

Корбан Д.В.

РАДІОЛОКАЦІЙНЕ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗСІЯННЯ ОБ'ЄКТУ ПРИ НАЯВНОСТІ ПРИРОДНОГО ФОНУ

У статті синтезована процедура радіолокаційного вимірювання характеристик спостережуваного об'єкту за наявності природного фону. При прийманні відбитих від об'єкту сигналів реалізований процес усунення навколишнього фону у вигляді опадів різної інтенсивності, що випадають. Це забезпечує достовірність і надійність радіолокаційної інформації. Підвищення достовірності та надійності радіолокаційної інформації про об'єкт дистанційного спостереження здійснюється вибором поляризації зондуючого сигналу, а також урахуванням відмінностей поляризаційного стану прийнятих від об'єкта і навколишнього природного фону сигналів за певних умов радіолокаційного спостереження об'єкта. Як інформативні параметри використана повна ефективна поверхня розсіювання об'єкта, отримана при послідовному опроміненні об'єкту електромагнітною хвилею чотирьох фіксованих поляризацій в лінійному і круговому базисах, і вимірі коефіцієнтів матриці розсіювання об'єкта для кожної поляризації опромінюючої хвилі. Засновано поляризаційний метод радіолокаційного вимірювання характеристик розсіювання об'єкта за наявності луна-сигналу атмосферного утворення, що дозволяє проводити радіолокаційне спостереження об'єкта у складних умовах атмосферного середовища. При аналізі результатів радіолокаційних вимірювань елементів матриці розсіювання об'єкта при його послідовному опроміненні електромагнітними хвилями чотирьох наведених поляризацій виділення луна-сигналу об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта (об'єкт + атмосферне утворення) використовуються коефіцієнти K_1 , K_2 , K_3 , рівні відношенню основних компонентів певних поляризацій опромінюваної хвилі, таких як неполяризованою хвилею (використання коефіцієнта S_{11}^H), електромагнітною хвилею лінійної вертикальної поляризації (використання коефіцієнта S_{22}^{BP}), лінійно-поляризованою хвилею з нахилом електричного вектору 45° (коефіцієнт $S_{33}^{45^\circ}$), електромагнітною хвилею кругової поляризації (коефіцієнт S_{44}^K). Показано, що якщо об'єкт знаходиться в зоні облогових опадів, то виділення його луна-сигналу з луна-сигналу складного об'єкта проводиться за коефіцієнтом K_3 , а при знаходженні об'єкта в зоні зливових опадів, виділення його луна-сигналу з луна-сигналу складного об'єкта проводиться за коефіцієнтами K_1 , K_2 .

Ключові слова: поляризація, об'єкт радіолокаційного спостереження, природний фон, ефективна поверхня розсіювання, матриця розсіювання об'єкта, модулі узгоджених і перехресних коефіцієнтів, параметри Стокса.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями. До теперішнього часу завдання радіолокаційного спостереження об'єктів на тлі різних метеоутворень (хмари, випадаючі опади) ще далеке до остаточного рішення. Об'єкти радіолокаційного спостереження можна розділити на:

- об'єкти складної конфігурації, що складаються з жорстко пов'язаних між собою найпростіших відбиваючих елементів (лінійні вібратори, кутові відбивачі, металеві пластини, металеві та діелектричні кулі та ін.) – літаки, морські та річкові судна, різні споруди;

- об'ємно-розподілені, що являють собою сукупність частинок хмар і опадів, розподілених у певній області простору, які значно перевищують за своїми розмірами елемент дозволу радіолокаційної станції (РЛС);

- поверхнево-розподілені, що являють собою поверхню суші, морську або річкову поверхню.

Формування луна-сигналу від таких об'єктів істотно залежить від типу поляризації електромагнітної хвилі, що опромінює об'єкт радіолокаційного спостереження, а система координат, в якій розглядаються лінійно-поляризовані компоненти хвилі, визначається двома одиничними взаємно перпендикулярними ортами, що становлять поляризаційний базис. У поляризаційному базисі електромагнітна хвиля розкладається на горизонтально та вертикально поляризовані компоненти, а поодинокі вектори збігаються у напрямку з віссю OX та OY декартової системи координат [1].

При опроміненні об'єкта електромагнітною хвилею певної поляризації компоненти можуть бути представлені дійсними енергетичними параметрами Стокса [2]. Вибір зонduючого і розсіяного сигналів, специфіка аналізованої ситуації визначають вид матриці розсіювання об'єкта радіолокаційного спостереження. Використання параметрів Стокса при поданні компонентів електромагнітної хвилі на випромінювання та прийом дозволяє обходитися без переходу до аналітичних сигналів за допомогою перетворення Гільберта, а поляризаційна структура є синонімом векторної структури складових електромагнітного поля. При цьому радіолокаційна інформація про реальні об'єкти міститься в дійсній, симетричній та позитивно визначеній матриці розсіювання розмірності 4×4 . Об'єкти радіолокаційного спостереження в загальному випадку знаходяться в зоні природного фону, а луна-сигнали на вхід приймальної антени РЛС одночасно надходять як від об'єкта спостереження, так і від фону, що маскує об'єкт. Різними авторами [3-16] розглянуті принципи поляризаційної селекції, в яких використовуються методи вибору поляризації опромінюючої об'єкт хвилі, оптимальної обробки поляризаційних сигналів у приймальному тракті РЛС, компенсації сигналів нерухомих об'єктів, доплерівської селекції об'єктів, що рухаються.

