

10.31653/smf343.2021.172-195

Korban D., Корбан Д.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

**АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЗВ'ЯЗКІВ НАВІГАЦІЙНОГО
ОБ'ЄКТУ І ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ
ФУНКЦІОНУВАННІ СУДНОВОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ
СТАНЦІЇ (РЛС)**

National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine

**ANALYSIS OF THE FUNCTIONAL CONNECTIONS BETWEEN
THE NAVIGATIONAL OBJECT AND THE ENVIRONMENT DUR-
ING THE OPERATION OF THE SHIP'S RADAR****ABSTRACT**

The implementation of the model of interaction of the ship's radar with the external environment for single-position radar, when the navigation object is in the zone of atmospheric formation, has been carried out. An electromagnetic wave for emission and reception is presented in the form of two matrices consisting of the actual energy Stokes parameters, and the reflecting properties of the atmospheric formation are characterized by 16 coefficients combined in the Muller matrix and consisting of four columns and four rows. The reflected wave is represented by four Stokes parameters, as a field induced by an unknown distribution of reflectors of atmospheric formation, when they are irradiated with electromagnetic waves of four polarizations in linear and circular bases. The determination of the coefficients of the scattering matrix of atmospheric formation is carried out by differentiation or integration by the Picard method (successive approximation). It is shown that the coefficients of the scattering matrix of atmospheric formation are variable functions of time, finite for all values of the considered interval. The division of the time interval into segments in which the coefficients of the matrix are considered as constants is made, which allows them to be calculated using the Becker formula. The practical implementation of the model of interaction of the ship's radar with the atmospheric environment is based on measuring the coefficients of the scattering matrix during successive irradiation of the atmospheric formation by an unpolarized wave, a wave of two linear and circular polarizations.

Keywords: interaction model, ship radar, atmospheric environment, navigation object, electromagnetic wave, Muller matrix, Stokes param-

ters, method of successive approximations, differentiation and integration operators, radar channel, dynamic system.

РЕФЕРАТ

Здійснено реалізацію моделі взаємодії суднової РЛС із зовнішнім середовищем при однопозиційній радіолокації, коли навігаційний об'єкт перебуває у зоні атмосферного утворення. Електромагнітна хвиля на випромінювання і прийом представлена у вигляді двох матриць, що складаються з дійсних енергетичних параметрів Стокса, а відбиваючі властивості атмосферного утворення характеризуються 16 коефіцієнтами, що об'єднані в матрицю Мюллера яка складається з чотирьох стовпців і чотирьох рядків. Відбита хвиля представлена чотирма параметрами Стокса, як поле, індуковане невідомим розподілом відбивачів атмосферного утворення, при їх опроміненні електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій у лінійному та круговому базисах. Визначення коефіцієнтів матриці розсіювання атмосферного утворення здійснюється диференціюванням або інтегруванням за методом Пікара (послідовним наближенням). Показано, що коефіцієнти матриці розсіювання атмосферного утворення є змінними функціями часу, кінцевими для всіх значень аналізованого інтервалу. Зроблено поділ часового проміжку на відрізки, у яких коефіцієнти матриці розглядаються як постійні, що дозволяє їх обчислити за допомогою формули Бейкера. Практична реалізація моделі взаємодії суднової РЛС з атмосферним середовищем заснована на вимірюванні коефіцієнтів матриці розсіювання при послідовному опроміненні атмосферного утворення неполяризованою хвилею, хвилею двох лінійних та кругової поляризацій.

Ключові слова: модель взаємодії, суднова РЛС, атмосферне середовище, навігаційний об'єкт, електромагнітна хвиля, матриця Мюллера, параметри Стокса, метод послідовних наближень, оператори диференціювання та інтегрування, радіолокаційний канал, динамічна система.

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

При функціонуванні суднової РЛС на вхід пристрою прийняття рішення надходить сигнал, джерелом якого є навігаційний об'єкт радіолокаційного спостереження при відсутності сигналу атмосферного середовища. Модель радіолокаційного інформаційного каналу

описує процес перетворення характеристик сигналів за трасою від передавача до об'єкта, від об'єкта до приймача і далі до пристрою обробки прийнятих сигналів. При цьому всі процеси задаються у дискретному часі.

Результат взаємодії хвилі, що випромінюється антеною суднової РЛС, з атмосферним утворенням, в якому знаходиться навігаційний об'єкт, виходить шляхом множення вектору Стокса, випромінюваної хвилі на матрицю Мюллера атмосферного утворення, в результаті чого обчислюється вектор Стокса відбитої хвилі.

Для аналізу принципу переходу при описі функціонування суднової РЛС від безперервного часу до дискретного використовується математична структура, яка називається динамічною системою, і яка є абстрактною моделлю та задовольняє принципу причинності. При цьому найважливішим класом динамічних систем за безперервного часу їх завдання є гладкі динамічні системи, що описуються перехідною функцією стану.

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

Теорію інформаційного каналу сформульовано В.А. Потехінім, В.С. Дулевичем, А.П. Родимовим, D.A. Middleton, E. M. Kennaugh, J.R. Nuunen, W. M. Voerner та ін. Отримані результати за станом теорії радіолокаційного каналу представлені в [1]. Поляризація радіолокаційних сигналів повною мірою розглянута в роботах [2 - 15]. Параметричне уявлення поляризації радіохвиль ґрунтується на введенні Стоксом чотирьох речових параметрах, що мають розмірність інтенсивностей. Так як взаємодія випромінюваної хвилі з атмосферним об'єктом відбувається некогерентно, тому використана матриця Мюллера, формалізм якої заснований на поданні стану поляризації хвилі вектором Стокса і поданні розсіюючих властивостей атмосферного утворення, 16 дійсними коефіцієнтами.

