Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська морська академія»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Корбан Дмитро Вікторович

УДК 656.61.052

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУДНОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ

Спеціальність 05.22.13 – Навігація та управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Д. В. Корбан

Науковий консультант: Бурмака Ігор Олексійович, д.т.н., професор

Одеса – 2026

АНОТАЦІЯ

Корбан Д. В. Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом. – Національний університет «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2025.

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладної проблеми – радіолокаційна видимість навігаційних об'єктів судновим радіолокаційним комплексом в умовах складних атмосферних завад.

Головною мотивацією досліджень є сьогоденна наявність **запитів практики**:

- на забезпечення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів в умовах атмосферних завад;
- на підвищення енергетичної ефективності суднового радіолокаційного комплексу;
- на забезпечення отримання радіолокаційної інформації щодо навігаційних об'єктів і атмосферних утворень за траєкторією руху судна;
- на використання у суднових радіолокаційних поляризаційних комплексів на сучасних швидкісних суднах з підвищенним енергетичним потенціалом;
- на використання у суднових радіолокаційних поляризаційних комплексах методів поляризаційної селекції луна-сигналів складних об'єктів, які дозволяють забезпечити розрізнене спостереження на індикаторах та дисплеях суднових комп'ютерів луна-сигналів навігаційних об'єктів і луна-сигналів атмосферних утворень;
- на впровадження в суднові радіолокаційні поляризаційні комплекси більш інформативних і дійсних, енергетичних поляризаційних параметрів Стокса, які легко виміряються та дозволяють отримати радіолокаційну інформацію про навігаційні об'єкти при різних умовах атмосферного середовища;
- на використання у суднових радіолокаційних поляризаційних комплексах всеполяризованої антени, яка дозволяє випромінювати електромагнітну хвилю певної

поляризації та приймати луна-сигнал частково поляризованої хвилі складного об’єкта;

- на використання у системі опрацювання трьох енергетичних матриць, які дозволяють розділити луна-сигнал складного об’єкту на луна-сигнал навігаційного об’єкту та луна-сигнал атмосферного утворення;

На підставі аналізу сучасних концепцій розвитку суднових радіолокаційних комплексів, що забезпечують радіолокаційне спостереження навігаційних об’єктів, встановлено **наявність наступних нерозв’язаних проблем** під час функціонування суднових радіолокаційних комплексів:

- порушення використання повного енергетичного потенціалу електромагнітної хвилі як на випромінення, так і на прийом;
- недостатня інформація про сигнали та завади;
- необхідність додаткової апріорної інформації щодо об’єктів радіолокаційного спостереження та джерел завад, у процесі первинної обробки луна-сигналів;
- недосконаліть методів радіолокаційного виявлення навігаційних об’єктів, що знаходяться в складних умовах атмосферного середовища;
- відсутні алгоритм і критерій використання статистичних методів розділу луна-сигналів навігаційного об’єкту і атмосферного утворення;
- недостатня ефективність коефіцієнта розрізнення навігаційного об’єкту на тлі атмосферного утворення.

Вищевказані проблеми визначили та зумовили **комплексне завдання наукового дослідження:** підвищення інформаційних і експлуатаційних характеристик суднових радіолокаційних комплексів (СРК) одночасною селекцією за кількома поляризаційними параметрами радіолокаційних сигналів, що забезпечує їх функціонування, яке складається **з трьох головних наукових завдань дослідження**:

- побудова системи моніторингу поляризаційної структури радіолокаційних сигналів з ідентифікацією їх поляризаційних параметрів;
- розроблення стратегії формування системи радіолокаційних сигналів, що базуються на їх поляризаційних параметрах;

- розроблення методології підвищення ефективності функціонування СРК в умовах атмосферних завад.

У результаті вирішення головних та допоміжних завдань отримані наступні **наукові положення**:

- механізм поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні атмосферного утворення, залежить від синтезу алгоритмів виявлення і відмінності поляризаційного стану луна-сигналів навігаційного об'єкта і атмосферного утворення, при цьому враховуються як поляризаційні характеристики луна-сигналів навігаційного об'єкта, так і поляризаційні характеристики луна-сигналів атмосферного утворення;
- підвищення ефективності радіолокаційного виявлення навігаційних об'єктів, що знаходяться у зоні небезпечних атмосферних утворень, судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом (СРПК) досягається випромінюванням і прийомом електромагнітних хвиль певних поляризацій: лінійних, кругових, а також неполяризованих з подальшим використанням повного енергетичного потенціалу прийнятих всеполяризованою антеною СРПК електромагнітних хвиль;
- ефективний розподіл потужності двох ортогональних компонент електромагнітної хвилі довільної поляризації, що надходять на вхід всеполяризованої антени СРПК проводиться шестикомпонентним поляризаційним роздільником на чотири лінійно поляризовані компоненти і дві кругові, з яких усередненням квадратичних і білінійних форм ортогональних складових частково поляризованого поля формуються дійсні енергетичні поляризаційні параметри Стокса, які використовуються при розв'язанні завдань поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться у зоні атмосферних завад.

Наукові положення обгрунтовані науковими результатами.

Вперше:

- встановлено, що основним показником, який характеризує підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних поляризаційних комплексів є технічна і фізична основа методів поляризаційної селекції радіолокаційних сигналів

і об'єктів, що забезпечують радіолокаційне виявлення і спостереження навігаційних об'єктів СРПК при різних несприятливих умовах атмосферного середовища;

- обгрунтована і розроблена функціональна схема суднового шестикомпонентного СРПК з поляризаційним роздільником і керованою всеполяризованою антеною з амплітудними і фазовими співвідношеннями в високочастотному тракті і чотирьохканальною схемою реєстрації енергетичних поляризаційних параметрів Стокса на виході двоканального лінійного приймача;

- обгрунтована фізична модель випромінювання і прийому неполяризованої електромагнітної хвилі, що дозволяє розділити луна-сигнали атмосферного утворення і навігаційного об'єкта, аналізувати структуру атмосферного утворення для визначення його ступеня небезпеки по трасі руху судна;

- розроблена енергетична матриця розсіювання об'єктів, які спостерігаються СРПК, що дозволяє за сукупною обробкою виміряних дійсних поляризаційних параметрів Стокса виділити луна-сигнал навігаційного об'єкта з сумарного луна-сигналу частково поляризованої хвилі і луна-сигнал атмосферного утворення, матриця якого порівнюється з накопиченим тезаурусом даного атмосферного утворення;

- здійснено синтез алгоритмів поляриметричних радіолокаційних спостережень об'єктів за отриманими за допомогою параметрів Стокса матрицями, які характеризують розсіювальну здатність об'єктів і відповідні їм радіофізичні моделі;

- обгрунтована і розроблена функціональна схема приладу , що синтезує алгоритм вирішення завдання поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що знаходиться у зоні небезпечного атмосферного утворення, з використанням їх енергетичних матриць;

- розроблена методологія поляризаційної селекції навгаційних об'єктів, що знаходяться у зоні небезпечних атмосферних утворень, з використанням матриці когерентності;

- обгрунтована і розроблена функціональна схема приладу, що синтезує алгоритм вирішення завдання поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що знаходиться у зоні небезпечного атмосферного утворення, з використанням матриці когерентності;

- розроблена методологія поляризаційної селекції навігаційних обїектів, що знаходяться в умовах атмосферних завад, з використанням ступеня поляризації луна-сигналів частково поляризованої хвилі;

- обгрунтована і розроблена функціональна схема приладу, що синтезує алгоритм вирішення завдання поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що знаходиться у зоні небезпечного атмосферного утворення, за значеннями ступеня поляризації електромагнітної хвилі;

- розроблена методологія поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в умовах атмосферних завад, з використанням статистичних властивостей поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта;

- розроблена технологія визначення критеріальних поляризаційних параметрів луна-сигналів навігаційного об'єкта і атмосферного утворення, за якими вирішене завдання поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що знаходиться в умовах атмосферних завад.

- використано оптимальний статистичний синтез поляризаційних параметрів луна-сигналу складного об'єкта (навігаційний об'єкт, який знаходиться в зоні атмосферного утворення) при вирішенні завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів СРПК;

- використано ідентифікацію фізико-математичної моделі складного об'єкта, що спостерігається СРПК, для вирішення завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів;

- підвищена ефективність радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів на шляху судна з використанням енергетичної матриці, матриці когерентності, ступеня поляризації та критеріальних значень параметрів Стокса частково поляризованої хвилі;

- проведена експериментальна перевірка методології та розроблених методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні небезпечних атмосферних утворень з одночасним використанням СРПК та метеорологічного радіолокатора МРЛ-5 в районі Запорізького аеропорту, яка підтвердила можливість

використання цих методів і СРПК на торговельних суднах для забезпечення безпеки судноводіння в складних умовах атмосферного середовища.

