УДК 621.396.963.391 **DOI: 10.31653/2306-5761.38.2025.116-127**

REFLECTIVE CAPACITY OF A COMPLEX OBJECT LOCATED IN THE OPERATING ZONE OF A SHIP RADAR POLARISATION COMPLEX

ВІДБИВНА ЗДАТНІСТЬ СКЛАДНОГО ОБ'ЄКТУ, ЯКИЙ ЗНАХОДИТЬСЯ У ЗОНІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУДНОВОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ

D. Korban, *PhD*

Д.В. Корбан, *доцент, к.т.н.*

National University «Odesa Maritime Academy», Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

The article presents the radar reflectivity of complex objects (navigation objects in atmospheric formations) during their observation by a shipborne radar polarisation complex (SRPC) in the form of an equation relating three matrices. Two matrices determine the energy and parametric characteristics of fully polarised waves that irradiate a complex radar observation object, the elements of which are real Stokes energy parameters, while the third matrix of Müller scattering of echo signals of partially polarised waves of a complex object determines its scattering properties, the elements of which are the effective scattering areas of the navigation object and atmospheric formation. The reflectivity of the navigation object is represented by four linear equations and allows determining the effective reflective properties of its surface by measuring the SRPC of four Stokes parameters of the reflected wave echo signals. Taking into account the scattering properties of atmospheric formations, their reflective properties are substantiated and presented in the form of a matrix consisting of 16 elements, which are the average effective scattering surfaces of atmospheric formation particles for the radar volume, and its polarisation properties are determined by four consecutive irradiations with fully polarised waves of specific polarisation and measurement of the Stokes parameters for each polarisation of the irradiating wave. The reflective properties of a complex object are considered from the point of view of distinguishing the polarisation structure of its echo signals, the individual characteristics of the observed SRPC navigation object against the background of the echo signal of atmospheric formation, and are presented in the form of a Mueller matrix.

Keywords: navigation object, atmospheric formation, complex object, radar observation, fully polarized wave, partially polarized wave, reflectivity of the communication equation, energy characteristics, parametric characteristics, scattering matrix, Stokes parameters.

АНОТАЦІЯ

У статті радіолокаційна відбивна здатність складних об'єктів (навігаційний об'єкт у атмосферному утворенні) під час їх спостереження судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом (СРПК) надано у вигляді рівняння зв'язку між трьома матрицями. Дві матриці визначають енергетичні та параметричні характеристики повністю поляризованих хвиль, які опромінюють складний об'єкт радіолокаційного спостереження елементами яких є дійсні енергетичні параметри Стокса, а третя матриця розсіювання Мюллера луна-сигналів частково поляризованих хвиль складного об'єкту визначає його розсіювальні властивості, елементами якої є ефективні площі розсіювання навігаційного об'єкту і атмосферного утворення. Відбивна здатність навігаційного об'єкту представлена у вигляді чотирьох лінійних рівнянь і дає змогу

визначити ефективні відбивні властивості його поверхні, шляхом вимірювання СРПК чотирьох параметрів Стокса луна-сигналів відбитої хвилі. З урахуванням розсіювальних властивостей атмосферних утворень обґрунтовано їхні відбивні властивості і представлено у вигляді матриці, що складається з 16 елементів, якими є середні для радіолокаційного об'єму ефективні поверхні розсіювання частинок атмосферного утворення, а поляризаційні властивості його визначають чотирикратним послідовним опроміненням повністю поляризованими хвилями визначених поляризацій і вимірюванням параметрів Стокса для кожної поляризації опромінювальної хвилі. Відбивні властивості складного об'єкта розглянуті з позицій розрізнення за поляризаційною структурою його луна-сигналів, індивідуальних особливостей спостережуваного СРПК навігаційного об'єкта на тлі луна-сигналу атмосферного утворення та представлені у вигляді матриці Мюллера.

Ключові слова: навігаційний об’єкт, атмосферне утворення, складний об’єкт, радіолокаційне спостереження, повністю поляризована хвиля, частково поляризована хвиля, відбивна здатність, рівняння зв’язку, енергетичні характеристики, параметричні характеристики, матриця розсіювання, параметри Стокса.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

Для забезпечення безпеки судноплавства на суднах використовуються суднові радіолокаційні комплекси (СРК), які повинні дистанційно забезпечити спостереження об'єктів по трасі слідування судна. Однак ефективність СРК знижується при наявності на трасі руху судна небезпечних атмосферних утворень у вигляді зливових опадів великої інтенсивності, при яких СРК не виявляє навігаційні об'єкти, що рухаються назустріч або перетинають трасу руху судна.