Результат взаємодії хвилі, що випромінюється антеною суднової РЛС, з атмосферним утворенням, в якому знаходиться навігаційний об'єкт, виходить шляхом множення вектору Стокса, випромінюваної хвилі на матрицю Мюллера атмосферного утворення, в результаті чого обчислюється вектор Стокса відбитої хвилі.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Мета цієї статті – представлення моделі взаємодії суднової РЛС з атмосферним середовищем, коли враховується реакція атмосферного середовища на функціонування суднової РЛС.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Розглянемо гладку динамічну систему, що описується перехідною функцією стану, тобто:

$$\frac{dS(t)}{dt} = S\{S(t), U_{\text{вх}}(t), t\} \quad (1)$$

та вихідним відбиттям:

$$U_{\text{вих}}(t) = U_{\text{вих}}\{S(t)\} \quad (2)$$

З точки зору динамічної системи (1), (2), вхідний вплив змінює стан суднової РЛС, який визначає вихідний сигнал.

Щодо гладких динамічних систем, у яких забезпечена лінійність перехідної функції стану та вихідного відбиття за своїми сигнальними аргументами, рівняння (1) та (2) запишуться у вигляді:

$$\frac{dS(t)}{dt} = A_t S(t) + B_t U_{\text{вих}}(t); \quad (3)$$

$$U_{\text{вих}}(t) = C_t S(t), \quad (4)$$

де A_t, B_t, C_t - матриці, які можуть залежати від часу;

$S(t), U_{\text{вих}}(t)$ - багатовимірні векторні функції.

Рівняння (4) теоретично динамічних систем називається рівнянням стану.

Виходячи з феноменологічного опису пристроїв і систем у термінах входу та виходу, опис динамічної системи є диференціальним рівнянням, що зв'яже вхідні та вихідні впливи, тобто:

$$a_0 \frac{d^n U_{\text{ex}}(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} U_{\text{ex}}(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n U_{\text{ex}}(t) = b_1 \frac{d^{n-1} U_{\text{вих}}(t)}{dt^{n-1}} + \dots + b_n U_{\text{вих}}(t) \quad (5)$$

де $U_{\text{ex}}(t)$ и $U_{\text{вих}}(t)$ - багатовимірні вектори;

$a_0(t), a_1(t), \dots, a_n(t), b_0(t), b_1(t), \dots, b_n(t)$ - матричні коефіцієнти, розмірність яких дозволяє узгодити вхідний та вихідний сигнали в одне рівняння.

Вихідне рівняння (3) та рівняння стану (4) для дискретної системи записуються у вигляді:

$$S_{j+1} = AS_j + BU_{\text{вих}j}, \quad (6)$$

$$U_{\text{вих}j} = CS_j, \quad (7)$$

де A, B, C – матриці, які мають для дискретної системи, відсутній індекс t , що вказує на дискретність часу.

Рівняння (6) і (7) отримані з (3) і (4) при $U_{\text{вих}}(t) = 0, \frac{d}{dt} = A$, а оператор B_t (3) перетворюється на оператор $B = (e^{A\Delta} - 1)^{-1} \cdot B = (A)^{-1} \cdot B$, де Δ - крок дискретизації системи.

Таким чином, визначення динамічної системи в термінах вхід-вихід та стандартне уявлення (3), (4) повністю еквівалентні.

Для суднової РЛС будемо використовувати два види описів:

- за допомогою динамічної системи (1)–(7), що відповідає феноменологічним уявленням, що описують пристрої та системи у термінах входу та виходу;

- за допомогою моделі взаємодії суднової РЛС із зовнішнім середовищем, що відповідає цілеспрямованим системам.

При описі суднової РЛС за допомогою динамічної системи сигнали, що надходять на вхід суднової РЛС $U_{\text{ex}}(t)$ і вихідні сигнали $U_{\text{вих}}(t)$ пов'язані матричними рівняннями, представленими енергетичними параметрами Стокса:

$$U_{\text{ex}}(t) = \begin{bmatrix} S_{1\text{ex}}(t) \\ S_{2\text{ex}}(t) \\ S_{3\text{ex}}(t) \\ S_{4\text{ex}}(t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$U_{\text{six}}(t) = \begin{bmatrix} S_{1\text{six}}(t) \\ S_{2\text{six}}(t) \\ S_{3\text{six}}(t) \\ S_{4\text{six}}(t) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

При використанні моделі взаємодії суднової РЛС з атмосферним середовищем, коли враховується реакція атмосферного середовища на функціонування суднової РЛС при радіолокаційному спостереженні навігаційних об'єктів в умовах атмосферних перешкод, фіксована послідовність операторів, що змінюються в часі, представляється у вигляді матриць T , що характеризують набір атмосферних середовищ (дощі різної інтенсивності та фазового стану):

$$T_1 = \begin{bmatrix} \alpha_{11}(t_1) & \alpha_{12}(t_1) & \alpha_{13}(t_1) & \alpha_{14}(t_1) \\ \alpha_{21}(t_1) & \alpha_{22}(t_1) & \alpha_{23}(t_1) & \alpha_{24}(t_1) \\ \alpha_{31}(t_1) & \alpha_{32}(t_1) & \alpha_{33}(t_1) & \alpha_{34}(t_1) \\ \alpha_{41}(t_1) & \alpha_{42}(t_1) & \alpha_{43}(t_1) & \alpha_{44}(t_1) \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \alpha_{11}(t_2) & \alpha_{12}(t_2) & \alpha_{13}(t_2) & \alpha_{14}(t_2) \\ \alpha_{21}(t_2) & \alpha_{22}(t_2) & \alpha_{23}(t_2) & \alpha_{24}(t_2) \\ \alpha_{31}(t_2) & \alpha_{32}(t_2) & \alpha_{33}(t_2) & \alpha_{34}(t_2) \\ \alpha_{41}(t_2) & \alpha_{42}(t_2) & \alpha_{43}(t_2) & \alpha_{44}(t_2) \end{bmatrix}; \quad (11)$$

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

де $\alpha_m(t_n)$ - коефіцієнти, що характеризують відбивні властивості атмосферного середовища, в якому знаходиться навігаційний об'єкт.

