

Research. April 2019. URL: <https://research.senedd.wales/media/h32fiwbv/022-web-english.pdf>

16. Responding To Oil Spills. | Clear Seas. URL: <https://clearseas.org/oil-spill-response/>.

17. IMO. International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation (OPRC). – London: IMO, 1990.

Kalinichenko Ye.V., Tomchakovsky G.G., Koliesnik O.V., Oberto Santana L.E.

MINIMISING THE RISKS OF MARINE POLLUTION FROM THE TANKER FLEET: ANALYSIS OF TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

This article provides a comprehensive analysis of the technical and technological factors that are of paramount importance for minimising the risks of marine pollution from the tanker fleet. The study covers a wide range of issues, including the design features of tankers, emergency prevention systems, and modern methods of collecting and eliminating pollution arising from the transport of oil products and other hazardous substances. Particular emphasis is placed on measures to prevent leaks and accidents, such as the use of double hulls, ship monitoring and emergency response systems. In addition, the article highlights advanced technological solutions, such as pollution detection and automated control systems, which contribute to the efficiency and safety of the tanker fleet. The article emphasises the importance of developing and implementing environmentally sustainable and innovative technologies in the tanker sector in order to minimise the negative impact on the environment and ensure the safe transportation of goods. The article also offers recommendations for improving the environmental safety of the tanker fleet based on best practices and innovative solutions. Overall, this article is a valuable analytical study of the technical and technological aspects aimed at reducing the risks of marine pollution in the course of tanker fleet operation.

Keywords: tanker fleet, marine pollution, environmental safety, oil product leaks, accident prevention systems, spill response technologies, innovative solutions.

УДК 551.508.85 (551.576 +551.577)

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.04

Корбан Д.В., Бурмака І.О.

РАДІОЛОКАЦІЙНЕ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ У СКЛАДНИХ УМОВАХ АТМОСФЕРНОГО СЕРЕДОВИЩА З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ СЕЛЕКЦІЇ ЛУНА-СИГНАЛІВ

У статті теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено методологію використання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають на траєкторії руху судна в складних умовах атмосферного середовища судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом. Показано, що використання дійсних енергетичних параметрів Стокса, дає змогу здійснити розпізнавання луна-сигналу навігаційного об'єкта на тлі луна-сигналів атмосферного утворення з використанням енергетичної матриці розсіювання та пристрою обробки луна-сигналу складного об'єкта (навігаційний об'єкт і атмосферне утворення) на виході приймача суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу (СРПК). Теоретичною основою розпізнавання є радіофізична модель енергетичної матриці розсіювання з елементами, представленими параметрами Стокса та вимірюваними СРПК. Обрані

опромінювані луна-сигнали навігаційного об'єкта й атмосферного утворення визначили вигляд енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта та забезпечили функціонування СРПК в умовах складного атмосферного середовища під час розв'язування задачі поляризаційної селекції.

Розроблено схеми обробки луна-сигналу складного об'єкта, що дали змогу виділити луна-сигнал навігаційного об'єкта з луна -сигналу складного об'єкта шляхом вимірювання елементів енергетичної матриці розсіювання.

Обґрунтовано можливість використання енергетичної матриці частково поляризованої хвилі під час поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища. Енергетична матриця розсіювання дає змогу одержати в СРПК інформацію про поляризацію луна-сигналу частково поляризованої хвилі навігаційного об'єкта й атмосферного утворення шляхом вимірювання інтенсивностей їхніх луна-сигналів, які й розв'язують завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів. Причому інтенсивність зливових випадних опадів вимірюється СРПК за першим параметром Стокса. Представлено результати експериментальної перевірки ефективності використання енергетичної матриці в поляризаційній селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні небезпечного для судноплавства атмосферного утворення.

Ключові слова: *радіолокаційне спостереження, навігаційний об'єкт, атмосферне середовище, частково поляризована хвиля, енергетична матриця розсіювання, радіолокаційна модель, складний об'єкт радіолокаційного спостереження, тезаурус, поляризаційна селекція.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями. Застосування поляризаційних параметрів електромагнітних хвиль у суднових РЛС дасть змогу підвищити не тільки їхні потенційні та інформаційні можливості, а й розв'язати задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень за траєкторією руху судна. З урахуванням того, що луна-сигнал, який надходить на вхід антени суднової РЛС, є частково поляризованим при будь-якій поляризації випромінюваної хвилі, то виникає проблема виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта в частково поляризованій хвилі, яка до теперішнього часу остаточно не вирішена. Це пов'язано з можливістю ухвалення помилкового рішення під час оцінювання ефективності різних методів виявлення луна-сигналу навігаційного об'єкта за наявності луна-сигналу поляризованої, неполяризованої або частково поляризованої завади. До теперішнього часу в зарубіжних і вітчизняних публікаціях, авторами розглянуті різні методи і технічні засоби вдосконалення радіолокаційних методів з використанням поляризаційних властивостей електромагнітних хвиль, однак, поляризаційна селекція навігаційних об'єктів, які перебувають у складних умовах атмосферного середовища, остаточно не представлена.

Аналіз останніх досягнень та публікацій, в яких розпочато вирішення даної проблеми. Використовувані в суднових РЛС радіолокаційні методи, що ґрунтуються на вимірюванні амплітуд і фаз луна-сигналів складних об'єктів радіолокаційного спостереження, добре вивчені й дають змогу одержати уявлення про природу джерел випромінювання, про умови поширення електромагнітних хвиль та дають змогу дослідити механізм їхнього віддзеркалення й розсіювання [1]. У роботі [2] розглянуто новий метод моделювання когерентних морських перешкод. У роботі [3] представлено спільне оцінювання координатних і поляризаційних параметрів радіолокаційних об'єктів, однак, їх використання для підвищення розпізнавання об'єктів певного типу не представлено. У роботі [4] проведено аналіз алгоритмів некогерентного підсумовування та вибору максимуму за каналами, але були розглянуті тільки об'єкти з ідеально провідними поверхнями та чіткими геометричними формами під час їхнього радіолокаційного виявлення. У роботі [5] розглянуто варіанти функціональних схем радіолокаційних станцій з керованою поляризацією з урахуванням їхньої ефективності. Водночас, за основним напрямом удосконалення суднових РЛС, пов'язаним із поліпшенням розрізнення навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища за траєкторією руху судна, не здійснено повною мірою. Про те, що луна-сигнал від

метеоутворень являє собою стаціонарний, нормальний, випадковий процес, за якого середня потужність луна-сигналу не залежить від його потужності, показано в роботі [6]. Проаналізовано мережу МРЛ, що дає змогу синоптикам використовувати радіолокаційну інформацію про опади під час складання прогнозу погоди [7]. Однак, у наведених публікаціях не відображено важливу особливість інтерпретації первинних радіолокаційних даних щодо необхідності використання як інформативного параметра електромагнітної хвилі її поляризації. Відсутні публікації про застосування поляризаційних методів отримання інформації про навігаційні об'єкти в нових поповненнях суднових РЛС. Необхідність модернізації суднових РЛС представлена в розглянутих нижче публікаціях. Так у роботі [8] обґрунтовано необхідність використання надширококузових РЛС для морських суден. У роботі [9] розглянуто методи поляриметричної радіолокаційної візуалізації та оброблення, а в роботі [10] розглянуто радіолокаційну поляриметрію та інтерферометрію, поляризацію в дистанційному зондуванні, у роботі [11] представлено імітаційну модель блок-схеми РЛС із повним поляризаційним скануванням, а в роботі [12] дано спільне оцінювання координатних і поляризаційних параметрів радіолокаційних об'єктів. У роботі [13] розглянуто нові радіолокаційні методи і додатки, радар із решіткою з реальною апертурою, радар формування зображень, а також пасивний і мультистатичний радар. Представлено нові радіолокаційні методи і застосунки, різноманітність форм сигналів і когнетивний радар, а також стеження за цілями і об'єднання даних [14]. У роботі [15] представлено імпульсний доплерівський радар, принципи його побудови та застосування.

