

УДК 621.396.96

DOI: 10.31653/2306-5761.38.2025.93-103

IMPROVING THE ACCURACY OF DETERMINING NAVIGATIONAL PARAMETERS BY THE SHIP'S RADAR SYSTEM DURING PILOTAGE

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ РАДІОЛОКАЦІЙНОЮ СИСТЕМОЮ СУДНА ПРИ ВИКОНАННІ ЛОЦМАНСЬКОЇ ПРОВОДКИ

O. Galamutko , PhD student, D. Korban , PhD

О. О. Галамутько, аспірант, Д. В. Корбан, к.т.н.

National University «Odesa Maritime Academy», Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

The article addresses the problem of increasing the accuracy of measuring navigational parameters, in particular the angular coordinates, of the ship's radar (RADAR) under complex pilotage conditions. A method based on adaptive control of the polarization parameters of the probing and received signals is proposed. The relationship between the classical radar equation and modern polarimetric methods is established. It is shown that representing the interaction of a radio wave with a navigational target through the Mueller matrix, expressed via the Stokes parameters, makes it possible to optimize the signal-to-noise ratio (SNR) and signal-to-interference ratio (SIR). The Mueller matrix is interpreted as an energy scattering matrix that describes the transformation of the wave's power characteristics. It is substantiated that the deliberate selection of the polarization of the transmitting and receiving antennas, based on the analysis of the full polarization signature of the target, can significantly improve the accuracy of determining its azimuth, which is critically important for ensuring navigation safety in confined waters. Additionally, the synergistic effect of integrating a polarimetric radar with high-precision Portable Pilot Units (PPU), which provide reference kinematic parameters of the vessel necessary for more efficient target discrimination and polarization parameter adaptation, is investigated.

Keywords: pilotage, ship radar, radio wave polarization, Stokes parameters, Mueller matrix, radar equation, angular measurement accuracy, adaptive polarization, Portable Pilot Unit, PPU, SafePilot.

АНОТАЦІЯ

У статті розглядається проблема підвищення точності вимірювання навігаційних параметрів, зокрема кутових координат, суднової станції радіолокації (РЛС) у складних умовах лоцманської проводки. Запропоновано метод, заснований на адаптивному управлінні поляризаційними параметрами зондувального та прийнятого сигналів. Встановлено зв'язок між класичним рівнянням радіолокації та сучасними методами поляриметрії. Показано, що подання взаємодії радіохвилі з навігаційною метою через матрицю Мюллера, виражену через параметри Стокса, дозволяє оптимізувати відношення сигнал/шум (ВСШ) та сигнал/перешкода (ВСП). Матриця Мюллера інтерпретується як енергетична матриця розсіювання, що описує трансформацію потужних характеристик хвилі. Обґрунтовано, що цілеспрямований вибір поляризації передавальної та приймальної антен на основі аналізу повної поляризаційної сигнатури цілі дозволяє суттєво підвищити точність визначення її азимуту, що є критично важливим для забезпечення безпеки мореплавання у стиснутих водах. Додатково досліджується синергетичний ефект від інтеграції поляриметричної РЛС із високоточними портативними

лоцманськими блоками (PPU), які надають еталонні кінематичні параметри судна, необхідні для більш ефективної селекції цілі та адаптації поляризаційних параметрів.

Ключові слова: лоцманська проводка, суднова РЛС, поляризація радіохвиль, параметри Стокса, матриця Мюллера, рівняння радіолокації, точність кутових вимірювань, адаптивна поляризація, портативний лоцманський блок, PPU, SafePilot.

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

Лоцманська проводка суден в акваторіях портів, вузькості та на каналах є одним з найбільш складних та відповідальних етапів морського переходу. Безпека маневрування за таких умов безпосередньо залежить від точності, своєчасності та надійності навігаційної інформації, що отримується від бортових технічних засобів. Ключову роль серед них відіграє радіолокаційна станція, що забезпечує інформацією про взаємне розташування судна і навколишніх навігаційних небезпек, орієнтирів та інших суден.