З урахуванням співвідношень (8) - (12) для суднової РЛС, у загальному вигляді для будь-якого моменту часу, основний інформаційний потік є суцільним від входу до виходу, сформованим атмосферним середовищем та навігаційним об'єктом. Рівняння основного інформаційного потоку представляється у вигляді трьох матриць:

$$\begin{bmatrix} S_{1\text{вх}}(t_n) \\ S_{2\text{вх}}(t_n) \\ S_{3\text{вх}}(t_n) \\ S_{4\text{вх}}(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}(t_n) & \alpha_{12}(t_n) & \alpha_{13}(t_n) & \alpha_{14}(t_n) \\ \alpha_{21}(t_n) & \alpha_{22}(t_n) & \alpha_{23}(t_n) & \alpha_{24}(t_n) \\ \alpha_{31}(t_n) & \alpha_{32}(t_n) & \alpha_{33}(t_n) & \alpha_{34}(t_n) \\ \alpha_{41}(t_n) & \alpha_{42}(t_n) & \alpha_{43}(t_n) & \alpha_{44}(t_n) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1\text{вих}}(t_n) \\ S_{2\text{вих}}(t_n) \\ S_{3\text{вих}}(t_n) \\ S_{4\text{вих}}(t_n) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Синтаксичний підхід до дослідження процесів чи отримання інформації судновою РЛС спрямовано на структурний аналіз інформації, тобто, зняття невизначеності при надходженні повідомлення про навігаційний об'єкт з урахуванням просторово-часової та поляризаційної структур сигналу. Семантичний підхід передбачає аналіз смислового змісту інформації, а прагматичний – оцінку корисності та цінності отримуваної інформації. Система сигналів розглядається як деяка математична конструкція, що відображає здатність перетворення, передачі, отримання та обробки інформації про ситуацію, що спостерігається.

Розглядається знаходження у зоні атмосферного утворення навігаційного об'єкта. Електромагнітна хвиля, що випромінюється антеною суднової РЛС і приймається при відбитті від зони випадаючих опадів, в якій знаходиться навігаційний об'єкт, представляється чотирма дійсними параметрами Стокса S_1, S_2, S_3, S_4 :

$$\begin{aligned}
 S_1 &= I_x + I_y = I_{+\pi/4} + I_{-\pi/4} = I_l + I_n; \\
 S_2 &= I_x - I_y; \\
 S_3 &= I_{+\pi/4} - I_{-\pi/4}; \\
 S_4 &= I_n - I_l.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Параметри Стокса називаються параметричними і описують поляризацію поля хвилі за допомогою системи квадратичних щодо напруженості поля речових параметрів. Інтенсивності хвилі позначаються через I_x , I_y , $I_{+\pi/4}$, $I_{-\pi/4}$, I_l , I_n , де перші чотири відносяться до лінійних поляризацій, а останні дві до кругової поляризації лівого і правого обертання.

Відбивальні властивості радіолокаційного об'єму атмосферного утворення характеризуються коефіцієнтами ($\alpha_{11} \dots \alpha_{44}$). Електромагнітна хвиля на випромінювання і прийом представляється у вигляді двох матриць, що складаються з параметрів Стокса, а властивості радіолокаційного об'єму атмосферного утворення, що відбивають, подаються також у вигляді матриці, що складається з 16 коефіцієнтів. Тоді рівняння зв'язку між випромінюваною хвилею і відбитою і відбиваючими властивостями радіолокаційного об'єму, записуються у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1\text{від}} \\ S_{2\text{від}} \\ S_{3\text{від}} \\ S_{4\text{від}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1\text{вип}} \\ S_{2\text{вип}} \\ S_{3\text{вип}} \\ S_{4\text{вип}} \end{bmatrix}, \tag{15}$$

або у вигляді чотирьох лінійних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} S_{1\text{від}} &= \alpha_{11}S_{1\text{вип}} + \alpha_{12}S_{2\text{вип}} + \alpha_{13}S_{3\text{вип}} + \alpha_{14}S_{4\text{вип}} \\ S_{2\text{від}} &= \alpha_{21}S_{1\text{вип}} + \alpha_{22}S_{2\text{вип}} + \alpha_{23}S_{3\text{вип}} + \alpha_{24}S_{4\text{вип}} \\ S_{3\text{від}} &= \alpha_{31}S_{1\text{вип}} + \alpha_{32}S_{2\text{вип}} + \alpha_{33}S_{3\text{вип}} + \alpha_{34}S_{4\text{вип}} \\ S_{4\text{від}} &= \alpha_{41}S_{1\text{вип}} + \alpha_{42}S_{2\text{вип}} + \alpha_{43}S_{3\text{вип}} + \alpha_{44}S_{4\text{вип}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Визначення відбиваючих властивостей певного виду атмосферного утворення здійснюється шляхом теоретичного або експериментального дослідження коефіцієнтів матриці ($\alpha_{11} \dots \alpha_{44}$), які несуть всю інформацію про фізичні властивості атмосферного утворення. При моделюванні відбиваючих властивостей атмосферного утворення використовуються чотири параметри Стокса випромінюваної хвилі чотирьох поляризацій, а також чотири параметри Стокса відбитої хвилі для кожного виду поляризації випромінюваної хвилі.

Тоді при опроміненні атмосферного утворення (зони випадючих опадів) з навігаційним об'єктом, що знаходиться в ньому, електромагнітною хвилею лінійної вертикальної або горизонтальної поляризації рівняння (15) виглядає наступним чином:

$$\begin{bmatrix} S_{1\text{від}} \\ S_{2\text{від}} \\ S_{3\text{від}} \\ S_{4\text{від}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & 0 & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & 0 & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & 0 & 0 \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1\text{вип}} \\ S_{2\text{вип}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

або у вигляді:

$$[S_{\text{від}}] = [\alpha] \cdot [S_{\text{вип.л.в.(л.г.)}}], \quad (18)$$

а матриця коефіцієнтів запишеться так:

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Параметри Стокса випромінюваної та відбитої хвилі не є незалежними, між ними існують чотири лінійні рівняння:

$$\left. \begin{aligned} S_{1\text{вiд}} &= \alpha_{11}S_{1\text{вун}} + \alpha_{12}S_{2\text{вун}} \\ S_{2\text{вiд}} &= \alpha_{21}S_{1\text{вун}} + \alpha_{22}S_{2\text{вун}} \\ S_{3\text{вiд}} &= \alpha_{31}S_{1\text{вун}} + \alpha_{32}S_{2\text{вун}} \\ S_{4\text{вiд}} &= \alpha_{41}S_{1\text{вун}} + \alpha_{42}S_{2\text{вун}} \end{aligned} \right\}, \quad (20)$$

вирішення яких дозволяє визначити коефіцієнти матриці (19).