Однак аналіз наведених публікацій показав, що на практиці виконані теоретичні розробки поки що реалізувати не вдається. Виникає необхідність у переході до поляризаційних вимірювань луна-сигналів частково поляризованих хвиль складних об'єктів і розробленні суднових радіолокаційних поляризаційних комплексів, які реалізують поляризаційні методи радіолокаційних спостережень, здатних не тільки визначати координати об'єкта, а й також здійснювати поляризаційну селекцію навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень.

Тому актуальним завданням є розроблення та практичне використання методу поляризаційної селекції, заснованого на енергетичній матриці та експериментальній перевірці його результатів на судовому радіолокаційному поляризаційному комплексі.

Формулювання цілей статті (постановка задачі). Метою цієї статті є розробка методології використання енергетичної матриці у розв'язанні задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у складних умовах атмосферного середовища за траєкторією руху судна.

Виклад основного матеріалу дослідження. Просторово-часова фільтрація завад може здійснюватися радіолокаційними комплексами, що мають антени різного типу, зокрема й фазовані антенні решітки. На вхід приймача СРПК надходять луна-сигнали від атмосферних утворень (гідрометеорів), які маскують луна-сигнал спостережуваного навігаційного об'єкта. Гідрометеорні частинки є дипольними відбивачами для випромінювальної антени СРПК сантиметрового діапазону довжин хвиль (3-10 см) і мають довжину, яка дорівнює $\lambda/2$, із середньою ефективною поверхнею розсіювання $\bar{\sigma}_{ef}$ диполя, що дорівнює $0,17 \lambda^2$. При множенні $\bar{\sigma}_{ef}$ на кількість дипольних відбивачів n у радіолокаційному об'ємі атмосферного утворення, виходить значення сумарної ефективною поверхні розсіювання частинок атмосферного утворення (АУ), які одночасно розсіюють енергію опромінюваної хвилі, тобто

$$\sigma_{\Sigma efAV} = 0,17 \lambda^2 n . \quad (1)$$

Ефективність радіолокаційного спостереження навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні атмосферного утворення, буде в тому разі, якщо сумарна ефективна поверхня розсіювання частинок атмосферного утворення буде меншою за ефективну поверхню навігаційного об'єкта (НО) на величину коефіцієнта пригнічення N , тобто

$$\sigma_{\Sigma efAV} \leq N \cdot \sigma_{efHO} , \quad (2)$$

де $N = \frac{\sigma_{efAV}}{\sigma_{efHO}}$ - коефіцієнт подавлення заважаючого фону атмосферного утворення.

Однак реальних $\sigma_{\Sigma efAV}$ і σ_{efHO} отримати важко, тому необхідний пошук інших напрямів, які дають змогу виділити об'єкт радіолокаційного спостереження з пасивних завад атмосферного утворення на траєкторії руху судна. Завади від гідрометеорів створюють на індикаторі СРПК зображення, ідентичні навігаційним об'єктам, які їх маскують і зменшують радіолокаційне спостереження.

Не дивлячись на те, що до теперішнього часу розроблено різні методи пристрою пригнічення завад, до яких належать фільтрові системи верхніх і нижніх частот, смугові фільтри, пристрої кутової селекції та бланкування, дискримінатори частоти повторення імпульсів, перебудови частоти за діапазоном, компенсатори перешкод за бічними пелюстками тощо, однак невизначеності, спричинені завадами, призводять до помилкових, щодо реальної ситуації, рішень. Різноманітні ситуації, наявні під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, змушують урахувати семантику та прагматику луна-сигналів атмосферних завад. Виникає необхідність використовувати тезаурус, який утворює відомості про атмосферні завади (інтенсивність випадних опадів). Характеристики луна-сигналів під час спостереження навігаційного об'єкта в атмосферних завадах базуються на часових, просторових і поляризаційних параметрах. Поляризаційні дійсні параметри дають змогу здійснювати розпізнавання об'єкта на тлі атмосферних завад із використанням наявного в архіві СРПК тезауруса шляхом порівняння луна-сигналів навігаційного об'єкта з луна-сигналами від опадів відомої інтенсивності. Імітаційною моделлю при цьому є енергетична матриця розсіювання з елементами, представленими дійсними енергетичними параметрами Стокса, які легко вимірюються СРПК. Поляризаційний напрям компенсації атмосферних завад під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів є альтернативним вирішенням наявної проблеми.

Отримання та використання енергетичної матриці розсіювання для пригнічення атмосферних завад під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів є актуальним завданням суднової радіолокації.

Дистанційне вимірювання усереднених за часом поляризаційних параметрів Стокса луна-сигналів S_1 , S_2 , S_3 , S_4 частково поляризованої хвилі під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферного утворення, проведено в лінійному (L) і круговому (KP) базисах. У разі використання лінійного базису взаємозв'язок параметрів Стокса з амплітудами ортогональних компонент електромагнітної хвилі E_{xm} , E_{ym} і різницею фаз Φ_{xy} між ними встановлюється за допомогою таких співвідношень:

$$\begin{aligned} S_1^L &= \langle E_{x\max}^2 \rangle + \langle E_{y\max}^2 \rangle, \\ S_2^L &= \langle E_{x\max}^2 \rangle - \langle E_{y\max}^2 \rangle, \\ S_3^L &= 2 \langle E_{x\max} \rangle \langle E_{y\max} \rangle \cos F_{xy}, \\ S_4^L &= 2 \langle E_{x\max} \rangle \langle E_{y\max} \rangle \sin F_{xy}. \end{aligned} \quad (3)$$

У разі використання кругового базису взаємозв'язок параметрів Стокса з амплітудами ортогональних компонент правого і лівого обертання електричного вектору хвилі E_{nm} , E_{lm} і різницею фаз між ними Φ_{nl} записується у вигляді:

$$\begin{aligned}
S_1^{KP} &= \langle E_{n\max}^2 \rangle + \langle E_{l\max}^2 \rangle, \\
S_2^{KP} &= \langle E_{n\max}^2 \rangle - \langle E_{l\max}^2 \rangle, \\
S_3^{KP} &= 2 \langle E_{n\max} \rangle \langle E_{l\max} \rangle \cos \Phi_{nl}, \\
S_4^{KP} &= 2 \langle E_{n\max} \rangle \langle E_{l\max} \rangle \sin \Phi_{nl}.
\end{aligned} \tag{4}$$

Сукупність параметрів Стокса луна-сигналів електромагнітної хвилі навігаційного об'єкта, за яким спостерігає СРПК, у кожний момент часу, що розглядається, відображає його функціонування. Використання лінійного і кругового базисів розглядається з погляду цінності одержуваної інформації під час спостереження навігаційного об'єкта.

