

POLARIZATION MEASUREMENTS OF ECHO SIGNALS OF PARTIALLY POLARIZED WAVES OF COMPLEX OBJECTS BY A SHIP'S RADAR POLARIZATION COMPLEX

ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ВИМІРЮВАННЯ ЛУНА-СИГНАЛІВ ЧАСТКОВО ПОЛЯРИЗОВАНИХ ХВИЛЬ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ СУДНОВИМ РАДІОЛОКАЦІЙНИМ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИМ КОМПЛЕКСОМ

D. Korban, *PhD*,

Д.В. Корбан, *к.т.н.*,

National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

The paper theoretically substantiates the methodology of polarization measurements of echo signals of a partially polarized wave of a complex object using an all-polarized antenna of a shipboard radar polarization complex (SRPC). The transformation of the echo signals of a partially polarized wave with regard to its polarization properties when passing through the microwave waveguide elements of the all-polarized antenna, such as power dividers (E-, H-, T-bridges) and polarization separators, which in a certain way divide the echo signals of the wave under analysis into orthogonal components in the waveguide path, is presented. It is shown that the polarization separator acts as a waveguide element that connects one of the electric field components at the output of a circular waveguide, during the reception of an echo signal of a partially polarized wave of a complex object, with currents and loads in one of the SRPC channels, and the second component with currents and loads in the second channel. The use of six channels simultaneously allows for instantaneous registration of the polarization state of the echo signal of a partially polarized wave received at the input of the all-polarized antenna from a complex radar surveillance object of the SRPC.

To transmit arbitrarily polarized fields in an all-polarized antenna, symmetry for two orthogonally polarized waves is ensured. The accuracy of the six-component polarization separator is evaluated. The possibility of using the polarization scattering matrix of the separator is substantiated, the elements of which allow to identify possible sources of errors caused by the imperfect factory manufacturing of waveguide elements, to establish the degree of coordination of each arm of the waveguide polarization separator.

Keywords: all-polarized antenna, partially polarized wave, waveguide polarization separator, polarization scattering matrix of the separator, echo signals of a complex object, error sources, polarization selection, degree of coordination of the waveguide sides of the separator.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями

У поляриметричних радіолокаційних системах суднових РЛС антена є аналізатором поляризації та бере участь у візуалізації властивостей спостережуваних об'єктів на трасі руху судна шляхом поляризаційного представлення луна-сигналів складних об'єктів, що надходять на її вхід. Тому антени сучасних поляриметричних суднових РЛС характеризуються певною технологічною базою, більш повним використанням поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі, що надходить на її вхід, шляхом варіювання її електричних характеристик. Таким чином, антени сучасних суднових поляриметрів мають бути всеполяризованими, випромінювальними та такими, що приймають електромагнітні хвилі

будь-яких поляризацій шляхом керування амплітудою, фазою і поляризацією випромінюваних хвиль та аналізу поляризації прийнятих всеполяризованою антеною електромагнітних хвиль, як просторово-часових сигналів. Використання НВЧ елементів і пристроїв, що включають хвилеводні відгалужувачі, поглинальні навантаження, атенюатори, фазообертачі, феритові елементи, дадуть змогу судновій поляризаційній РЛС розв'язувати задачі виявлення, розпізнавання і селекції навігаційних об'єктів у будь-яких несприятливих умовах атмосферного середовища.

Використання всеполяризованої антени в СРПК є необхідною умовою для забезпечення селекції луна-сигналу навігаційного об'єкта під час надходження на вхід антени луна-сигналу частково поляризованої хвилі від складного об'єкта, що у використовуваних антенах судових РЛС до теперішнього часу не забезпечено.