Однак до теперішнього часу радіолокаційний вимір характеристик розсіювання об'єкта за наявності природного фону є актуальним завданням, вирішення якого дозволить підвищити достовірність та оперативність радіолокаційного спостереження об'єктів за наявності природних перешкод.

Аналіз останніх досягнень та публікацій, в яких розпочато вирішення даної проблеми. У роботі [1] розглянуто судові навігаційні інформаційні системи, за допомогою яких екіпаж судна отримує інформацію про зустрічні судна. Однак інформація, що отримується, не містить даних про поляризацію луна-сигналу. У роботі [2] проведено оцінку ступеня поляризації радіотеплового випромінювання хмар, що дають опади, які впливають на радіовидимість суден, проте не представлена інформація ступеня поляризації опадів, що випадають. У роботі [3] представлені матричні характеристики радіолокаційного розсіювання хмар та опадів, проте практичний результат для судноводіння відсутній. У роботі [4] представлені результати вимірювання диференціальної відбиваності метеооб'єктів, проте стосовно до використання результатів у судноводінні вони відсутні. У роботі [5] розглянуто певні методи радіолокаційної поляриметрії, які можуть бути використані у судноводінні. У роботі [6] представлені моделі різних інформаційних систем, проте їх використання у судноводінні не розглянуто. В роботах [7-9] розглянуто некогерентні та доплерівські радіолокаційні системи та їх аналіз. У роботі [10] розглянуто полігональні моделі складних радіолокаційних сцен, що дають змогу провести аналіз полів розсіювання об'єктів, проте для судноводіння вони не розглянуті. В роботах [11-13] розглянуто реалізацію поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі в радіолокаційних системах на довжині хвилі 1,8 см та 3,2 см, однак у судових радіолокаційних системах вони не використані. У роботі [14] проведено аналіз використання поляризації електромагнітних хвиль при радіолокаційному спостереженні об'єктів. У роботі [15] розглянута можливість використання судової РЛС для

виявлення об'єктів при наявності складних умов навколишнього середовища, а у роботі [16] розглянуті геометричні параметри поляризації, однак у суднової РЛС до теперішнього часу вони не використовувались.

Формулювання цілей статті (постановка задачі). Метою даної статті є обґрунтування поляризаційного методу радіолокаційного вимірювання характеристик розсіювання об'єкта за наявності розсіювання від природного фону, що дозволяє проводити радіолокаційне спостереження об'єктів у складних умовах довкілля.

Виклад основного матеріалу дослідження. При опроміненні об'єкта радіолокаційного спостереження електромагнітною хвилею лінійної вертикальної, лінійної горизонтальної поляризації, лінійної з будь-яким кутом нахилу електричного вектору, відбитий сигнал буде мати ту ж поляризацію, що і випромінюваний, так як в квазіоптичній області розсіювання наведені струми опромінюючої хвилі на гладкій поверхні відтворюють її векторну структуру.

Наявність перехресної компоненти у відбитому радіолокаційному сигналі щодо лінійної компоненти опромінюючої об'єкт хвилі свідчить про появу нелінійностей і несингулярностей на поверхні об'єкта, що спостерігається РЛС, що підтверджує псевдовласний характер лінійної поляризації для даного об'єкта. У лінійному поляризаційному базисі матриця Джонса розсіювання об'єкта радіолокаційного спостереження запишеться у вигляді:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & S_{12} \\ S_{21} & \lambda_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ - коефіцієнти відбиття об'єкта для відповідних поєднань поляризації сигналу на випромінювання та прийом;

λ_1 і λ_2 - власні значення матриці, що характеризують власні поляризації об'єкта, які збігаються з поляризацією хвилі, що опромінює;

λ_1 - відповідає максимальній ЕПР об'єкта;

λ_2 - відповідає мінімальній ЕПР об'єкта;

S_{12}, S_{21} - перехресні елементи матриці розсіювання об'єкта, що спостерігається.

Для однопозиційної радіолокації використовується одна і та сама антена на випромінювання і прийом, $S_{12} = S_{21}$.