При опроміненні зони випадаючих опадів, в якій знаходиться навігаційний об'єкт, хвилюю лінійної поляризації з нахилом електричного вектору під кутом 45° рівняння (15) подається у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1\text{вiд}} \\ S_{2\text{вiд}} \\ S_{3\text{вiд}} \\ S_{4\text{вiд}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & \alpha_{13} & 0 \\ \alpha_{21} & 0 & \alpha_{23} & 0 \\ \alpha_{31} & 0 & \alpha_{33} & 0 \\ \alpha_{41} & 0 & \alpha_{43} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1\text{вун}} \\ 0 \\ S_{3\text{вун}} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

або у вигляді:

$$[S_{\text{вiд}}] = [\alpha] \cdot [S_{\text{вун.л.45}^\circ}], \quad (22)$$

а матриця коефіцієнтів $[\alpha]$ запишеться наступним чином:

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{33} \\ \alpha_{41} & \alpha_{43} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

З (21) лінійні співвідношення між параметрами Стокса подаються у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} S_{1\text{вiд}} &= \alpha_{11}S_{1\text{вун}} + \alpha_{13}S_{3\text{вун}} \\ S_{2\text{вiд}} &= \alpha_{21}S_{1\text{вун}} + \alpha_{23}S_{3\text{вун}} \\ S_{3\text{вiд}} &= \alpha_{31}S_{1\text{вун}} + \alpha_{33}S_{3\text{вун}} \\ S_{4\text{вiд}} &= \alpha_{41}S_{1\text{вун}} + \alpha_{43}S_{3\text{вун}} \end{aligned} \right\}. \quad (24)$$

При опроміненні зони випадваючих опадів, в якій знаходиться навігаційний об'єкт, хвилею кругової поляризації лівого або правого обернення електричного вектору, рівняння (21) подається у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1\text{вiд}} \\ S_{2\text{вiд}} \\ S_{3\text{вiд}} \\ S_{4\text{вiд}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & 0 & 0 & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & 0 & 0 & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & 0 & 0 & \alpha_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1\text{вун}} \\ 0 \\ 0 \\ S_{4\text{вун}} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

а також у вигляді трьох матриць:

$$[S_{\text{вiд}}] = [\alpha] \cdot [S_{\text{вун.кр.}}], \quad (26)$$

матриця коефіцієнтів $[\alpha]$ запишеться наступним чином:

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{44} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Між параметрами Стокса випромінюваної та відбитої хвилі існують такі лінійні співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} S_{1\epsilon i\delta} &= \alpha_{11}S_{1\epsilon un} + \alpha_{14}S_{4\epsilon un} \\ S_{2\epsilon i\delta} &= \alpha_{21}S_{1\epsilon un} + \alpha_{24}S_{4\epsilon un} \\ S_{3\epsilon i\delta} &= \alpha_{31}S_{1\epsilon un} + \alpha_{34}S_{4\epsilon un} \\ S_{4\epsilon i\delta} &= \alpha_{41}S_{1\epsilon un} + \alpha_{44}S_{4\epsilon un} \end{aligned} \right\}. \quad (28)$$

У судновій РЛС використовується метод радіолокаційного спостереження навігаційного об'єкта при однопозиційній радіолокації, коли передавальна та приймаюча антени розташовані в одній точці простору, а матриця коефіцієнтів є матрицею зворотного розсіювання:

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Матриця зворотного розсіювання характеризує розсіювальні властивості об'єкта радіолокаційного спостереження при протилежних напрямках поширення випромінюваної (падаючої на об'єкт) і розсіяної об'єктом (відбитої) електромагнітної хвилі, тобто, оператором розсіювання з погляду перетворення поляризації хвилі об'єктом при зворотному розсіюванні, щодо лінійного і кругового базисів.

Елементи матриці (29) α_{ij} є функціями однієї змінної t , тоб-

то:

$$\alpha_{ij} = \alpha_{ij}(t). \quad (30)$$

Похідна матриці (29) визначається наступним співвідношенням:

$$\frac{d}{dt}[\alpha] = \begin{bmatrix} \frac{d\alpha_{11}}{dt} & \frac{d\alpha_{12}}{dt} & \frac{d\alpha_{13}}{dt} & \frac{d\alpha_{14}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{21}}{dt} & \frac{d\alpha_{22}}{dt} & \frac{d\alpha_{23}}{dt} & \frac{d\alpha_{24}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{31}}{dt} & \frac{d\alpha_{32}}{dt} & \frac{d\alpha_{33}}{dt} & \frac{d\alpha_{34}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{41}}{dt} & \frac{d\alpha_{42}}{dt} & \frac{d\alpha_{43}}{dt} & \frac{d\alpha_{44}}{dt} \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Інтеграл матриці (29) можна подати у вигляді:

$$\int_{t_0}^t [\alpha] dt = \begin{bmatrix} \int_{t_0}^t \alpha_{11} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{12} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{13} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{14} dt \\ \int_{t_0}^t \alpha_{21} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{22} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{23} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{24} dt \\ \int_{t_0}^t \alpha_{31} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{32} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{33} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{34} dt \\ \int_{t_0}^t \alpha_{41} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{42} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{43} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{44} dt \end{bmatrix}. \quad (32)$$

Тоді похідна матриці (29) запишеться у вигляді:

$$\frac{d}{dt}[\alpha] = \begin{bmatrix} \frac{d\alpha_{11}}{dt} & \frac{d\alpha_{12}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{21}}{dt} & \frac{d\alpha_{22}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{31}}{dt} & \frac{d\alpha_{32}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{41}}{dt} & \frac{d\alpha_{42}}{dt} \end{bmatrix}, \quad (33)$$

