

УДК 621.396.26

О.Д. Флоров¹, С.А. Волювач¹, О.П. Гребенюк²

¹Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

²Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова, Житомир

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЯХ З ПОВНИМ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИМ ЗОНДУ- ВАННЯМ

Досліджено характер впливу спотворень поляризаційного базису антенної системи на ефективність поляризаційно-просторової обробки сигналів на фоні діючих завад в РЛС з повним поляризаційним зондуванням.

активна шумова завада, поляризаційний вектор, повне поляризаційне зондування, антенна система, поляризаційна матриця розсіювання, антенна решітка, амплітудно-фазовий розподіл, діаграма спрямованості, поляризаційна характеристика, область локалізації, поляризаційна діаграма, ковариаційно-поляризаційна матриця

Вступ

Постановка задачі. Бурхливий розвиток радіотехнічних засобів, що працюють на випромінювання, обумовив виникнення ряду актуальних задач. Так на фоні удосконалення засобів радіоелектронної боротьби за рахунок оптимізації видів створюваних завад, розширення частотного діапазону, підвищення енергетичного потенціалу та ін., особливої уваги заслуговує питання захисту радіолокаційних станцій (РЛС) від активних шумових завад (АШЗ).

З цією метою набули застосування алгоритми компенсації завад, дія яких ґрунтується на використанні просторових та поляризаційних відмінностей сигналів і завад. Так в області радіолокації та

зв'язку широко використовуються та забезпечують ефективне придушення діючих АШЗ алгоритми просторової, поляризаційної, а також просторово-поляризаційної вагових обробок. Також заслуговує уваги використання спільних просторово-поляризаційних відмінностей сигналів та завад. Причому в якості поляризаційних відмінностей доцільним є використання статистичних закономірностей розподілу в багатомірному просторі поляризаційних векторів (ПВ) об'єктів різних класів, а також ПВ АШЗ, які проявляються при повному поляризаційному зондуванні (ППЗ) простору [1].

Слід відмітити, що ефективність поляризаційної селекції на фоні завад в РЛС з керованим поля-

ризаційним базисом або в РЛС з ППЗ, в значній мірі залежить від поляризаційних характеристик (ПХ) антенної системи (АС), оскільки їхні викривлення можуть привести до появи додаткових помилок при визначенні параметрів ПВ сигналів та завад, а як наслідок до неоптимальної для даних умов обробки.

У зв'язку з цим метою статті є дослідження ефективності поляризаційно-просторової обробки при ППЗ простору з урахуванням впливу ПХ антен.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У відомих дослідженнях методу ППЗ [2,3] отримано результати без урахування впливу ПХ антен. Крім того, на відміну від методу просторово-поляризаційної обробки із повним поляризаційним прийомом [4], питання спільної поляризаційно-просторової обробки при ППЗ також не досліджувалось.

Рішення задачі

Будемо вважати, що зондування простору відбувається, таким чином, що за фіксований проміжок часу спостереження здійснюється N відліків елементів ПВ. В якості фіксованих параметрів відбитих сигналів будемо розглядати всі елементи поляризаційної матриці розсіювання (ПМР) (1): чотири амплітуди й відповідні фази, які утворюють елементи ПВ (2):

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

де $\dot{S}_{xy} = |\dot{S}_{xy}|e^{j\phi_{xy}}$ – відповідно модуль (амплітуда) та фаза x, y -го комплексного елемента ПМР ($x, y=1,2$);