Стандартні суднові РЛС, як правило, працюють з фіксованою, найчастіше горизонтальною поляризацією. Такий підхід не дозволяє ефективно боротися з деякими видами перешкод (гідрометеорологічними, багатопроменими) і не використовує повний обсяг інформації, що міститься у відбитому від цілі сигналі. Відбитий сигнал несе у собі інформацію як про амплітуди і фази, так й про зміну поляризаційного стану хвилі при взаємодії з об'єктом. Ця інформація, що описує фізичні властивості та геометрію цілі, у традиційних РЛС втрачається.

В умовах інтенсивного судноплавства, поганої видимості (туман, опади) або при спостереженні малорозмірних цілей навігації (наприклад, буїв) на тлі інтенсивного морського хвилювання, відношення сигнал/шум (ВСШ) на виході приймача РЛС може значно знижуватися. Падіння ВСШ безпосередньо веде до збільшення середньоквадратичної помилки (СКП) виміру координат цілі, особливо її кутових координат (азимуту). Для безпечного розходження з суднами і точного слідування фарватером потрібна максимально можлива точність вимірювання азимуту.

Актуальність даної роботи полягає у пошуку шляхів підвищення точності навігаційних визначень за рахунок використання прихованого інформаційного ресурсу – поляризації радіохвиль. Адаптивне керування поляризаційними параметрами РЛС здатне забезпечити селекцію корисного сигналу на тлі перешкод, тим самим підвищивши ВСШ і, як наслідок, точність вимірювань. Поряд з цим, поява портативних лоцманських блоків (PPU) надвисокої точності створює нову парадигму навігації, надаючи еталонні дані про рух власного судна. Інтеграція цих двох технологій – адаптивної поляриметрії та високоточних PPU – може дати кумулятивний ефект, що значно перевершує можливості кожної із систем окремо.

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

Значна кількість досліджень присвячена проблемі підвищення ефективності та точності радіолокаційних систем при спостереженні цілей на тлі сильних перешкод, зокрема морських хвиль (завад) та гідрометеорів. Класичні роботи, такі як праці М. Скольника [1], заклали фундаментальні теоретичні основи радіолокації, однак у них розглядається переважно скалярне рівняння радіолокатора, яке не враховує векторний та поляризаційний характер електромагнітного поля. Подальший розвиток цих підходів отримав відображення у сучасних роботах з поляриметричної обробки радіолокаційних сигналів, де поляризація розглядається як додатковий інформаційний ресурс для підвищення відношення сигнал/шум та точності

вимірювань [2]. Стандартні суднові радари, що працюють з фіксованою, переважно горизонтальною поляризацією, у таких умовах мають суттєві обмеження.

Дослідження в галузі поляриметрії, зокрема у працях В. М. Боєрнера, Ф. Т. Улабі та Г. Мотта [3-6], активно розвивалися, головним чином у контексті обробки сигналів радарів із синтезованою апертурою для задач дистанційного зондування Землі. У роботах Е. Крогагера та Б. Колліна [7, 8] запропоновано різні методи поляризаційної декомпозиції та фільтрації, спрямовані на поліпшення відношення сигнал/шум і класифікацію різних типів поверхонь та об'єктів.

Разом з тим, аналіз існуючих публікацій дозволяє виділити низку невирішених раніше частин загальної проблеми.

1. Обмежена адаптація в навігаційних радарах

Більшість існуючих суднових радарів не використовують повною мірою поляриметричну інформацію, обмежуючись у кращому випадку перемиканням між лінійною та круговою поляризацією для боротьби з опадами. Методи динамічної адаптації параметрів поляризації передавальних та приймальних антен у реальному часі на основі аналізу повних поляризаційних характеристик (зокрема параметрів Стокса та матриці Мюллера) навігаційної цілі та фонових перешкод у суднових РЛС практично не реалізовані [9].