а її інтеграл визначається співвідношенням:

$$\int_{t_0}^t [\alpha] dt = \begin{bmatrix} \int_{t_0}^t \alpha_{11} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{12} dt \\ \int_{t_0}^t \alpha_{21} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{22} dt \\ \int_{t_0}^t \alpha_{31} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{32} dt \\ \int_{t_0}^t \alpha_{41} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{42} dt \end{bmatrix}. \quad (34)$$

Похідна матриці (19) запишеться у вигляді:

$$\frac{d}{dt} [\alpha] = \begin{bmatrix} \frac{d\alpha_{11}}{dt} & \frac{d\alpha_{13}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{21}}{dt} & \frac{d\alpha_{23}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{31}}{dt} & \frac{d\alpha_{33}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{41}}{dt} & \frac{d\alpha_{43}}{dt} \end{bmatrix}, \quad (35)$$

а її інтеграл у вигляді:

$$\int_{t_0}^t [\alpha] dt = \begin{bmatrix} \int_{t_0}^t \alpha_{11} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{13} dt \\ \int_{t_0}^t \alpha_{21} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{23} dt \\ \int_{t_0}^t \alpha_{31} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{33} dt \\ \int_{t_0}^t \alpha_{41} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{43} dt \end{bmatrix}. \quad (36)$$

Похідна матриці (27) запишеться у вигляді:

$$\frac{d}{dt}[\alpha] = \begin{bmatrix} \frac{d\alpha_{11}}{dt} & \frac{d\alpha_{14}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{21}}{dt} & \frac{d\alpha_{24}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{31}}{dt} & \frac{d\alpha_{34}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{41}}{dt} & \frac{d\alpha_{44}}{dt} \end{bmatrix}, \quad (37)$$

а її інтеграл у вигляді:

$$\int_{t_0}^t [\alpha] dt = \begin{bmatrix} \int_{t_0}^t \alpha_{11} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{14} dt \\ \int_{t_0}^t \alpha_{21} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{24} dt \\ \int_{t_0}^t \alpha_{31} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{34} dt \\ \int_{t_0}^t \alpha_{41} dt & \int_{t_0}^t \alpha_{44} dt \end{bmatrix}. \quad (38)$$

Загалом рішення системи лінійних диференціальних рівнянь першого порядку запишеться:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_{1\epsilon i\delta}}{dt} &= \alpha_{11}S_{1\epsilon un} + \alpha_{12}S_{2\epsilon un} + \alpha_{13}S_{3\epsilon un} + \alpha_{14}S_{4\epsilon un} \\ \frac{dS_{2\epsilon i\delta}}{dt} &= \alpha_{21}S_{1\epsilon un} + \alpha_{22}S_{2\epsilon un} + \alpha_{23}S_{3\epsilon un} + \alpha_{24}S_{4\epsilon un} \\ \frac{dS_{3\epsilon i\delta}}{dt} &= \alpha_{31}S_{1\epsilon un} + \alpha_{32}S_{2\epsilon un} + \alpha_{33}S_{3\epsilon un} + \alpha_{34}S_{4\epsilon un} \\ \frac{dS_{4\epsilon i\delta}}{dt} &= \alpha_{41}S_{1\epsilon un} + \alpha_{42}S_{2\epsilon un} + \alpha_{43}S_{3\epsilon un} + \alpha_{44}S_{4\epsilon un} \end{aligned} \right\}. \quad (39)$$

Для визначення коефіцієнтів системи рівнянь (39) ($\alpha_{11} \dots \alpha_{44}$) необхідно мати відомості про параметри Стокса $S_{1\epsilon i\delta}$, $S_{2\epsilon i\delta}$, $S_{3\epsilon i\delta}$, $S_{4\epsilon i\delta}$, при опроміненні об'єкта радіолокаційного спостереження судновою РЛС електромагнітними хвилями чотирьох фіксованих поляризацій, розглянутих вище або неполяризованою хвилею, хвилею лінійної горизонтальної (вертикальної) поляризації, хвилею лінійної з кутом нахилу вектору поля в 45° і хвилею кругової поляризації (правого або лівого обертання вектору). Однак параметри Стокса відбитої хвилі пов'язані з мікроструктурою об'єкта, що відбиває, і їх теоретичне обчислення є складним завданням. Позначаючи через D операцію диференціювання, система рівнянь (39) запишеться за допомогою матричних позначень таким чином:

$$[DS_{\epsilon i\delta}] = [\alpha] \cdot [S_{\epsilon un}]. \quad (40)$$

Параметри Стокса електромагнітної хвилі, що випромінюється антеною суднової РЛС, не залежать від часу t , і приймаються рівними одиниці. Тоді рівняння (40) запишеться у вигляді:

$$[DS_{\epsilon i\delta}] = [\alpha], \quad (41)$$

або

$$\frac{d}{dt}(S_{\epsilon i\delta}) = [\alpha]. \quad (42)$$

Підставимо початкові умови для відбитої хвилі, коли момент часу $t = t_0$, тоді:

$$[S_{\text{eio}}] = [S_{\text{eio}}(t_0)], \quad (43)$$

а інтегральне рівняння запишеться так:

$$[S_{\text{eio}}(t)] = [S_{\text{eio}}(t_0)] + \int_{t_0}^t [\alpha(t)] [S_{\text{eio}}(t)] dt. \quad (44)$$

Рішення рівняння (44) можна здійснити послідовним наближенням, (метод Пікара) з введенням оператора Q , який визначає операцію інтегрування $\int_{t_0}^t \alpha(t) dt$, тобто дозволяє отримати [5]:

$$[S_{\text{eio}}(t)] = \{[1] + Q[\alpha] + Q[\alpha]Q[\alpha] + Q[\alpha]Q[\alpha]Q[\alpha] + \dots\} [S_{\text{eio}}(t_0)] \quad (45)$$

