьому коефіцієнт  $m_p$  приймає значення  $m_p = 0 \dots 1$  і відповідає заданому ступеню поляризації.

На рис. 1 показані миттєві положення вектора  $\vec{E}$  на інтервалі спостереження (1000 вибірок) частково поляризованих сигналів із заданими поляризаційними параметрами, змодельованих за виразами (2)–(7) у програмному середовищі Mathcad.

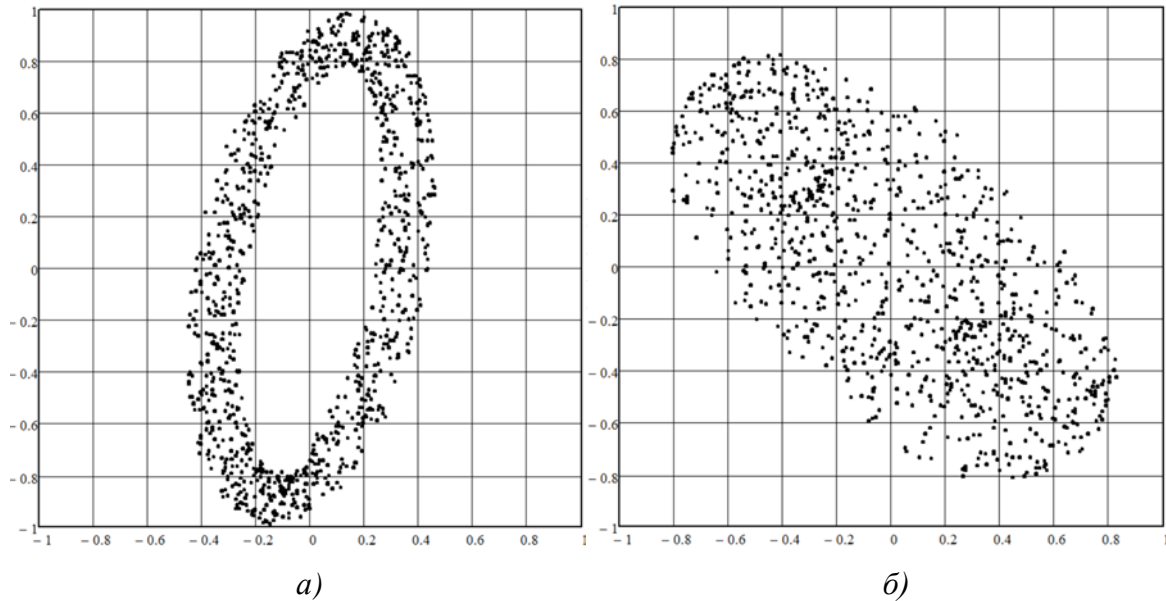


Рис. 1. Нормований поляризаційний еліпс сигналів із заданими поляризаційними параметрами:

$$а) m_p = 0,9; k_e = 0,4; \beta = 80^\circ;$$

$$б) m_p = 0,7; k_e = 0,4; \beta = -45^\circ.$$

У ході проведення поляризаційних досліджень зазвичай обмежуються розкладом поляризованих хвиль по двох ортогональних комплексних в загальному випадку ортах, що знаходяться у фазовій площині хвилі в дальній зоні антени радіолокаційної станції. Пара ортонормованих комплексних векторів  $\vec{e}_1$  та  $\vec{e}_2$  називається ПБ та позначається  $[\vec{e}_1, \vec{e}_2]$  [8].

Під ортонормованим базисом деякого простору в загальному розуміють таку систему ортонормованих векторів  $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n)$ , якщо виконується умова

$$\vec{e}_k \vec{e}_l = \begin{cases} 1, & \text{при } k \neq l \\ 0, & \text{при } k = l \end{cases}, k, l = (\overline{1, n}), \quad (8)$$

де  $n$  – кількість векторів, що збігаються з розмірністю простору [8].

Для аналізу поляризаційних параметрів ЕМХ застосовують ортогональні двомірні ПБ. Таким базисом може бути лінійний, еліптичний або коловий. Будь-який ПБ можна вважати заданим, якщо відомі коефіцієнт еліптичності  $k_{e1}$  та кут орієнтації  $\beta_1$  одного з ортів, тому що для іншого орта (через їхню ортогональність) завжди правильне співвідношення  $k_{e2} = -k_{e1}$ ,  $\beta_2 = \beta_1 \pm \pi/2$ . Тому базис  $[\vec{e}_1, \vec{e}_2]$  можна позначити у вигляді  $[k_e, \beta]$ , де  $k_e = k_{e1}$  а  $\beta = \beta_1$ .

