

О.П. Гребенюк, О.І. Логінов, О.О. Мартинчук

АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИМ БАЗИСОМ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ НА ВИПРОМІНЕННЯ РЛС В УМОВАХ ДІЇ ЗОВНІШНІХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Пропонується алгоритм адаптивного управління поляризацією передавальної системи в РЛС з повним поляризаційним зондуванням, який дозволяє усунути залежність ефективності виявлення об'єктів та подавлення завад від поляризації зовнішнього випромінювання.

Використання поляризаційних відмінностей сигналу та зовнішніх випромінювань представляє інтерес в умовах, коли ускладнені просторова, частотна та часова фільтрації.

Адаптивні за поляризацією приймальні антенні системи [1] можуть забезпечити значне подавлення діючих завад. Це здійснюється за умови ортогональності еліпсів поляризації завади та антени, при протилежних напрямках обертання площин їх обертання. В реальних пристроях подавлення завад вдається здійснити до 30 дБ [1].

Для підвищення ефективності алгоритмів поляризаційної обробки доцільно використовувати РЛС з повним поляризаційним зондуванням (ППЗ). Під ППЗ розуміємо випромінювання взаємортогональних за часовою структурою сигналів на двох ортогональних поляризаціях та їх повний поляризаційний прийом [2]. Цей процес дозволяє забезпечити одночасне вимірювання квадратурних компонент поляризаційного вектора (ПВ). Поляризаційний вектор сигналу представимо у вигляді вектора:

$$\vec{S} = (\dot{S}_{11} \dot{S}_{21} \dot{S}_{12} \dot{S}_{22})^T, \tag{1}$$

який складається з комплексних елементів поляризаційної матриці розсіювання (ПМР), яка визначає зв'язок між випроміненими та відбитими від об'єкта хвилями [2]:

$$S = \begin{pmatrix} | & | \\ \dot{S}_{11} e^{j\varphi_{11}} & \dot{S}_{12} e^{j\varphi_{12}} \\ | & | \\ \dot{S}_{21} e^{j\varphi_{21}} & \dot{S}_{22} e^{j\varphi_{21}} \\ | & | \end{pmatrix}, \tag{2}$$

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

($i, j = 1; 2$), причому перший індекс відповідає поляризації випромінюючої антени, а другий – поляризації приймальної антени.

Таке подання дозволяє використовувати для опису та досліджень, в тому числі і поляризаційних явищ, апарат багатомірного статистичного аналізу, а також основні результати сучасної теорії радіолокації, одержані на його основі.

За простір вимірюваних ознак оберемо n -мірний ($n = 4$) комплексний поляризаційний простір (КПП) [2], направляючи комплексні орти якого поставимо у відповідність комплексним елементам ПВ.

Поляризаційно-статистичні якості ПВ різних сигналів та завад можна використовувати при вирішенні задач виявлення, розпізнавання, а також подавлення зовнішніх заважаючих випромінювань.

Домовимось, що вимірювання елементів ПВ проводиться з абсолютними фазами та достатньою для практичних досліджень точністю, що квадратурні складові відбитого сигналу підпорядковані нормальному закону розподілення.

Нехай ПВ \vec{S} відповідає в деякому наближенні багатомірна нормальна щільність розподілення $P(\vec{S})$, яка визначає енергетичні та взаємні кореляційні властивості елементів ПВ (1). У першому наближенні багатомірна щільність розподілення ймовірностей може бути представлена коваріаційно-поляризаційною матрицею (КПМ) [3]:

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

де $E\{\cdot\}$ – оператор статистичного усереднення;

\dot{M} – коваріаційно-поляризаційна матриця [2];

$\dot{\mu}$ – вектор області середніх значень.

Маючи КПМ (3), можемо визначити ту область початкового КПП, всередині якого локалізується випадковий вектор \dot{S} , компоненти якого розподілені нормально [3]. Відомо, що виборки нормально розподіленої випадкової величини мають тенденцію попадати в одну область [3]. Центр області визначається вектором середніх значень $\dot{\mu}$, а форма – коваріаційною матрицею \dot{M} . З відношення (3) слідує, що елементи випадкового вектора \dot{S} утворюють п-мірний еліпсоїд, який дорівнює щільності ймовірностей [2, 3], рівняння якого має такий вигляд:

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

де $d > 0$, ймовірність попадання координат випадкового вектора \dot{S} всередину еліпсоїда. Головні осі цього еліпса задаються особистими значеннями.

$$a_i = d\sqrt{\lambda_i}, \quad i = 1, \dots, g, \quad (5)$$

де a_i – розмір напівосей;

g – ранг КПМ;

λ_i – власне число КПМ.