Оператор інтегрування $\Omega^{t_0,t}$, дозволяє отримати результат його операції зробленої над матрицею у вигляді:

$$\Omega^{t_0,t} = \left\{ [1] + \int_{t_0}^t [\alpha] dt + \int_{t_0}^t [\alpha] dt \int_{t_0}^t [\alpha] dt + \int_{t_0}^t [\alpha] dt \int_{t_0}^t [\alpha] dt \int_{t_0}^t [\alpha] dt + \dots \right\}. \quad (46)$$

В підсумку рішення системи (43) запишеться у вигляді:

$$[S_{\text{eio}}(t)] = \Omega^{t_0,t} [\alpha] [S_{\text{eio}}(t_0)]. \quad (47)$$

Диференціювання інтегрального оператора $\Omega^{t_0,t} [\alpha]$ по t дозволяє отримати наступний результат:

$$\frac{d}{dt} \Omega^{t_0,t} [\alpha] = [\alpha] \Omega^{t_0,t} [\alpha]. \quad (48)$$

Однак, коефіцієнти α є функціями змінної t , кінцевими для всіх значень інтервалу (t_0, t) , тому обчислення $\Omega^{t_0,t} [\alpha(t)]$ є скрутним і для отримання наближеного рішення інтервал (t_0, t) поділяється на відрізки, в яких коефіцієнти α розглядаються як постійні і тоді (48) записується у вигляді:

$$\Omega^{t_0,t} [\alpha] = e^{[\alpha](t-t_0)}, \quad (49)$$

тому що в цьому випадку:

$$\mathcal{Q}[\alpha]\mathcal{Q}[\alpha]\mathcal{Q}[\alpha]\dots\mathcal{Q}[\alpha] = \frac{(t-t_0)^n}{n!} [\alpha]^n. \quad (50)$$

А з урахуванням (49) рівняння (47) записується у вигляді:

$$[S_{\text{вiд}}(t)] = e^{[\alpha](t-t_0)} [S_{\text{вiд}}(t_0)]. \quad (51)$$

Матриця $e^{[\alpha](t-t_0)}$ обчислюється за допомогою формули Бейкера [5].

Практична реалізація визначення відбивних властивостей об'єктів радіолокаційного спостереження судною РЛС (елементів матриці розсіювання $\alpha_{11} \dots \alpha_{44}$) легко здійснюється шляхом опромінення судною РЛС об'єкта, що спостерігається, неполяризованою хвилею, хвилею лінійної вертикальної (горизонтальної) поляризації, лінійно поляризованою хвилею з кутом нахилу вектору поля у 45° відносно горизонтальної осі обраного лінійного базису та хвилею кругової поляризації (правого або лівого обертання вектору).

При опроміненні атмосферного об'єкта неполяризованою хвилею рівняння (15) запишеться наступним чином:

$$\begin{bmatrix} S'_{1\text{вiд}} \\ S'_{2\text{вiд}} \\ S'_{3\text{вiд}} \\ S'_{4\text{вiд}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{21} & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{31} & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S'_{1\text{вiд}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (52)$$

З (52) виходять чотири лінійні рівняння:

$$\begin{aligned}
 S'_{1\text{вiд}} &= \alpha_{11} S'_{1\text{вун}} \\
 S'_{2\text{вiд}} &= \alpha_{21} S'_{1\text{вун}} \\
 S'_{3\text{вiд}} &= \alpha_{31} S'_{1\text{вун}} \\
 S'_{4\text{вiд}} &= \alpha_{41} S'_{1\text{вун}}
 \end{aligned} \tag{53}$$

З (53) визначаються коефіцієнти першого стовпця матриці (29):

$$\alpha_{11} = \frac{S'_{1\text{вiд}}}{S'_{1\text{вун}}}; \alpha_{21} = \frac{S'_{2\text{вiд}}}{S'_{1\text{вун}}}; \alpha_{31} = \frac{S'_{3\text{вiд}}}{S'_{1\text{вун}}}; \alpha_{41} = \frac{S'_{4\text{вiд}}}{S'_{1\text{вун}}}. \tag{54}$$

Параметри Стокса відбитої хвилі $S'_{1\text{вiд}}, S'_{2\text{вiд}}, S'_{3\text{вiд}}, S'_{4\text{вiд}}$ вимірюються судновою РЛС, а параметр Стокса $S'_{1\text{вун}}$ відомий заздалегідь, тому коефіцієнти першого стовпця матриці легко вимірюються експериментально і їх значення виводяться на дисплей суднової комп'ютера РЛС.

Для визначення коефіцієнтів другого стовпця матриці (29) атмосферний об'єкт опромінюється електромагнітною хвилею лінійної вертикальної поляризації для якої рівняння (15) запишеться у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S''_{1\text{вiд}} \\ S''_{2\text{вiд}} \\ S''_{3\text{вiд}} \\ S''_{4\text{вiд}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & 0 & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & 0 & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & 0 & 0 \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S''_{1\text{вун}} \\ S''_{2\text{вун}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{55}$$

а лінійні рівняння із (55) запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned}
 S''_{1\text{вiд}} &= \alpha_{11} S''_{1\text{вун}} + \alpha_{12} S''_{2\text{вун}} \\
 S''_{2\text{вiд}} &= \alpha_{21} S''_{1\text{вун}} + \alpha_{22} S''_{2\text{вун}} \\
 S''_{3\text{вiд}} &= \alpha_{31} S''_{1\text{вун}} + \alpha_{32} S''_{2\text{вун}} \\
 S''_{4\text{вiд}} &= \alpha_{41} S''_{1\text{вун}} + \alpha_{42} S''_{2\text{вун}}
 \end{aligned} \tag{56}$$

з яких визначаються коефіцієнти другого стовпця матриці (29):

$$\alpha_{12} = \frac{S''_{1\text{вiд}}}{S''_{1\text{вун}}} - \alpha_{11}; \alpha_{22} = \frac{S''_{2\text{вiд}}}{S''_{1\text{вун}}} - \alpha_{21}; \alpha_{32} = \frac{S''_{3\text{вiд}}}{S''_{1\text{вун}}} - \alpha_{31}; \alpha_{42} = \frac{S''_{4\text{вiд}}}{S''_{1\text{вун}}} - \alpha_{41}, \quad (57)$$

де $S''_{1\text{вун}} = S''_{2\text{вун}}$, а коефіцієнти матриці α_{11} , α_{21} , α_{31} , α_{41} визначені у співвідношенні (54).