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

З виходу кожної пари антенних елементів, що мають ортогональну поляризацію, отримаємо ортогональні складові векторного сигналу. Так, наприклад, з виходів m -х антенних елементів вертикальної (в) та горизонтальної (г) поляризації отримаємо сигнали:

$$\dot{Y}_{B_m}(t_i) = \gamma_c \cdot \dot{S}_{B_m}(t_i) \cdot \dot{S}(\alpha_m) + \sum_{k=1}^K \gamma_{\zeta_k} \cdot \dot{n}_{B_{k,m}}(t_i) \cdot \dot{n}_k(v_m) + \xi_{B_m}(t_i); \quad (3)$$

$$\dot{Y}_{\tilde{A}_m}(t_i) = \gamma_c \cdot \dot{S}_{\tilde{A}_m}(t_i) \cdot \dot{S}(\alpha_m) + \sum_{k=1}^K \gamma_{\zeta_k} \cdot \dot{n}_{\tilde{A}_{k,m}}(t_i) \cdot \dot{n}_k(v_m) + \xi_{\tilde{A}_m}(t_i), \quad (4)$$

де $\dot{S}_{B_m}(t_i) = \dot{S}_{BB_m}(t_i) + \dot{S}_{\tilde{A}\tilde{A}}(t_i)$;

$\dot{S}_{\tilde{A}_m}(t_i) = \dot{S}_{\tilde{A}\tilde{A}_m}(t_i) + \dot{S}_{\tilde{A}\tilde{A}}(t_i)$;

$m=1 \dots M$ – кількість антенних елементів в антенній системі; $k=1 \dots K$ – кількість діючих АШЗ; $i=1 \dots N$ – кількість відліків за часом;

$\dot{S}_{BB_m}(t_i), \dot{S}_{\tilde{A}\tilde{A}_m}(t_i), \dot{S}_{B\tilde{A}_m}(t_i), \dot{S}_{\tilde{A}\tilde{A}}(t_i)$ – елементи ПМР об'єкту локації прийняті m -м антенним

елементом, причому другий індекс вказує на поляризацію антенного елемента з якого випромінювався сигнал, а перший індекс на поляризацію антенного елемента яким його прийнято;

$\dot{n}_{B_{k,m}}(t_i), \dot{n}_{\tilde{A}_{k,m}}(t_i)$ – закон зміни в часі комплексних амплітуд коливань k -ї завади на m -му антенному елементі в i -й момент часу, відповідно для антенних елементів з вертикальною та горизонтальною поляризацією;

$\dot{S}(\alpha_m)$ та $\dot{n}_k(v_m)$ – описують амплітудно-фазовий розподіл (АФР) відповідно корисного сигналу та діючої k -ї завади на m -му антенному елементі розкриття АС.

Вони залежать від виду апроксимації (сферична, плоска) та параметрів фронту електромагнітної хвилі, що надходить. Для плоских хвиль $\dot{S}(\alpha_m)$ та $\dot{n}_k(v_m)$ залежить від кутового напрямку приходу [5]. Для m -го елемента лінійної еквідистантної антенної решітки (АР):

$$\dot{S}(\alpha_m) = \exp(-j\alpha_{c_m}); \quad \dot{n}(v_m) = \exp(-jv_{k,m}), \quad (5)$$

де α_{c_m} та $v_{k,m}$ – просторовий параметр, що характеризує напрямок приходу відповідно корисного сигналу та k -ї завади:

$$\alpha_{c_m} = \frac{(m-1) \cdot 2\pi d \cdot \sin Q_c}{\lambda};$$

$$v_{k,m} = \frac{(m-1) \cdot 2\pi d \cdot \sin Q_{\zeta_k}}{\lambda}, \quad (6)$$

де d – відстань між сусідніми елементами АС; Q_c та Q_{ζ_k} – кут між нормаллю АР і напрямком на джерело корисного сигналу та k -ту діючу заваду; λ – довжина хвилі прийнятого коливання;

$\xi_{B_m}(t_i)$ та $\xi_{\tilde{A}_m}(t_i)$ – описують закон зміни в часі власних шумів m -го приймального каналу вертикальної та горизонтальної поляризації.