На індикаторі СРК виникає відбитий від навігаційного об'єкта і атмосферного утворення складний, частково поляризований сигнал, що складається з луна-сигналу навігаційного об'єкта і луна-сигналу атмосферного утворення. Для виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта необхідна інформація про відбивну здатність складного об'єкта, що складається з відбивної здатності навігаційного об'єкта і відбивної здатності атмосферного утворення. Ця інформація дозволить вирішити задачу поляризаційної селекції луна-сигналу навігаційного об'єкта, яка в СРК до теперішнього часу не вирішена. Тому найважливішим науковим напрямком є вирішення задачі поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційних об'єктів СРК.

І незважаючи на те, що використовувані СРК радіолокаційні методи є дистанційними, без інерційними і у них відсутні впливи на аналізовані об'єкти і мають широкі можливості автоматизації процесу радіолокаційного спостереження об'єктів і обробки прийнятої інформації, проте амплітуда електромагнітної хвилі в них є основним джерелом радіолокаційної інформації про об'єкт і відображає тільки кількісну характеристику луна-сигналу. Амплітуда електромагнітної хвилі є недостатньо інформативним параметром для виявлення природи самого об'єкта. До теперішнього часу недостатньо, тільки за рівнем луна-сигналу, однозначно визначити луна-сигнал якого об'єкта присутній на індикаторі СРК в даний момент радіолокаційного спостереження.

Використання ж такої важливої характеристики електромагнітної хвилі, як її поляризація, дасть можливість підвищити інформаційну можливість СРК і змоделювати відбивну здатність складного об'єкта, що і є актуальним завданням підвищення ефективності його функціонування в складних умовах атмосферного середовища по трасі руху судна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частини загальної проблеми

Зміна поляризації при відбитті електромагнітної хвилі від різних об'єктів обумовлена структурою самих відбивних об'єктів і тому тісно пов'язана з їх властивостями. Перехід до поляризаційних методів в судновій радіолокації дозволить більш повно описати і проаналізувати поле електромагнітної хвилі при її взаємодії з об'єктами радіолокаційного спостереження СРК. На сьогоднішній день проблема зменшення впливу атмосферних опадів на оперативну роботу СРК розглянута багатьма авторами.

Вирішення цієї проблеми в більшості випадків ґрунтується на використанні характерних особливостей поляризаційної структури луна-сигналів різних об'єктів і вдосконаленні суднових радіолокаційних СРК [1-5]. У роботі [6] представлений програмний комплекс розрахунку діаграм зворотного розсіювання, а також шляхи підвищення інформативності про морську обстановку за рахунок корабельних навігаційних РЛС в систему бачення надводної обстановки. Підхід до моделювання радіолокаційних сигналів, відбитих від об'єктів складної просторової конфігурації розглянуто в роботі [7]. Поляризаційна селекція в радіолокаційному каналі розглянута в роботі [8]. Методи і засоби високоінформативних радіолокаційних вимірювань представлені в роботі [9]. Перспективи розвитку радіолокаційних станцій збройних сил іноземних держав представлені в роботі [10-15]. Однак, наведений аналіз наукових публікацій не в повній мірі розглянув відбиваючі здатності складних об'єктів і принцип побудови певних радіолокаційних станцій для вирішення завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в складних умовах атмосферного середовища по трасі руху судна.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою даної статті є дослідження відбивної здатності складного об’єкту, що спостерігається СРПК, який складається з навігаційного об’єкту і атмосферного утворення, яка дозволить вирішити задачу поляризаційної селекції навігаційних об’єктів у складних умовах атмосферного середовища за траєкторією руху судна.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Будемо розглядати відбивні здатності навігаційного об'єкту, атмосферного утворення та складного об'єкту.