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

До теперішнього часу створено радіолокаційні антени з регульованою поляризацією, що дають змогу оптимально реалізувати енергетичні можливості судових РЛС [1], антени кругової поляризації для зниження завад від випадних опадів у хвилеводному тракті яких увімкнені поляризатори, які перетворюють хвилю лінійної поляризації на кругову, та комутатори для ввімкнення й вимкнення цих поляризаторів [2]. Розроблено також антени лінійної поляризації з невзаємними поляризаційними властивостями, які випромінюють лінійно поляризовану хвилю, а приймають їй ортогональну [3]. Такі антени виготовляються у вигляді двох антен - одна на передачу, інша на приймання, а діючі висоти, яких ортогональні одна одній [4]. Також виготовляють антени з перемиканням передавального і приймального каналів, у яких один із каналів передавальний, а другий приймальний [5]. Для підвищення ефективності пригнічення відбиття від гідрометеорів використовують електромагнітні хвилі еліптичної поляризації в антенах з регульованими поляризаційними характеристиками [6]. Однак, у всіх розглянутих антенах, ефективність виділення луна-сигналів навігаційних об'єктів з луна-сигналів складних об'єктів визначатиметься тим, наскільки різняться між собою коефіцієнти деполіризації атмосферного утворення та навігаційного об'єкта. Тому у зв'язку з недостатньою ефективністю їхньої роботи, такі антени в судових РЛС дотепер не використовуються і виникає необхідність для підвищення безпеки судноводіння в розробці й аналізі їхнього функціонування судових РЛС всеполяризованих антен, які б давали змогу здійснювати поляризаційну селекцію луна-сигналів навігаційних об'єктів, а радіолокаційне спостереження вести окремо як за навігаційним об'єктом, так і за атмосферним утворенням за траєкторією руху судна, що і є актуальною задачею.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою даної статті є обґрунтування методології побудови всеполяризованої антени в СРПК, яка дозволить вирішити задачу поляризаційної селекції навігаційних об'єктів у складних умовах атмосферного середовища за траєкторією руху судна.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Розроблені до теперішнього часу радіолокаційні методи поляризаційного аналізу частково поляризованих хвиль визначили конструктивні особливості різних видів поляризаційних поляриметрів з антенами певного виду [7]. При поляризаційних вимірюваннях неоднорідних з поляризаційної точки зору полях, у СРПК краще використовувати всеполяризовані антени повним розкритом, у даному варіанті рупорні, які мають менші недоліки при прийманні неоднакового поляризованого сигналу складного об'єкта. Поляризація рупорного розкриття мало залежить від напрямку у межах головної пелюстки її діаграми спрямованості і ця залежність може не враховуватись. У табл.1 надані відомі

характеристики кінчного рупору який використовують у СРПК при випромінненні всеполяризованою антеною електромагнітної хвилі кругової поляризації на довжині хвилі

$\lambda = 3,2$ см.

Таблиця 1. Поляризаційні характеристики кінчного рупору, що використовується у всеполяризованій антені СРПК

Кут ϕ , град	Кут, відлічуваний від осі рупора, град		Відношення півосей поляризаційного еліпса, дБ
0 4 180	0		0,3
	10		0,4
	20		1,2
	30		3,7
	35		5,8
	40		8,0
	45		13,4
	50		> 23
45 4 225	20		1,6
	30		4,1
	35		5,1
	40		7,5
	45		13,1
	50		> 23
90 4 270	20		1,8
	30		4,2
	35		5,2
	40		8,7
	45		14,8
	50		> 23
135 4 315	20		1,5
	30		3,6
	35		5,5
	40		8,7
	45		14,7
	50		> 23

Розподіл поля, що забезпечує формування заданої діаграми спрямованості в розкритті осесиметричного рупору, створюється застосуванням рупорного опромінювача відповідного

розміру. Для симетрування діаграми спрямованості опромінювача можна використовувати спеціальну конструкцію контррефлектора. Тоді випромінювання антени буде сприйматися як частково лінійно поляризоване в площині XOZ, а реєстровані параметри Стокса на виході двоканального лінійного приймача будуть рівними $S_1 = P_x + P_y$; $S_2 = P_x - P_y$; $S_3 = 0$; $S_4 = 0$

і ступінь поляризації випромінювання m визначатиметься з умови:

$$m = \frac{S_3}{S_1} = \frac{P_x - P_y}{P_x + P_y} = 0,06, \quad (1)$$

що є достатньою для розв'язання задачі поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційного об'єкта.

У загальному випадку, під час використання всеполяризованої рупорної антени з опромінювачем у вигляді конічного рупора, неполяризоване випромінювання частково поляризується в площині падіння або перпендикулярно до неї. Необхідність у залученні до розгляду кроссполяризованого випромінювання тут не виникає. Для аналізу помилок, зумовлених недосконалістю побудови всеполяризованої антени СРПК, антенну систему, що забезпечує приймання двох ортогональних складових поля, розглядатимемо як пристрій, який здійснює розділення ортогональних складових поля двома хвилеводними каналами, амплітуди та фази хвиль яких відповідають амплітудам та фазам складових поля в просторі та здійснює його перетворення за методом Джонса [8,9]:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де \dot{E}_1, \dot{E}_2 - комплексні амплітуди ортогональних складових луна-сигналів складного об'єкта, що приймаються всеполяризованою антеною СРПК;

E_1, E_2 - амплітуди складових поля НВЧ у хвилеводному тракті всеполяризованої антени;

$\alpha_{11} - \alpha_{22}$ - елементи матриці, що описують роботу вхідного антенного хвилеводного роздільника поляризацій на ортогональні компоненти і визначають кроссполяризацію та посилення ортогональних складових.