2. Розрив між теорією поляриметрії та навігаційною практикою

Потужний математичний апарат поляриметрії, що базується на використанні параметрів Стокса та матриць Мюллера і детально описаний у фундаментальних та прикладних роботах, широко застосовується у спеціалізованих радіолокаційних системах дистанційного зондування, однак рідко використовується для вирішення практичної задачі підвищення точності вимірювання кутових координат у навігаційних радарах [10, 11].

3. Ігнорування нових джерел навігаційних даних

Питання синергетичної інтеграції адаптивних поляриметричних радарів із сучасними високоточними незалежними джерелами навігаційних даних, такими як портативні пілотні пристрої (PPU), залишається практично недослідженим. Недостатньо з'ясовано, яким чином використання еталонних кінематичних параметрів (координат, швидкості, курсу та кутової швидкості обертання), що надаються PPU, може бути залучене для підвищення ефективності вибору поляризації цілі і, як наслідок, точності її відстеження [12].

Таким чином, обґрунтування методу, що поєднує адаптивне управління поляризацією на основі матриць Мюллера з високоточними еталонними даними від PPU, для підвищення точності кутових вимірювань, є актуальною та невирішеною науково-практичною задачею.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою статті є теоретичне обґрунтування методу підвищення точності вимірювання кутових координат навігаційної цілі суднової РЛС шляхом оптимізації поляризаційних параметрів на основі поляриметричного опису процесу розсіювання радіохвиль з використанням апарату матриць Мюллера та параметрів Стокса, а також демонстрація ролі даних від PPU у підвищенні ефективності цього методу.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

1. Класичний підхід та його обмеження

Основою розрахунку енергетичних характеристик радіолокаційного каналу служить класичне рівняння радіолокації. У найпростішому вигляді для точкової цілі воно записується як:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L}, \quad (1)$$

де P_r — потужність сигналу на вході приймача, Вт;

P_t — потужність передавача, Вт;

G — коефіцієнт посилення антени (передбачається однаковим для прийому та передачі);

λ — довжина хвилі, см;

σ — ефективна площа розсіювання (ЕПР) цілі, м²;

R — відстань до цілі, км;

L — сукупні втрати в атмосфері та апаратурі, у відносних за потужністю величинах.

Рівняння (1) є скалярним і оперує лише з потужністю сигналу. Воно не враховує векторного, поляризаційного характеру електромагнітних хвиль. Параметр ЕПР (σ) у цій моделі є скалярною величиною, яка умовно характеризує відбивні властивості цілі для заданої поляризації та ракурсу спостереження. Цей підхід не дозволяє описати трансформацію поляризації при відображенні і, отже, не дає інструментів для управління цим процесом з метою покращення якості сигналу.

Точність вимірювання кутової координати (θ) РЛС з антенною апертурою D у загальному випадку зворотно пропорційна ВСШ і ширині діаграми спрямованості антени ($\Delta\theta \approx \lambda/D$). Гранична СКП оцінки кутової координати σ_θ може бути оцінена [6] за формулою:

$$\sigma_\theta \approx \frac{\Delta\theta}{\sqrt{q}}, \quad (2)$$

де $q = 2P_r/N_0$ — нормоване енергетичне відношення сигнал/шум, яке визначається з урахуванням ефективної смуги приймача або часу інтегрування сигналу; N_0 - одностороння спектральна щільність потужності шуму, Вт/Гц.

З залежності (2), записаної для нормованої смуги очевидно, що будь-яке збільшення потужності прийнятого від цілі сигналу P_r при незмінному рівні шуму N_0 безпосередньо веде до підвищення точності вимірювання кута. Завдання, таким чином, зводиться до максимізації P_r від корисної цілі при одночасній можливої мінімізації потужності сигналу, відбитого від об'єктів, що заважають (морської поверхні, опадів). Класичне рівняння радіолокації не дає відповіді на питання, як це зробити, окрім тривіального збільшення потужності передавача або розмірів антени.