Уведемо вектор-параметр Стокса для квазімонохроматичної хвилі, випромінюваної антеною СРПК, у вигляді згрупованих параметрів Стокса в 4x4 вектор-стовпець:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Спостережуваний СРПК навігаційний об'єкт послідовно опромінюється електромагнітною хвилею чотирьох поляризацій, з яких три лінійні вертикальна (*ЛВ*), горизонтальна (*ЛГ*) і з нахилом електричного вектору під кутом 45° (*Л45°*) та одна кругова (*КР*). Вектор Стокса для кожної поляризації випромінюваної хвилі запишеться такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned}
S_{\text{вип}}^{ЛВ} &= S_{1\text{вип}}, S_{2\text{вип}}, 0, 0; \\
S_{\text{вип}}^{ЛГ} &= S_{1\text{вип}}, -S_{2\text{вип}}, 0, 0; \\
S_{\text{вип}}^{Л45^\circ} &= S_{1\text{вип}}, 0, S_{3\text{вип}}, 0; \\
S_{\text{вип}}^{КР} &= S_{1\text{вип}}, 0, 0, S_{4\text{вип}}.
\end{aligned} \tag{6}$$

Під час розсіювання опромінюваної хвилі будь-якої з наведених чотирьох поляризацій навігаційним об'єктом, атмосферним утворенням або навігаційним об'єктом і атмосферним утворенням, формується луна-сигнал певної поляризації, який містить інформацію про їхні відбивні властивості. Параметри Стокса опромінюваної хвилі під час відбиття зазнають перетворень, оскільки відбита електромагнітна хвиля в обох випадках має поляризаційну структуру, відмінну від поляризаційної структури опромінюваної хвилі. Змінюватимуться і коефіцієнти відбиття. З огляду на лінійність процесу розсіювання електромагнітної хвилі взаємозв'язок поляризаційних параметрів відбитої хвилі з коефіцієнтами відбиття, які є елементами енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта для кожної з наведених поляризацій опромінюваної хвилі в загальному вигляді визначається співвідношенням:

$$\begin{bmatrix} S_{1\text{від}}(t) \\ S_{2\text{від}}(t) \\ S_{3\text{від}}(t) \\ S_{4\text{від}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}(t) & \alpha_{12}(t) & \alpha_{13}(t) & \alpha_{14}(t) \\ \alpha_{21}(t) & \alpha_{22}(t) & \alpha_{23}(t) & \alpha_{24}(t) \\ \alpha_{31}(t) & \alpha_{32}(t) & \alpha_{33}(t) & \alpha_{34}(t) \\ \alpha_{41}(t) & \alpha_{42}(t) & \alpha_{43}(t) & \alpha_{44}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{1\text{вип}}(t) \\ S_{2\text{вип}}(t) \\ S_{3\text{вип}}(t) \\ S_{4\text{вип}}(t) \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Опромінення складного об'єкта електромагнітними хвилями чотирьох фіксованих поляризацій дозволяє визначити всі елементи $\alpha_{11} \dots \alpha_{44}$ матриці (7), що є дійсними енергетичними параметрами Стокса, які утворюють енергетичну матрицю розсіювання складного об'єкта (*СО*) та повністю характеризують його відбивні властивості, тобто

$$[S_{enCO}(t)] = \begin{bmatrix} \frac{S_{1ei0}^{JB}(t) + S_{1ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & \frac{S_{1ei0}^{JB}(t) - S_{1ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{1ei0}^{J45^\circ}(t) - \frac{S_{1ei0}^{JB}(t) + S_{1ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{1ei0}^{KP}(t) - \frac{S_{1ei0}^{JB}(t) + S_{1ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} \\ \frac{S_{2ei0}^{JB}(t) + S_{2ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & \frac{S_{2ei0}^{JB}(t) - S_{2ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{2ei0}^{J45^\circ}(t) - \frac{S_{2ei0}^{JB}(t) + S_{2ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{2ei0}^{KP}(t) - \frac{S_{2ei0}^{JB}(t) + S_{2ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} \\ \frac{S_{3ei0}^{JB}(t) + S_{3ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & \frac{S_{3ei0}^{JB}(t) - S_{3ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{3ei0}^{J45^\circ}(t) - \frac{S_{3ei0}^{JB}(t) + S_{3ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{3ei0}^{KP}(t) - \frac{S_{3ei0}^{JB}(t) + S_{3ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} \\ \frac{S_{4ei0}^{JB}(t) + S_{4ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & \frac{S_{4ei0}^{JB}(t) - S_{4ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{4ei0}^{J45^\circ}(t) - \frac{S_{4ei0}^{JB}(t) + S_{4ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} & S_{4ei0}^{KP}(t) - \frac{S_{4ei0}^{JB}(t) + S_{4ei0}^{J\Gamma}(t)}{2} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Усі елементи, які входять в енергетичну матрицю розсіювання (8) складного об'єкта, легко вимірюються СРПК на шляху судна. Енергетична матриця розсіювання дає змогу розв'язати задачу поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення. Розділення луна-сигналу навігаційного об'єкта та луна-сигналу атмосферного утворення здійснюється за відмінністю їхніх енергетичних матриць розсіювання, шляхом віднімання від енергетичної матриці складного об'єкта енергетичної матриці атмосферного утворення, яка для відомих типів небезпечних атмосферних утворень (зливові опади різної інтенсивності) міститься в архіві комп'ютера СРПК. Більшість реальних атмосферних середовищ мають електродинамічні параметри, які відповідають дійсній і симетричній енергетичній матриці розсіювання. Вимірювання параметрів Стокса проводять в одновимірних радіолокаційних каналах, коли відсутні фізичні та геометричні межі радіолокаційного об'єму атмосферного утворення. Обрані опромінювані та відбиті сигнали від навігаційного об'єкта й атмосферного утворення визначили вигляд енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта, що дає змогу здійснити зв'язок параметрів Стокса складного об'єкта з радіолокаційними сигналами та зрештою забезпечити функціонування СРПК в умовах складного атмосферного середовища під час розв'язання задачі поляризаційної селекції.

Енергетична матриця атмосферного утворення пов'язана з уявленням про тезаурус, тобто накопичені відомості про структуру атмосферного утворення і процеси, що протікають у ньому. Радіолокаційне сукупне опрацювання вимірюваних дійсних параметрів Стокса луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта дає змогу застосувати його енергетичну матрицю розсіювання для виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта.