Спочатку розглянемо *матрицю розсіювання навігаційного об’єкту* представленого деяким канонічним розсіювачем у вигляді плоскої пластини, випуклих і увігнутих поверхонь пластини, на яких можуть утворюватися двогранні кутові відбивачі, які створюють луна-сигнали кругової поляризації, які приймає всеполяризована антена СРПК. Реальний же навігаційний об'єкт має відбивну поверхню великого розміру і під час падіння на неї електромагнітної хвилі певної поляризації, яка випромінюється всеполяризованою антеною СРПК. Поверхневі струми, що збуджуються на відбиваючих елементах навігаційного об'єкта, представляють собою векторну суму полів, збуджуваних кожним елементом. З урахуванням малих відстаней між відбивними елементами металевої поверхні навігаційного об'єкта, порівняно з відстанню d_k від кожного елемента до приймальної антени СРПК, ефективна відбивальна площа (*ЕВП*) навігаційного об'єкта $\sigma_{НО}$ записується у відомому вигляді:

$$\sigma_{НО} = \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|^2 , \qquad (1)$$

де σ_k - *ЕВП* окремого елемента (частини) відбивної поверхні навігаційного об'єкта\, м^2;

d_k - відстань до приймальної антени від кожного елемента, м;

λ - довжина хвилі, на якій працює СРПК, см.

Навігаційний об'єкт належить до об'єктів великих розмірів із поверхневим і крайовим розсіюванням електромагнітної енергії. Розсіювальні властивості навігаційного об'єкта можна описати матрицею розсіювання, яка дає змогу визначити розсіяний сигнал (луна-сигнал) під час його опромінення електромагнітною хвилею певної поляризації. Поляризація луна-сигналу залежить як від поляризації хвилі, що опромінює навігаційний об'єкт, так і від фізичних властивостей і форми поверхні навігаційного об'єкта. Матриця розсіювання навігаційного об'єкта, елементами якої є ефективні відбивні площини σ_k частин його поверхні, запишеться у вигляді:

$$[S_{від}]_{НО} = \begin{bmatrix} \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{11}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{12}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{13}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{14}^2 \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{21}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{22}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{23}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{24}^2 \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{31}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{32}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{33}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{34}^2 \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{41}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{42}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{43}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{44}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Елементи матриці (2) є функцією поляризації електромагнітної хвилі, що опромінює навігаційний об'єкт, яка характеризує орієнтацію вектору електричного поля відносно поверхні навігаційного об'єкта, що відбиває. До теперішнього часу визначення елементів матриці розсіювання луна-сигналів навігаційних об'єктів (2) представляє собою складне завдання. Будемо виходити з представлення відбивної здатності навігаційного об'єкта за допомогою елементів матриці Мюллера, опроміненням його відбивної поверхні повністю поляризованою електромагнітною хвилею, представленою матрицею параметрів Стокса. Приймання луна-сигналу електромагнітної хвилі навігаційного об'єкта також представлено матрицею параметрів Стокса. Тоді рівняння, що пов'язує параметри опромінювальної та відбитої хвиль з розсіювальними властивостями навігаційного об'єкта, запишеться в такому вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1від} \\ S_{2від} \\ S_{3від} \\ S_{4від} \end{bmatrix}_{НО} = \begin{bmatrix} \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{11}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{12}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{13}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{14}^2 \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{21}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{22}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{23}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{24}^2 \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{31}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{32}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{33}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{34}^2 \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{41}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{42}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{43}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{44}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ S_{3вип} \\ S_{4вип} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Перемноження матриць у (3) дає змогу отримати чотири лінійні рівняння:

$$S_{1відНО} = \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{11}^{2}\cdot S_{1вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{12}^{2}\cdot S_{2вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{13}^{2}\cdot S_{3вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{14}^{2}\cdot S_{4вип}; \quad (4)$$

$$S_{2відНО} = \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{21}^{2}\cdot S_{1вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{22}^{2}\cdot S_{2вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{23}^{2}\cdot S_{3вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{24}^{2}\cdot S_{4вип}; \quad (5)$$

$$S_{3відНО} = \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{31}^{2}\cdot S_{1вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{32}^{2}\cdot S_{2вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{33}^{2}\cdot S_{3вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{34}^{2}\cdot S_{4вип}; \quad (6)$$

$$S_{4відНО} = \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{41}^{2}\cdot S_{1вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{42}^{2}\cdot S_{2вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{43}^{2}\cdot S_{3вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{44}^{2}\cdot S_{4вип}. \quad (7)$$

Поляризаційні параметри випромінюваної хвилі відомі заздалегідь, поляризаційні параметри хвилі, відбитої від поверхні навігаційного об'єкта, які надходять на вхід всеполяризованої антени, вимірюються СРПК, що дає змогу визначити елементи матриці Мюллера, що характеризують властивості відбиваючої поверхні навігаційного об'єкта.