2. Сучасні засоби високоточного позиціонування: PPU

Паралельно з розвитком радіолокаційних технологій удосконалюються та засоби визначення власних кінематичних параметрів судна. Вершиною таких розробок є портативні лоцманські блоки (Portable Pilot Unit, PPU), також відомі як лоцманські валізки. Ці пристрої надають лоцману повністю незалежне та високоточне джерело навігаційних даних. Як приклад розглянемо систему **Trelleborg SafePilot**, що складається з двох модулів: CAT I та CAT ROT.

• **Модуль CAT I (Координати та швидкість):** цей блок є автономним ГНСС-приймачем (рис. 1), який відстежує всі основні супутникові системи (GPS, GLONAS, GALILEO,

BEIDOU). Його ключова особливість - надвисока точність визначення координат і швидкості, що досягається за рахунок підтримки різних систем, що коректують:

- **Позиція:** до 1 см + 1ppm у режимі RTK.
- **Швидкість:** до 1 см/с (RMS).

Така точність значно перевищує можливості стандартних суднових ГНСС-приймачів і лагів, дозволяючи відстежувати найменші поперечні зміщення і зміни швидкості.



Рис. 1. Модуль CAT I [13]

• **Модуль CAT ROT (Курс та кутова швидкість):** цей модуль підключається до судового роз'єму AIS і вирішує проблему низької дискретності гірокомпасних даних (Рис. 2). За рахунок вбудованого датчика кутової швидкості та інтелектуальної обробки (фільтр Калмана) він забезпечує:

- **Роздільна здатність за курсом:** 0,1 градуса.
- **Точність кутової швидкості (Rate of Turn):** < 0.5 град/хв.



Рис. 2. Основні функції модулів CAT I та CAT ROT [13]

Це дозволяє отримати плавне, стабільне та високоточне значення курсу і, що особливо важливо, швидкості повороту судна, усуваючи запізнення та «стрибки», властиві даним з AIS.

Вся інформація з модулів (Рис. 3) передається Wi-Fi на планшет з навігаційним додатком (наприклад, SeaIQ Pilot), де лоцман бачить положення свого судна на карті з максимальною достовірністю.

SPECIFICATIONS	CAT ROT	CAT I
Weight	325g	410g
Dimensions	138 x 100 x 25 mm	138 x 100 x 25 mm
Heading resolution	0.1 deg	–
Rate of Turn	<0.5 deg/min	–
Integrated rate sensor	Yes	–
Charge time	3 hours	3 hours
Battery capacity	30 hours	30 hours
GNSS	N/A	Multi GNSS L1/L2 supporting all constellations. (GPS, GLONAS, GALILEO, BEIDOU)
Wi-Fi link to pilot's display (connection to multiple displays allowed)	Yes	Yes
Wi-Fi range	200m line of sight	200m line of sight
Fast-charging via USB-C	Supports wireless charging	Supports wireless charging
AIS targets	from ship's AIS	–
Speed accuracy	from ship's instruments	1cm/sec (RMS) or from ship instruments
Position Accuracy	–	RTK: 1cm + 1ppm DGPS: 0.4m SBAS: 0.6m Stand-alone: 2m
Option for ships shore link (GPRS or UMTS)	SafePilot	SafePilot

Рис. 3. Основні функції модулів CAT I та CAT ROT [13]

Як буде показано далі, наявність такого точного джерела даних про рух власного судна відіграє ключову роль задачі оптимізації параметрів поляриметричної РЛС.

3. Поляриметричний опис: параметри Стокса та вектор Стокса

Для повного опису поляризаційного стану електромагнітної хвилі, включаючи частково поляризовані та шумові сигнали, найбільш зручним є формалізм, запропонований Джорджем Стоксом [7, 8]. Він заснований на чотирьох вимірюваних в інтенсивності (потужності) параметрах.