За допомогою пристроїв (рис.1 і рис.2) проводиться віднімання в автоматичному режимі з енергетичної матриці луна-сигналу складного об'єкта енергетичної матриці атмосферного утворення, відповідної до тих, які випадають у момент радіолокаційного спостереження складного об'єкта, дощовим опадам вимірюваної інтенсивності. Отримана в результаті віднімання енергетична матриця навігаційного об'єкта надходить на індикатор СРПК і дисплей комп'ютера для дистанційного спостереження навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення на траєкторії руху судна.

Отримана енергетична матриця розсіювання луна-сигналів навігаційного об'єкта відповідає його поданню сукупністю "блискучих точок", певному вибору виду поляризацій електромагнітної хвилі, що опромінює навігаційний об'єкт, та прийнятим луна-сигналам вертикальної та горизонтальної поляризаціям.

Перевага розглянутої методики радіолокаційної поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення, проявляється в накопиченні метеорологічної інформації про відбивні властивості наявних небезпечних атмосферних утворень, введених у банк даних СРПК.

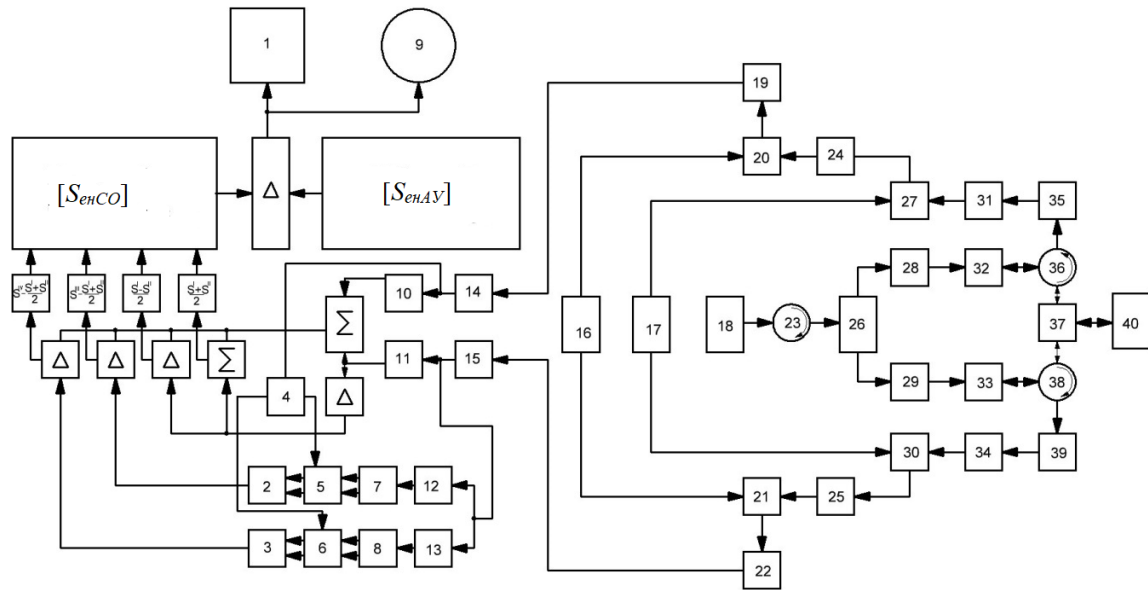


Рисунок 1 - Функціональна схема пристрою СРПК, що синтезує алгоритм розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, який перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення:

$[S_{enCO}]$ - енергетична матриця розсіювання складного об'єкта; $[S_{enHO}]$ - енергетична матриця розсіювання навігаційного об'єкта; $[S_{enAV}]$ - енергетична матриця розсіювання атмосферного утворення; Δ - віднімачі; Σ - суматори;

1 - дисплей комп'ютера СРПК; 2,3 - підсилювачі постійного струму; 4,12,13 - підсилювачі фазообертачі; 5,6 - каскади перемноження; 7,8 - парафазні підсилювачі; 9 - індикатор СРПК; 10,11 - квадратичні детектори; 14,15,19,22 - лінійні підсилювачі проміжної частоти 4 МГц; 6,17 - гетеродини для проміжної частоти 4 МГц і 30 МГц; 18 - передавач СРПК; 20,21 - балансні змішувачі проміжної частоти 4 МГц; 23 - циркулятор; 24,25 - підсилювачі проміжної частоти 30 МГц; 26 - роздільник потужності; 27,30 - балансні змішувачі проміжної частоти 30 МГц; 28,29 - фазообертачі; 31,34 - підсилювачі сигналу високої частоти; 32,33 - атенюатори; 35,39 - розрядники захисту приймачів; 36,38 - антенні перемикачі; 37 - поляризаційний селектор; 40 - випромінювач.

Параметри Стокса луна-сигналу CO при його опроміненні електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій:

$$S_1^1, S_1^2, S_1^3, S_1^4 (S_{1\text{в}i\text{д}}^{LB}, S_{1\text{в}i\text{д}}^{ЛГ}, S_{1\text{в}i\text{д}}^{Л45^\circ}, S_{1\text{в}i\text{д}}^{KP}) - \text{перший параметр};$$

$$S_2^1, S_2^2, S_2^3, S_2^4 (S_{2\text{в}i\text{д}}^{LB}, S_{2\text{в}i\text{д}}^{ЛГ}, S_{2\text{в}i\text{д}}^{Л45^\circ}, S_{2\text{в}i\text{д}}^{KP}) - \text{другий параметр};$$

$$S_3^1, S_3^2, S_3^3, S_3^4 (S_{3\text{в}i\text{д}}^{LB}, S_{3\text{в}i\text{д}}^{ЛГ}, S_{3\text{в}i\text{д}}^{Л45^\circ}, S_{3\text{в}i\text{д}}^{KP}) - \text{третій параметр};$$

$$S_4^1, S_4^2, S_4^3, S_4^4 (S_{4\text{в}i\text{д}}^{LB}, S_{4\text{в}i\text{д}}^{ЛГ}, S_{4\text{в}i\text{д}}^{Л45^\circ}, S_{4\text{в}i\text{д}}^{KP}) - \text{четвертий параметр}.$$

Завдання СРПК полягає у вимірюванні дійсних параметрів Стокса луна-сигналів від складного об'єкта на шляху судна, за якими визначається інтенсивність процесу в атмосферному утворенні (інтенсивність дощу або снігопаду), і на основі наявного тезаурусу здійснюється порівняння виміряної інтенсивності небезпечного атмосферного утворення з наявними в банку даних. Для виміряної інтенсивності, в автоматичному режимі, в банку даних СРПК знаходиться енергетична матриця розсіювання спостережуваного небезпечного атмосферного утворення.