Удосконалено:

- математичну модель інформаційного потоку у судовому радіолокаційному поляризаційному комплексі, що дозволило вирішити завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні небезпечних атмосферних утворень;
- технологія побудови СРПК з повним аналізом поляризаційних властивостей луна-сигналів частково поляризованої хвилі складних об'єктів;
- практична реалізація моделі взаємодії СРПК з атмосферним середовищем, у якому перебуває навігаційний об'єкт, що базується на вимірюванні елементів матриці розсіювання складного об'єкта під час його послідовного опромінення електромагнітними хвилями чотирьох фіксованих поляризацій;
- структура побудови радіолокаційного каналу під час розв'язання задач поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень на шляху судна;
- теоретичні та експериментальні методи підвищення ефективності функціонування СРПК в умовах атмосферних завад.

Набули подальшого розвитку:

- модель основного інформаційного потоку, в якій фіксована послідовність операторів, що змінюються в часі, подається у вигляді матриц Мюллера, що характеризують набір атмосферних середовищ (опади різної інтенсивності та фазового стану);
- система радіолокаційних сигналів яка розглядається як певна математична конструкція, що відображає здатність перетворення, передавання, одержання й оброблення радіолокаційної інформації про спостережувану СРПК ситуацію за траєкторією руху судна;
- модель відбивних властивостей складного об'єкта, в якій використовуються енергетичні, поляризаційні та дійсні парметри Стокса випромінюваних хвиль

чотирьох поляризацій і параметри Стокса відбитої хвилі для кожного виду поляризації випромінюваної хвилі;

- відомості про розсіювальну здатність складного об'єкта використовуються в СРПК у вигляді парметрів Стокса, представлених інформаційними блоками (енергетична матриця, матриця когерентності, ступінь поляризації та статистичні критеріальні параметри Стокса);

- теоретичні та експериментальні методи визначення поляризаційних парметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі виконаних досліджень розроблено та впроваджено:

- математична модель енергетичної матриці складного об'єкта, яка дає змогу виділити луна-сигнал навігаційного об'єкта з ехо-сигналу складного об'єкта і забезпечити його радіолокаційне спостереження;

- математична модель матриці когерентності частково поляризованої хвилі складного об'єкта, що дає змогу розв'язати задачу поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, який перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення за траєкторією руху судна СРПК;

- систему нормованих інтенсивностей двох повністю поляризованих енергетичних потоків зі ступенями поляризації, які відповідають луна-сигналам навігаційного об'єкта та луна-сигналам атмосферного утворення;

- система поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень, з використанням статистичних властивостей поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта;

- радіолокаційна поляризаційна система, що реалізує енергетичний та інформаційний потенціал методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають в умовах небезпечних атмосферних завад.

Ключові слова: судновий радіолокаційний поляризаційний комплекс, поляризаційна структура радіолокаційних сигналів, керування основним інформаційним потоком, методологія поляризаційної селекції навігаційних об’єктів.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України (що входять до переліку наукових фахових видань України, які рекомендовані МОН України для публікації результатів дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук):

1. **Корбан Д. В.** Влияние атмосферы на измерение дальности навигационных объектов судовой РЛС / Д. В. Корбан. // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып.35. Одесса: ОНМА, 2015. С.128-136

2. Корбан В. Х. Многофункциональный метеорологический радар / В. Х. Корбан, **Д. В.Корбан**, Л. М.Дегтярьова **//** Цифрові технології ОНАЗ, ім. О.С. Попова, 2016. №20. С.118-127.

3. **Корбан Д. В.** Влияние турбулентной тропосферы на разрешающую способность антенны судового радиолокатора по угловым координатам // Судовождение: Сб. научн. трудов / НУ «ОМА», Вып.26. Одесса: «ИздатИнформ», 2016. С.104-109.

4. Корбан В. Х. Использование поляризации электромагнитной волны при радиолокационном распознавании объектов / В. Х. Корбан, **Д. В. Корбан**, Л. М. Дегтярьова // Наукові праці ОНАЗ, ім. О.С. Попова, 2017. №1. С.75-82.

5. Путятин В. Г. Радиофизическая модель отражающего объема тропосферы / В. Г. Путятин, **Д. В. Корбан**, С. И.Заичко и др. // Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2017. Т.19. №3. С.42-52.

6. Путятин В. Г. Радиолокационное распознавание навигационных объектов на пути судна по поляризационным параметрам электромагнитной волны / В. Г. Путятин, **Д. В. Корбан**, С. И.Заичко и др.// Математичні машини і системи, 2017. №4. С.120-128.

7. Путятин В. Г. Влияние осадков на разрешающую способность судовой радиолокационной станции по угловым координатам / В. Г. Путятин, **Д. В. Корбан**, А. И. Князь // Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2017. Т.19. №4. С. 26-34.

8. Корбан В. Х. К возможности использования аффинного базиса в радиолокационных метеорологических поляриметрах / В. Х. Корбан, **Д. В. Корбан**, Л. М. Дегтярьова // «Цифрові технології» ОНАЗ ім. О. С. Попова, Одеса, № 21, 2017. С.129-137.

9. Путятин В. Г. Влияние атмосферных условий на радиолокационное наблюдение навигационных объектов / В. Г. Путятин, **Д. В. Корбан**, А. И.Князь // Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2018. Т.20. №1. С. 40 – 51.

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

11. **Korban D. V.** Implementing the coherence matrix of the partially polarized wave to enhance efficiency of radar observation of the objects / D. V. Korban, O. M. Volkov, V. Ch. Korban, L. M. Degtjarjeva // Цифрові технології ОНАЗ ім. О. С. Попова. Одеса, 2018. № 23. С. 131–142.

12. **Korban D. V.** Improving the efficiency of remote radar observation of the objects / D. V. Korban, O. M. Volkov, V. Ch. Korban, L. M. Degtjarjeva // Цифрові технології ОНАЗ ім. О. С. Попова. Одеса, 2018. № 24. С. 118–127.

13. **Корбан Д. В.** Кінцевомірні розподіли при радіолокаційному спостереженні навігаційних об'єктів / Д. В. Корбан, І. О. Бурмака // Судноводіння: зб. наук. праць / НУ «ОМА». Одеса: ВидавІнформ, 2019. Вип. 29. С. 106–115. https://doi.org/10.31653/2306-5761.29.219.106-115

14. Корбан В. Х. До проблеми зменшення перешкод від атмосферних опадів при радіолокаційному спостереженні об'єктів судновою РЛС / В. Х. Корбан, **Д. В. Корбан**, В. Ю. Ревенко // Суднові енергетичні установки: Зб. наук. праць/ НУ «ОМА». – Вип.40. Одеса: «ВидавІнформ», 2020. С.79-87.

15. **Корбан Д. В.** Аналіз функціональних зв'язків навігаційного об'єкту і зовнішнього середовища при функціонуванні суднової радіолокаційної станції (РЛС) / Д. В. Корбан // Суднові енергетичні установки: Зб. наук. праць/ НУ «ОМА». – Вип.43. – Одеса: «ВидавІнформ», 2021. С.172-195.

16. **Korban D. V.** Polarization selection of navigation objects located in the zone of atmospheric formations / D. V. Korban // Судноводіння / Shipping & Navigation. 2021. No. 32. С. 56–70. https://doi.org/10.31653/2306-5761.32.2021

17. **Корбан Д. В.** Шестиканальний поляризаційний роздільник всеполяризованої антени з керуванням поляризації електромагнітної хвилі на випромінювання / Д.В. Корбан // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА», Одеса: ВидавІнформ, 2022. Вип.33. С. 79 - 90. https://doi.org/10.31653/2306-5761.33.2022.67-78

18. **Корбан Д. В.** Радіолокаційне вимірювання характеристик розсіяння об'єкту при наявності природного фону / Д.В. Корбан // Водний транспорт. Зб. наукових праць ДУІТ. Київ: ДУІТ, 2023. Вип. 1(37). С. 122-134. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37 .