Нехай плоска електромагнітна хвиля поширюється вздовж осі z , а її електричне поле у площині (x, y) описується компонентами:

$$\begin{aligned} E_x(t) &= a_x(t) \cos(\omega t + \delta_x(t)) \\ E_y(t) &= a_y(t) \cos(\omega t + \delta_y(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

тоді параметри Стокса визначаються так:

$$S_1 = I = \langle a_x^2 \rangle + \langle a_y^2 \rangle \text{ — повна інтенсивність (потужність) хвилі;}$$

$S_2 = Q = \langle a_x^2 \rangle - \langle a_y^2 \rangle$ — переважання горизонтальної ($|E_x|^2$) або вертикальної ($|E_y|^2$) лінійної поляризації;

$S_3 = U = 2 \langle a_x a_y \cos(\delta) \rangle$ — переважання лінійної поляризації, орієнтованої під кутами $+45^\circ$ або -45° ;

$$S_4 = V = 2 \langle a_x a_y \sin(\delta) \rangle \text{ — переважання правої або лівої кругової поляризації.}$$

Тут $\delta = \delta_y - \delta_x$ — різниця фаз, а кутові дужки $\langle \cdot \rangle$ означають усереднення за часом.

Ці чотири параметри утворюють вектор Стокса:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для повністю поляризованої хвилі виконується рівність $S_1^2 = S_2^2 + S_3^2 + S_4^2$. Для частково поляризованої хвилі $S_1^2 > S_2^2 + S_3^2 + S_4^2$. Найважливішою перевагою формалізму Стокса є те, що він оперує з енергетичними, а не з польовими характеристиками, що спрощує виміри та розрахунки.

4. Матриця Мюллера як енергетична матриця розсіювання

Процес взаємодії зондувальної електромагнітної хвилі з метою радіолокації можна описати як лінійне перетворення, яке змінює вектор Стокса цієї хвилі. Таке перетворення описується речовинною матрицею, яка є матрицею Мюллера (**M**) [3].

Якщо S_{inc} - вектор Стокса падаючої (зондуючої) хвилі, а S_{scat} - вектор Стокса розсіяної (відбитої) хвилі на деякій відстані R від цілі, їх зв'язок виражається рівнянням:

$$S_{scat} = \frac{1}{R^2} M \cdot S_{inc}. \quad (5)$$

Елементи матриці **M** містять інформацію про те, як об'єкт перетворює поляризацію зондувального сигналу. Для радіолокації матриця Мюллера фактично виконує роль енергетичної матриці розсіювання, пов'язуючи вхідні та вихідні поляризаційні стани.

Загальна форма матриці **M**:

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

Кожен елемент матриці α_{ij} має чітке фізичне значення, описуючи, як j -й компонент вектора Стокса падаючої хвилі впливає на i -й компонент вектора Стокса розсіяної хвилі [6]. Наприклад, елемент α_{11} показує, як повна потужність падаючої хвилі перетворюється на повну потужність розсіяної хвилі, і тісно пов'язаний з поняттям ЕПР. Елементи α_{12} , α_{13} , α_{14} показують, як поляризація падаючої хвилі (лінійна або кругова) впливає на повну потужність відбитого сигналу.

Саме тому, що матриця Мюллера пов'язує енергетичні параметри хвилі до і після розсіювання (вектори Стокса складаються з інтенсивностей), її справедливо називати енергетичною матрицею розсіювання. Вона повністю характеризує поляризаційні властивості об'єкта для заданого ракурсу спостереження і залежить від поляризації зондуючого сигналу.

5. Зв'язок рівняння радіолокації з матрицею Мюллера

Тепер ми можемо узагальнити скалярне рівняння радіолокації (1) до поляриметричної, матричної форми.