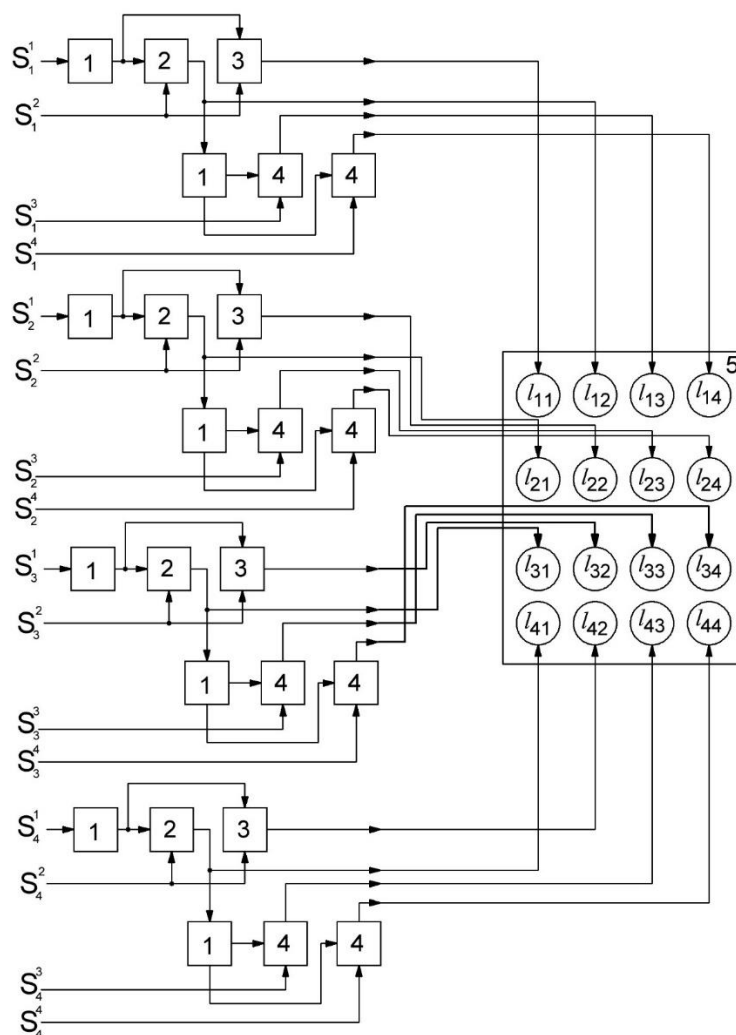


Рисунок 2 - Функціональна схема пристрою отримання енергетичної матриці розсіювання луна-сигналу складного об'єкта (CO):

$l_{11} - l_{44}$ – елементи енергетичної матриці розсіювання CO;

1 – ультрозвукові лінії затримки RLT – D6386;

2, 3, 4 – підсумовуючий і віднімаючий блоки;

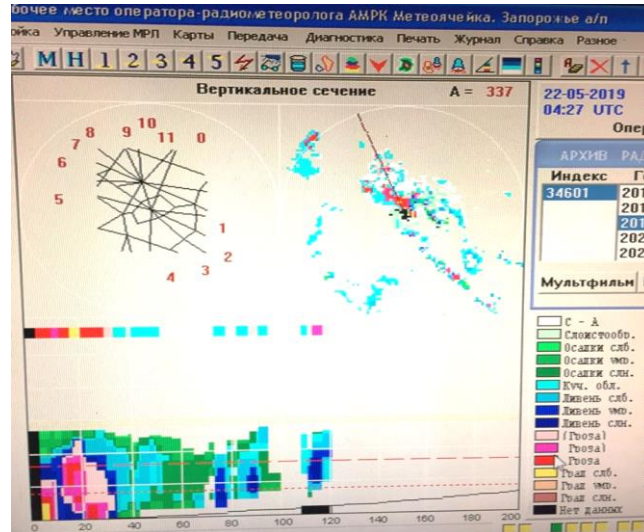
5 – енергетичні матриці розсіювання луна-сигналу складного об'єкта.

З енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта, отриманої пристроєм її формування СРПК (рис.1 і рис.2) віднімається енергетична матриця розсіювання небезпечного атмосферного утворення. У результаті віднімання від енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта енергетичної матриці атмосферного утворення отримується енергетична матриця розсіювання навігаційного об'єкта, що надходить на індикатор СРПК та дисплей його комп'ютера для дистанційного радіолокаційного спостереження. З урахуванням виділення луна-сигналу атмосферного утворення з луна-сигналу складного об'єкта з використанням їхніх енергетичних матриць розсіювання та отримання енергетичної матриці розсіювання навігаційного об'єкта, сформований тезаурус атмосферних утворень певних інтенсивностей дає змогу СРПК ефективно використовувати накопичену інформацію про атмосферне утворення та повною мірою враховувати фактори атмосферного середовища під час проведення радіолокаційного розпізнавання об'єктів дистанційного спостереження.

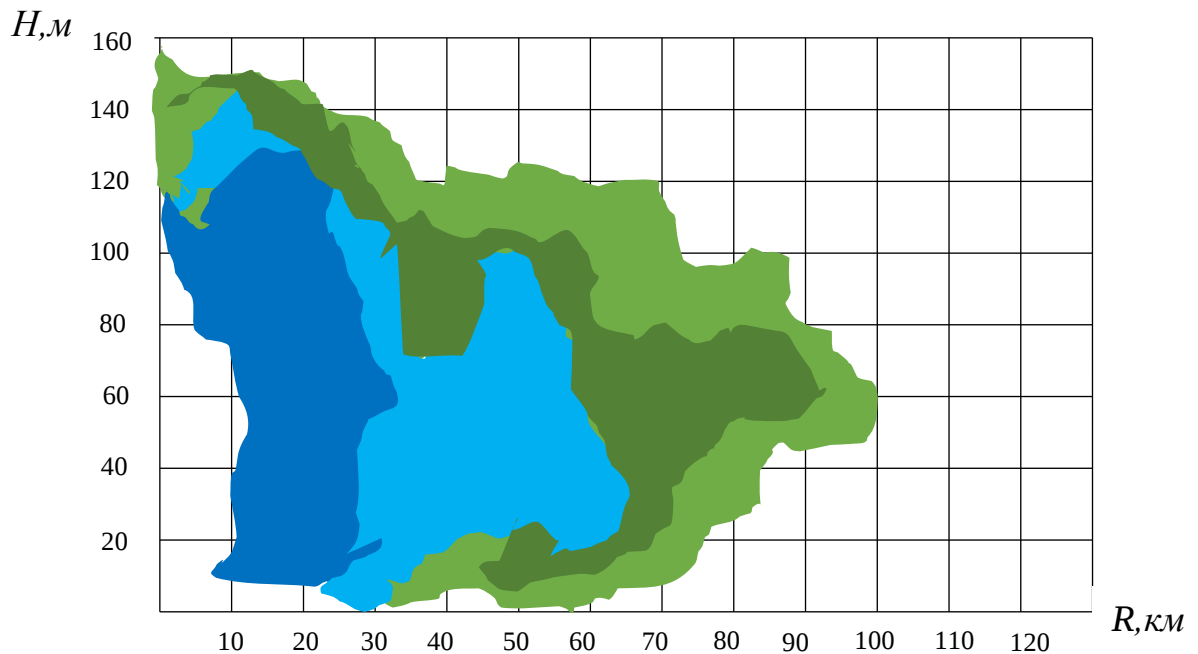
Експериментальні дослідження були проведені в прибережній зоні Азовського моря Запорізької області на СРПК спільно з мережевим радіолокаційним комплексом АМРК, до складу якого входить двоххвильовий ($\lambda_1 = 3,2$ см, $\lambda_2 = 10$ см) відкалібрований метеорологічний

радіолокатор п'ятого покоління МРЛ-5 та автоматизована система обробки луна-сигналів метеоб'єктів "МЕТЕОКОМПКА" в період з червня до вересня 2019 року і в травні - липні 2020 року. Подання метеоданих на екрані ЕОМ АМРК здійснювалося у вигляді кольорових карт метеоявищ у дальній і ближній зонах.