При заданні електромагнітної хвилі на випромінювання та прийом параметрами Стокса матриці розсіювання об'єкта радіолокаційного спостереження для наступних лінійних поляризацій електромагнітної хвилі на випромінювання запишуться у наступному вигляді:

1. При опроміненні об'єкта неполяризованою хвилею, матриця відбитої хвилі запишеться у вигляді:

$$S_{\text{НП}} = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & 0 & 0 & 0 \\ S_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

2. При опроміненні об'єкта електромагнітною хвилею лінійної вертикальної чи горизонтальної поляризації матриця розсіювання об'єкта в лінійному базисі запишеться як:

$$S_{\mathcal{L}(B\Gamma)} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & 0 & 0 \\ S_{41} & S_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

3. При опроміненні об'єкта електромагнітною хвилею лінійної поляризації з нахилом вектору під кутом 45° матриця розсіювання об'єкта буде:

$$S_{\mathcal{L}(45^\circ)} = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & 0 & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & 0 & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & 0 & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

4. Об'єкт опромінюється електромагнітною хвилею кругової поляризації. Тоді у круговому базисі матриця розсіювання об'єкта запишеться у вигляді:

$$S_K = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & 0 & S_{14} \\ S_{21} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{31} & 0 & 0 & S_{34} \\ S_{41} & 0 & 0 & S_{44} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Сума квадратів модулів всіх елементів матриць розсіювання не залежить від певного базису та є інтегральною ЕПР об'єкта радіолокаційного спостереження. Оскільки зміна поляризаційного базису не змінює величини ЕПР, то класифікацію об'єктів радіолокаційного спостереження можна проводити за будь-яких приведених поляризаціях електромагнітної хвилі на випромінювання.

У загальному випадку коефіцієнти $S_{11} \dots S_{44}$ матриці розсіювання об'єкта:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \quad (6)$$

легко визначаються шляхом послідовного опромінення об'єкта радіолокаційного спостереження неполяризованою хвилею (H), електромагнітною хвилею лінійної вертикальної ($B\Pi$) або горизонтальної ($\Gamma\Pi$) поляризацій, лінійної поляризації з нахилом електричного вектору під кутом 45° (45°), відносно осей X і Y лінійного базису, хвилею кругової (K) поляризації кругового базису, представленими параметрами Стокса ($I_{\text{вип}}, Q_{\text{вип}}, U_{\text{вип}}, V_{\text{вип}}$). У результаті послідовного опромінення об'єкта електромагнітною хвилею чотирьох поляризацій коефіцієнти матриці (6) визначаються за вимірними параметрами Стокса відбитої хвилі ($I_{\text{від}}, Q_{\text{від}}, U_{\text{від}}, V_{\text{від}}$) на виході приймача РЛС за такими залежностями:

$$S_{11}^H = \frac{I_{\text{від}}^H}{I_{\text{вип}}^H}; \quad S_{21}^H = \frac{Q_{\text{від}}^H}{Q_{\text{вип}}^H}; \quad S_{31}^H = \frac{U_{\text{від}}^H}{U_{\text{вип}}^H}; \quad S_{41}^H = \frac{V_{\text{від}}^H}{V_{\text{вип}}^H}; \quad (7)$$

$$S_{12}^{BP} = \frac{I_{\text{від}}^{BP}}{I_{\text{вип}}^{BP}} - S_{11}^H; \quad S_{22}^{BP} = \frac{Q_{\text{від}}^{BP}}{Q_{\text{вип}}^{BP}} - S_{21}^H; \quad S_{32}^{BP} = \frac{U_{\text{від}}^{BP}}{U_{\text{вип}}^{BP}} - S_{31}^H; \quad S_{42}^{BP} = \frac{V_{\text{від}}^{BP}}{V_{\text{вип}}^{BP}} - S_{41}^H; \quad (8)$$

$$S_{13}^{45^\circ} = \frac{I_{\text{від}}^{45^\circ}}{I_{\text{вип}}^{45^\circ}} - S_{11}^H; \quad S_{23}^{45^\circ} = \frac{Q_{\text{від}}^{45^\circ}}{Q_{\text{вип}}^{45^\circ}} - S_{21}^H; \quad S_{33}^{45^\circ} = \frac{U_{\text{від}}^{45^\circ}}{U_{\text{вип}}^{45^\circ}} - S_{31}^H; \quad S_{43}^{45^\circ} = \frac{V_{\text{від}}^{45^\circ}}{V_{\text{вип}}^{45^\circ}} - S_{41}^H; \quad (9)$$

$$S_{14}^K = \frac{I_{\text{від}}^K}{I_{\text{вип}}^K} - S_{11}^H; \quad S_{24}^K = \frac{Q_{\text{від}}^K}{Q_{\text{вип}}^K} - S_{21}^H; \quad S_{34}^K = \frac{U_{\text{від}}^K}{U_{\text{вип}}^K} - S_{31}^H; \quad S_{44}^K = \frac{V_{\text{від}}^K}{V_{\text{вип}}^K} - S_{41}^H. \quad (10)$$

Встановимо інформативність кожного коефіцієнта матриці розсіювання об'єкта радіолокаційного спостереження (6):