Достатньою умовою безпомилкової роботи вхідного пристрою антени є виконання такої рівності яку в загальному випадку не можна розглядати як необхідну:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 \\ 0 & \alpha_{22} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Параболічне дзеркало антени з розташованим у його фокусі симетричним випромінювачем переходить у круглий хвилевод із роздільником еліптично поляризованої хвилі, що надходить на вхід всеполяризованої антени СРПК, на дві ортогонально лінійно поляризовані компоненти, які надходять прямокутними хвилеводами на входи шестикомпонентного поляризаційного роздільника, що є основною хвилеводною ланкою, яка визначає принцип і точність роботи двоканального СРПК. Поляризаційний роздільник пов'язує одну з компонент електричного поля частково поляризованого луна-сигналу на виході всеполяризованої антени в режимі приймання зі струмами та напругами в одному з каналів, а іншу компоненту - зі струмами та напругами в другому каналі. Використання двох каналів одночасно дає змогу здійснювати миттєвий аналіз поляризаційного стану радіохвилі.

Оскільки в хвилеводних трактах використовуються прямокутні хвилеводи з хвилею H_{01} , то для передавання частково поляризованої хвилі необхідно забезпечити симетрію для двох ортогонально поляризованих компонент електромагнітної хвилі, що надходить на вхід всеполяризованої антени СРПК. Цій умові задовольняє круглий хвилевід із двома ортогональними хвилями типу H_{11} . Кожна з ортогональних компонент вхідної хвилі проходить у відповідний вихідний канал роздільника. Зменшення помилок під час роботи роздільника забезпечується узгодженням усіх його хвилеводних плечей. На рис.1 представлено функціональну схему всеполяризованої антени СРПК. Луна-сигнал частково поляризованої хвилі надходить на вхід 1 всеполяризованої антени та круглим хвилеводом 2 проходить на роздільник 3 лінійних поляризацій з відводами А, Б, В, Г для ортогональних лінійних компонент хвилі. Лінійні ортогональні поляризації (вертикальна і горизонтальна) спільно з роздільниками потужності 5 і фазообертачем 6 використовуються для отримання електромагнітної хвилі кругових поляризацій правого і лівого обертання вектору. Канал кругових поляризацій утворюється завдяки введенню в один із трактів додаткової фазозатримувальної секції 6 на $\varphi = 90^\circ$ з подальшим їхнім складанням у хвилеводному трійнику.