У загальному вигляді, при повному поляризаційному прийомі, з виходів антенних елементів отримаємо вхідний вектор виду:

$$\dot{Y}(t_i) = \left\| \begin{matrix} \dot{Y}_{B_1}(t_i), \dot{Y}_{\tilde{A}_1}(t_i), \dot{Y}_{B_2}(t_i), \dot{Y}_{\tilde{A}_2}(t_i), \dots \\ \dots, \dot{Y}_{B_m}(t_i), \dot{Y}_{\tilde{A}_m}(t_i) \end{matrix} \right\|^T. \quad (7)$$

З урахуванням подальшого виділення елементів ПВ отриманих при ППЗ, вхідний вектор запишемо у вигляді:

$$\dot{Y}(t_i) = \left\| \begin{matrix} \dot{Y}_{\tilde{A}B_1}(t_i), \dot{Y}_{\tilde{A}\tilde{A}_1}(t_i), \dot{Y}_{B\tilde{A}_1}(t_i), \dot{Y}_{\tilde{A}\tilde{A}_1}(t_i), \dots \\ \dots, \dot{Y}_{B\tilde{A}_m}(t_i), \dot{Y}_{\tilde{A}\tilde{A}_m}(t_i), \dot{Y}_{B\tilde{A}_m}(t_i), \dot{Y}_{\tilde{A}\tilde{A}_m}(t_i) \end{matrix} \right\|^T. \quad (8)$$

Загальна структура алгоритму поляризаційно-просторової обробки при ППЗ співпадає зі структурою алгоритму просторово-часової обробки. Але, параметри, зміст перемінних, що входять до нього, а також фізичні результати є іншими.

Запропонований алгоритм передбачає розгляд процесу придушення завад та виявлення сигналу як єдиного етапу обробки поляризаційних векторів.

Для рішення даної задачі пропонується використовувати критерій Неймана-Пірсона [5] у відповідності з яким вирішальне правило забезпечує при заданому обмеженні ймовірності хибної тривоги F , максимум ймовірності правильного виявлення D .

Вважаємо, що умовна щільність розподілу ймовірностей незалежних ПВ при наявності та відсутності сигналу описується нормальним законом:

$$P_1(\vec{Y}) = \left((2\pi)^n |\dot{M}_1| \right)^{-1/2} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\vec{Y} - \vec{\mu}_1)^T \dot{M}_1^{-1} (\vec{Y} - \vec{\mu}_1) \right\}; \quad (9)$$

$$P_0(\vec{Y}) = \left((2\pi)^n |\dot{M}_0| \right)^{-1/2} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\vec{Y} - \vec{\mu}_0)^T \dot{M}_0^{-1} (\vec{Y} - \vec{\mu}_0) \right\}. \quad (10)$$

Вирішальне правило з фіксованою ймовірністю хибної тривоги в загальному має вид:

$$P_1(\vec{Y}) / P_0(\vec{Y}) \geq A. \quad (11)$$

В [5] показано, що оптимальна вагова обробка реалізується шляхом вагового додавання комплексних амплітуд коливань, прийнятих елементами антенної системи, з комплексними ваговими коефіцієнтами. Вагові коефіцієнти вводяться поканально за допомогою атенуаторів, фазообертачів на які подаються управляючі напруги, що відрізняються по фазі та амплітуді.

В узагальненому векторно-матричному запису

$$\dot{Y}_\Sigma(t) = \vec{Y}^T(t) \vec{R}^*, \quad (12)$$

це враховується як множення вектор-рядка прийнятих коливань $\vec{Y}^T(t)$ (розміром $4M$) на комплексно-спряжений ваговий вектор-стовбець \vec{R}^* .

Вектор вагових коефіцієнтів \vec{R} обчислюється за формулою Вінера – Хопфа:

$$\vec{R} = \dot{M}_0^{-1} \cdot \vec{S}_c, \quad (13)$$

де \dot{M}_0 – ковариаційно-поляризаційна матриця завад розміром $4M \times 4M$; \vec{S}_c – комплексний вектор, що враховує структуру ПВ очікуваного сигналу та напрямку його приходу відносно розкриття АС.