Довільний комплексний вектор  $\vec{E}$ , компланарний ортам базису  $\vec{e}_1$  та  $\vec{e}_2$ , може бути поданий у такому вигляді [1, 2]:

$$\vec{E} = (\vec{E}, \vec{e}_1^*) \vec{e}_1 + (\vec{E}, \vec{e}_2^*) \vec{e}_2 = \dot{E}_1 \vec{e}_1 + \dot{E}_2 \vec{e}_2, \quad (9)$$

де  $\vec{E}_1 = (\dot{E}_1, \vec{e}_1^*)$  та  $\vec{E}_2 = (\dot{E}_2, \vec{e}_2^*)$  – проєкції вектора  $\vec{E}$  на напрямки ортів  $\vec{e}_1$ ,  $\vec{e}_2$ , вони називаються комплексними координатами вектора  $\vec{E}$  в базисі  $[\vec{e}_1, \vec{e}_2]$ .

Якщо вектор  $\vec{E}$  створює еліптичну поляризацію деякої хвилі, то модулі та аргументи комплексних координат є амплітудами та фазами еліптично поляризованих компонентів цієї хвилі, причому кожний компонент спрямовано паралельно відповідному орту ПБ. Отже, (9) описує розклад еліптично поляризованої хвилі на дві ортогонально-поляризовані складові, кожна з яких характеризується своєю амплітудою та фазою.

У зв'язку із цим використовують матричний запис координат комплексного вектора  $\vec{E}$

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} \vec{E}_1 & \vec{E}_2 \end{pmatrix}^T, \quad (10)$$

де  $\vec{E}_1$  та  $\vec{E}_2$  – комплексні амплітуди ортогональних компонент поля, модулі та аргументи яких є амплітудами та фазами еліптично поляризованої хвилі, причому амплітудою хвилі еліптичної поляризації є модуль комплексного вектора  $\vec{E}$ :

$$E_m = \sqrt{\dot{E}_1 \dot{E}_1^* + \dot{E}_2 \dot{E}_2^*}, \quad (11)$$

де (\*) означає комплексно-спряжене число, а фаза визначається фазою лінійно поляризованої компоненти, що збігається з великою віссю еліпса [2, 5, 6].

Отже, відношення (9) також описує розклад еліптично поляризованої хвилі на дві ортогонально поляризовані компоненти в довільному базисі  $[\vec{e}_1, \vec{e}_2]$ . Таке аналітичне подання є зручним та дозволяє використовувати для аналізу поляризаційних властивостей хвиль апарат матричного обчислення.

У разі необхідності переходу від одного довільного ортонормованого базису до іншого (від  $[\vec{e}_1^0, \vec{e}_2^0]$  до  $[\vec{e}_1^1, \vec{e}_2^1]$ ) здійснюється перетворення ортогонально-поляризованих компонент вектора  $\vec{E}$  шляхом домноження на комплексну унітарну матрицю перетворення [1]:

$$\vec{E}^1 = \dot{Q} \vec{E}^0, \quad (12)$$

де  $\dot{Q} = \begin{pmatrix} \dot{q}_{11} & \dot{q}_{12} \\ \dot{q}_{21} & \dot{q}_{22} \end{pmatrix}$  – матриця перетворення.

Оскільки вибір одного з ортів базису є довільним, то дія (12) може бути виконана нескінченною кількістю способів. На практиці найбільш поширеним є розклад у ПБ із

двох лінійно поляризованих або двох поляризованих за колом компонент, які, відповідно, мають назву лінійного та колового ПБ [1, 3, 5].

Матриця перетворення ЕМХ, визначеної в початковому ортогональному ПБ, який характеризується поляризаційними параметрами  $\alpha_0, \beta_0$ , з параметрами ортів  $\alpha_1, \beta_1$  та  $\alpha_2, \beta_2$  має такий вигляд [1]:

$$\dot{Q}_\alpha = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & -j \sin \alpha_1 \\ -j \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

де  $\alpha$  – кут еліптичності.

Іншою матрицею перетворення є матриця повороту будь-якого ПБ на кут  $\beta$  у фазовій площині хвилі:

$$Q_\beta = \begin{pmatrix} \cos \beta_1 & \sin \beta_1 \\ -\sin \beta_1 & \cos \beta_1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Таким чином, розглянуті ПБ, визначені в них ПВ та їхні інваріанти можуть бути використані для вирішення завдань із виявлення та подальшого оброблення корисних сигналів на фоні завадових.

*Взаємозв'язок коваріаційних матриць ПВ у різних ПБ антенної системи (випадок пасивної локації – ведення РМ)*

Розглянемо взаємозв'язок між ПВ у різних ПБ. Для цього запишемо ПВ у формі поляризаційної матриці (ПМ) розміром  $2 \times 2$  за аналогією до ПМ розсіювання [9], яку використовують у радіолокації, прирівнявши до нуля елементи матриці 1,2 та 2,1. Застосування такого подання ПВ пояснюється тим, що під час РМ поляризаційно чутлива антена приймає тільки ортогонально поляризовані складові сигналів, які випромінюють джерела радіовипромінювань.