Розглянемо *матрицю розсіювання атмосферного утворення.* В основі процесу радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних утворень або на їхньому тлі, а також за атмосферними утвореннями лежить акт розсіювання зондувального сигналу навігаційним об'єктом і атмосферним утворенням. Судновий радіолокаційний поляризаційний комплекс, здійснюючи радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів, одночасно здійснює і радіолокаційне спостереження атмосферних утворень, які представляються у вигляді опадів різної інтенсивності, фазового стану і які складаються з великої кількості випадково розташованих та орієнтованих у просторі частинок, що розсіюють, різного розміру і форми.

Електромагнітне поле, що збуджується зондувальною хвилею певної поляризації в частинках атмосферного утворення, є лінійною комбінацією полів, що збуджуються в кожній частинці, відповідно до її фізичних властивостей. Вплив атмосферних утворень на радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів СРПК проявляється не тільки у вигляді ослаблення луна-сигналу навігаційного об'єкта, а й погіршення їхньої радіолокаційної спостережуваності на траєкторії судна завдяки розсіянню електромагнітної енергії частками атмосферного утворення у зворотному напрямку та створенню неправдивих луна-сигналів, що можуть бути сприйняті за луна-сигнали навігаційного об'єкта на індикаторі СРПК.

Стосовно завдання радіолокаційного спостереження навігаційного об'єкта СРПК виділяються дві частини електромагнітного поля: падаючого на навігаційний об'єкт і розсіяного навігаційним об'єктом. Однак, у зв'язку з тим, що навігаційний об'єкт перебуває всередині, перед або за зоною атмосферного утворення, розсіяне поле складається з поля, розсіяного навігаційним об'єктом, і поля, розсіяного атмосферним утворенням. Звідси випливає процедура виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта із сумарного луна-сигналу складного об'єкта, яку до теперішнього часу повністю не реалізовано під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів на тлі атмосферних утворень СРПК на траєкторії руху судна, що є одним з актуальних завдань підвищення ефективності функціонування СРПК.

Атмосферні утворення є падаючими або зваженими водяними краплями або крижаними кристалами, які є елементарними відбивачами електромагнітної енергії, що падає на них, і характеризуються певною геометричною конфігурацією (сфера, сплюснуті та витягнуті еліпсоїди обертання) за величиною відношення їхніх основних розмірів до довжини опромінюваної хвилі. Так, під час випадання облогових опадів довжина опромінювальної

хвилі значно більша за розміри їхніх частинок і такі атмосферні утворення характеризуються релеєвським розсіюванням електромагнітної енергії (розглядається частинка опадів як електричний диполь, у якому опромінювальна хвиля збуджує відповідні струми).

Зливові опади, що випадають, характеризуються резонансним розсіюванням, за якого розміри частинок опадів, що випадають, мають один порядок із довжиною опромінювальної хвилі. Ці дві групи розсіювання електромагнітної енергії присутні в атмосферному утворенні при функціонуванні СРПК в умовах можливої протидії антисистеми.

Атмосферні утворення, як об'єкти, що заважають радіолокаційному спостереженню навігаційних об'єктів СРПК, складаються із сукупностей N_0 рідких і твердих частинок, випадково розташованих і орієнтованих у просторі. Під час опромінення такого атмосферного утворення електромагнітною хвилею певної довжини та поляризації, частинки, що відбивають, і які формують луна-сигнал, розподілено в межах імпульсного радіолокаційного об'єму V у формі циліндра, який визначається роздільною здатністю СРПК за дальністю й кутовими координатами та обчислюється за відомою формулою:

$$V = \frac{2\pi R^2 c\tau_u}{D}, \tag{8}$$

де R – відстань від антени СРПК до відбивального об'єму атмосферного утворення, км;

c – швидкість світла, м/с;

τ_u – тривалість випромінюваного імпульсу, мкс;

D – коефіцієнт направленої дії антени СРПК.

Середня *ЕВП* (ефективна відбиваюча поверхня) об'єму атмосферного утворення, що відбиває, визначається з умови:

$$\bar{\sigma}_{AV} = N_0 \sigma_0 V, \tag{9}$$

де σ_0 – *ЕВП* елементарного відбивача в радіолокаційному об'ємі V, м^2.