1. При опроміненні об'єкта неполяризованою хвилею (поперемінне випромінювання двох ортогональних поляризацій – вертикальної та горизонтальної, однаковою інтенсивністю I (з часом опосередкування приймача РЛС більшим за час перемикавання) коефіцієнти матриці (2) $S_{11}, S_{21}, S_{31}, S_{41}$ є коефіцієнтами відбиття від об'єкта і характеризують:

S_{11}^H - повну інтенсивність ортогональних лінійних складових відбитої хвилі I_x і I_y ;

S_{21}^H - різницю інтенсивностей ортогональних лінійних складових відбитої хвилі I_x і I_y ;

S_{31}^H - різницю інтенсивностей лінійних складових відбитої хвилі, орієнтованих $+\frac{\pi}{4}$ і $-\frac{\pi}{4}$,

$I + \frac{\pi}{4}$ і $I - \frac{\pi}{4}$;

S_{41}^H - різниця інтенсивностей ліво і право поляризованих кругових компонентів відбитої хвилі.

2. При опроміненні об'єкта радіолокаційного спостереження електромагнітною хвилею лінійної вертикальної поляризації, коефіцієнти відбиття $S_{12}^{BP}, S_{22}^{BP}, S_{32}^{BP}, S_{42}^{BP}$ матриці (3) характеризують:

S_{12}^{BP} - повну інтенсивність ортогональних лінійних складових відбитої від об'єкта хвилі без інтенсивності відбитої хвилі при опроміненні об'єкта неполяризованою хвилею S_{11}^H ;

S_{22}^{BP} - різницю інтенсивностей ортогональних лінійних складових відбитої хвилі з відрахуванням S_{21}^H ;

S_{32}^{BP} - різницю інтенсивностей лінійних складових відбитої хвилі, орієнтованих $+\frac{\pi}{4}$ і $-\frac{\pi}{4}$ з відрахуванням S_{31}^H ;

S_{42}^{BP} - різниця інтенсивностей ліво і право поляризованих кругових компонентів відбитої хвилі з відрахуванням S_{41}^H .

3. При опроміненні об'єкта радіолокаційного спостереження лінійно поляризованою хвилею з нахилом електричного вектору під кутом 45° , коефіцієнти відбиття $S_{13}^{45^\circ}, S_{23}^{45^\circ}, S_{33}^{45^\circ}, S_{43}^{45^\circ}$ матриці (4) характеризують:

$S_{13}^{45^\circ}$ - повну інтенсивність ортогональних лінійних складових відбитої хвилі з відрахуванням S_{11}^H ;

$S_{23}^{45^\circ}$ - різниця інтенсивностей ортогональних лінійно поляризованих складових відбитої хвилі з відрахуванням S_{21}^H ;

$S_{33}^{45^\circ}$ - різниця інтенсивностей лінійних складових відбитої хвилі, орієнтованих $+\frac{\pi}{4}$ і $-\frac{\pi}{4}$ з відрахуванням S_{31}^H ;

$S_{43}^{45^\circ}$ - різниця інтенсивностей ліво і право поляризованих кругових компонентів відбитої хвилі з відрахуванням S_{41}^H .

4. При опроміненні об'єкта електромагнітною хвилею кругової поляризації, коефіцієнти відбиття $S_{14}^K, S_{24}^K, S_{34}^K, S_{44}^K$ матриці (5) характеризують:

S_{14}^K - повну інтенсивність ортогональних лінійних складових відбитої хвилі з відрахуванням S_{11}^H ;

S_{24}^K - різниця інтенсивностей ортогональних лінійно поляризованих складових відбитої хвилі з відрахуванням S_{21}^H ;

S_{34}^K - різниця інтенсивностей лінійних складових відбитої хвилі, орієнтованих $+\frac{\pi}{4}$ і $-\frac{\pi}{4}$ з відрахуванням S_{31}^H ;

S_{44}^K - різниця інтенсивностей ліво і право поляризованих кругових компонентів відбитої хвилі з відрахуванням S_{41}^H .

В результаті отримання шістнадцяти коефіцієнтів матриці розсіювання шляхом послідовного опромінення об'єкта електромагнітною хвилею чотирьох поляризацій можна отримати інтегральну ефективну поверхню розсіювання об'єкта σ_Σ радіолокаційного спостереження у вигляді:

$$\sigma_\Sigma = |S_{11}|_H^2 + |S_{22}|_{BG}^2 + |S_{33}|_{45^\circ}^2 + |S_{44}|_K^2. \quad (11)$$

Варіювання поляризаційним базисом не змінює величини σ_Σ , за якою можна проводити розпізнавання об'єктів радіолокаційного спостереження. Рівняння (11) порівняно легко реалізується в комп'ютері суднової РЛС за умови вимірювання всіх модулів елементів матриці розсіювання (6).