Потужність сигналу, що приймається антеною, залежить не тільки від потужності електромагнітної хвилі, що приходить, але і від того, наскільки поляризація антени "узгоджена" з поляризацією цієї хвилі [4, 5]. Потужність на виході приймальної антени (P_r)

може бути виражена через скалярний добуток енергетичних параметрів Стокса хвилі S_{scat} , що приходить, і «поляризаційного вектору» приймальної антени S_{ant} :

$$P_r = k \cdot S_{ant}^T \cdot S_{scat}, \quad (7)$$

де k – коефіцієнт, що враховує апертуру антени та інші її параметри, а T – знак транспонування. Вектор S_{ant} описує поляризаційні характеристики приймальної антени (наприклад, для горизонтального приймача він буде $(1,1,0,0)^T$).

Підставимо в (7) вираз рівняння для S_{scat} :

$$P_r = k \cdot S_{ant}^T \cdot \left(\frac{1}{R^2} M \cdot S_{trans} \right), \quad (8)$$

де S_{trans} – вектор Стокса сигналу, що випромінюється передавальною антеною.

Зібравши всі коефіцієнти, пов'язані з параметрами РЛС та відстанню до цілі, ми отримаємо поляриметричне рівняння радіолокації:

$$P_r = C \cdot \frac{1}{R^4} (S_{ant}^T \cdot M \cdot S_{trans}), \quad (9)$$

де C – константа, що включає потужність передавача, посилення антени, довжину хвилі.

Порівнюючи це з класичним рівнянням радіолокації (1), бачимо, що скалярна ЕПР σ замінюється на ефективний поляризаційний множник f :

$$\sigma_{ef} f = S_{ant}^T \cdot M \cdot S_{trans}. \quad (10)$$

Цей множник f , на відміну скалярної ЕПР, набув значення вектору цієї цілі. Його значення залежить від вибору поляризації передавальної антени (S_{trans}) та приймальної антени (S_{ant}).

6. Оптимізація точності кутових вимірів

Метою оптимізації є максимізація відношення сигнал/перешкода (ВСП), де як корисний сигнал виступає віддзеркалення від навігаційної цілі (буй, створний знак, мис), а як перешкода віддзеркалення від морської поверхні (клаттер).

Нехай навігаційна ціль характеризується матрицею Мюллера M_{target} , а ділянка морської поверхні, що знаходиться в тому ж осередку дозволу, – матрицею $M_{clutter}$. Тоді потужності сигналів від цілі та перешкоди будуть:

$$\begin{aligned} P_{target} &\propto S_{ant}^T \cdot M_{target} \cdot S_{trans} \\ P_{clutter} &\propto S_{ant}^T \cdot M_{clutter} \cdot S_{trans} \end{aligned} \quad (11)$$

Завдання оптимізації зводиться до знаходження таких векторів S_{trans} і S_{ant} , які максимізують ставлення:

$$\frac{P_{target}}{P_{clutter}} = \frac{S_{ant}^T \cdot M_{target} \cdot S_{trans}}{S_{ant}^T \cdot M_{clutter} \cdot S_{trans}} \rightarrow \max. \quad (12)$$

Це завдання математичного програмування, яке можна вирішити у час бортовим процесором РЛС. Для її вирішення необхідно знати (виміряти чи передбачити на основі моделей) матриці Мюллера цілі та перешкоди.

7. Практична роль PPU у задачі поляриметричної оптимізації

Вирішення цієї задачі в реальному часі вимагає точної ідентифікації цілі та перешкоди для вимірювання їх матриць Мюллера. Саме тут проявляється синергія із даними від PPU.

- **Високоточна цілевказівка.** PPU із сантиметровою точністю позиціонує власне судно на електронній карті. Коли лоцман вибирає на екрані навігаційний орієнтир (наприклад, буй), система може з дуже високою точністю розрахувати очікуване місце щодо судна [13-18]. Це дозволяє алгоритму РЛС однозначно ідентифікувати луна-сигнал від потрібної цілі серед багатьох інших відбиттів і сфокусувати процес вимірювання матриці M_{target} саме на ньому.