За умови, що у радіолокаційному об'ємі V всі частинки мають однакове *ЕВП*, що дорівнює σ_0, середнє *ЕВП* запишеться у вигляді:

$$\bar{\sigma}_{AV} = 2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}. \tag{10}$$

З урахуванням (10) розсіювальні властивості атмосферного утворення можна представити такою матрицею:

$$[S_{від}]_{AV} = \begin{bmatrix} \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{11} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{12} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{13} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{14} \\ \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{21} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{22} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{23} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{24} \\ \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{31} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{32} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{33} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{34} \\ \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{41} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{42} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{43} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{44} \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Матриця розсіювання атмосферного утворення (11) входить до рівняння, що зв'язує параметри опромінювальної та відбитої хвиль, представлених параметрами Стокса:

$$\begin{bmatrix} S_{1від} \\ S_{2від} \\ S_{3від} \\ S_{4від} \end{bmatrix}_{АУ} = \begin{bmatrix} \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{11} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{12} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{13} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{14} \\ \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{21} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{22} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{23} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{24} \\ \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{31} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{32} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{33} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{34} \\ \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{41} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{42} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{43} & \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ S_{3вип} \\ S_{4вип} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Перемноження матриць у рівнянні (12) дає змогу отримати чотири лінійні рівняння, що представляють луна-сигнал атмосферного утворення:

$$S_{1відАУ} = \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{11} \cdot S_{1вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{12} \cdot S_{2вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{13} \cdot S_{3вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{14} \cdot S_{4вип}; \quad (13)$$

$$S_{2відАУ} = \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{21} \cdot S_{1вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{22} \cdot S_{2вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{23} \cdot S_{3вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{24} \cdot S_{4вип}; \quad (14)$$

$$S_{3відАУ} = \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{31} \cdot S_{1вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{32} \cdot S_{2вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{33} \cdot S_{3вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{34} \cdot S_{4вип}; \quad (15)$$

$$S_{4відАУ} = \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{41} \cdot S_{1вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{42} \cdot S_{2вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{43} \cdot S_{3вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{44} \cdot S_{4вип}. \quad (16)$$

Повне визначення поляризаційних властивостей атмосферного утворення досягається чотириразовим послідовним опроміненням електромагнітними хвилями різних поляризацій із вимірюванням параметрів Стоксу луна-сигналу для кожної поляризації, опромінюваної атмосферне утворення електромагнітної хвилі.

Розглянемо *матрицю розсіювання складного об'єкту*. Суднові радіолокаційні поляризаційні комплекси функціонують у складних умовах атмосферного середовища, за яких погіршується радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів. Якщо визначити рівень безпеки виникнення катастрофічної, аварійної та складної ситуації за допомогою математичного моделювання, під час якого відмови тих чи інших видів вводяться у функціональні системи суден, то моделювання функціонування суднових радіолокаційних комплексів під час впливу перешкод від атмосферного утворення є складною задачею, розв'язання якої потребує відомостей як про структуру та властивості навігаційного об'єкта радіолокаційного моніторингу, так про атмосферного утворення. Незважаючи на доведення

до розробників і виробників суднового радіолокаційного устаткування вимог і рекомендацій технічного персоналу суден до нових розробок суднових радіолокаційних комплексів, дотепер в експлуатованих суднових СРК повною мірою ще не враховані фактори впливу атмосферних утворень на радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів, не використовується поляризаційна структура радіолокаційних сигналів, а поляризацію електромагнітної хвилі не розглядають як важливе потенційне джерело інформації щодо навігаційного об'єкта.

Розсіювальні властивості складного об'єкта (*СО*) можна описати матрицею Мюллера у вигляді:

$$[S_{CO}]=\begin{vmatrix} \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{11}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{11} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{12}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{12} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{21}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{21} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{21}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{21} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{31}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{31} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{31}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{31} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{41}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{41} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{41}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{41} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{13}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{13} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{14}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{14} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{23}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{23} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{24}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{24} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{33}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{33} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{34}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{34} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{43}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{43} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{44}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{44} \end{vmatrix}. \qquad (17)$$