ПМ у довільному базисі може бути визначена в такий спосіб [1]:

$$\dot{S}_\alpha = \dot{Q}_\alpha^* \cdot \dot{S}_L \cdot \dot{Q}_\alpha^{T*}, \quad (15)$$

де  $\dot{S}_L$  – ПМ у лінійному базисі;

$\dot{Q}_\alpha$  – матриця переходу від лінійного ПБ до довільного, яка враховує вплив кута еліптичності  $\alpha$  (14).

Аналогічним чином враховується вплив кута  $\beta$  на параметри ПМ у довільному базисі:

$$\dot{S}_\beta = Q_\beta^* \cdot \dot{S}_L \cdot Q_\beta^{T*}, \quad (16)$$

де  $Q_\beta$  – матриця переходу від лінійного ПБ до довільного, яка враховує вплив кута орієнтації поляризаційного еліпса (14).

Тоді ПМ у довільному ПБ можна записати як добуток ПМ у лінійному базисі та відповідних матриць перерахунку:

$$\dot{S}_{\beta\alpha} = Q_{\beta}^* \dot{Q}_{\alpha}^* \cdot \dot{S}_L \cdot \dot{Q}_{\alpha}^{T*} Q_{\beta}^{T*}. \quad (17)$$

Для коваріаційних матриць ПВ буде справедливим вираз

$$\dot{M}_{\beta\alpha} = [Q_{\beta}^* \otimes \dot{Q}_{\alpha}^*] \cdot \dot{M}_L \cdot [\dot{Q}_{\alpha}^{T*} \otimes Q_{\beta}^{T*}], \quad (18)$$

де  $\otimes$  – знак кронекерівського множення [7, 8].

Вираз (18) визначає зв'язок коваріаційної матриці в лінійному та довільному ПБ.

**Висновки.** Застосування в сучасних радіолокаційних станціях сигналів зі змінними поляризаційними параметрами спонукає до їх врахування в обробці для покращення показників виявлення, розпізнавання та пеленгування засобів і комплексів РМ.

Запропонована в статті математична модель відтворює через параметри еліпса поляризації в лінійному ПБ ортогональні складові ПВ, які формуються на виході ортогональних поляризаційних каналів антенної системи. Вибірki ПВ, визначені в довільному ПБ, можуть бути перераховані в заданий ПБ шляхом математичних обчислень. За аналогією також є зв'язок між коваріаційними матрицями, розрахованими в різних ПБ.

Розроблену математичну модель доцільно використовувати для отримання об'єктивних результатів у ході дослідження алгоритмів виявлення, пеленгування та розпізнавання джерел зі змінними поляризаційними параметрами сигналів під час ведення РМ у складних умовах сучасної радіоелектронної обстановки.

### СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Казаков Е. Л. Радиолокационное распознавание космических объектов по поляризационным признакам. Одесса : ОИУМ, 1999. 230 с.
2. Giuli D. Polarization Diversity in Radars. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2005. P. 245–269.
3. Ільницький Л. Я., Сібрук Л. В., Габрусенко Є. І. Особливості колового ортогонального поляризаційного базису // Електроніка та системи управління. 2007. № 1. С. 54–61.
4. Нарбут В. П., Хмель В. Ф. Поляризация излучения зеркальных антенн / Київ : Вища школа, 1978. 279 с.
5. Ільницький Л. Я., Фецуна А. В. Розкладання антенною системою електромагнітної хвилі на ортогонально поляризовані складові // Матер. VI Міжнар. наук.-техн. конф. АВІА-2003. Київ, 2003. С. 24.1–24.4.
6. Pnytskyi L. Y., Fetsun A. V. The Requirements to Dipole Orientation on the Assumption of Polarization Orthogonalization // Proc. of the IV International Conference on Antenna Theory and Techniques. Sevastopol, 2003. P. 739–741. <https://doi.org/10.1109/icatt.2003.1238852>
7. Методика аналізу впливу поляризаційних характеристик антен на відмінності параметрів областей локалізації поляризаційних векторів сигналів та завад / О. О. Мартинчук, О. Д. Флоров, О. П. Гребенюк, С. А. Волювач // Системи озброєння і військова техніка. Харків : ХУПС, 2007. № 2 (10). С. 71–75.

8. Bronshtein I. N., Semendyayev K. A. Handbook of Mathematics. SPRINGER, New York Incorporated, 2007. 1109 p.
9. Сухаревский О. И., Василец В. А. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами : монография. Харьков : ХУПС, 2009. 468 с.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2024.