Для визначення коефіцієнтів третього стовпця матриці (15) атмосферний об'єкт необхідно опромінити електромагнітною хвилею лінійної поляризації з кутом нахилу вектору поля 45° . Для такої хвилі $S'''_{1\text{вун}} = S'''_{3\text{вун}}$ та за аналогією з (57) коефіцієнти третього стовпця матриці (15) будуть визначатися співвідношеннями:

$$\alpha_{13} = \frac{S'''_{1\text{вiд}}}{S'''_{1\text{вун}}} - \alpha_{11}; \alpha_{23} = \frac{S'''_{2\text{вiд}}}{S'''_{1\text{вун}}} - \alpha_{21}; \alpha_{33} = \frac{S'''_{3\text{вiд}}}{S'''_{1\text{вун}}} - \alpha_{31}; \alpha_{43} = \frac{S'''_{4\text{вiд}}}{S'''_{1\text{вун}}} - \alpha_{41}. \quad (58)$$

Опромінення атмосферного об'єкта електромагнітною хвилею кругової поляризації дозволяє визначити четвертий стовпець матриці (15) з урахуванням того, що $S''''_{1\text{вун}} = S''''_{4\text{вун}}$, тоді за аналогією з (57):

$$\alpha_{14} = \frac{S''''_{1\text{вiд}}}{S''''_{1\text{вун}}} - \alpha_{11}; \alpha_{24} = \frac{S''''_{2\text{вiд}}}{S''''_{1\text{вун}}} - \alpha_{21}; \alpha_{34} = \frac{S''''_{3\text{вiд}}}{S''''_{1\text{вун}}} - \alpha_{31}; \alpha_{44} = \frac{S''''_{4\text{вiд}}}{S''''_{1\text{вун}}} - \alpha_{41}. \quad (59)$$

В результаті послідовного опромінення атмосферного об'єкта електромагнітними хвилями чотирьох фіксованих поляризацій і вимірювання параметрів Стокса відбитої хвилі, для кожної поляризації опромінюючої хвилі, повністю визначається матриця розсіювання атмосферного об'єкта, яка характеризує його відбивні властивості. Розбіжності у значеннях коефіцієнтів матриць певних атмосферних утворень використовують у методиці їх ідентифікації, а також на вирішення завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться у зоні атмосферного утворення. Випромінювання електромагнітною хвилею певної поляризації

здійснюється автоматично за певною програмою, а весь процес вимірювання коефіцієнтів матриці становить кілька секунд, що знаходиться в межах зміни фізичного стану внутрішньої структури атмосферного об'єкта.

Висновки та перспектива подальшої роботи за цим напрямком

Розглянуто функціональні зв'язки між судновою РЛС та атмосферним середовищем. Встановлено основний інформаційний потік для будь-якого моменту часу, сформований атмосферним середовищем, де знаходиться навігаційний об'єкт і представлений у вигляді трьох матриць.

Реалізовано модель взаємодії суднової РЛС з атмосферним середовищем, відбиваючі властивості якого визначаються шляхом теоретичного та експериментального дослідження коефіцієнтів матриці Мюллера, які несуть всю інформацію про атмосферне середовище. При моделюванні відбиваючих властивостей атмосферного утворення, використані дійсні енергетичні параметри Стокса.

Показано, що теоретичне обчислення коефіцієнтів матриці Мюллера є складним завданням, тому представлена методика їхнього експериментального вимірювання за допомогою суднової РЛС. Однак, функціональна побудова суднової РЛС повинна дозволити випромінювати та приймати електромагнітну хвилю будь-якої поляризації з формуванням параметрів Стокса як на випромінювання, так і на прийом. Тому подальше дослідження в даному напрямку будуть присвячені розробці функціональної схеми суднової поляризаційної РЛС з автоматичною обробкою та поданням отриманої інформації, що дозволить виділити луна-сигнал навігаційного об'єкта з луна-сигналу атмосферного середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1 Путятин В.Г. Радиолокационное распознавание навигационных объектов на пути судна по поляризационным параметрам электромагнитной волны / В.Г. Путятин, Д.М. Корбан, С.Ю. Гуденко и др // Математичні машини і системи, 2017. - №4. – С.120-128.

2 Акиншин Р.Н. Модель матричной взаимокорреляционной функции зондирующего и отраженного векторных сигналов для концептуального проектирования радиолокатора с синтезированной апертурой на воздушном носителе /Акиншин Р.Н., Есиков О.В., За-

тучный Д.А., Петешов А.В. // Научный вестник МГТУ ГА, 2019; 22(2):86-95. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2019-22-2-86-95>

3 Залевский А.П. Оценка эффективности пространственно-временной и время-пространственной фильтрации сигналов в когерентно-импульсных РЛС / Залевский А.П., Пиза Д.М., Пресняк И.С., Сиренко А.С. // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – №2. – С.39-44.

4 Путятин В. Г. Матрица распространения радиолокационного информационного канала при радиолокационном наблюдении навигационных объектов на пути судна / Путятин В.Г., Корбан Д.В., Князь А.И. // Математические машины и системы, 2018. - №2. – С.141-147.

5 Методы приближенного решения задачи Коши: Учебное пособие / К.В. Григорьева, С. Е. Михеев. – СПб: СПб ГУ, 2010. - с.56

6 Вербя В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Под ред. В. С. Вербя. М.: Радиотехника, 2010, 680 с.

7 Ботов М. И., Вяхирев В. А., Девотчак В. В. Введение в теорию радиолокационных систем: монография. Под ред. М. И. Ботова. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012, 394 с.

8 Ахияров В. В., Нефедов С. И, Николаев А. И. Радиолокационные системы. Под ред. А. И. Николаева. 2-е изд., М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 349 с. ISBN 978-5-7038-4823-4.