Результатом вагової обробки є достатня статистика виду:

$$v = \vec{Y}^T \vec{R}^* = \vec{Y}^T \dot{M}_0^{-1} \vec{S}_c. \quad (14)$$

Оскільки процедура перевірки гіпотез полягає в порівнянні достатньої статистики з порогом A , величина якого залежить від обраного критерію виявлення, то рішення про наявність сигналу в прийнятій виборці, приймається за умови якщо

$$v \geq \ln \dot{A}, \quad (15)$$

де поріг $\ln \dot{A} = K \left(\vec{Y}_0^T \dot{M}_0^{-1} \vec{Y}_0 \right)^{1/2}$ визначається при відсутності сигналу ($\gamma_n = 0$), шляхом усереднення за простором. Коефіцієнт K обирають в залежності від заданого рівня хибної тривоги.

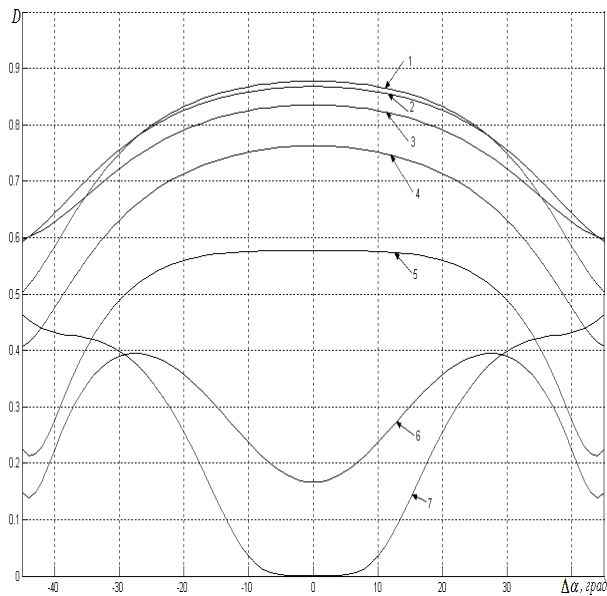
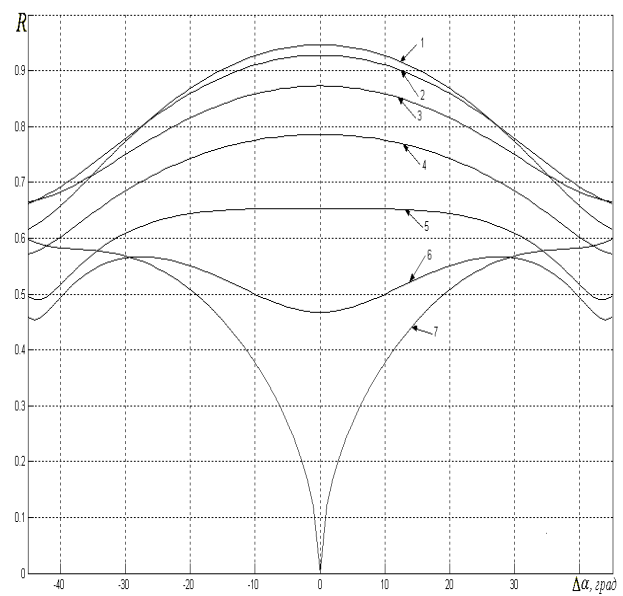
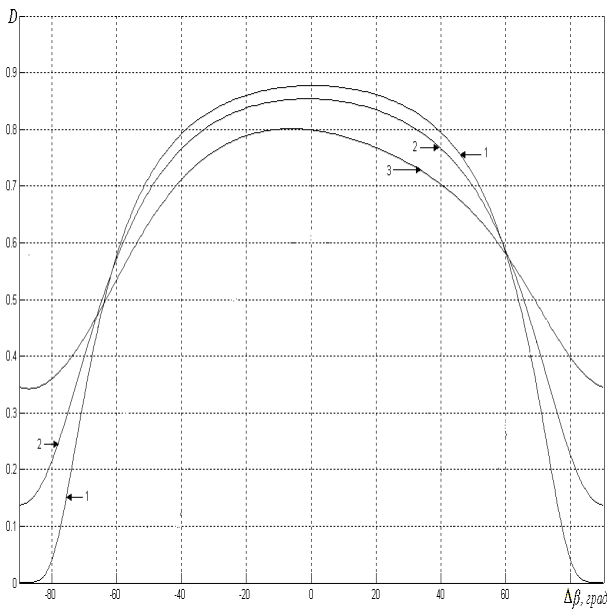
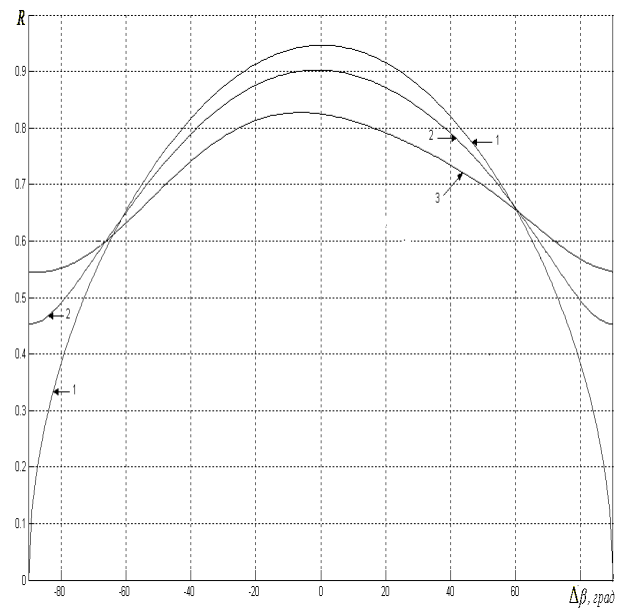
Було досліджено характер впливу відмінностей характеристик поляризаційного вимірювального базису РЛС від заданих, на ефективність алгоритму поляризаційно-просторової обробки з ППЗ.