## REFERENCES

1. Kazakov, E. L. (1999). *Radiolokatsionnoe raspoznavanie kosmicheskikh ob'ektov po poliarizatsionnym priznakam [Radar Recognition of Space Objects by Polarization Features]*. Odesa [in Russian].
2. Giuli, D. (2005). *Polarization Diversity in Radars*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
3. Ilnytskyi, L. Ya., Sibruk, L. V., & Habrusenko, Ye. I. (2007). Osoblyvosti kolovoho ortohonalnoho poliaryzatsiinoho bazysu [Features of the Circular Orthogonal Polarization Basis]. *Elektronika ta systemy upravlinnia [Electronics and Control Systems]*, 1, 54–61 [in Ukrainian].
4. Narbut, V. P., & Khmel', V. F. (1978). *Poliaryzatsiia izlucheniia zerkal'nykh antenn [Polarization of Specular Radiation Radiation]*. Kyiv [in Russian].
5. Ilnytskyi, L. Ya., & Fetsun, A. V. (2003). Rozkladannia antennoiu systemoiu elektromahnitnoi khvyli na ortohonalno poliaryzovani skladovi [Decomposition of an Electromagnetic Wave into Orthogonally Polarized Components by an Antenna System]. In *Mater. VI Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. AVIA-2003 [Mater. VI International Scientific and Technical Conference AVIA-2003]*. (pp. 24.1–24.4). Kyiv [in Ukrainian].
6. Ilnytskyi, L. Ya., & Fetsun, A. V. (2003). The Requirements to Dipole Orientation on the Assumption of Polarization Orthogonalization. In *Proc. of the IV International Conference on Antenna Theory and Techniques*. Sevastopol. (pp. 739–741). <https://doi.org/10.1109/icatt.2003.1238852>
7. Martynchuk, O. O., Florov, O. D., Hrebenuk, O. P., & Voliuvach, S. A. (2007). Metodyka analizu vplyvu poliaryzatsiinykh kharakterystyk anten na vidminnosti parametriv oblastei lokalizatsii poliaryzatsiinykh vektoriv syhnaliv ta zavad [Methodology for Analyzing the Influence of Polarization Characteristics of Antennas on the Differences in the Parameters of the Localization Areas of Polarization Vectors of Signals and Interference]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Armament Systems and Military Equipment]*, 2 (10), 71–75. Kharkiv [in Ukrainian].
8. Bronshtein, I. N., & Semendyayev, K. A. (2007). *Handbook of Mathematics*. SPRINGER, New York Incorporated.
9. Sukharevskii, O. I., Vasilets, V. A. (2009). *Rasseianie elektromagnitnykh voln vozdushnymi i nazemnymi radiolokatsionnymi ob'ektami: monografiia [Scattering of Electromagnetic Waves by Air and Ground Radar Objects: Monograph]*. Kharkiv [in Russian].



## MATHEMATICAL MODEL OF A SIGNAL WITH SPECIFIED POLARISATION PARAMETERS IN THE ORTHOGONAL POLARISATION BASIS

*The experience of combat operations in the context of the large-scale invasion of Ukraine by the Russian Federation shows that the current level of development of electronic weapons is characterised by a wide variety of types and types of electronic means, the use of multifunctional means with widely variable signal parameters and operating modes. For example, modern (state-of-the-art) ground, air and sea radar stations use deliberate changes in the frequency, time and polarisation parameters of emitted signals in different modes of operation, depending on the tasks and conditions of a complex electronic environment. The presence of differences in the polarisation parameters of signals objectively creates prerequisites for their consideration in processing in order to improve the detection, recognition and direction finding performance of radio monitoring systems in a complex electronic environment. The approach is based on the use of antennas with orthogonal polarisation antenna elements, which allows signals to be represented as polarisation vectors. During the processing, it is necessary to take into account the influence of the polarisation characteristics of the antenna system on the parameters of the polarisation vector (change of the polarisation basis), which is relevant since the signals are received by the antenna system from different angular directions.*

*An important condition for obtaining objective results when studying the efficiency of polarisation processing algorithms is the use of a correct mathematical model of signals with given polarisation parameters in a certain orthogonal polarisation basis, as well as the use of signals from real radio equipment whose polarisation parameters can be determined in a polarisation basis other than the specified one. The article presents a mathematical model that allows expressing the field components through the parameters of the polarisation ellipse, and also gives expressions describing the relationship between polarisation vectors and their covariance matrices in different polarisation bases of the antenna system.*

**Keywords:** *polarisation ellipse; polarisation characteristics; degree of polarisation; orthogonal polarisation basis; transformation matrix.*