Матриця, яка входить до виразу (4), обернена до КПМ \dot{M} та передбачає існування останньої. В подальшому g -мірний еліпсоїд будемо називати областю локалізації ПВ.

Аналіз поляризаційно-статистичних параметрів ПВ сигналу та завад виявив їх суттєві відмінності [2].

Дослідження алгоритмів поляризаційно-статистичної обробки ПВ сигналів та завад [2] показало залежність ефективності виявлення від відношення потужностей сигналу та завад; ступеня поляризації завад; способу вимірювання елементів ПВ; а також від поляризаційних параметрів, які визначають орієнтацію області локалізації ПВ сигналу та завад в КПП. Для оцінки просторових відмінностей областей локалізації ПВ сигналу та завад використовується комплексний кут Q між відповідними власними векторами КПМ сигналу та завад [4]. Найбільша ефективність алгоритмів виявлення відповідає умовам, коли кут між власними векторами областей локалізації ПВ сигналу та завади складає $Q^\perp = 90^\circ + j0^\circ$, тобто області локалізації ПВ сигналу та завади ортогональні.

При відхиленні кута від Q^\perp спостерігається зниження ефективності показників виявлення цілі на фоні завад.

Забезпечити високу ефективність виявлення для всієї кількості станів поляризації сигналів та завад важко. Разом з тим бажано зберегти високу ефективність поляризаційно-статистичної обробки в складних сигнальних та заводових умовах. Отже, необхідно проводити адаптивне управління параметрами поляризаційного базису антенної системи (АС) РЛС з метою підвищення ефективності алгоритмів виявлення.

Управління поляризаційним базисом антенної системи на прийом при умові, що в РЛС здійснюється повний поляризаційний прийом, показало, що ефективність виявлення не змінюється. Це пояснюється тим, що зміна параметрів поляризаційного базису АС на прийом однаково змінює просторове положення областей локалізації ПВ в КПП, тобто кут Q між власними векторами КПМ сигналу та завади не змінюється.

Для підвищення ефективності виявлення пропонується проводити адаптивне управління поляризаційним базисом АС на випромінення, що повинно забезпечити ортогоналізацію відповідних областей локалізації ПВ сигналу та завад в КПП.

Розглянемо приклад управління параметрами поляризаційного базису АС на випромінення. Як ціль розглянемо об'єкт типу сфера, завада – повністю поляризована шумова. Антенну систему можна представити у вигляді двох ортогональних лінійних вібраторів. Рішення задачі управління параметрами поляризаційного базису зводиться до визначення таких поляризаційних

параметрів α_c та β_c , які забезпечать ортогональність областей локалізації ПВ цілі та завади в КПП.

Оскільки ранг КПМ ПВ сфери та повністю поляризованої завади дорівнює одиниці [2], то відповідні області локалізації одномірні, а їх орієнтації в КПП визначаються тільки першими власними векторами, а саме $\hat{b}_{1c\phi}$ та \hat{b}_{1z} .

Визначення необхідних поляризаційних параметрів зондуючих сигналів α_c та β_c , що забезпечують ортогональність векторів $\hat{b}_{1c\phi}$ та \hat{b}_{1z} , можливе при виконанні умови рівності нулю скалярного добутку власних векторів [4]:

$$\left(\hat{b}_{1c\phi} \hat{b}_{1z} \right) = 0^\circ + j0^\circ. \quad (6)$$

Поляризаційний вектор у довільному поляризаційному базисі можна представити як $\hat{S} = (\hat{Q} \otimes \hat{Q}) \hat{S}^\wedge$, тоді ПМР цілі дорівнює $\hat{S} = \hat{Q}_r \hat{S}^\wedge \hat{Q}_t$ [5]. Визначимо КПМ цілі у довільному поляризаційному базисі:

$$\hat{M}_{c\phi} = [\hat{Q}_t^* \otimes \hat{Q}_r^*] \hat{M}_{c\phi} [\hat{Q}_t^{T*} \otimes \hat{Q}_r^{T*}], \quad (7)$$

де $\hat{M}_{c\phi}^\wedge$ – КПМ цілі типу сфера в лінійному поляризаційному базисі;

\hat{Q}_t – матриця перетворень на випромінення;

\hat{Q}_r – матриця перетворень на прийом.