Актуальність даного питання пов'язана з відсутністю стабільності поляризаційних характеристик АС в межах діаграми спрямованості (ДС), особливо при скануванні зони огляду РЛС. Це обумовлено впливом ряду факторів основними з яких є такі як: недостатня розв'язка за поляризацією антени; викривлення АФР електромагнітного поля по відношенню до заданого; взаємний вплив антенних елементів та ін.

Дослідження впливу поляризаційних характеристик АС на ефективність алгоритму поляризаційно-просторової обробки з ППЗ, має на увазі використання у розрахунках значень ПВ сигналів та АШЗ у новому ПВ, який обумовлений поляризаційними характеристиками антени для заданого кутового напрямку. В результаті отримано сукупність залежностей таких параметрів ефективності як ймовірність правильного виявлення $D = f(\Delta\alpha, \Delta\beta)$ (рис. 1, 2) та нормована дальність виявленні $R = f(\Delta\alpha, \Delta\beta)$ (рис. 3, 4) при фіксованих значеннях кута еліптичності $\Delta\alpha$ та кута нахилу еліпса поляризації $\Delta\beta$ (тут $\Delta\alpha$ та $\Delta\beta$ значення, що визначають величину параметрів поляризаційного базису АС, на яку він відмінний від початкового) за умови відсутності просторових відмінностей між сигналом та АШЗ.

На рис. 1 та 3 цифрами відповідно позначені залежності: 1 – при $\Delta\beta = 0^\circ$; 2 – при $\Delta\beta = \pm 15^\circ$; 3 – при $\Delta\beta = \pm 30^\circ$; 4 – при $\Delta\beta = \pm 45^\circ$; 5 – при $\Delta\beta = \pm 60^\circ$; 6 – при $\Delta\beta = \pm 75^\circ$; 7 – при $\Delta\beta = \pm 90^\circ$. На рис. 2 та 4 цифрами позначені характеристики: 1 – при $\Delta\alpha = 0^\circ$; 2 – при $\Delta\alpha = \pm 15^\circ$; 3 – при $\Delta\alpha = \pm 25^\circ$.