9 Корбан Д.В., Волков А.Н, Корбан В.Х., Дегтярева Л.Н Использование матрицы когерентности частично поляризованной волны для повышения эффективности радиолокационного наблюдения объектов//Цифровые технологии, ОНАЗ ім.О.С.Попова, Одеса. - №23, 2018. - С.131-142

10 Корбан Д.В., Бурмака І.О. Кінцевомірні розподіли при радіолокаційному спостереженні навігаційних об'єктів / Корбан Д.В., Бурмака І.О. // Судноводіння: Зб. наук. праць/ НУ «ОМА», Вип. 29. – Одеса: Е 89 «ВидавІнформ», 2019. – С. 106 – 115.

11 William L. Melvin; James A. Scheer Principles of Modern Radar: Volume 3: Radar Applications, Institution of Engineering & Technology, 2013. – 820 p. ISBN: 9781891121548.

12 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. – 951 p. ISBN: 9781613532256.

13 Richard Klemm; Ulrich Nickel; Christoph Gierull; Pierfrancesco Lombardo; Hugh Griffiths; Wolfgang Koch Novel Radar Techniques and Applications Volume 2: Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion, SciTech Publishing, 2017 – 553 p. ISBN: 9781613532263.

14 Michael C. Wicks; Eric L. Mokole; Shannon D. Blunt; Richard S. Schneible; Vincent J. Amuso Principles of Waveform Diversity and Design, Scitech Publishing, 2011 - 1228 p. ISBN: 9781891121951.

15 Clive Alabaster Pulse Doppler Radar: Principles, technology, applications, SciTech Publishing Inc, United States, 2012. – 420 p. ISBN: 9781891121982.

REFERENCES

1 Putyatin V.G. Radiolokatsionnoye raspoznavaniye navigatsionnykh obyektov na puti sudna po polarizatsionnym parametram elektromagnitnoy volny / V.G. Putyatin. D.M. Korban. S.Yu. Gudenko i dr // Matematichni mashini i sistemi. 2017. - №4. – S.120-128.

2 Akinshin R.N. Model matrichnoi? vzaimnokorrelyatsionnoi? funktsii zondiruyushchego i otrazhennogo vektornykh signalov dlya kontseptualnogo proyektirovaniya radiolokatora s sintezirovannoi? aperturoi? na vozdushnom nositele /Akinshin R.N.. Esikov O.V.. Zatchnyi? D.A.. Peteshov A.V. // Nauchnyy vestnik MGTU GA. 2019; 22(2):86-95. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2019-22-2-86-95>

3 Zalevskiy A.P. Otsenka effektivnosti prostranstvenno-vremennoy i vremya-prostranstvennoy filtratsii signalov v kogerentno-impulsnykh RLS / Zalevskiy A.P.. Piza D.M.. Presnyak I.S.. Sirenko A.S. // Radioelektronika. Informatika. Upravlinnya. – Zaporizhzhya: ZNTU. 2012. – №2. – S.39-44.

4 Putyatin V. G. Matritsa rasprostraneniya radiolokatsionnogo informatsionnogo kanala pri radiolokatsionnom nablyudenii navigatsionnykh obyektov na puti sudna / Putyatin V.G.. Korban D.V.. Knyaz A.I. // Matematicheskiye mashiny i sistemy. 2018. - №2. – S.141-147.

5 Metody priblizhennogo resheniya zadachi Koshi: Uchebnoye posobiye / K.V. Grigoryeva. S. E. Mikheyev. – SPb: SPb GU. 2010. - s.56.

6. Verba V. S., Neronskiy L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. Radiolokatsionnie sistemi zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya [Space

Based Radar Surveillance Systems]. Pod red. V.S. Verbi. M.: Radiotekhnika, 2010, 680 s.

7. Botov M. I., Vyahirev V. A., Devotchak V. V. Vvedenie v teoriyu radiolokatsionnih sistem: monografiya. [Introduction to the theory of radar systems: monograph]. Pod red. M.I. Botova. Krasnoyarsk: Sib. federal. un-t, 2012, 394 s.

8. Akhiyarov V. V., Nefedov S. I., Nikolaev A. I. Radiolokatsionny`e sistemy`. [Radar systems]. Pod red. A.I. Nikolaeva. 2-e izd., M.: Izd. MGTU im. N.E` . Bauman, 2018, 349 s. ISBN 978-5-7038-4823-4.

9 Korban D.V..Volkov A.N. Korban V.Kh.. Degtyareva L.N Ispolzovaniye matritsy kogerentnosti chastichno polarizovannoy volny dlya povysheniya effektivnosti radiolokatsionnogo nablyudeniya obyektov//Tsifrovyye tekhnologii. ONAZ im.O.S.Popova. Odesa. - №23. 2018. - S.131-142.

10 Korban D.V.. Burmaka I.O. Kintsevomirni rozpodili pri radiolokatsionnomu sposterezhenni navigatsiynikh ob'ektiv / Korban D.V.. Burmaka I.O. // Sudnovodinnya: Zb. nauk. prats/ NU «OMA». Vip. 29. – Odesa: E 89 «VidavInform». 2019. – S. 106 – 115.

11 William L. Melvin; James A. Scheer Principles of Modern Radar: Volume 3: Radar Applications, Institution of Engineering & Technology, 2013. – 820 p. ISBN: 9781891121548.

12 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. – 951 p. ISBN: 9781613532256.

13 Richard Klemm; Ulrich Nickel; Christoph Gierull; Pierfrancesco Lombardo; Hugh Griffiths; Wolfgang Koch Novel Radar Techniques and Applications Volume 2: Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion, SciTech Publishing, 2017 – 553 p. ISBN: 9781613532263.

14 Michael C. Wicks; Eric L. Mokole; Shannon D. Blunt; Richard S. Schneible; Vincent J. Amuso Principles of Waveform Diversity and Design, Scitech Publishing, 2011 - 1228 p. ISBN: 9781891121951.

15 Clive Alabaster Pulse Doppler Radar: Principles, technology, applications, SciTech Publishing Inc, United States, 2012. – 420 p. ISBN: 9781891121982.