При аналізі результатів вимірювань елементів матриці розсіювання об'єкта при його послідовному опроміненні електромагнітними хвилями чотирьох наведених поляризацій, виділення луна-сигналу об'єкта зі складного луна-сигналу (об'єкт + атмосферне утворення) можна проводити коефіцієнтами K_1, K_2, K_3 рівних відношенню основних компонент відбитої хвилі при певних поляризаціях опромінюючої хвилі, тобто:

$$K_1 = \frac{|S_{11}| - |S_{22}|}{|S_{11}| + |S_{22}|}, \quad (12)$$

$$K_2 = \frac{|S_{11}| - |S_{33}|}{|S_{11}| + |S_{33}|}, \quad (13)$$

$$K_3 = \frac{|S_{11}| - |S_{44}|}{|S_{11}| + |S_{44}|}. \quad (14)$$

Використання параметрів Стокса (дійсних енергетичних) при отриманні радіолокаційної інформації про об'єкти спостереження, що представляють собою повну щільність енергії хвилі (перший параметр Стокса $I(t)$), різницю енергій у горизонтально-вертикально поляризованих компонентах (другий параметр Стокса $Q(t)$), різницю енергій лінійно поляризованих під кутами $\beta_1 = 45^\circ$ і $\beta_2 = 135^\circ$ компонент (третій параметр Стокса $U(t)$), різницю поляризованих по правому та лівому колу $\alpha = \pm 45^\circ$ компонентів (четвертий параметр Стокса $V(t)$), дозволяє в реальному часі без вимірювання абсолютної фази отримати максимум інформації про об'єкт.

Зміна базису здійснюється обчислювальними пристроями РЛС в аналоговому вигляді, а операція перетворення базису проводиться в антені. Отримані за допомогою параметрів Стокса матриці є атрибутами об'єкта, і результати їх вимірювання не залежать від дальності до об'єкта радіолокаційного спостереження, вони дозволяють здійснити синтез алгоритмів поляриметричних спостережень об'єктів.

Розглянемо радіолокаційне розпізнавання об'єктів, що мають на своїй поверхні сингулярності типу вібраторів, що знаходяться в зоні випадючих облогових та зливових опадів різної інтенсивності при їх опроміненні електромагнітними хвилями розглянутих поляризацій.

1. Нехай об'єкт спостереження радіолокації знаходиться в зоні облогових опадів. Тоді як частинки облогових опадів мають сферичну форму і є ізотропними для опромінюючої хвилі, то коефіцієнти S_{11}, S_{22}, S_{33} у матриць розсіювання (3) і (4) в лінійному базисі рівні між собою, тобто $S_{11} = S_{22} = S_{33}$, а $K_1 = K_2 = 0$, тоді коефіцієнти $S_{12}, S_{13}, S_{23}, S_{41}, S_{42}, S_{43}$ матриць (3) і (4) характеризують відбивні властивості об'єкта спостереження судновою РЛС, а виділення луна-сигналу об'єкта з луна-сигналу облогових опадів проводиться за коефіцієнтом K_1 .

2. Нехай спостережуваний РЛС об'єкт перебуває у зоні випадючих зливових опадів різної інтенсивності. Частинки таких опадів не є сферами і їх можна представити у вигляді сукупності лінійних вібраторів з довільною орієнтацією та сфер. Лінійні вібратори деполаризують падаючу (випромінену) хвилю лінійної поляризації на зону зливових опадів,

що випадують. Матриці розсіювання (3) і (4) зливових опадів з урахуванням того, що для вібраторів $S_{22} = S_{33} = 0$ і $K_1 = K_2 = 1$, а для сфер $S_{11} = S_{22} = S_{33}$ і $K_1 = K_2 = 0$ запишеться у вигляді:

- при опроміненні опадів хвилею лінійної вертикальної або лінійної горизонтальної поляризаціями:

$$S_{\text{відВГ}} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 & 0 \\ S_{21} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & 0 & 0 \\ S_{41} & S_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

а при опроміненні електромагнітною хвилею лінійної поляризації з кутом нахилу 45° у вигляді:

$$S_{\text{від}45^\circ} = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & S_{13} & 0 \\ S_{21} & 0 & S_{23} & 0 \\ S_{31} & 0 & 0 & 0 \\ S_{41} & 0 & S_{43} & 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

і виділення луна-сигналу об'єкта з зони зливових опадів проводиться за коефіцієнтами K_1 або K_2 .

Для виявлення об'єкта з сингулярностями типу вібраторів на фоні зливових опадів, що випадають, необхідно об'єкт опромінити електромагнітною хвилею кругової поляризації і спостереження за об'єктом проводити в круговому базисі. Потім луна-сигнал від об'єкта у погодженому по поляризації каналі приймача РЛС розділити на луна-сигнал у перехресному каналі і визначити коефіцієнт K_3 відповідно до співвідношення:

$$K_3 = \frac{|S_{44}|}{|S_{41}|}. \quad (17)$$

Оцінка K_3 дозволяє виявити об'єкт на індикаторі РЛС, який знаходиться в зоні зливових опадів.