Якісний аналіз графічних залежностей зображених на рис. 1 та рис. 3 підтверджує адекватність отриманих результатів. Так, якщо алгоритм обробки настроєний на очікуваний корисний сигнал з поляризаційними параметрами вимірюваними наприклад в ортогональному лінійному поляризаційному базисі, при чому $\Delta\alpha = 0^\circ$ і $\Delta\beta = 0^\circ$, то досліджувані характеристики набувають максимальних значень (залежність № 1, $D_{\max} = 0,877$, $R_{\max} = 0,946$). Якщо базис АС змінюється на величину $\Delta\alpha = 0^\circ$, $\Delta\beta = \pm 90^\circ$ тобто відбувається поворот еліпса поляризації на 90 градусів, значення параметрів D і R дорівнюють нулю (залежності № 7).

Рис. 1. Залежність $D = f(\alpha, \beta) : \beta = \text{const}$ Рис. 3. Залежність $R = f(\alpha, \beta) : \beta = \text{const}$ Рис. 2. Залежність $D = f(\alpha, \beta) : \alpha = \text{const}$ Рис. 4. Залежність $R = f(\alpha, \beta) : \alpha = \text{const}$

Кількісний аналіз виконаний за умови $\Delta\alpha = \pm 15^\circ$, $\Delta\beta = \pm 15^\circ$ (графічні залежності № 2) свідчить, що при зміні поляризаційних параметрів на вказану величину відбувається зменшення показників ефективності алгоритму обробки. Так імовірність правильного виявлення D та нормована дальність виявлення R відповідно зменшаться на 3,626% і 6,115% до рівня $D = 0,845$, $R = 0,888$, що становить відповідно 96,374% та 93,885% від максимальної величини.

Висновки

1. Відмінність вимірювального поляризаційного базису АС від заданого є джерелом похибок при визначенні ПВ сигналів та АШЗ, та призводить до зниження показників ефективності поляризаційно-просторової обробки при ППЗ.

2. Даний недолік можливо усунути двома шляхами: шляхом апаратного підстроювання поляризаційної структури поля ФАР при відхиленні променя від геометричної осі антени, або шляхом перерахунку вимірюваного з спотворенням ПВ об'єкта (завади) в ПВ в ідеальному базисі з використанням параметрів спотвореного поляризаційного базису АР [6].

Рекомендації щодо застосування

Застосування спільної поляризаційно-просторової вагової обробки при повному поляризаційному зондуванні дозволить покращити ефективність роботи РЛС у складній завадовій обстановці при мінімальних просторових, поляризаційних відмінностях, а також при дії АШЗ, що мають хаотично поляризовану складову. Врахування впливу поляризаційних характеристик антен на параметри області

локалізації (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 поляризационного зондирования пространства // Научные ведомости БелГУ, сер. Информатика, прикладная математика, управление. – Б.: БГУ/– 2004. – Т. 1, № 1 (19). – С. 111-130.

2. Храбростин Б.В. Основные статистические свойства поляризационных векторов рассеяния радиолокационных объектов различных классов // Сб. НММ. – Х.: ВИРТА. – 1990. – № 26. – С. 344-353.

3. Храбростин Б.В. Мартыничук А.А. Зубрицкий Г.Н. Применение метода полного поляризационного зондирования в РЛС // Сб. науч. тр. 6 Междунар. НТК. – Х.: ХГПУ. – 1998. – № 6, ч. 1. – С. 351-354.

4. Проблемы антенной техники. / Под ред. Л.Д. Бахраха, Д.Н.Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1989. – 368 с.

5. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 340 с.

6. Казаков Е.Л. Радиолокационное распознавание космических объектов по поляризационным признакам. – Одесса: ОИУМ, 1999. – 230 с.

Надійшла до редколегії 00.00.2007

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