- **Стабілізація вимірів та компенсація руху.** Процес вимірювання повної матриці Мюллера вимагає часу і стабільності. Дані від модуля CAT ROT про найменші кутові рухи судна (рискання, поворот) з точністю до < 0.5 град/хв дозволяють ідеально компенсувати ці рухи при обробці сигналу радіолокації. Без такої компенсації "змазування" зображення призвело б до невірної вимірювання матриць M_{target} і $M_{clutter}$, що зробило б подальшу оптимізацію неефективною.

- **Поліпшена селекція перешкоди.** Знаючи точний вектор швидкості та курс власного судна (дані CAT I та CAT ROT), система може ефективніше відокремлювати стаціонарні цілі від морського хвилювання (клаттера), яке має власну доплерівську характеристику. Це дозволяє отримати "чистішу" оцінку матриці $M_{clutter}$, що підвищує якість поляризаційної фільтрації. Таким чином, PPU надає поляриметричній РЛС ідеальну опорну систему координат та кінематичних даних, що є фундаментом для успішної адаптивної поляризаційної селекції. В результаті цієї процедури потужність сигналу від цілі максимально збільшується, а потужність від фону, що заважає - максимально пригнічується. Це призводить до різкого зростання ВСШ/ВСП. Як було показано раніше, збільшення ВСШ (q) безпосередньо веде до зменшення СКП вимірювання кутової координати: $\sigma_{\theta} \approx \Delta\theta / \sqrt{q}$. Якщо за рахунок поляризаційної селекції, посиленої точною вказівкою від PPU, вдається підняти ВСП в 4 рази (на 6 дБ), то СКП вимірювання азимуту зменшиться в $\sqrt{4} = 2$ рази. Для лоцманської проводки, де помилка у визначенні азимуту навіть на десятки частки градуса може бути критичною, таке підвищення точності має величезне практичне значення і дозволяє:

- Більш впевнено визначати положення судна щодо кромок фарватеру.
- Точніше оцінювати параметри руху інших суден для безпечного розходження.
- Надійно супроводжувати малорозмірні цілі, які в умовах стандартної РЛС можуть губитися у перешкодах.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Перехід від скалярного опису радіолокаційного спостереження до векторного поляриметричного відкриває нові можливості для підвищення якості і точності навігаційних систем. У цій статті показано, що:

1. Класичне рівняння радіолокації є окремим випадком більш загального поляриметричного рівняння, в якому скалярна ЕПР замінюється на поляризаційний множник, що залежить від матричних характеристик цілі та поляризації приймача та передавача.

2. Використання формалізму параметрів Стокса та матриці Мюллера дозволяє адекватно описати енергетичну взаємодію поляризованої хвилі з навігаційною метою. Матриця Мюллера виступає у ролі повної енергетичної матриці розсіювання.

3. Цілеспрямований вибір поляризації зондувального та прийнятого сигналів на основі вирішення задачі максимізації відношення потужності сигналу від цілі та сигналу від перешкоди дозволяє значно підвищити ВСШ.

4. Збільшення ВСШ безпосередньо веде до підвищення точності вимірювання кутових координат навігаційної цілі, що супроводжується, що є критично важливим фактором для забезпечення безпеки судноводіння в обмежених умовах лоцманської проводки.

5. Інтеграція адаптивної поляриметричної РЛС із високоточними портативними лоцманськими блоками (PPU) створює потужний синергетичний ефект. PPU надає еталонні дані про власний рух, які необхідні для точного вказівки, стабілізації та селекції, що багаторазово підвищує ефективність поляризаційної оптимізації і як наслідок підсумкову точність навігаційних визначень.