Матриця перетворень поляризаційного базису має наступний вигляд:

$$\hat{Q} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha & j \sin \alpha \\ -j \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де перший співмножник є оператором повороту базису, а другий – оператором еліптичного перетворення. Матрицю перетворення поляризаційного базису на прийом вважаємо одиничною $\hat{Q}_r = 1$. Враховуючи, що спектральні параметри та власні вектори КПМ зв'язані виразом:

$$\hat{M} = \hat{S}_{c\phi} \hat{S}_{c\phi}^{T*} = \sum_{i=1}^r \lambda_i \hat{b}_i \hat{b}_i^{T*}, \quad (9)$$

то для цілі типу сфера ПВ можна поставити у відповідність першому власному вектору

$$\hat{S}_{c\phi} \equiv \sqrt{\lambda} \hat{b}_c, \quad (10)$$

оскільки

$$\lambda_1 = S_p(\hat{M}_{c\phi}). \quad (11)$$

Власний вектор КПМ сфери може бути представлений у наступному вигляді:

$$\hat{b}_{1c\phi} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_c \cos \beta_c - j \sin \alpha_c \sin \beta_c \\ \cos \alpha_c \sin \beta_c + j \sin \alpha_c \cos \beta_c \\ -\cos \alpha_c \sin \beta_c - j \sin \alpha_c \cos \beta_c \\ \cos \alpha_c \cos \beta_c - j \sin \alpha_c \sin \beta_c \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Оскільки для ПВ завади характерна рівність першого та третього елементів, а також другого та четвертого елементів, тоді власний вектор завади можна записати у вигляді:

$$\hat{b}_{1z} = \begin{pmatrix} b_1 + j b_1' \\ b_2 + j b_2' \\ b_1 + j b_1' \\ b_2 + j b_2' \end{pmatrix}, \quad (13)$$

де b_1, b_1' та b_2, b_2' – дійсні та уявні складові проекцій першого та другого елементів власного вектора завади на орти КПП. У даному випадку власний вектор завади може бути представлений у вигляді [2]:

$$\dot{b}_{1z} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_3 \cos \beta_3 - j \sin \alpha_3 \sin \beta_3 \\ \cos \alpha_3 \sin \beta_3 + j \sin \alpha_3 \cos \beta_3 \\ \cos \alpha_3 \cos \beta_3 - j \sin \alpha_3 \sin \beta_3 \\ \cos \alpha_3 \sin \beta_3 + j \sin \alpha_3 \cos \beta_3 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Проводячи адаптивну оцінку поляризаційних параметрів завад, діючих на РЛС, можна одержати деякі поляризаційні параметри α_3 та β_3 усереднені на інтервалі спостереження за завадами. Підставивши значення поляризаційних параметрів завади α_3 та β_3 у вираз (14), можемо визначити дійсні та уявні складові проекції першого власного вектора завади на орти КПП. Підставляючи значення власних векторів цілі та завади в (6), одержимо, що для виконання умови рівності нулю скалярного добутку необхідно визначити відповідні α_c та β_c . Вирішуючи рівняння (6) відносно α_c та β_c , одержимо:

$$\alpha_c = \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{2[(b_1 - b_2)(b_1' + b_2') + (b_1 + b_2)(b_1' - b_2')]}{(b_1 + b_2)^2 + (b_1' - b_2')^2 + (b_1 - b_2)^2 + (b_1' + b_2')^2} \right], \quad (15)$$

$$\beta_c = \frac{1}{2} \arctg \left[\frac{2[(b_1' + b_2')(b_1' - b_2') + (b_1 + b_2)(b_1 - b_2)]}{(b_1' + b_2')^2 - (b_1' - b_2')^2 + (b_1 + b_2)^2 - (b_1 - b_2)^2} \right]. \quad (16)$$

Викладене дозволяє сформулювати алгоритм управління параметрами поляризаційного базису РЛС з повним поляризаційним зондуванням. Даний алгоритм включає в себе: адаптивну оцінку усереднених значень поляризаційних параметрів діючої завади; визначення проекцій компонент першого власного вектора завади на орти КПП; підстановку значень компонент власного вектора завади з метою визначення поляризаційних параметрів α_c та β_c зондуючих сигналів; формування сигналів управління поляризаційним базисом антенної системи на випромінення з метою забезпечення необхідних поляризаційних параметрів.

Для одержання чисельного результату, що характеризує ефективність використання алгоритму управління параметрами поляризаційного базису АС РЛС, розглянемо ситуацію, коли в секторі огляду РЛС з ППЗ знаходиться об'єкт типу сфера, який прикривається повністю, частково та хаотично поляризованими завадами.