Межі можливих змін модулів перехресних коефіцієнтів матриць розсіювання (2), (3), (4), (5) у наведеному поляризаційному базисі становитимуть:

$$\left. \begin{aligned} |S_{12}|^2 &= |S_{21}|^2 = |S_{31}|^2 = |S_{32}|^2 = |S_{41}|^2 = |S_{42}|^2 \leq 0.25\sigma_\Sigma \left(1 + \sqrt{1 - K_1^2}\right) \\ |S_{13}|^2 &= |S_{21}|^2 = |S_{23}|^2 = |S_{31}|^2 = |S_{41}|^2 = |S_{43}|^2 \leq 0.25\sigma_\Sigma \left(1 + \sqrt{1 - K_2^2}\right) \\ |S_{14}|^2 &= |S_{21}|^2 = |S_{24}|^2 = |S_{31}|^2 = |S_{34}|^2 = |S_{41}|^2 \leq 0.25\sigma_\Sigma \left(1 + \sqrt{1 - K_3^2}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

а межі можливих змін модулів узгоджених по поляризації коефіцієнтів матриць розсіювання (2),(3),(4),(5) у приведеному поляризаційному базисі запишуться у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} |S_{11}|^2 &= |S_{22}|^2 = 0.5\sigma_\Sigma \left(1 - \sqrt{1 - K_1^2}\right) \\ |S_{11}|^2 &= |S_{33}|^2 = 0.5\sigma_\Sigma \left(1 - \sqrt{1 - K_2^2}\right) \\ |S_{11}|^2 &= |S_{44}|^2 = 0.5\sigma_\Sigma \left(1 - \sqrt{1 - K_3^2}\right) \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

У результаті ми сформували модель розсіювальних властивостей радіолокаційного об'єкта, на вході якого створено чотиривимірний сигнал, представлений параметрами Стокса $I_{\text{вип}}, Q_{\text{вип}}, U_{\text{вип}}, V_{\text{вип}}$, в результаті на виході об'єкта виник відгук - розсіяний сигнал, також представлений чотирма параметрами Стокса $I_{\text{від}}, Q_{\text{від}}, U_{\text{від}}, V_{\text{від}}$. При цьому виконуються такі умови:

1. *Лінійність*, якщо випромінюваним параметрам Стокса $I_{\text{вип}}, Q_{\text{вип}}, U_{\text{вип}}, V_{\text{вип}}$ відповідають Відгуки $I_{\text{від}}, Q_{\text{від}}, U_{\text{від}}, V_{\text{від}}$.

2. *Дійсність*, якщо випромінювані параметри Стокса $I_{\text{вип}}, Q_{\text{вип}}, U_{\text{вип}}, V_{\text{вип}}$ дійсні, то й відбиті параметри Стокса $I_{\text{від}}, Q_{\text{від}}, U_{\text{від}}, V_{\text{від}}$ також дійсні.

3. *Трансляційна інваріантність*, якщо параметрам Стокса $I_{\text{вип}}, Q_{\text{вип}}, U_{\text{вип}}, V_{\text{вип}}$, що випромінюються, відповідають відбиті параметри Стокса $I_{\text{від}}, Q_{\text{від}}, U_{\text{від}}, V_{\text{від}}$, то будь-якого тимчасового зсуву τ справедливо відповідність параметрів Стокса:

$$I_{\text{вип}}(t-\tau) \rightarrow I_{\text{від}}(t-\tau), Q_{\text{вип}}(t-\tau) \rightarrow Q_{\text{від}}(t-\tau), U_{\text{вип}}(t-\tau) \rightarrow U_{\text{від}}(t-\tau), V_{\text{вип}}(t-\tau) \rightarrow V_{\text{від}}(t-\tau).$$

Ці умови еквівалентні існуванню єдиної матриці (6), коефіцієнти якої змінюються кожної поляризації випромінюваної хвилі і у якій коефіцієнти $S_{11} - S_{44}$ є узагальненими функціями лінійного простору.

Подання об'єкта радіолокаційного спостереження матрицею (6) є універсальним, оскільки за допомогою її коефіцієнтів можна визначити відбитий сигнал при опроміненні об'єкта електромагнітною хвилею чотирьох фіксованих поляризацій. Елементи матриці не залежать від часу розповсюдження електромагнітної хвилі (t) і відстані від РЛС до об'єкта і характеризують тільки здатність об'єкта розсіювати.