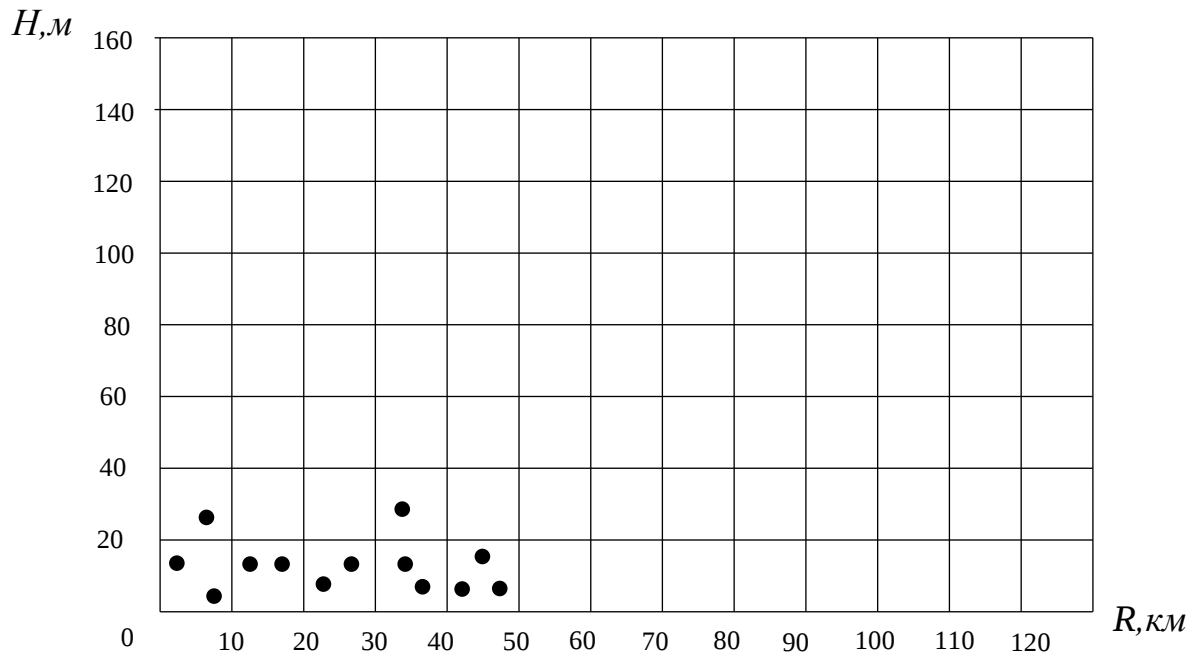
Результати експериментальних досліджень з радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних утворень, виконаних СРПК з використанням енергетичної матриці розсіювання луна-сигналів складного об'єкта при поляризаційній селекції і оптимального алгоритму, надані на рис.3а,б,в з азимутом радіолокаційного спостереження $A_1 = 337^\circ$, а також для азимута $A_2 = 344^\circ$ на рис.4 а,б,в.



а)



б)



в)

Рисунок 3 - Результати експериментального радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів різної інтенсивності у напрямі азимута $A_1 = 337^\circ$ представлені: а - на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА»; б - на дисплеї СРПК;

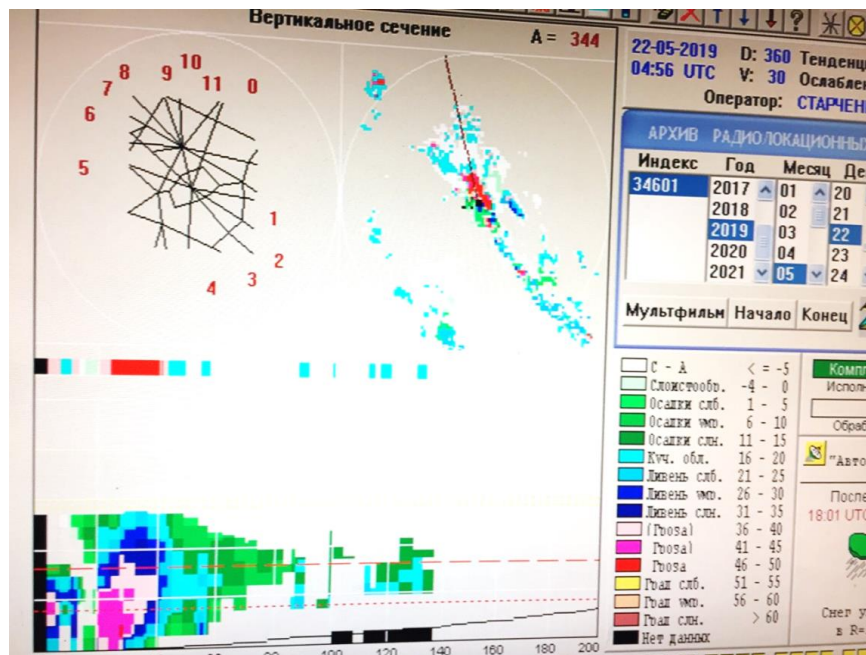
в - представлені на дисплеї СРПК при поляризаційній селекції з використанням енергетичної матриці розсіювання

Оптимальний алгоритм для реалізації радіолокаційного методу поляризаційної селекції навігаційного об'єкта з використанням *енергетичної матриці розсіювання* складного об'єкта встановлює:

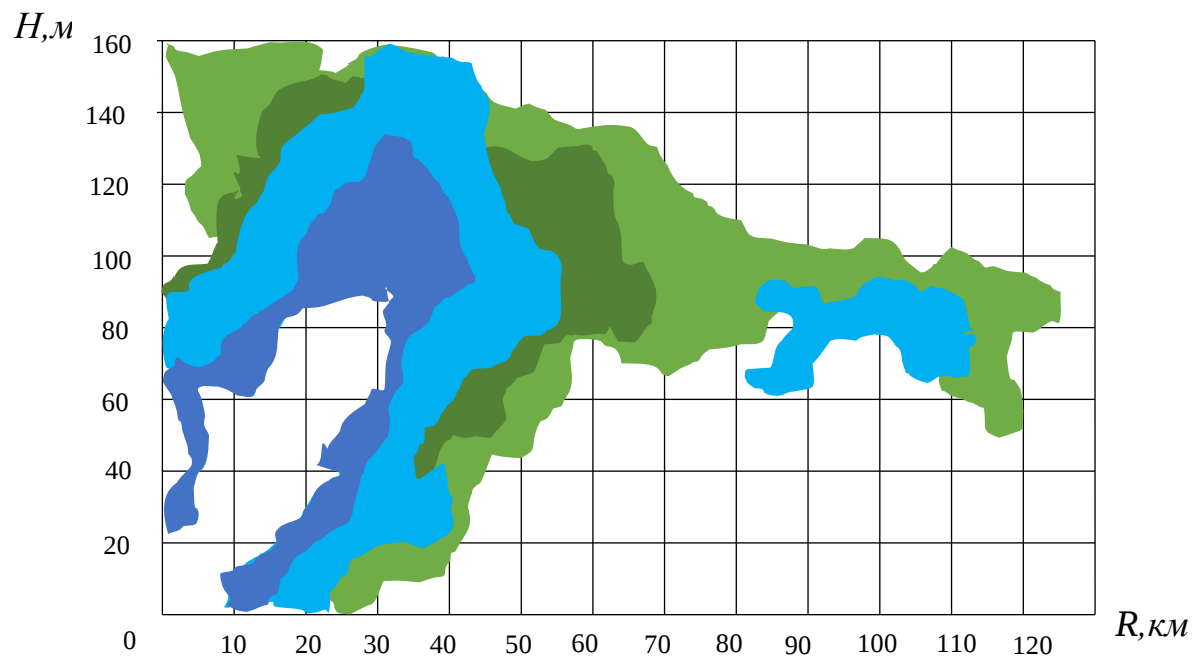
- послідовне опромінення складного об'єкта електромагнітними хвилями: трьома лінійними поляризаціями ЛВ, ЛГ, Л45° та однією КР;
- приймання всеполяризованою антеною СРПК луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта з подальшим вимірюванням параметрів Стокса для кожної поляризації випромінюваної хвилі;
- за виміряними параметрами Стокса луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта утворити його енергетичну матрицю розсіювання, що складається з 16 елементів;
- для даної максимальної інтенсивності випадних опадів, виконати віднімання енергетичної матриці випадних опадів даної інтенсивності (взятої в архіві комп'ютера СРПК), з енергетичної матриці складного об'єкта;
- у результаті віднімання двох матриць отримати енергетичну матрицю навігаційного об'єкта;
- за енергетичним слідом енергетичної матриці розсіювання луна-сигналів навігаційного об'єкта (сума діагональних елементів матриці) провести радіолокаційне спостереження на дисплеї СРПК навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні випадних опадів.

Виконане експериментальне дослідження для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні випадних опадів з використанням *енергетичної матриці розсіювання* складного об'єкта показало високу ефективність радіолокаційного виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта та підтвердило

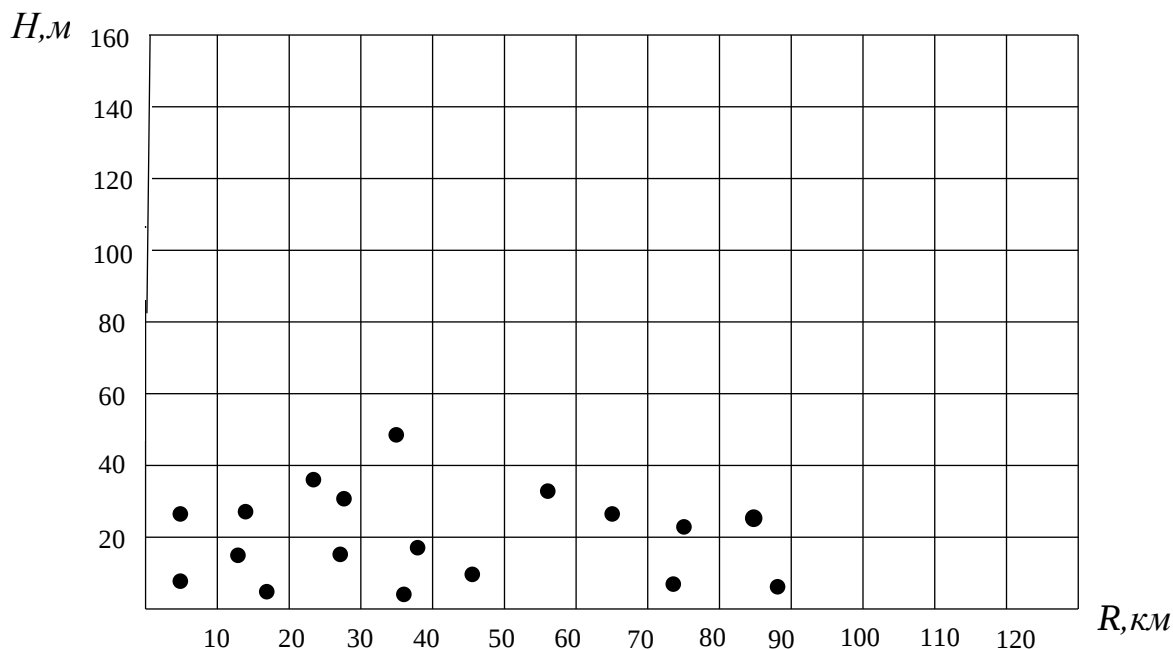
можливість використання в СРПК розробленого методу поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень за траєкторією руху судна



а)



б)



в)

Рисунок 4 - Результати експериментального радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів різної інтенсивності у напрямі азимута $A_1 = 344^\circ$ представлені: а - на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМПРКА»; б - на дисплеї СРПК; в - представлені на дисплеї СРПК при поляризаційній селекції з використанням енергетичної матриці розсіювання

Висновки.

1. Представлено методологію використання енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта під час розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в складних умовах атмосферного середовища, за траєкторією руху судна.
2. Експериментально підтверджено виділення луна-сигналів навігаційних об'єктів із луна-сигналів складного об'єкта та їх радіолокаційне спостереження на дисплеї комп'ютера СРПК.
3. Показано, що використання поляризаційної селекції в СРПК дає змогу здійснювати радіолокаційне спостереження по трасі руху судна тільки луна-сигналу навігаційного об'єкта, що забезпечує підвищення безпеки судноводіння.
4. Поляризаційними характеристиками для оцінки луна-сигналу навігаційного об'єкта є дійсні енергетичні параметри Стокса, які входять до енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта.
5. Поляризаційна селекція навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища, базується на радіолокаційній моделі відбиваючих властивостей складного об'єкта.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кравченко В.Ф. Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне / В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко. – М.: Физматлит, 2015. – 448с.
2. Бакулев П.А. Радиолокационные системы / П.А. Бакулев. – М.: Радиотехника, 2004. – 320с.
3. Бакулев П.А. Методы и устройства селекции движущихся целей / П.А. Бакулев, Б. М. Степин. – М.: Радио и связь, 1986. – 288с.