19. **Корбан Д. В.** Радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів у складних умовах атмосферного середовища з використанням поляризаційної селекції луна-сигналі / Д. В. Корбан, І. О. Бурмака. // Водний транспорт: зб. наук. праць ДУІТ. Київ: ДУІТ, 2024. Вип. 1(39).С. 35-48. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.04

20. **Корбан Д. В.** Радіолокаційні методи поляризаційної селекції морських об’єктів: монографія / Д. В. Корбан. Одеса: НУ «ОМА», 2024. 155 с. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25651473.v1

21. **Корбан Д. В.** Поляризаційні вимірювання луна-сигналів частково поляризованих хвиль складних об'єктів судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом / Д. В. Корбан // Судноводіння / Shipping & Navigation. 2024. No. 36. С. 77–85. https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.77-85

22. Галамутько О. Підвищення точності визначення навігаційних параметрів радіолокаційною системою судна при виконанні лоцманської проводки / О. Галамутько, **Д. В. Корбан** // Судноводіння / Shipping & Navigation. 2025. No. 38. С. 93–103. https://doi.org/10.31653/2306-5761.38.2025.93-103

23. **Корбан Д. В.** Відбивна здатність складного об'єкту, який знаходиться у зоні функціонування суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу / Д. В. Корбан // Судноводіння / Shipping & Navigation. 2025. No. 38. С. 116–127. https://doi.org/10.31653/2306-5761.38.2025.116-127

Статті в іноземних виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus and Web of Science:

24. Polarization-based target detection approach to enhance small surface object identification ensuring navigation safety / M. Stetsenko, O. Melnyk, I. Vorokhobin, **D. Korban**, O. Onishchenko та ін. System Research and Information Technologies. 2024. № 2. С. 35–51. https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2024.2.03

25. **Korban D.** Polarization method of navigation object selection in ship radar systems. Scientific Journal of the Maritime University of Szczecin. 2023. Vol. 76 (148). P. 17–22. https://doi.org/10.17402/581

26. Radar - based detection and recognition methodology of autonomous surface vehicles in challenging marine environment / **D. Korban**, O. Melnyk, O. Onishchenko, S. Kurdiuk, V. Shevchenko, T. Obniavko. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2024. Vol. 122. P. 111–127. https://doi.org / 10.20858/sjsutst.2024.122.7 .

27. Method of polarization selection of navigation objects in adverse weather conditions using statistical properties of radio signals / **D. Korban,** O. Melnyk, S. Kurdiuk, O. Onishchenko, V. Ocheretna, O. Shcherbina, O. Kotenko. System Research and Information Technologies. 2025. № 1. С. 73–88. https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2025.2.03.

28. **Korban, D.** Increasing the functionality of the ship's radar systems. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin. 2024. Vol. 79 (151).P. 22–29. https://doi.org/10.17402/612

Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності

29. Спосіб підвищення ефективності виявлення та супроводження надводних цілей навігаційною радіолокаційною станцією незалежно від стану морської поверхні: Пат. 119985 Україна: МПК G01S 13/00, G01S 13/66, G01S 7/12 / В. В. Голіков, М. С. Стеценко, О. Г. Губський, **Д. В. Корбан**; заявл. 21.10.2016; опубл. 25.10.2017, Бюл. № 20.

30. Спосіб підвищення ефективності виявлення та супроводження надводних об'єктів судновою навігаційною радіолокаційною станцією на тлі атмосферних утворень різного типу та ступеня інтенсивності: пат. 151471 Україна: МПК: G01S 13/00 G01S 13/66 / М. С. Стеценко, **Д. В. Корбан**; заявл. 09.11.2020; опубл. 03.08.2022, Бюл. №31.

31. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 139439 Україна. Докторська дисертація «Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів» / Д. В. Корбан ; заявник та правовласник **Д. В. Корбан**. - реєстр. 15.09.2025.

Статті у збірниках за матеріалами конференцій

32. **Корбан Д. В.** Принцип взаимности применительно к поляризационным свойствам антенны судового радиолокационного поляриметра / Д. В. Корбан // Матеріали наук.-методичної конференції: «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві» (19-20 листопада 2015р.), Одеса, 2015. С.151.

33. **Корбан Д. В.** Влияние атмосферных образований на точность измерения угловых координат навигационных объектов / Д. В. Корбан // Матеріали науково-техн. конф.: «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека» 16 -17 листопада 2016. Одеса, НУ «ОМА», 2017. С.16-17.

34. **Корбан Д. В.** Использование судовой РЛС при проведении спасательных работ на море / Д. В. Корбан, Р. А. Иванов // Матеріали науково- техн. конф.: «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (16-17 листопада 2017). Одеса: НУ ОМА, 2018. С.159-162.

35. **Корбан Д. В.** Информационная технология синтеза поляризационного состояния электромагнитной волны при радиолокационном наблюдении навигационных объектов /Д. В. Корбан // Матеріали X наук.-практичної конф.: «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (MINTT-2018) (29-31 травня 2018 р.), Херсон, 2018. С.121-123.

36. **Korban D.** Parametric polarization radio-location method of improvement of radiolocation observation of navigational objects against the background of natural hindrances / D Korban, O Volkov, P Kostenko // SEA - CONF 2018 4th INTERNATIONAL CONFERENCE. May 17th – 19th, 2018 Constanta. P.91-99.

37. **Корбан Д.В.** Поляризаційна структура сигналів в інформаційному каналі суднових РЕК / Д. В. Корбан, А. В. Подорван, Т. Н. Буяджи // Матеріали наук.-техн. конф. «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» 14-15.11.2019. Одеса: НУ ОМА, 2019. С.128-129.

38. **Корбан Д. В.** Ефективність пригнічення відбиттів від атмосферних утворень судновою РЛС з лінійною поляризацією / Д.В. Корбан, О.Ю. Морозов // Матеріали наук.-техн. конф. «Транспортні технології (Морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» 14-15.11.2019. Одеса: НУ ОМА, 2019. С.136.

39. **Корбан Д. В.** Использование неполяризованной волны для радиолокационной селекции навигационных объектов при наличии атмосферного фона / Д. В. Корбан // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2020): матеріали XII Міжнар. наук. – практ. конф. (Херсон , 27 – 29 травня 2020 р.). Херсон, 2020. С. 68-70.

40. **Корбан Д. В.** Радіолокаційне виявлення луна-сигналів навігаційного об'єкта судновою РЛС при наявності атмосферниих перешкод / Д. В. Корбан // Матеріали міжнародної наукової інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 51)» / Збірник тез доповідей: випуск 51 (м. Тернопіль, 16 вересня 2020 р.). Тернопіль, 2020. С.40-41.

41. **Корбан Д. В**. Вплив відбиттів від атмосферних утворень та водної поверхні на роботу суднової РЛС / Д. В. Корбан, Ю. В. Шевченко // Матеріали наук.-техн. конф. «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплав-ство, перевезення, автоматизація» 17.11.2020. Одеса: НУ ОМА, 2020. С.97-101.

42. **Корбан Д. В.** Виявлення і розпізнавання поляризаційних сигналів навігаційних об'єктів при наявності нормальних частково поляризованих перешкод / Д. В. Корбан // Сучасні тенденції розвитку морської галузі, підвищення ефективності та безпеки судноплавства: матеріали Міжнар. наук. конф. (Маріуполь, 23 квітня 2021р.). Маріуполь: АМІ НУ «ОМА», 2021. С.28-37.

43. **Корбан Д. В.** Поляризаційна селекція навігаційних об'єктів судновими РЛС / Д. В. Корбан // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-21): матеріали XIII Міжнар. наук. - практ. конф. (Херсон, 22-27 травня 2021 р.) Херсон: ХДМА, 2021. С.122-124.

44. **Корбан Д. В.** Виявлення і відмінність поляризованих сигналів навігаційних об'єктів при наявності нормальних частково поляризованих перешкод / Д. В. Корбан // Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021): матеріали Першої Міжнар. наук. - практ. конф. (Херсон, 3-5 листопада 2021 р.) Херсон: ХДМА, 2021. С.189-192.

45. **Korban D.** Improving the efficiency of ship radar systems functioning / D. Korban // Navigation, Shipping and Technology (NST): Materials International Conference on Science and Technology November 18th November (Odessa, 18 – 19 Nov. 2021) Odessa, NUOMA, 2021. P.77-80.

46. **Корбан Д. В.** Розпізнавання навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні випадних опадів, судновими РЛС з використанням ступеня поляризації відбитої хвилі / Д. В. Корбан // Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2022): матеріали Першої Міжнар. наук.-практич. конф.(Херсон, 7 грудня 2022 р.). Херсон: ХДМА, 2022. С.90-93.

47. **Корбан Д. В**. Селекція радіолокаційних сигналів навігаційних об'єктів, що знаходяться у зоні атмосферних утворень / Д. В. Корбан // «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт: матеріали наук.-техн. конф. (Одеса, 24-25 березня 2022 р.). Одеса: НУ "ОМА", 2022. С.25-28.

48. **Корбан Д. В.** Поляризаційна модель складного об'єкта, що спостерігається судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом / Д. В. Корбан // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: зб. тез

доповідей Міжнародної наукової інтернет-конф. (Тернопіль, 7 - 8 червня 2022 р.). Тернопіль, 2022. вип. 68. С. 83-85.