Висновки

1. Синтезована процедура радіолокаційного вимірювання характеристик розсіювання об'єкта, що спостерігається за наявності природного фону.
2. При прийомі відбитих від об'єкта сигналів реалізовано процедуру відбудови сигналів від навколишнього об'єкта фону, що підвищує достовірність та надійність радіолокаційного спостереження об'єктів.
3. Підвищення достовірності та надійності радіолокаційної інформації про об'єкт здійснюється вибором поляризації зондувального сигналу, а також врахуванням відмінностей поляризаційного стану прийнятих від об'єкта та навколишнього фону сигналів за певних умов радіолокаційного спостереження за об'єктом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теоретические основы радиолокации: Учебн. Пособие для вузов /А.А. Коростылев, Н.Ф. Ключев, Ю.А. Мельник и др.; Под ред. В.Е. Дулевича. – 2-е изд., перераб. И доп. - М.: Изд-во «Советское радио», 1978. – 608 с.
2. Голиков В.В. Повышение безопасности судовождения методами радиолокационной поляриметрии / В.В. Голиков, Д.В. Корбан // Судовождение: сб. научных трудов. Вып.21. - Одесса: ОНМА, 2012. - С.78-85.
3. Матросов С.Ю. Матричные характеристики радиолокационного рассеяния жидкокапельных облаков и осадков / С.Ю. Матросов // Труды ГГО, 1991, вып.535. – С.96 - 99.
4. Матросов С.Ю. Оценка степени поляризации радиотеплового излучения облаков, дающих осадки / С.Ю. Матросов, Щукин Г.Г// Труды ГГО, 1991, вып.535. – С.100-102.
5. Вагущенко Л.Л. Судовые навигационные информационные системы/ Л.Л. Вагущенко. – Одесса: «Феникс», 2004. - 302 с.
6. Томашевський В.М. Моделювання систем / В.М. Томашевський. – К.: ВПВ, 2005. – 352 с.
7. Борзов А.Б. Анализ полей рассеяния сложных радиолокационных сцен на основе полигональных моделей / А.Б. Борзов, В.Б. Сучков // Наукоемкие технологии, 2001. - №3. – С. 175 – 184.
8. Афанасьев В.В. Судовые радиолокационные системы: Учебник под ред. Ю. М. Устинова / В.В. Афанасьев, А.Н. Маринич, А.В. Припотнюк, Ю.В. Устинов. - СПб.: Веленара, 2009. - 366 с.
9. Кораблев А.Ю. Determination of radar contrast using various polarization and evaluation of its limiting significance. Determination of statistical characteristics for polarization-radar contrast. IRCTR-S-011-03, Delft, Netherlands, 2003, p. 15-18.

10. Кораблев А.Ю. Criteria for evaluation of methods to distinguish targets and geophysical objects on the basis for various polarization parameters. IRCTR-S-011-03, Delft, Netherlands, 2003, p. 9-11.
11. Кораблев А.Ю. Measurement Campaigns Using 1,8cm and 3,2 cm Coherent Radar with Controlled Polarization Capabilities. IRCTR-S-035-01, Delft, Netherlands, 2000, p. 14-16.
12. Козлов И.М. Параметры двухточечной статистической модели для имитации сложного радиолокационного объекта // Известия вузов. Радиоэлектроника, 2000. - № 5-6. - С.19-23.
13. Шахтарин Б.И. Цифровое моделирование однородных случайных полей с заданными корреляционно-спектральными характеристиками / Б.И. Шахтарин, Л.В. Лабунец // Научный вестник МГТУ ГА, серия Радиофизика и радиотехника, 2000. - №24. -
14. Колядов Д.В. Моделирование наземных подстилающих поверхностей при их дистанционном зондировании // Научный вестник МГТУ ГА, серия Радиофизика и радиотехника, 2001. - №36. - С.25-61.
15. Морозов А.В. РЛС в судовождении / А.В. Морозов. –Одеса: Друкарський дім, 2013. – 464с.
16. Bebbington D., Carrea L., Krogager E. Geometric polarimetry - Part 1: Spinors and wave states // arXiv.org: архив электронных публикаций статей и препринтов. 2008. URL: <http://arxiv.org/abs/0804.0745>.