4. Мусорин О.О. Особливості аналітичного забезпечення експлуатації суден у сучасних умовах / О.О. Мусорин, Ю.С. Шапран, І.В. Трофименко // Наукові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку, 2017. - №1(45) – с. 117-121.
5. Старых А.В. Варианты функциональных схем радиолокационных станций с управляемой поляризацией / А.В. Старых, Г.Н. Жилинская // Научный вестник МГТУ ГА. - № 186, 2012. – с. 145-148.
6. Beyer S., Fleuth IL, Mahner K., Schleiermacher C. Aims and advantages: a new generation of distributed radar acquisition and control systems (DIRAC). - COST 75, 1999, pp. 221-228.
7. Cavaili R. Operational experience with the new generation of Swiss radars. COST 75, 1999, pp. 159-164.
8. Koshevoi V.M. Utilization of ultra-wideband equipment for marine radar tasks / V.M. Koshevoi, A.A. Shevchenko // Shipbuilding: Collection of scientific works / NU "OMA". - Issue 28. - Odesa: VydavInform, 2018, pp. 78-87.
9. Lee J. S., Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications. CRC Press, 2009.
10. Cloude S. Polarisation: applications in remote sensing. Oxford University Press, 2009.
11. Akinshin N.S. Model of matrix mutual correlation function of sounding and reflected vector signals for the conceptual design of airborne synthetic aperture radar / N.S. Akinshin, O.V. Esikov, D.A. Zatuchny, A.V. Peteshov // Scientific Bulletin of MSTU GA. - Vol.22. - No. 02, 2019. – pp.86-95.
12. Akinshin N.S., Varenitsa Yu.I. and Khomyakov K.A. (2016) Sovmestnaya otsenka koordinatnykh i polyarizatsionnykh parametrov radiolokatsionnykh obektov [Joint estimation of coordinate and polarization parameters of radar objects]. Izv. TulGU. Ser. Tekhnicheskkiye nauki [The News of The Tula State University, ser. Technical Sciences], vol. 2, pp. 3–14.
13. 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
14. 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
15. Clive Alabaster. Pulse Doppler Radar: Principles, technology, applications. SciTech Publishing Inc, United States, 2012. – 420 p. ISBN: 9781891121982

REFERENCES

1. Kravchenko V.F. Scattering of radio waves by the sea and detection of objects on its background / V.F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko. - Moscow: Fizmatlit, 2015. – 448p.
2. Bakulev, P.A. Radar systems / P.A. Bakulev. - Moscow: Radiotekhnika, 2004. – 320p.
3. Bakulev, P.A. Methods and devices of moving target selection / P.A. Bakulev, B.M. Stepin. - Moscow: Radio and Communication, 1986. – 288p.
4. Musorin, O.O. Peculiarities of analitical support of ship operation under current conditions / O.O. Musorin, Y.S., Shapran I.V. Trofimenko // Scientific notes of the Ukrainian scientific and research Institute of telecommunications, 2017. - №1(45). - pp.117-121.
5. Starykh, A.V. Variants of functional schemes of radar stations with controlled polarisation / A.V. Starykh, G.N. Zhilinskaya // Scientific Bulletin of MSTU GA. - № 186, 2012. - pp.145-148.
6. Beyer S., Fleuth IL, Mahner K., Schleiermacher C. Aims and advantages: a new generation of distributed radar acquisition and control systems (DIRAC). - COST 75, 1999, pp. 221-228.
7. Cavaili R. Operational experience with the new generation of Swiss radars. COST 75, 1999, pp. 159-164.
8. Koshevoi V.M. Utilization of ultra-wideband equipment for marine radar tasks / V.M. Koshevoi, A.A. Shevchenko // Shipbuilding: Collection of scientific works / NU "OMA". Issue 28. - Odesa: VydavInform, 2018. - pp.78-87.

9. Lee J. S., Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications. CRC Press, 2009.
10. Cloude S. Polarisation: applications in remote sensing. Oxford University Press, 2009.
11. Akinshin N.S. Model of matrix mutual correlation function of sounding and reflected vector signals for the conceptual design of airborne synthetic aperture radar / N.S. Akinshin, O.V. Esikov, D.A. Zatuchny, A.V. Peteshov // Scientific Bulletin of MSTU GA. - Vol.22. No. 02, 2019. – pp.86-95.
12. Akinshin, N.S., Varenitsa, Yu.I. and Khomyakov, K.A. (2016) Sovmestnaya otsenka koordinatnykh i polarizatsionnykh parametrov radiolokatsionnykh obektov [Joint estimation of coordinate and polarization parameters of radar objects]. Izv. TulGU. Ser. Tekhnicheskiye nauki [The News of The Tula State University, ser. Technical Sciences], vol. 2, pp. 3–14.
13. 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. – 951p. ISBN: 9781613532256
14. 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. - 553p. ISBN: 9781613532263
15. Clive Alabaster. Pulse Doppler Radar: Principles, technology, applications. SciTech Publishing Inc, United States, 2012, - 420p. ISBN: 9781891121982

Korban D.V., Burmaka I.A.

RADAR OBSERVATION OF NAVIGATION OBJECTS IN COMPLEX ATMOSPHERIC CONDITIONS USING POLARISATION SELECTION OF ECHO - SIGNALS

The paper theoretically substantiates and experimentally confirms the methodology of using polarization selection of navigation objects located on the ship's trajectory in complex conditions of atmospheric environment by ship radar polarization complex. It is shown that the use of real Stokes energy parameters allows to recognize the echo-signal of a navigation object against the background of echo-signals of atmospheric formation with the use of energy scattering matrix and echo-signal processing device of a complex object (navigation object and atmospheric formation) at the output of the receiver of the ship radar polarization complex (SRPC). The theoretical basis for recognition is a radiophysical model of the scattering energy matrix with elements represented by Stokes parameters and measured SRPC. The selected irradiating echo-signals of the navigation object and atmospheric formation determined the type of energy scattering matrix of a complex object and ensured the functioning of SRPC in a complex atmospheric environment when solving the problem of polarization selection.

The schemes for processing the echo-signal of a complex object have been developed, which made it possible to separate the echo-signal of a navigation object from the echo-signal of a complex object by measuring the elements of the energy matrix of scattering.

The possibility of using the energy matrix of partially polarized wave in polarization selection of navigation objects located in complex conditions of atmospheric environment was substantiated. The energy matrix of scattering allows to obtain in SRPC the information about polarization of echo-signal of partially polarized wave of navigation object and atmospheric formation by measuring the intensities of their echo-signals, which solve the problem of polarization selection of navigation objects. Moreover, the intensity of rainfall is measured by the SRPC according to the first Stokes parameter. The results of experimental verification of the efficiency of using the energy matrix in polarization selection of navigation objects located in the zone of atmospheric formation dangerous for navigation are presented.

Keywords: radar observation, navigation object, atmospheric medium, partially polarized wave, scattering energy matrix, radar model, complex radar object, thesaurus, polarization selection.