Впровадження адаптивних поляриметричних технологій у судові РЛС здатне зробити якісний стрибок у підвищенні їхньої ефективності та стати важливим внеском у загальну систему безпеки мореплавання.

REFERENCES

- [1] Skolnik M., *Radar Handbook*, 3rd ed. McGraw-Hill, 2008.
- [2] Aubry A., De Maio A., and Farina A., *Polarimetric Radar Signal Processing*. Scitech Publishing (IET Radar, Sonar & Navig.), New York, 2023, doi: 10.1049/SBRA549E
- [3] Boerner W. M., "Polarimetric scattering and SAR polarimetry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2003.
- [4] Ulaby F. T. and Elachi C., Eds., *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*. Artech House, 1990.
- [5] Mott H., *Antennas for Radar and Communications: A Polarimetric Approach*. John Wiley & Sons, 2007.
- [6] Boerner W. M., Mott H., Luneburg E., et al., "Polarimetry in radar technology," in *Handbook of Radar Measurement*. Artech House, 1998.
- [7] Collin B., *Polarimetric Radar Signal Processing*. Wiley, 2013.
- [8] Krogager E., "Polarimetric radar target decomposition," *IEE Proc.*, 1992.
- [9] Zhang S., Wang T., Liu C., and Wang D., "A space-time adaptive processing method based on sparse Bayesian learning for maneuvering airborne radar," *Sensors*, vol. 22, no. 15, art. no. 5479, 2022, doi: 10.3390/s22155479
- [10] Dingle-Robertson L., McNairn H., Jiao X., McNairn C., and Ihuoma S., "Monitoring crops using compact polarimetry and the RADARSAT Constellation Mission," *Can. J. Remote Sens.*, vol. 48, no. 6, pp. 1–21, 2022, doi: 10.1080/07038992.2022.2121271
- [11] Wang H., Zhou Z., Turnbull J., Song Q., and Qi F., "Three-component decomposition based on Stokes vector for compact polarimetric SAR," *Sensors*, vol. 15, no. 9, pp. 24087–24114, 2015, doi: 10.3390/s150924087
- [12] Badanis K. E., "Automated monitoring of road surfaces taking into account the correction of tropospheric delays of satellite navigation signals," *Vestn. Samarsk. Gos. Tekhn. Univ. (Tekhn. nauk)*, vol. 33, no. 1, pp. 7–20, 2025, doi: 10.14498/tech.2025.1.1
- [13] Trelleborg Marine and Infrastructure, *SafePilot CAT ROT & CAT I Portable Piloting Units* [Brochure], 2024. [Online]. Available: <https://www.trelleborg.com/marine-and-infrastructure/-/media/marine-systems/resources/brochures/downloads/safepilot-cat-rot.pdf>. [Accessed: Sept. 23, 2025].
- [14] Trelleborg Marine and Infrastructure, *SafePilot Pro User Guide* [User Manual], 2023.

- [15] Mikkelsen T., "Trelleborg PPU (HAS, SBAS)," presentation at User Consultation Platform, EUSPA, 2022. [Online]. Available: https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/12._space_week_trelleborg.pdf [Accessed: Sep. 23, 2025].
- [16] The International Taskforce on Port Call Optimization (ITPCO), *A Practical Guide to Portable Pilot Units (PPU)*. The Nautical Institute, 2019.
- [17] Trelleborg Marine and Infrastructure, *SafePilot SmartPort System* [Brochure]. [Online]. Available: <https://www.trelleborg.cn/marine-and-infrastructure/-/media/marine-and-infrastructure/resources/brochures/downloads/safepilot-port-system.pdf> [Accessed: Sep. 23, 2025].
- [18] Rawson C. and Patterson L., "Enhancing pilotage with high-accuracy portable navigation systems," in *Proc. Int. Assoc. Maritime Univ. (IAMU) Conf.*, 2021, pp. 112–120.