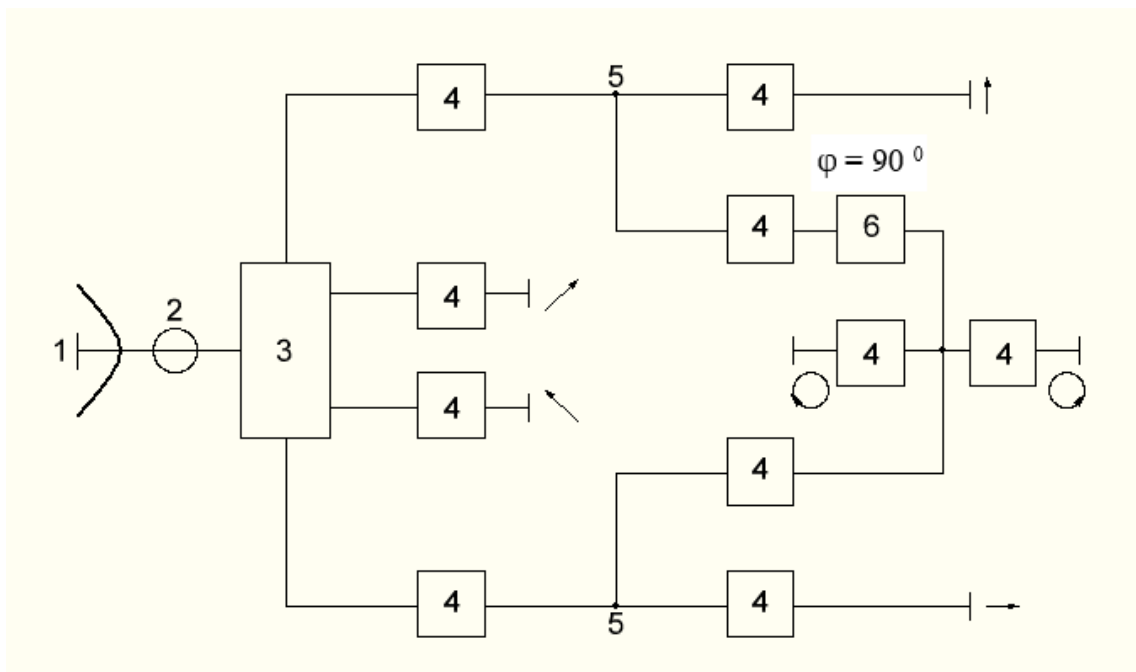


Рис.1 Схема всеполяризованої антени СРПК з поляризаційним роздільником

1 - параболоїд із конічним випромінювачем; 2 - круглий хвилевід; 3 - поляризаційний роздільник на круглому хвилеводі; 4 - прямокутні хвилеводи; 5 - роздільники потужності (E, H і P - хвилевідні мости); 6 - фазозатримувальна секція.

Наведена схема дає змогу здійснювати переведення всіх фазових співвідношень в амплітудні вже у високочастотному тракті всеполяризованої антени, що полегшує калібрування та налагодження антени, підвищує її функціонування та спрощує роботу двоканального лінійного приймача із системою формування поляризаційних параметрів Стокса і дає змогу розв'язувати задачу поляризаційної селекції навігаційних об'єктів у СРПК за траєкторією руху судна в будь-яких атмосферних умовах. Налаштування поляризаційного роздільника та умови узгодження його плечей здійснюється за допомогою хвилеводного плунжера на виході роздільника 4 (Рис.1), який ввімкнено в місці закінчення круглого хвилеводу роздільника, що забезпечує одержання його повної матриці розсіювання $[S]$ [8]:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} & S_{17} & S_{18} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} & S_{27} & S_{28} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} & S_{37} & S_{38} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} & S_{47} & S_{48} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} & S_{57} & S_{58} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} & S_{67} & S_{68} \\ S_{71} & S_{72} & S_{73} & S_{74} & S_{75} & S_{76} & S_{77} & S_{78} \\ S_{81} & S_{82} & S_{83} & S_{84} & S_{85} & S_{86} & S_{87} & S_{88} \end{bmatrix} \quad (4)$$

і матрицю розсіювання для лінійних компонент $[S]_{лк}$:

$$[S]_{лк} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

У налаштованому поляризаційному роздільнику кожна з компонент поля повністю проходить тільки у відповідне їй вихідне плече і не викликає появу сигналу в іншому плечі. Ступінь узгодження кожного плеча шестикомпонентного поляризаційного розподільника характеризується величиною коефіцієнта відбиття, виміряного при приєднанні інших плечей до узгоджених хвильоводних навантажень. Чим ближчими до нуля будуть значення діагональних елементів S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{44} , S_{55} , S_{66} , S_{77} , S_{88} повної матриці розсіювання, тим точнішими будуть поляризаційні вимірювання. Ступінь розв'язки каналів двох ортогональних компонент визначається величиною елементів матриці, що лежать на її допоміжній діагоналі, а зв'язок один з одним вхідних каналів характеризують елементи матриці S_{11} і S_{21} , а зв'язок вихідних каналів характеризується елементами матриці S_{34} , S_{43} , S_{56} , S_{65} , S_{78} , S_{87} . Конструкція роздільника повинна забезпечувати появу сигналу тільки в одному з його вихідних каналів під час надходження на його вхід однієї компоненти аналізованого поля. Ступінь розв'язки двох ортогональних компонент визначається величинами елементів $S_{14} = S_{41}$ і $S_{32} = S_{23}$. Під час роботи поляризаційного роздільника необхідно контролювати узгодження хвильоводних трактів, що підключаються до всіх вихідних плечей поляризаційного роздільника 1 - 8. Так, наприклад, відсутність узгодження для однієї з компонент відбитої хвилі в круглому хвильоводі b_1 або b_2 (рис. 2) призведе до порушення нормальної роботи поляризаційного роздільника.