За початкові дані для чисельного розрахунку ефективності управління параметрами поляризаційного базису (ПБ) вважатимемо, що параметри ПБ антенної системи на прийом лінійні, тобто $\alpha_{c1} = 0^\circ$, $\alpha_{c2} = 0^\circ$, $\beta_{c1} = 0^\circ$, та $\beta_{c2} = 90^\circ$, а параметри антенної системи на випромінення визначаються в залежності від поляризаційних параметрів активно-шумової завади (АШЗ) згідно з формулами (15) і (16), що забезпечує ортогоналізацію перших власних векторів областей локалізації ПБ завад та сигналу. Відношення сигнал-шум візьмемо рівним не менше 20 дБ.

На рис. 1 зображена залежність ймовірності правильного виявлення від відношення сигнал-шум. Крива під номером 1 відповідає ймовірності правильного виявлення (D) об'єкта типу сфера при дії повністю поляризованої АШЗ, поляризаційні параметри якої дорівнюють $\alpha_3 = 0^\circ$, $\beta_3 = 0^\circ$, без управління параметрами ПБ. Крива під номером 2 відповідає D при управлінні параметрами ПБ антенної системи на випромінення. Криві під номером 3 та 4 відповідають ймовірностям правильного виявлення при дії частково та хаотично поляризованих АШЗ та управлінні параметрами ПБ антенної системи на випромінення. З порівняння кривих, наведених на рис. 1, слідує, що енергетичний вигравш при управлінні параметрами ПБ антенної системи на випромінення, який визначається за рівнем $D = 0,9$, складає приблизно 4 дБ при дії на РЛС з ППЗ повністю поляризованої завади (рис. 1, крива 2). При дії частково та хаотично поляризованих завад енергетичний вигравш складає 5 дБ та 6 дБ відповідно. Задані показники ефективності виявлення ($D = 0,9$ та $F \leq 10^{-7}$) при управлінні параметрами ПБ антенної системи на випромінення можуть бути отримані при $q^2_{c/z} = -47$ дБ для ПП АШЗ, $q^2_{c/z} = -44$ дБ для ЧП АШЗ, та $q^2_{c/z} = -40$ дБ для ХП завади.

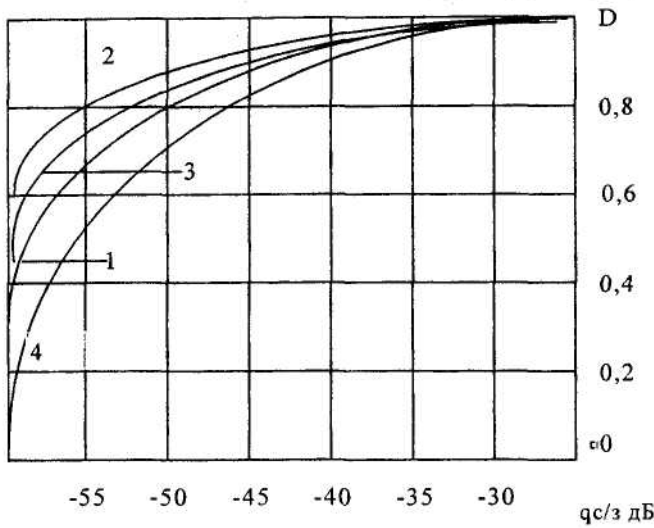


Рис. 1

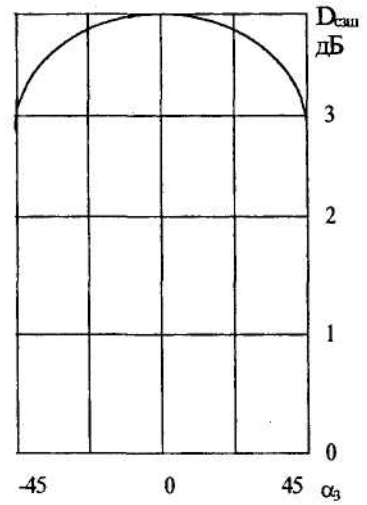


Рис. 2

Як показник ефективності управління параметрами ПБ антенної системи на випромінення можна використовувати коефіцієнт покращення [1]:

$$D_{сшш} = \frac{P_{с\ вих} (P_{з\ вих} + P_{ш\ вих})}{P_{с\ вх} (P_{з\ вх} + P_{ш\ вх})} \tag{17}$$

де $P_c, P_z, P_{ш}$ – потужність відповідно сигналу, завади та шуму.

Коефіцієнт покращення показує, на скільки покращується відношення корисного сигналу та придушеної завади в результаті управління параметрами ПБ антенної системи на випромінення.

На рис. 2 показана залежність $D_{сшш}$ від α_3 . В залежності від α_3 , коефіцієнт покращення може досягати 4 дБ при $\alpha_3 = 0^\circ, \beta_3 = 0^\circ$ та 3 дБ при $\alpha_3 = 45^\circ$.