49. **Корбан Д. В.** Ефективність використання кругової поляризації при радіолокаційному спостереженні навігаційних об'єктів /Д. В. Корбан, В.М. Абрамова // Navigation, Shipping and Technology (NST-2022): матеріали наук.-техн. конф. (Одеса, 17-18 листопада 2022 р.). Одеса: НУ «ОМА», 2022. С.103-105.

50.**Корбан Д. В.** Матриця розповсюдження небезпечних атмосферних утворень / Д. В. Корбан, Я. К. Куценко // Navigation, Shipping and Technology (NST-2022): матеріали наук.-техн. конф. (Одеса, 17-18 листопада 2022 р.). Одеса: НУ «ОМА», 2022. С.110-112.

51. **Корбан Д. В.** Модель основного інформаційного потоку в судновому радіолокаційном поляризаційному комплексі / Д. В. Корбан // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023): матеріали XV Міжнародної наук.-практич. конф. (Херсон, 24–25 травня 2023 р.). Херсон: ХДМА, 2023. С.225-228.

52. **Корбан Д. В.** Оптимальний статистичний синтез алгоритмів виявлення і розпізнавання сигналів навігаційного об’єкта при наявності частково поляризованої перешкоди від атмосферного утворення / Д.В. Корбан // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: зб. тез доповідей Міжнародної наукової інтернет-конф. (Тернопіль, 7-8 грудня 2023 р.). Тернопіль, 2023. Вип.83. С. 169-171.

53. **Korban D**. The model of the main information flow in radar observation of objectsin difficult atmospheric conditions / D. Korban // The First International Symposium "Special Ships and Intelligent Systems 2023" (Sanya, 16-18 December, 2023). Sanya, 2023.

54. Корбан Д. В. Вплив морської поверхні на радіолокаційне спостереження навігаційнихоб'єктів судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2024): матеріали XVI Міжнародної наук.-практич. конф. (Одеса, 29–31 травня 2024 р.). Херсон: ХДМА, 2024. С.156-159.

55. **Корбан Д. В.** Структура побудови сучасного суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: зб. тез доповідей Міжнародної наукової інтернет-конф. (Тернопіль, 10-11 вересня 2024 р.). Тернопіль. 2024. Вип.91С.121-123.

56. **Корбан Д. В.** Моделювання електромагнітного поля поляризаційної структури складного об'єкту // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2025): матеріали XVI Міжнародної наук.-практич. конф. (Одеса, 28–30 травня 2025 р.). Херсон: ХДМА, 2025. С.159-162.

57. **Korban D. V.** Solving the problem of polarization selection of echo signals from a navigation object in the presence of sea-surface waves / D. V. Korban // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2026): матеріали XVII Міжнар. наук.-практ. конф. (Херсон, 26–28 трав. 2026 р.). Херсон: ХДМА, 2026. С. 193–195.

З наукових робіт, опублікованих у співавторстві, у дисертації використані тільки ті положення, які належать автору особисто:

[2, 8, 14, 22, 49] – проведення інформаційного пошуку адекватного теоретичного апарату використання частково поляризованої хвилі в експериментальних дослідженнях;

[13, 19, 37, 38, 41] – аналіз радіолокаційного каналу, який дозволяє функціонування СРПК в умовах атмосферних завад;

[7, 9, 10] – розроблення просторово-часової фільтрації атмосферних завад;

[4, 6, 11, 27, 36] – математичне обґрунтування методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів;

[5, 12, 24, 26] – розроблення методології підвищення ефективності функціонування СРПК в умовах атмосферних завад;

[29, 30] – розроблення схеми експериментального СРПК;

[34, 50] – використання накопиченого тезауруса.

ANNOTATION

Korban D. V. Increasing the efficiency of ship radar systems. - Qualification scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.22.13 - Navigation and Traffic Control - National University “Odessa Maritime Academy” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2024.

The dissertation research is aimed at solving a scientific and applied problem - radar visibility of navigational objects by a ships' radar complex in conditions of complex atmospheric interference.

The main motivation for the research is the current existence of practical requests:

- to ensure the efficiency of ships' radar systems in conditions of atmospheric interference;
- to increase the energy efficiency of the ship radar to increase the energy efficiency of the ships' radar complex;
- to ensure the receipt of radar information on navigational objects and atmospheric formations along the ship's trajectory;
- to use ships' radar polarization systems on modern high-speed vessels with increased energy potential;
- for the use of ships' radar polarization complexes methods of polarization selection of echo signals of complex objects, which allow for separate observation of echo signals of navigation objects and echo signals of atmospheric formations on indicators and displays of ships' computers;
- to introduce more informative and valid, energetic radar polarization systems in ships more informative and valid, energy Stokes polarization parameters, which are easily measured and allow obtaining radar information about navigation objects under different atmospheric conditions;
- for use in ships' radar polarization systems an omnipolarized antenna that allows emitting an electromagnetic wave of a certain polarization and receiving an echo signal of a partially polarized wave of a composite object;

- for the use of three energy matrices in the processing system, which allow to divide the echo signal of a complex object into the echo signal of a navigation object and the echo signal of an atmospheric formation.

Based on the analysis of modern concepts of development of ships' radar systems that provide radar surveillance of navigation objects, **the following unresolved problems** in the operation of ships' radar systems:

- violation of the use of the full energy potential of the electromagnetic wave for both emission and reception;
- insufficient information about signals and interference;
- the need for additional a priori information about the objects of radar and interference sources in the process of primary processing of echo signals;
- imperfection of methods of radar detection of navigation objects that located in difficult atmospheric conditions;
- there is no algorithm and criterion for the use of statistical methods of echo signals of the navigation object and atmospheric formation;
- insufficient efficiency of the coefficient of navigation object resolution against the background of the atmospheric formation.

The above problems defined and determined **the complex task of the research**: to improve the information and operational characteristics of ship radars by simultaneous selection by several polarization parameters of radar signals, which ensures their functioning, consisting **of three main research objectives**:

- construction of a system for monitoring the polarization structure of radar signals with the identification of their polarization parameters;
- development of a strategy for the formation of a system of radar signals based on their polarization based on their polarization parameters;
- development of a methodology for improving the efficiency of ships' radars in conditions of atmospheric interference.

As a result of solving the main and auxiliary tasks, the following **scientific provisions** were obtained:

- the mechanism of polarization selection of navigation objects located in the zone of depends on the synthesis of detection algorithms and the difference in the polarization state of the echo signals of the navigation object and the atmospheric formation, taking into account both the polarization characteristics of the echo signals of the navigation object and the polarization characteristics of the echo signals of the atmospheric formation;
- improving the efficiency of radar detection of navigation objects, radar detection of navigation objects located in the zone of dangerous atmospheric formations is achieved by emitting and receiving electromagnetic waves of certain polarizations of linear, circular, and unpolarized with further use of the full energy potential of electromagnetic waves of certain polarizations received by the all-polarized antenna of the ship's radar polarization complex (SRPC);
- effective power distribution of two orthogonal components of an electromagnetic wave of arbitrary polarization arriving at the input of the all-polarized SRPC antenna is performed by a six-component polarization divider into four linearly polarized components and two circular ones, from which, by averaging the quadratic and bilinear forms of the orthogonal components of the partially polarized field, the actual energy polarization Stokes parameters are formed, which are used to solve the problems of polarization selection of navigation objects located in the area of atmospheric interference.

The scientific provisions are substantiated by scientific results.