Матриця розсіювання складного об'єкта, з його розсіювальними властивостями, входить до рівняння, що пов'язує параметри опромінювальної та відбитої від нього електромагнітної хвилі, які представлені дійсними енергетичними поляризаційними параметрами Стокса представлена у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1вiдCO} \\ S_{2вiдCO} \\ S_{3ompCO} \\ S_{4вiдCO} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{11}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{11} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{12}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{12} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{21}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{21} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{21}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{21} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{31}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{31} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{31}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{31} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{41}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{41} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{41}^2+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{41} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{13}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{13} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{14}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{14} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{23}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{23} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{24}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{24} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{33}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{33} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{34}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{34} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{43}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{43} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{44}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ S_{3вип} \\ S_{4вип} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Для середньої *ЕВП* відбиваючого радіолокаційного об'єму атмосферного утворення було зроблено припущення про однакові *ЕВП* усіх елементарних відбивачів σ_0, однак, у складному об'єкті наявні *ЕВП* із різними σ_i, тоді $2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D} = \bar{\sigma}_{AY}$, а $\left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|^2 = \sigma_{HO}$ і рівняння (18) набуде вигляду:

$$\begin{bmatrix} S_{1відСО} \\ S_{2відСО} \\ S_{3відСО} \\ S_{4відСО} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11HO}+\bar{\sigma}_{11AY} & \sigma_{12HO}+\bar{\sigma}_{12AY} & \sigma_{13HO}+\bar{\sigma}_{13AY} & \sigma_{14HO}+\bar{\sigma}_{14AY} \\ \sigma_{21HO}+\bar{\sigma}_{21AY} & \sigma_{22HO}+\bar{\sigma}_{22AY} & \sigma_{23HO}+\bar{\sigma}_{23AY} & \sigma_{24HO}+\bar{\sigma}_{24AY} \\ \sigma_{31HO}+\bar{\sigma}_{31AY} & \sigma_{32HO}+\bar{\sigma}_{32AY} & \sigma_{33HO}+\bar{\sigma}_{33AY} & \sigma_{34HO}+\bar{\sigma}_{34AY} \\ \sigma_{41HO}+\bar{\sigma}_{41AY} & \sigma_{42HO}+\bar{\sigma}_{42AY} & \sigma_{43HO}+\bar{\sigma}_{43AY} & \sigma_{44HO}+\bar{\sigma}_{44AY} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ S_{3вип} \\ S_{4вип} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Опромінюючи складний об'єкт електромагнітною хвилею певної поляризації визначаються елементи матриці розсіювання складного об'єкта (19). При цьому розсіювачі в атмосферному утворенні змінюють свою орієнтацію відносно один одного, форму, розміри, фазовий стан, а відбитий луна-сигнал навігаційного об'єкта є результатом інтерференції хвиль, відбитих від його окремих елементів поверхні. Тому відбивні властивості складного об'єкта визначаються внутрішньою структурою його двох характерних частин, що мають певні особливості. Під час опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею певної поляризації луна-сигнал матиме еліптичну поляризацію, а відбита хвиля стає частково поляризованою. Елементи матриці розсіювання складного об'єкта можна подати у вигляді сумарних ефективних площ розсіювання складного об'єкта $\sigma_{mnHO} + \sigma_{mnAY} = \sigma_{mnCO}$.

Тоді рівняння, що пов'язує параметри випромінюваної хвилі з параметрами відбитої хвилі і матрицею розсіювальних властивостей складного об'єкта, запишеться у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1відСО} \\ S_{2відСО} \\ S_{3відСО} \\ S_{4відСО} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11CO} & \sigma_{12CO} & \sigma_{13CO} & \sigma_{14CO} \\ \sigma_{21CO} & \sigma_{22CO} & \sigma_{23CO} & \sigma_{24CO} \\ \sigma_{31CO} & \sigma_{32CO} & \sigma_{33CO} & \sigma_{34CO} \\ \sigma_{41CO} & \sigma_{42CO} & \sigma_{43CO} & \sigma_{44CO} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ S_{3вип} \\ S_{4вип} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

З метою підвищення безпеки судноводіння, судновий радіолокаційний комплекс повинен володіти певним обсягом радіолокаційної інформації про об'єкти спостереження, яку можна отримати за використання поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі як найперспективнішого джерела радіолокаційної інформації про об'єкти радіолокаційного спостереження, а судновий радіолокаційний комплекс повинен бути судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом. Оскільки проблема перешкодозахищеності суднових СРК далека до завершення, то одним із перспективних напрямів розв'язання зазначеної проблеми є використання поляризаційної селекції луна-сигналів, що дає змогу за

поляризаційною структурою луна-сигналу складного об'єкта розрізнити індивідуальні характеристики навігаційного об'єкта, що спостерігається судновою СРК, на тлі атмосферного утворення.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