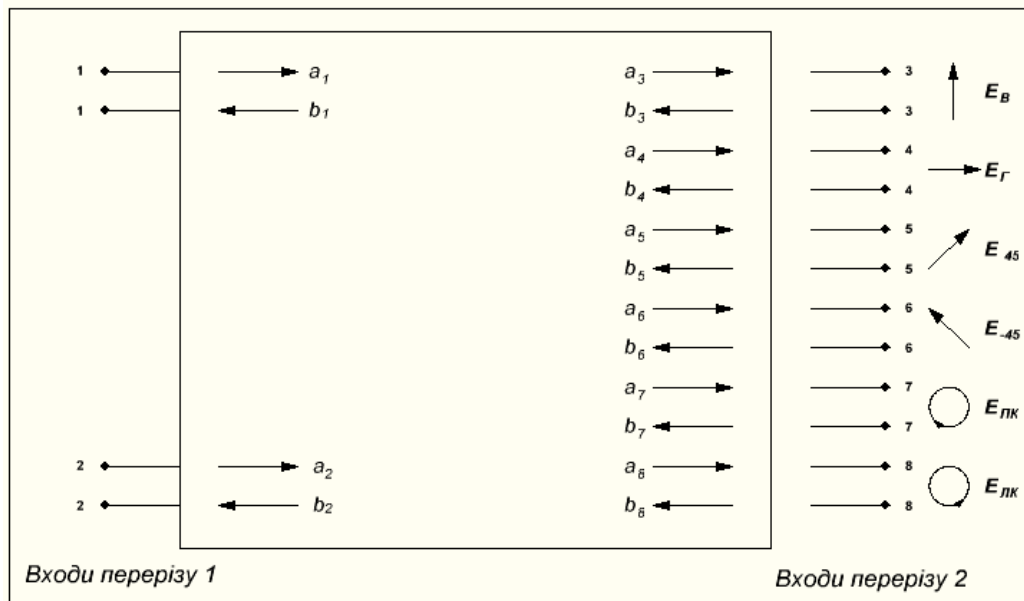


Рис.2. Еквівалентна схема шестикомпонентного хвелеводного поляризаційного роздільника електромагнітної хвилі на шість поляризованих компонент

Вся конструкція всеполяризованої антени передбачає аналіз лінійно поляризованих компонент частково поляризованої хвилі, що надходить на вхід антени під час опромінення складного об'єкта електромагнітними хвилями трьох лінійних поляризацій, однією круговою і в окремому випадку неполяризованою хвилею. Лінійні приймачі СРПК мають бути узгоджені з вихідними плечима поляризаційного роздільника так, щоб коефіцієнт КСХ стоячої хвилі напруги, що розраховується за формулою:

$$КСХ = \frac{1 + K_{від}}{1 - K_{від}} \quad (6)$$

не перевищував значення 1,13, а коефіцієнт відбиття $K_{від}$ був меншим за 0,063.

З урахуванням нерівності хвильових опорів, у разі розгалуження хвелеводів у Е-, Н- і Т-мостах, а також фазового набігу у фазорозподільвачі на 90° , величина паразитної поперечно поляризованої компоненти сигналу не повинна перевищувати 30 дБ при коефіцієнті відбиття $K_{від} < 0,063$. У роздільнику лінійно поляризованих компонент паразитний зв'язок вихідних плечей зумовлений неточністю заводського виготовлення прямокутних хвелеводів і визначається співвідношенням:

$$\Delta a_1 = 0,5 \sin \beta, \quad (7)$$

де β – відхилення вихідних плечей прямокутних хвелеводів від прямого кута. Допустиме відхилення β , за якого величина елемента S_{12} не перевищує 30 дБ, визначається з нерівності $0,5 \sin \beta < 10^{-9}$ і становить β менше 3° .

Висновки та перспектива подальшої роботи за цим напрямком

1. Надано аналіз роботи всеполяризованої антени СРПК у режимі приймання луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкту радіолокаційного спостереження.
2. Розглянуто оцінку точності роботи шестикомпонентного поляризаційного роздільника, що використано у всеполяризованій антені СРПК.
3. Показано, що всеполяризована антена СРПК може бути настроєна так, що матриця розсіювання поляризаційного роздільника буде близька до матриці розсіювання лінійних компонент, що дає змогу звести завади роботи всеполяризованої антени в