For the first time:

- It was established that the main indicator characterizing the increase the efficiency of ships' radar polarization complexes is the technical and physical basis of polarization selection methods for radar signals and objects that provide radar detection and surveillance of navigation objects of the SRPC under various adverse atmospheric conditions;
- substantiated and developed a functional diagram of the ships' six-component SRPC with a polarization separator and a controlled omnipolarized antenna with amplitude and phase relations in the high-frequency path and a four-channel scheme

for recording Stokes energy polarization parameters at the output of a two-channel linear receiver;

- the physical model of emission and reception of an unpolarized electromagnetic wave was substantiated, which allows separating the echo signals of an atmospheric formation and a navigation object, analyzing the structure of the atmospheric formation to determine its degree of danger along the ships' route;
- the energy scattering matrix of objects observed by SRPC was developed, which allows to separate the echo-signal of a navigation object from the total echo-signal of a partially polarized wave and the echo-signal of an atmospheric formation by aggregate processing of the measured real Stokes polarization parameters, the matrix of which is compared with the accumulated thesaurus of this atmospheric formation;
- synthesis of algorithms for polarimetric radar observations of objects using matrices obtained with the help of Stokes parameters, which characterize the scattering ability of objects and their corresponding radiophysical models;
- a functional diagram of the device was substantiated and developed, which synthesizes an algorithm for solving the problem of polarization selection of a navigation object located in the zone of a hazardous atmospheric formation using their energy matrices;
- developed a methodology for polarization selection of navigation objects located in the zone of hazardous atmospheric formations using the coherence matrix;
- a functional diagram of the device synthesizing the algorithm for solving the problem of polarization selection of a navigation object located in the zone of hazardous atmospheric formation using the coherence matrix was substantiated and developed;
- a methodology for polarization selection of navigation objects located in atmospheric interference using the degree of polarization of echo signals of a partially polarized wave was developed;

- the functional diagram of the device synthesizing the algorithm for solving the problem of polarization selection of a navigation object located in the zone of a dangerous atmospheric formation by the values of the degree of polarization of an electromagnetic wave was substantiated and developed;
- the methodology for polarization selection of navigation objects in atmospheric interference conditions using the statistical properties of the polarization parameters of echo signals of a partially polarized wave of a complex object was developed;
- the technology for determining the criterion polarization parameters of the echo signals of a navigation object and an atmospheric formation, which is used to solve the problem of polarization selection of a navigation object in conditions of atmospheric interference, was developed;
- the optimal statistical synthesis of polarization parameters of the echo signal of a complex object (a navigation object located in the area of atmospheric formation) was used to solve the problem of polarization selection of navigation objects of the SRPC;
- the identification of the physical and mathematical model of a complex object observed by the SRPC was used to solve the problem of polarization selection of navigation objects;
- the efficiency of radar observation of navigation objects of the ships' route was increased using the energy matrix, coherence matrix, degree of polarization and criterion values of the Stokes parameters of a partially polarized wave;
- experimental verification of the methodology and developed methods of polarization selection of navigation objects located in the area of hazardous atmospheric formations with the simultaneous use of SRPC and meteorological radar MRL-5 in the area of Zaporizhzhia airport, which confirmed the possibility of using these methods and SRPC on merchant ships to ensure safe navigation in difficult atmospheric environment.

Improved:

- the mathematical model of information flow in a ships' radar polarization complex, which made it possible to solve the problem of polarization selection of navigation objects located in the zone of dangerous atmospheric formations;
- technology of construction of SRPC with full analysis of polarization properties echo signals of partially polarized waves of complex objects;
- practical realization of the model of interaction of SRPC with the atmospheric environment, in which the navigation object is located, based on the measurement of the elements of the scattering matrix of a complex object during its sequential irradiation with electromagnetic waves of four fixed polarizations;
- the structure of the radar channel construction in solving problems polarization selection of navigation objects located in the zone of dangerous atmospheric formations on the ships' route;
- theoretical and experimental methods for improving the efficiency of of SRPC functioning in conditions of atmospheric interference.

The following have been further developed:

- the model of the main information flow, in which the sequence of time-varying operators is represented in the form of Mueller matrices characterizing a set of atmospheric environments (precipitation of different intensity and phase state);
- the system of radar signals is considered as a certain mathematical design that reflects the ability to convert, transmit, receive and process radar information about the situation observed by the SRPC along of the ships' route;
- model of reflective properties of a complex object, which uses energy, polarization and real Stokes parameters of the emitted waves of four polarizations and Stokes parameters of the reflected wave for each type of polarization of the emitted wave;
- information on the scattering ability of a complex object is used in SRPC in the form of Stokes parameters represented by information blocks (energy matrix, coherence matrix, degree of polarization and statistical Stokes criterion parameters);

- theoretical and experimental methods for determining the polarization parameters of the echo signals of a partially polarized wave of a complex object.

The practical significance of the results obtained is that, on the basis of the research performed, the following have been developed and implemented:

- a mathematical model of the energy matrix of a complex object, which allows to distinguish the echo signal of a navigation object from the echo signal of a complex object and to ensure its radar observation
- mathematical model of the coherence matrix of a partially polarized wave of a complex object, which makes it possible to solve the problem of polarization selection of a navigation object located in the zone of a dangerous atmospheric formation along the trajectory of the SRPC vessel;
- the system of normalized intensities of two fully polarized energy flows with degrees of polarization corresponding to the echo signals of the navigation object and the echo signals of the atmospheric formation;
- system of polarization selection of navigation objects located in the area of hazardous atmospheric formations, using the statistical properties of the polarization parameters of echo signals of a partially polarized wave of a complex object;
- radar polarization system that realizes the energy and information potential of polarization selection methods for navigation objects in conditions of dangerous atmospheric interference.

Key words: ships' radar polarization complex, polarization structure of radar signals, control of the main information flow, methodology of polarization selection of navigation objects.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ……..... 29
ВСТУП ……..……... 30
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУДНОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ 45
1.1 Сучасні концепції підвищення ефективності функціонування СРК у складних умовах атмосферного середовища……. 45
1.2 Аналіз основних напрямів підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних систем ……. 51
1.3 Розробка алгоритму оптимізації, що забезпечує розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкту на тлі атмосферного утворення …… 56
1.4 Висновки за розділом 1 …… 64
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СРК…….. 66
2.1 Обґрунтування вибору напряму наукового дослідження……..... 66
2.2 Обґрунтування мети та завдань дисертаційного дослідження……..... 73
2.3 Системний та структурний підхід до розробки технологічної карти наукового дослідження…… 76
2.4 Вибір та обґрунтування методів наукових досліджень…….. 78
2.5 Експериментальний метод порівняльного аналізу радіолокаційної інформації щодо об'єктів радіолокаційного спостереження СРПК……. 81
2.6 Висновки за розділом 2 ……. 82
РОЗДІЛ 3 СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ З ІДЕНТИФІКАЦІЄЮ ЇХ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ……. 84
3.1 Структурна схема СРПК……..... 86
3.2 Функціональна схема високочастотної частини всеполяризованої антени СРПК.…… 93
3.2.1 Функціонування антени в режимі випромінювання електромагнітних хвиль певних поляризацій…… 95
3.2.2 Функціонування антени в режимі приймання електромагнітних хвиль еліптичної поляризації, відбитих від складного об'єкта…….. 103
3.3 Висновки за розділом 3 …… 117

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТРАТЕГІЇ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ, ЩО БАЗУЮТЬСЯ НА ЇХ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРАХ…… 119
4.1 Модель основного інформаційного потоку в судновому радіолокаційному поляризаційному комплексі…….. 119
4.2 Моделювання відбивної здатності складних об'єктів під час їх спостереження СРПК…… 122
4.3 Структурний аналіз радіолокаційної інформації про об'єкти спостереження СРПК ……. 135
4.3.1 Структурний аналіз радіолокаційного каналу під час розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення……. 135
4.3.2 Моделювання відбивної здатності навігаційного об'єкта…….. 143
4.3.3 Моделювання відбивної здатності атмосферного утворення…… 146
4.3.4 Моделювання відбивної здатності складного об'єкта……. 150
4.4 Висновки за розділом 4……. 154
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУДНОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ В УМОВАХ АТМОСФЕРНИХ ЗАВАД……. 156
5.1 Розроблення методології поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах атмосферних завад, з використанням енергетичної матриці розсіювання…… 156
5.1.1 Практичне розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта з використанням енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта… 166
5.2 Розроблення методології поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах атмосферних завад, з використанням матриці когерентності ……. 173
5.2.1 Розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що ґрунтується на властивостях енергетичних дійсних параметрах Стокса…… 181
5.3 Розроблення методології поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах атмосферних завад, з використанням ступеня поляризації та статистичних властивостей поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі…….. 193
5.3.1 Розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що

перебуває в зоні атмосферного утворення з використанням ступеня поляризації електромагнітної хвилі……. 200
5.3.2 Розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні атмосферного утворення з використанням статистичних властивостей поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі…….. 213
5.4 Висновки за розділом 5…… 224
РОЗДІЛ 6 МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СРПК З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ СЕЛЕКЦІЇ НАВІГАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ, ЩО ПЕРЕБУВАЮТЬ У ЗОНІ НЕБЕЗПЕЧНИХ АТМОСФЕРНИХ УТВОРЕНЬ…… 226
6.1 Енергетична структура розсіяного об'єктами електромагнітного поля, що використовується в СРПК під час поляризаційної селекції навігаційних об'єктів…… 226
6.2 Оцінювання похибки СРПК…… 229
6.3 Проведення експериментального аналізу використання розроблених в дисертації методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у різних ситуаційних умовах атмосферного середовища…… 234
6.3.1 Визначення поляризаційних елементів матриці Мюллера під час експериментального розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів СРПК…… 235
6.4 Синтез методів поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційних об'єктів, що забезпечує підвищення ефективності радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів СРПК…….. 243
6.4.1 Результати експериментальних досліджень з радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних утворень, виконаних СРПК з використанням методів поляризаційної селекції.. 239
6.4.2 Основні вимоги до оптимізації порівняльного аналізу радіолокаційного представлення луна-сигналів атмосферних утворень при експериментальних дослідженнях ефективності розроблених методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів…… 248
6.4.3 Експериментальне підтвердження підвищення функціональних можливостей суднових радіолокаційних комплексів методами поляризаційної селекції навігаційних об'єктів…….. 253