REFERENCES

1. Teoreticheskie osnovy radiolokatsii: Uchebn. Posobie dlia vuzov /A.A. Korostylev, N.F. Kliuev, Iu.A. Melnik i dr.; Pod red. V.E. Dulevicha. – 2-e izd., pererab. I dop. - M.: Izd-vo «Sovetskoe radio», 1978. – 608 s.
2. Golikov V. V. Povyshenie bezopasnosti sudovozhdeniia metodami radiolokatsionnoi poliarimetrii / V.V. Golikov, D.V. Korban // Sudovozhdenie: sb. nauchnykh trudov. Vyp.21. - Odessa: ONMA, 2012. - S.78-85.
3. Matrosov S.Iu. Matrichnye kharakteristiki radiolokatsionnogo rasseianiia zhidkokapelnykh oblakov i osadkov / S.Iu. Matrosov // Trudy GGO, 1991, vyp.535. – S.96 - 99.
4. Matrosov S.Iu. Otsenka stepeni poliarizatsii radioteplovogo izlucheniia oblakov, daiushchikh osadki / S.Iu. Matrosov, Shchukin G.G// Trudy GGO, 1991, vyp.535. – S.100-102.
5. Vagushchenko L.L. Sudovye navigatsionnye informatsionnye sistemy/ L.L. Vagushchenko. – Odessa: «Feniks», 2004. - 302 s.
6. Tomashevskii V.M. Modeliuvannia sistem / V.M. Tomashevskii. – K.: VNV, 2005. – 352s.
7. Borzov A.B. Analiz polei rasseianiia slozhnykh radiolokatsionnykh stsen na osnove poligonalnykh modelei / A.B. Borzov, V.B. Suchkov // Naukoemkie tekhnologii, 2001. - №3. – S. 175 – 184.
8. Afanasev V. V. Sudovye radiolokatsionnye sistemy: Uchebnik pod red. Iu. M. Ustinova / V.V. Afanasev, A.N. Marinich, A.V. Pripotniuk, Iu.V. Ustinov. - SPb.: Velenara, 2009. - 366 s.
9. Korablev A.Iu. Determination of radar contrast using various polarization and evaluation of its limiting significance. Determination of statistical characteristics for polarization-radar contrast. IRCTR-S-011-03, Delft, Netherlands, 2003, p. 15-18.
10. Korablev A.Iu. Criteria for evaluation of methods to distinguish targets and geophysical objects on the basis for various polarization parameters. IRCTR-S-011-03, Delft, Netherlands, 2003, p. 9-11.
11. Korablev A.Iu. Measurement Campaigns Using 1,8 cm and 3,2 cm Coherent Radar with Controlled Polarization Capabilities. IRCTR-S-035-01, Delft, Netherlands, 2000, p. 14-16.

12. Kozlov I.M. Parametry dvukhtocheknoi statisticheskoi modeli dlia imitatsii slozhnogo radiolokatsionnogo ob'ekta // Izvestiia vuzov. Radioelektronika, 2000. - № 5-6. - S.19-23.

13. Shakhtarin B.I. Tsifrovoe modelirovanie odnorodnykh sluchainykh polei s zadannymi s zadannymi korreliatsionno-spektralnymi kharakteristikami / B.I. Shakhtarin, L.V. Labunets // Nauchnyi vestnik MGTU GA, seriia Radiofizika i radiotekhnika, 2000. - №24. -

14. Koliadov D.V. Modelirovanie nazemnykh podstilaiushchikh poverkhnostei pri ikh distantsionnom zondirovanii // Nauchnyi vestnik MGTU GA, seriia Radiofizika i radiotekhnika, 2001. - №36. - S.25-61.

15. Morozov A.V. RLS v sudovozhdenii / A.V. Morozov. –Odesa: Drukarskii dim, 2013. – 464 s.

16. Bebbington D., Carrea L., Krogager E. Geometric polarimetry - Part 1: Spinors and wave states // arXiv.org: архив электронных публикаций статей и препринтов. 2008. URL: <http://arxiv.org/abs/0804.0745>.

Korban D.V.

RADAR MEASUREMENT OF OBJECT SCATTERING CHARACTERISTICS IN THE PRESENCE OF A NATURAL BACKGROUND

The article synthesized a procedure for radar simulation of the characteristics of a guarded object for the presence of a natural background. With the reception of the received signals from the object of the implementation of the process, the process of using the background in the background looks like falling of different intensity, which should fall. This ensures the reliability and reliability of radar information. Increasing the credibility and reliability of radar information about the object of remote surveillance is carried out by choosing the polarization of the sounding signal, as well as taking into account the differences in the polarization state of signals received from the object and the surrounding natural background under certain conditions of radar observation of the object. As informative parameters, the complete effective scattering surface of the object, obtained during successive irradiation of the object with an electromagnetic wave of four fixed polarizations in linear and circular bases, and the measurement of the coefficients of the scattering matrix of the object for each polarization of the irradiating wave were used. The polarization method of radar measurement of the object's scattering characteristics in the presence of an echo-signal of the atmospheric formation was established, which allows for radar observation of the object in difficult atmospheric conditions. When analyzing the results of radar measurements of the elements of the scattering matrix of an object when it is successively irradiated by electromagnetic waves of the four specified polarizations of the separation of the echo-signal of the object from the echo-signal of a complex object (object + atmospheric formation), coefficients K_1 , K_2 , K_3 are used, equal to the ratio of the main components of certain polarizations of the irradiated wave, such as an unpolarized wave (using the coefficient S_{11}^H), an electromagnetic wave of linear vertical polarization using the coefficient S_{22}^{BI}), a linearly polarized wave with an inclination of the electric vector 45° (coefficient $S_{33}^{45^\circ}$), an electromagnetic wave of circular polarization (coefficient S_{44}^K). It is shown that if the object is located in the area of heavy precipitation, then its echo-signal is separated from the echo-signal of a complex object using the K_3 coefficient, and when the object is located in the area of torrential precipitation, its echo-signal is separated from the echo-signal of a complex object is produced by coefficients K_1 , K_2 .

Keywords: polarization, object of radar observation, natural background, effective scattering surface, object scattering matrix, modules of consistent and cross coefficients, Stokes parameters.