режимі приймання луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта до мінімуму.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Jong-Sen L. Polarimetric Radar Imaging: from Basics to Applications / Jong-Sen L., Eric Pottier // Boca Raton. 1st Edition, 2017. P. 422. <https://doi.org/10.1201/9781420054989>
- [2] Nechitaylo S. V., Orlenko V. M., Sukharevsky O. I., Vasilets V. A. Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects. Boca Raton, USA: SRC Press Taylor & Francis Group. 2014. P 334.
- [3] Richard Klemm; Ulrich Nickel; Christoph Gierull; Pierfrancesco Lombardo; Hugh Griffiths; Wolfgang Koch [Novel Radar Techniques and Applications Volume 1: Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar](#), Institution of Engineering & Technology, 2017. P. 51. ISBN: 9781613532256.
- [4] Трофименко І. В. Визначення перспективних напрямків розвитку навігаційного забезпечення судноводіння з використанням радіолокаційних систем // Новітні технології, 2017. №. 2. С. 29-42.
- [5] Богом'я В. І. Математична модель функціональних систем суднового обладнання / О. І. Стадник, О. О. Коваль, В. І. Богом'я // Системи обробки інформації. Х.: Харківський університет повітряних сил імені Івана Кожедуба, 2015. Вип. 1(126). С.102–105.
- [6] Мусорин О. О., Шапран Ю. Є., Трофименко І. В. Особливості аналітичного забезпечення експлуатації суден у сучасних умовах / О. О. Мусорин, Ю. Є. Шапран., І. В. Трофименко // Наукові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку. 2017. №1(45). С.117–121.
- [7] Радіолокація: Програмний комплекс розрахунку діаграми зворотного розсіювання: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / В.А. Головін, Т.В. Романенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 84 с.
- [8] Корбан Д. В. Шестиканальний поляризаційний роздільник всеполяризованої антени з керуванням поляризації електромагнітної хвилі на випромінювання / Д.В. Корбан // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА», Вип. 33. Одеса: Е 89 «ВидавІнформ», 2022. С. 79-90. DOI: 10.31653/2306-5761.33.2022.67-78.

REFERENCES

- [1] Jong-Sen L. Polarimetric Radar Imaging: from Basics to Applications / Jong-Sen L., Eric Pottier // Boca Raton. 1st Edition, 2017. P. 422. <https://doi.org/10.1201/9781420054989>
- [2] Nechitaylo S. V., Orlenko V. M., Sukharevsky O. I., Vasilets V. A. Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects. Boca Raton, USA: SRC Press Taylor & Francis Group. 2014. P. 334.
- [3] Richard Klemm; Ulrich Nickel; Christoph Gierull; Pierfrancesco Lombardo; Hugh Griffiths; Wolfgang Koch [Novel Radar Techniques and Applications Volume 1: Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar](#), Institution of Engineering & Technology, 2017. P. 51. ISBN: 9781613532256.
- [4] Trofymenko I. V. Vyznachennya perspektyvnykh napryamkiv rozvytku navihatsiynoho zabezpechennya sudnovodinnya z vykorystanniam radiolokatsiynykh system // Novitni tekhnolohii, 2017. №. 2. S. 29-42.
- [5] Bohom'ya V. I. Matematychna model' funktsional'nykh system sudnovoho obladdnannya / O. I. Stadnyk, O. O. Koval', V. I. Bohom'ya // Systemy obrobky informatsiyi. Kh.: Kharkivs'kyy universytet povitryanykh syl imeni Ivana Kozheduba, 2015. Vyp. 1(126). S.102–105.

- [6] Musoryn O. O., Shapran Yu. Ye., Trofymenko I. V. Osoblyvosti analitychnoho zabezpechennya ekspluatatsii suden u suchasnykh umovakh / O. O. Musoryn, Yu. Ye. Shapran., I. V. Trofymenko // Naukovi zapysky ukraïns'koho naukovo-doslidnoho instytutu zv'yazku. 2017. No1(45). S.117–121.
- [7] Radiolokatsiya: Prohramnyy kompleks rozrakhunku diahramy zvorotnoho rozsiyuvannya: navch. posib. dlya studentiv spetsial'nosti 172 «Telekomunikatsii ta radiotekhnika» / V.A. Holovin, T.V. Romanenko; KPI im. Ihorya Sikors'koho. - Kyïv: KPI im. Ihorya Sikors'koho, 2021. 84 s.
- [8] Korban D. V. Shestykanal'nyy polyaryzatsiynyy rozdil'nyk vsepolyaryzovanoyi anteny z keruvanniam polyaryzatsiyi elektromahnitnoyi khvyli na vyprominyuvannya / D.V. Korban // Sudnovodinnya: Zb. nauk. prats' / NU «OMA», Vyp. 33. Odesa: E 89 «VydavInform», 2022. S. 79-90 DOI: 10.31653/2306-5761.33.2022.67-78.