6.4.3.1 Результати експериментального використання енергетичної матриці розсіювання луна-сигналів складного об'єкта під час поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні випадних опадів…….. 258
6.4.3.2 Результати експериментального використання матриці когерентності для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні опадів максимальної інтенсивності……... 259
6.4.3.3 Результати експериментального використання ступеня поляризації луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта під час поляризаційної селекції навігаційних об'єктів…… 260
6.4.3.4 Результати використання статистичних властивостей поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі для експериментального розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні випадних опадів певної інтенсивності…….. 261
6.5 Висновки до розділу 6…… 263
ВИСНОВКИ…….. 265
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ …….…….... 270
ДОДАТКИ……. 298
Додаток А Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» і на дисплеї СРПК….. 298
Додаток Б Результати експериментального розпізнавання навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів на дисплеї СРПК……. 325
Додаток В Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження ….. 335
Додаток Г Список опублікованих праць автора за темою дисертації…… 344

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

АМРК – автоматизований метеорологічний радіолокаційний комплекс;
ЕВП – ефективна відбиваюча поверхня;
ЕОМ – електронно-обчислювана машина;
КРП – кругова поляризація;
ЛВП – лінійна вертикальна поляризація;
ЛГП – лінійна горизонтальна поляризація;
ЛП45^{o} – лінійна поляризація під кутом 45^{o};
МРЛ – метеорологічна радіолокаційна станція;
ППХ – повністю поляризована хвиля;
РЕК – радіоелектронний комплекс;
РЛС – радіолокаційна станція;
СРК – судновий радіолокаційний комплекс;
СРПК – судновий радіолокаційний поляризаційний комплекс;
ТАРП – тимчасове автоматичне керування підсиленням;
ЧПХ – частково поляризована хвиля.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Зростання чисельності суден світового торгового флоту, їх якісне оновлення, експлуатація в різних несприятливих умовах зовнішнього середовища, передбачає розвиток і вдосконалення суднових радіолокаційних комплексів, реалізацію в них нових навігаційних можливостей, які мають забезпечувати ефективність навігації.

Проблеми підвищення ефективності навігації в складних атмосферних умовах викликані недостатньою ефективністю використовуваних суднових радіолокаційних комплексів по радіолокаційної спостережливості навігаційних об'єктів на тлі атмосферних перешкод і прагненням до поліпшення експлуатаційних показників суднових радіолокаційних комплексів лежать в основі експлуатаційних вимог до навігаційного радіолокаційного обладнання високошвидкісних суден.

Таким чином можливо сформулювати актуальну науково-технічну проблему у галузі розвитку суднових радіолокаційних навігаційних систем, радіолокаційних технологій і їх відповідної структури: дослідження та розроблення методів вдосконалення інформаційних і експлуатаційних характеристик суднових радіолокаційних комплексів, які б забезпечували підвищення ефективності їх функціонування у складних умовах атмосферного середовища, шляхом встановлення закономірностей змінювання радіолокаційних параметрів електромагнітної хвилі та впровадження методів і радіолокаційних засобів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться на тлі атмосферних завад у процесі їх радіолокаційного виявлення та спостереження судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом (СРПК).

Судновий радіолокаційний поляризаційний комплекс є результат певного періоду в його розвитку і він задає початок протікання наступного періоду розвитку. Дослідження та моделювання методів та засобів підвищення ефективності функціонування суднового радіолокаційного комплексу обмежені вирішенням задач узгодження зовнішніх протиріч: забезпеченням певної зоні радіолокаційного огляду; отриманням більш повної інформації щодо об'єкту радіолокаційного спостереження;

завадостійкості функціонування в умовах атмосферних завад; необхідністю поляризаційного обробляння сигналів; відсутністю використання методів поляризаційної селекції; необхідністю при вирішенні задачі виявлення, під якою розуміється селекція об'єктів на тлі атмосферних завад, використовування накопиченого тезауруса; обґрунтуванням поляризаційного критерія вибору рішень у задачі покращення розрізнення навігаційного об'єкта від атмосферного утворення з урахуванням ситуаційних факторів довкілля; затребування відсутності енергетичних втрат електромагнітної хвилі при забезпеченні виявлення структури і властивостей об'єкта радіолокаційного моніторингу з необхідною для екіпажу судна повнотою; відсутністю формалізованих поляризаційних моделей взаємозв'язку поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі з фізичними процесами радіолокаційного каналу; розробленням технології реалізації поляризаційної селекції навігаційних об'єктів суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу. Поляризаційні властивості електромагнітної хвилі, в яких міститься інформація про об'єкт радіолокаційного спостереження, проявляються при її взаємодії з об'єктом, геометричні і електрофізичні властивості якого змінюють поляризацію відбитої хвилі. Навігаційний об'єкт і атмосферне утворення мають різну геометричну структуру, а їх електрофізичні параметри будуть відображати електромагнітні хвилі різної поляризації при їх опроміненні хвилею певної поляризації, що створює основу поляризаційної селекції їх сигналів, а технічну основу методів поляризаційної селекції сигналів навігаційних об'єктів представляє залежність енергетичних характеристик приймально-передаючих антен від поляризаційного стану електромагнітних хвиль та від використання схем поляризаційної селекції. Відомі методи поліпшення радіолокаційної спостережливості навігаційних об'єктів на тлі атмосферних завад базуються на розробках G. O. Stokes [1], H. William [2,3], A. Marathay [4], В. І. Антюфєєва [5] , В. М. Кошевого [6] і інш. Проте, в суднових радіолокаційних комплексах методи поляризаційної селекції до теперішнього часу не використовуються, що веде до енергетичних втрат в відбитої від навігаційного об'єкту хвилі та зниженню можливості розпізнавання луна-сигналів навігаційних об'єктів на тлі луна-сигналів атмосферних утворень, **що свідчить про відсутність**

рішення комплексної наукової проблеми. Розв'язання цієї проблеми є актуальною та необхідною умовою забезпечення безпеки судноводіння у складних умовах атмосферного середовища.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота спрямована на реалізацію концепції безперервної національної транспортної політики розвитку всіх видів транспорту на 2007-2014 р.р. (Наказ МТУ від 05 травня 2007 р., № 360); Транспортної стратегії України на період до 2020 року (Указ Президента України №5/2015 від 12 січня 2015 року); положень Транспортної стратегії України на період до 2030 року; Рішення Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 року «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (Указ Президента України від 20.05.2008 року №463/2008); положеннями Міжнародна конвенція про охорону людського життя на морі (SOLAS 74/78, Правило 19); Експлуатаційні вимоги до РЛС – Резолюція MSC. 64(67), 1999, Додаток; Експлуатаційні вимоги до РЛС для швидкісних суден. Резолюція А.820(19), 1995; Проект підкомітету з безпеки нових загальних стандартів радіолокаційного обладнання з перспективною його заміною, березень 2003 р., (49 сесія підкомітету з безпеки); Державна програма удосконалення функціонування державної системи забезпечення безпеки судноплавства на 2002-2006р.р. (Постанова КМУ від 28.01.2002 р., № 296); а також у рамках наступних держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія»:
«Удосконалення методів безпечного управління судном» № ДР 011U005133 (2020 - 2022 р.р.) НДР, розділ 13 «Альтернативний метод визначення характеристик судна», «Удосконалення методів управління та експлуатації суден» № ДР 0123U101463 (2023 - 2025 р.р.) НДР, розділ 4 «Розробка стратегії формування системи радіолокаційних сигналів, що базуються на їх поляризаційних параметрах», у яких автор дисертації брав участь як виконавець теми.

Мета дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів.

Основною науковою гіпотезою дослідження є теза про те, що підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів забезпечується організацією управління процесом поляризаційної селекції радіолокаційних сигналів. Для досягнення мети та підтвердження наукової гіпотези під час проведення досліджень сформульовано комплексне завдання наукового дослідження.