1. Обгрунтовано відбиваюча здатність навігаційного об’єкту канонічним розсіювачем у вигляді плоскої пластини, випуклих і увігнутих поверхонь пластини, на яких можуть утворюватися двогранні кутові відбивачі, які створюють луна-сигнали кругової поляризації, які приймає всеполяризована антена розробленого СРПК. Матриця розсіювання навігаційного об’єкту, елементами якої є ефективні відбивні площини і є функцією поляризації електромагнітної хвилі, яка опромінює навігаційний об’єкт. Поляризаційні параметри випромінюваної хвилі відомі заздалегідь, поляризаційні параметри хвилі, відбитої від поверхні навігаційного об'єкта, які надходять на вхід всеполяризованої антени, вимірюються СРПК, що дає змогу визначити елементи матриці, які характеризують властивості відбиваючої поверхні навігаційного об'єкта.

2. Обгрунтовано відбиваюча здатність атмосферного утворення. Розсіювальні властивості атмосферного утворення надані також матрицею розсіювання, елементами якої є ефективні відбивні поверхні часинок атмосферного утворення і формують луна-сигнал у межах імпульсного радіолокаційного об’єму у формі циліндра, який визначається роздільною здатністю СРПК за дальністю та кутовими координатами. Повне визначення поляризаційних властивостей атмосферного утворення досягається чотириразовим послідовним опроміненням електромагнітними хвилями різних поляризацій.

3. Обгрунтовано відбиваюча здатність складного об’єкту. Розсіювальні властивості складного об’єкту представлені матрицею розсіювання, елементи якої складаються з суми відповідних елементів матриць розсіювання навігаційного об’єкту і атмосферного утворення. Матриця розсіювання складного об’єкту пов’язує параметри опромінюючої та відбитої від нього електромагнітної хвилі, а елементи матриці складного об’єкту надані як сума ефективних площ навігаційного об’єкту і атмосферного утворення. Електромагнітна хвиля яка опромінює складний об’єкт і відбита від нього, яка поступає на вхід всеполяризованої антени СРПК представлені дійсними енергетичними параметрами Стокса у вигляді матриць.

4. Відбивні властивості складного об'єкта розглянуті з позицій розрізнення за поляризаційною структурою його луна-сигналів, індивідуальних особливостей спостережуваного СРПК навігаційного об'єкта на тлі луна-сигналу атмосферного утворення та представлені у вигляді матриці Мюллера з сумарними елементами, що характеризують ефективні поверхні розсіювання навігаційного об'єкта й атмосферного утворення, які визначаються СРПК через вимірювані параметри Стокса луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Ryzkov A., “The effect of nonuniform beat filling on the quality of radar polarimetric data,” in *Proc. Fourth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2006)*, Barcelona, 18–22 Sept. 2006, pp. 1–4.

[2] Ryzkov A., Hydak D., and Scott J., “A new polarimetric scheme for attenuation correction at C-band,” in *Proc. ERAD 2006*, 2006, pp. 29–32.

[3] Ryzkov A. and Zrnic D., “The impact of depolarization on polarimetric signatures in snow,” in *Proc. ERAD 2006*, 2006, pp. 33–36.

[4] Hydak D., Rodriguez P., Lee G. W., Ryzhkov A., Fabry F., and Donaldson N., “Winter precipitation studies with a dual polarized C-band radar,” in *Proc. ERAD 2006*, 2006, pp. 9–12.

[5] Воробей В. І., Доронин В. В. та Роднянський Р. А., *Суднові навігаційні радіолокаційні станції*. Київ: КГАВТ, 2005, 76 с.

[6] Головін В. А. та Романенко Т. В., *Радіолокація: програмний комплекс розрахунку діаграми зворотного розсіювання: навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021, 84 с.

[7] Мальцев В. В., Сисигін І. В. та Колесников К. О., «Підхід до моделювання радіолокаційних сигналів, відбитих від об’єктів складної просторової конфігурації», *Радіопромисловість*, № 1, с. 42–49, 2018.

[8] Обод І. І., Стрельницький О. О. та Андрусевич В. А., *Інформаційна модель систем спостереження повітряного простору*. Харків: ХНУРЕ, 2015, 270 с.

[9] Обод І. І., Черних О. П., Заволодько В. В. та Ткаченко О. Ю., «Інформаційна модель систем спостереження повітряного простору», *Системи обробки інформації*, вип. 5(142), с. 35–37, 2016.

[10] Крилов Є., «Перспективи розвитку радіолокаційних станцій збройних сил іноземних держав», *Зарубіжний військовий огляд*, № 2, с. 37–40, 2018.