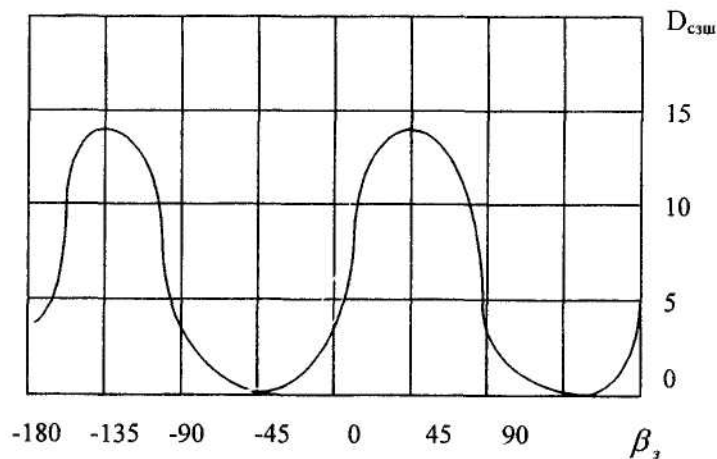


Рис. 3

На рис. 3 представлена залежність $D_{сшш}$ від β_3 , з якої слідує, що ефективність використання алгоритму поляризаційно-статистичного виявлення збільшується при управлінні параметрами поляризаційного базису АС РЛС. Для того, щоб орієнтація відповідних областей локалізації ПВ сфери та ПП АШЗ була ортогональною, в КПП необхідно забезпечити параметри зонduючого сигналу рівними $\alpha_{c_1} = 0^\circ, \alpha_{c_2} = 0^\circ, \beta_{c_1} = 45^\circ, \beta_{c_2} = 135^\circ$. В залежності від

поляризаційних параметрів, що діють на РЛС завади β_3 , коефіцієнт покращення може досягати 4 дБ при $\alpha_3 = 0^\circ$, $\beta_3 = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ та 14 дБ при $\alpha_3 = 0^\circ$, $\beta_3 = 45^\circ, -135^\circ$. В тому випадку, якщо $\alpha_3 = 0^\circ$, $\beta_3 = -45^\circ, 135^\circ$, коефіцієнт $D_{\text{сши}} = 0$, оскільки власні вектори \vec{b}_1 та $\vec{b}_{1\text{сф}}$ ортогональні в КПП.

Таким чином, використання алгоритму з управлінням параметрами поляризаційного базису АС на випромінення дозволяє отримати енергетичний виграш у відношенні сигнал-завада від 3 дБ до 14 дБ в залежності від поляризаційних параметрів завади. Дослідження алгоритму з управлінням параметрами ПБ антенної системи на випромінення показало, що управління параметрами зондуючого сигналу дозволяє підвищити показники ефективності виявлення при дії частково та хаотично поляризованих завад. Тоді задані показники ефективності виявлення ($D = 0,9$ та $F \leq 10^{-7}$) можуть бути одержані при $q^2_{\text{с/з}} = -47$ дБ для ПП АШЗ, $q^2_{\text{с/з}} = -44$ дБ для ЧП АШЗ та $q^2_{\text{с/з}} = -40$ дБ для ХП завади.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Родимов А.П., Поповский В.В. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех в линиях связи. – Москва: Радио и связь, 1984. – 271 с.
2. Мартыничук А.А., Логинов А.И. Анализ поляризационно-статистических различий сигнала и активно-шумовой помехи. Сборник докладов IX ВНК. – Житомир: ЖВУРЭ ПВО, 1994.
3. Либенсон М.Н., Хесин А.Я. Янсон Б.А. Автоматизация распознавания телевизионных изображений. – Москва: Энергия, 1975. – 159 с.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов 13-е изд. – Москва: Наука, гл. изд. физ.-мат. лит, 1986. – 544 с.
5. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / Варганов М.Е., Зиновьев Ю.С., Сарычев В.Л., Астанин Л.Ю. и др. / Под ред. Тучнова Л.Т. – М.: Радио и связь, 1985. – 236 с.

ГРЕБЕНЮК Олег Петрович – ад'юнкт Житомирського військового інституту радіоелектроніки.

Наукові інтереси:

– статистична теорія поляризаційної обробки.

ЛОГІНОВ Олександр Іванович – кандидат технічних наук, викладач Житомирського військового інституту радіоелектроніки.

Наукові інтереси:

– статистична теорія поляризаційної обробки.

МАРТИНЧУК Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, докторант Харківського військового університету.

Наукові інтереси:

– розвиток теорії поляризаційно-часової обробки сигналів та завад.