Комплексне завдання наукового дослідження - підвищення інформаційних і експлуатаційних характеристик суднових СРК одночасною селекцією за кількома поляризаційними параметрами радіолокаційних сигналів, що забезпечує їх функціонування, яке складається **з трьох головних наукових завдань дослідження**:

- побудова системи моніторингу поляризаційної структури радіолокаційних сигналів з ідентифікацією їх поляризаційних параметрів;
- розроблення стратегії формування системи радіолокаційних сигналів, що базуються на їх поляризаційних параметрах;
- розроблення методології підвищення ефективності функціонування суднових СРК в умовах атмосферних завад.

Об'єкт дослідження: процес радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів на тлі атмосферних завад.

Предмет дослідження: сукупність теоретико-методологічних та прикладних положень використання поляризаційних характеристик сигналів для підвищення ефективності функціонування суднових СРК.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі поєднані теоретичні, чисельні та експериментальні методи дослідження. Теоретичні методи (дедукції, експертних оцінок, системного аналізу) використовувались під час знаходження абсолютно нових нерозв'язаних проблем, які раніше не досліджувались, або якщо застосування відомих методів, виявлялося не раціональним для вирішення завдань. Єдність математичного опису різних фізичних процесів досягнуто шляхом подання всього радіолокаційного каналу у вигляді лінійної системи, що складається з СРПК, траси поширення електромагнітної хвилі певної поляризації і об'єкта радіолокаційного спостереження. При аналітичному поданні поляризації електромагнітних хвиль використані поляризаційні енергетичні параметри Стокса, що мають однакову

розмірність і легко визначаються експериментально. В основі аналітичних методів визначення характеристик об'єкта радіолокаційного спостереження використані матриці розсіювання, що характеризують просторово-часову і поляризаційну структури електромагнітної хвилі. Використано аналітичне моделювання параметрів електромагнітної хвилі при вирішенні задачі радіолокаційного виявлення і селекції навігаційних об'єктів. За допомогою теоретичних розробок здійснена процедура виділення з сумарного луна-сигналу частково поляризованої хвилі луна-сигналу навігаційного об'єкта. Експериментальні методи використовувалися для перевірки адекватності та достовірності математичних моделей радіолокаційного виявлення і селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні випадних зливових опадів різної інтенсивності. Удосконалення технології поділу в хвилеводному тракті електромагнітних полів з різними поляризаціями для випромінювання і приймання відбитої від об'єкта, що спостерігається, електромагнітної хвилі. Для вирішення загальної задачі радіолокаційного виявлення навігаційних об'єктів використано ймовірністно-статистичний метод, що дозволяє встановити усереднені криторіальні значення ознак виявлення навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні випадних зливових опадів для подальшого їх використання в оперативній практиці функціонування СРПК.

Чисельні методи використовувалися для радіолокаційного виявлення навігаційних об'єктів при наявності атмосферних завад на шляху судна.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що підвищення ефективності функціонування суднового радіолокаційного комплексу досягається застосуванням поляризаційних ефектів радіохвиль в задачах виявлення, відмінності і класифікації луна-сигналів навігаційних об'єктів на тлі луна-сигналів атмосферних завад і розробленням методів і радіолокаційної апаратури поляризаційного аналізу СРПК.

В результаті розв'язання головних і додаткових завдань сформульовані наступні **наукові положення**:

- механізм поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні

атмосферного утворення, залежить від синтезу алгоритмів виявлення і відмінності поляризаційного стану луна-сигналів навігаційного об'єкта і атмосферного утворення, при цьому враховуються як поляризаційні характеристики луна-сигналів навігаційного об'єкта, так і поляризаційні характеристики луна-сигналів атмосферного утворення;

- підвищення ефективності радіолокаційного виявлення навігаційних об'єктів, що знаходяться у зоні небезпечних атмосферних утворень, СРПК досягається випромінюванням і прийомом електромагнітних хвиль певних поляризацій лінійних, кругових, а також неполяризованих з подальшим використанням повного енергетичного потенціалу прийнятих всеполяризованою антеною СРПК певних електромагнітних хвиль;

- ефективний розподіл потужності двох ортогональних компонент електромагнітної хвилі довільної поляризації, що надходять на вхід всеполяризованої антени СРПК проводиться шестикомпонентним поляризаційним роздільником на чотири лінійно поляризовані компоненти і дві кругові, з яких усередненням квадратичних і білінійних форм ортогональних складових частково поляризованого поля формуються дійсні енергетичні поляризаційні параметри Стокса, які використовуються при розв'язанні завдань поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться у зоні атмосферних завад.

Наукові положення обгрунтовані науковими результатами:

Вперше:

- встановлено, що основним показником, який характеризує підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних поляризаційних комплексів є технічна і фізична основи методів поляризаційної селекції радіолокаційних сигналів і об'єктів, що забезпечують радіолокаційне виявлення і спостереження навігаційних об'єктів СРПК при різних несприятливих умовах атмосферного середовища;

- обгрунтована і розроблена функціональна схема суднового шестикомпонентного СРПК з поляризаційним роздільником і керованою всеполяризованою антеною з амплітудними і фазовими співвідношеннями в високочастотному тракті і

чотирьохканальною схемою реєстрації енергетичних поляризаційних параметрів Стокса на виході двоканального лінійного приймача;

- обгрунтована фізична модель випромінювання і прийому неполяризованої електромагнітної хвилі, що дозволяє розділити луна-сигнали атмосферного утворення і навігаційного об'єкта, аналізувати структуру атмосферного утворення для визначення його ступеня небезпеки по трасі руху судна;

- розроблена енергетична матриця розсіювання об'єктів, які спостерігаються СРПК, що дозволяє за сукупною обробкою виміряних дійсних поляризаційних параметрів Стокса виділити луна-сигнал навігаційного об'єкта з сумарного луна-сигналу частково поляризованої хвилі і луна-сигнал атмосферного утворення, матриця якого порівнюється з накопиченим тезаурусом даного атмосферного утворення;

- здійснено синтез алгоритмів поляриметричних радіолокаційних спостережень об'єктів за отриманими за допомогою параметрів Стокса матрицями, які характеризують розсіювальну здатність об'єктів і відповідні їм радіофізичні моделі;

- обгрунтована і розроблена функціональна схема приладу , що синтезує алгоритм вирішення завдання поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що знаходиться у зоні небезпечного атмосферного утворення, з використанням їх енергетичних матриць;

- розроблена методологія поляризаційної селекції навгаційних об'єктів, що знаходяться у зоні небезпечних атмосферних утворень, з використанням матриці когерентності;

- обгрунтована і розроблена функціональна схема приладу, що синтезує алгоритм вирішення завдання поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що знаходиться у зоні небезпечного атмосферного утворення, з використанням матриці когерентності;

- розроблена методологія поляризаційної селекції навігаційних обїектів, що знаходяться в умовах атмосферних завад, з використанням ступеня поляризації луна-сигналів частково поляризованої хвилі;

- обгрунтована і розроблена функціональна схема приладу, що синтезує алгоритм вирішення завдання поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що знаходиться у

зоні небезпечного атмосферного утворення, за значеннями ступеня поляризації електромагнітної хвилі;

- розроблена методологія поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в умовах атмосферних завад, з використанням статистичних властивостей поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта;

- розроблена технологія визначення критеріальних поляризаційних параметрів луна-сигналів навігаційного об'єкта і атмосферного утворення, за якими вирішене завдання поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що знаходиться в умовах атмосферних завад;

- використано оптимальний статистичний синтез поляризаційних параметрів луна-сигналу складного об'єкта (навігаційний об'єкт, який знаходиться в зоні атмосферного утворення) при вирішенні завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів СРПК;

- використано ідентифікацію фізико-математичної моделі складного об'єкта, що спостерігається СРПК, для вирішення завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів;

- підвищена ефективність радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів на шляху судна з використанням енергетичної матриці, матриці когерентності, ступеня поляризації та критеріальних значень параметрів Стокса частково поляризованої хвилі;

- проведена експериментальна перевірка методології та розроблених методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні небезпечних атмосферних утворень з одночасним використанням СРПК та метеорологічного радіолокатора МРЛ-5 в районі Запорізького аеропорту, яка підтвердила можливість використання цих методів і СРПК на торговельних суднах для забезпечення безпеки судноводіння в складних умовах атмосферного середовища.