[11] Korban D., “Polarization selection of navigation objects located in the zone of atmospheric formations,” *Shipping & Navigation*, iss. 32, pp. 56–70, 2021, doi: 10.31653/2306-5761.32.2021.56-70

[12] Korban D., “Polarization method for navigation object selection in ship radar observation,” *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, vol. 76, pp. 148–155, 2023.

[13] Korban D., Volkov O. and Kostenko P., “Parametric polarization radio-location method of improvement of radio-location observation of navigational objects against the background of natural hindrances,” *Buletinul Universităţii Maritime Constanţa*, 2018.

[14] Stetsenko M., Melnyk O., Vorokhobin I. and Ivanova I., “Polarization-based target detection approach to enhance small surface object identification ensuring navigation safety,” *System Research and Information Technologies*, 2024.

[15] Korban D., Melnyk O., Onyshchenko O., *et al*., “Radar-based detection and recognition methodology of autonomous surface vehicles in challenging marine environment,” *Scientific Journal of Silesian University of Technology, Series Transport*, vol. 122, pp. 111–127, 2024.

REFERENCES

[1] Ryzhkov A., “The effect of nonuniform beat filling on the quality of radar polarimetric data,” in *Proc. 4th Eur. Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2006)*, Barcelona, Sep. 18–22, 2006, pp. 1–4.

[2] Ryzhkov A., Hydak D., and Scott J., “A new polarimetric scheme for attenuation correction at C-band,” in *Proc. ERAD 2006*, 2006, pp. 29–32.

[3] Ryzhkov A. and Zrnic D., “The impact of depolarization on polarimetric signatures in snow,” in *Proc. ERAD 2006*, 2006, pp. 33–36.

[4] Hydak D., Rodriguez P., G. Lee W., Ryzhkov A., Fabry F., and Donaldson N., “Winter precipitation studies with a dual-polarized C-band radar,” in *Proc. ERAD 2006*, 2006, pp. 9–12.

[5] Vorobei V. I., Doronin V. V., and Rodnyansky R. A., *Shipborne Navigational Radar Stations*. Kyiv, Ukraine: KGAVT, 2005. [in Ukrainian].

[6] Holovin V. A. and Romanenko T. V., *Radiolocation: Software Package for Calculating the Backscattering Pattern. Textbook for Students of Specialty 172 “Telecommunications and Radio Engineering”*. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021. [in Ukrainian].

[7] Malcev V. V., Sisigin I. V., and Kolesnikov K. O., “Approach to modeling radar signals reflected from objects of complex spatial configuration,” *Radiopromyshlennost (Radio Industry)*, no. 1, pp. 42–49, 2018. [in Ukrainian].

[8] Obod I. I., Strelnytskyi O. O., and Andrusevych V. A., *Information Model of Airspace Surveillance Systems*. Kharkiv, Ukraine: Kharkiv National University of Radio Electronics, 2015. [in Ukrainian].

[9] Obod I. I., Chernykh O. P., Zavolodko V. V., and Tkachenko O. Yu., “Information model of airspace surveillance systems,” *Information Processing Systems*, no. 5(142), pp. 35–37, 2016. [in Ukrainian].

[10] Krylov E., “Prospects for the development of radar stations of the armed forces of foreign states,” *Foreign Military Review*, no. 2, pp. 37–40, 2018. [in Ukrainian].

[11] Korban D., “Polarization selection of navigation objects located in the zone of atmospheric formations,” *Shipping & Navigation*, no. 32, pp. 56–70, 2021, doi: 10.31653/2306-5761.32.2021.56-70

[12] Korban D., “Polarization method for navigation object selection in ship radar observation,” *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, vol. 76, pp. 148–155, 2023.

[13] Korban D., Volkov O., and Kostenko P., “Parametric polarization radiolocation method to improve radar observation of navigational objects against the background of natural clutter,” *Buletinul Universității Maritime Constanța*, 2018.

[14] Stetsenko M., Melnyk O., Vorokhobin I., and Ivanova I., “Polarization-based target detection approach to enhance small surface object identification ensuring navigation safety,” *System Research and Information Technologies*, 2024.

[15] Korban D., Melnyk O., Onyshchenko O., *et al*., “Radar-based detection and recognition methodology of autonomous surface vehicles in challenging marine environment,” *Scientific Journal of Silesian University of Technology, Series Transport*, vol. 122, pp. 111–127, 2024.