Удосконалено:

- математичну модель інформаційного потоку у судовому радіолокаційному

поляризаційному комплексі, що дозволило вирішити завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні небезпечних атмосферних утворень;

- технологія побудови СРПК з повним аналізом поляризаційних властивостей луна-сигналів частково поляризованої хвилі складних об'єктів;

- практична реалізація моделі взаємодії СРПК з атмосферним середовищем, у якому перебуває навігаційний об'єкт, що базується на вимірюванні елементів матриці розсіювання складного об'єкта під час його послідовного опромінення електромагнітними хвилями чотирьох фіксованих поляризацій;

- структура побудови радіолокаційного каналу під час розв'язання задач поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень на шляху судна;

- теоретичні та експериментальні методи підвищення ефективності функціонування СРПК в умовах атмосферних завад.

Набули подальшого розвитку:

- модель основного інформаційного потоку, в якій фіксована послідовність операторів, що змінюються в часі, подається у вигляді матриць Мюллера, що характеризують набір атмосферних середовищ (опади різної інтенсивності та фазового стану);

- система радіолокаційних сигналів яку розглядають як певну математичну конструкцію, що відображає здатність перетворення, передавання, одержання й оброблення радіолокаційної інформації про спостережувану СРПК ситуацію за траєкторією руху судна;

- модель відбивних властивостей складного об'єкта, в якій використовуються енергетичні, поляризаційні та дійсні параметри Стокса випромінюваних хвиль чотирьох поляризацій і параметри Стокса відбитої хвилі для кожного виду поляризації випромінюваної хвилі;

- відомості про розсіювальну здатність складного об'єкта використовуються в

СРПК у вигляді параметрів Стокса, представлених інформаційними блоками (енергетична матриця, матриця когерентності, ступінь поляризації та статистичні критеріальні параметри Стокса);

- теоретичні та експериментальні методи визначення поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта.

Наукова значимість дослідження полягає в підвищенні ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів у складних умовах атмосферного середовища шляхом підвищення їхніх потенційних та інформаційних можливостей використанням методів, які ґрунтуються на поляризаційних властивостях електромагнітних хвиль під час радіолокаційного виявлення навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні небезпечних атмосферних утворень.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що на основі виконаних досліджень розроблено та впроваджено:

- математична модель енергетичної матриці складного об'єкта, яка дає змогу виділити луна-сигнал навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта і забезпечити його радіолокаційне спостереження;
- математична модель матриці когерентності частково поляризованої хвилі складного об'єкта, що дає змогу розв'язати задачу поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, який перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення за траєкторією руху судна СРПК;
- систему нормованих інтенсивностей двох повністю поляризованих енергетичних потоків зі ступенями поляризації, які відповідають луна-сигналам навігаційного об'єкта та луна-сигналам атмосферного утворення;
- система поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень, з використанням статистичних властивостей поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта;
- радіолокаційна поляризаційна система, що реалізує енергетичний та інформаційний потенціал методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають в умовах небезпечних атмосферних завад.

Основні впровадження:

- технологія забезпечення ефективності дистанційного радіолокаційного виявлення навігаційних об’єктів, які перебувають у небезпечних умовах атмосферного середовища за трасою руху судна, під час знаходження суден у портах та при виході з портів, при підготовці командного складу до плавання на суднах компаній, завчасність прийняття обгрунтованого, відповідального рішення, щодо управління судном у складних умовах атмосферного середовища для виключення аврійності судноплавства використано у ДП «В. Шіпс Україна» (акт від 28.11.2023р.);
- методологія поділу енергетичних параметрів електромагнітних полів луна-сигналів частково поляризаційної хвилі складного об'єкта, що складається з луна-сигнала навігаційного об'єкта і атмосферного утворення використана фахівцями Державного Підприємства «Морський торгівельний порт «Черноморськ» у судновій РЛС при радіолокаційному спостереженні морських суден, що заходять в порт при наявності випадаючих опадів, які екранують луна-сигнал судна на індикаторі портового радіолокаційного комплексу, що дозволило виділити луна-сигнал морського судна з луна-сигналу атмосферної завади і спостерігати його на радіолокаційному індикаторі і дисплеї комп'ютера, що підвищило безпеку заходу і виходу морських суден в порт (акт від 23.06.2021р.);
- технологія, методика та алгоритми радіолокаційного розпізнавання навігаційних об’єктів і атмосферних утворень, які використовують матрицю когерентності, енергетичну матрицю, ступінь поляризації і статистичні параметри Стокса луна-сигналів частково поляризованої хвилі та алгоритм розрахунків зміни параметрів луна-сигналів, які надходять на вхід приймальної антени суднового радіолокаційного комплексу від навігаційних об'єктів і атмосферного утворення використовані при радіолокаційному забезпеченні для розходження суден як за трасою їх руху, так і при заході та виході з порту, при навчанні офіцерів судноплавної компанії з урахуванням напряму прийняття їми обгрунтованого та відповідального рішення на виконання маневру для забезпечення безпеки плавання. Експериментальне підтвердження наукових результатів представлених в даному акті впровадження проведено на судні т/х «DAISY» (акт від 20.04.2021р.);

- радіолокаційні методи поляризаційної селекції навігаційних об’єктів, які перебувають у зоні випадних опадів на території Азовського моря представлені матрицею когерентності, енергетичною матрицею розсіювання, ступенем поляризації та статистичними поляризаційними енергетичними параметрами Стокса луна-сигналів частково поляризованої хвилі, впроваджено в оперативну роботу Запорізького обласного центру гідрометеорології, які дають змогу забезпечити радіометеорологічною інформацією судна за трасою їхнього руху в Азовському морі, що підвищило безпеку їхнього судноводіння в складних умовах атмосферного середовища (акт від 20.01.22 р.);
- радіолокаційну технологію та радіолокаційний поляризаційний комплекс (принцип побудови) з поляризаційною селекцією луна-сигналів навігаційних об'єктів і атмосферних утворень впроваджено в науково-дослідну й оперативну роботу гідрометцентру Чорного та Азовського морів під час забезпечення радіометеорологічною інформацією суден, що перебувають в акваторії Одеського, Чорноморського та Ізмаїльського морських портів, а також під час заходження й виходу суден з цих портів, що забезпечує безаварійне судноплавство їхніми акваторіями незалежно від погодних умов (акт від 14.06.2021р., акт від 18.01.2022 р.);
- у навчальний процес (акт від 15.04.2024 р.) та науково - дослідну роботу ДР №0123U101463 «Удосконалення методів управління та експлуатації суден» Національного університету «Одеська морська академія» (акт від 15.05.2024 р.).

Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень і рекомендацій. Наукові положення та результати, що отримані в дисертаційному дослідженні достовірні, оскільки базуються на проведеному інформаційному пошуку, розробленої методології, розроблених математичних моделях основного інформаційного потоку в СРПК та моделях відбивної здатності складних об’єктів під час їх спостереження СРПК, збігу аналітичних та експериментальних значень досліджених параметрів при вирішенні задач поляризаційної селекції навігаційних об’єктів, а також актах впровадження дисертаційних досліджень в суднових радіолокаційних комплексах (СРК) морських засобах транспорту та гідрометцентрах України.

Особистий внесок автора. У дисертаційному дослідженні викладено авторський підхід до розв'язання важливої науково-прикладної проблеми – забезпечення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів у складних умовах атмосферного середовища методами поляризаційної селекції навігаційних об'єктів. Наукові положення, теоретичні визначення, технологічні розробки та науково-практичні рекомендації, що висвітлені у роботі та виносяться на захист, отримані автором особисто (під час проведених ним наукових досліджень у Національному університеті «Одеська морська академія», а також на морських суднах, що належать українським та закордонним судноплавним компаніям), Українських гідрометцентрах та викладені у його наукових працях.

З наукових робіт, опублікованих у співавторстві, у дисертації використані тільки ті положення, які належать автору особисто: [2, 8, 14, 22, 49] – проведення інформаційного пошуку адекватного теоретичного апарату використання частково поляризованої хвилі у експериментальних дослідженняї; [13, 19, 37, 38, 41] – аналіз радіолокаційного каналу, який дозволяє функціонування СРПК в умовах атмосферних завад; [7, 9, 10] – розроблення просторово часової фільтрації атмосферних завад; [4, 6, 11, 27, 36] – матиматичне обгрунтування методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів; [5, 12, 24, 26] – розроблення методології підвищення ефективності функціонування СРПК в умовах атмосферних завад; [29, 30] – розроблення схеми експериментального СРПК; [34, 50] – використання накопиченого тезауруса.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень за темою дисертаційної роботи неодноразово доповідалися на ряді міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях, зокрема: науково-методичній конференції «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві» 19.11.2015 - 20.11.2015.- Одеса, НУ «ОМА»; IX Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації» 3.12.2015-4.12.2015. - Переяслав-Хмельницький, ДВНЗ «Переяслав-Хмельницький ДПУ ім. Григорія Сковороди»; X Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації»

16.01.2016-18.01.2016. - Переяслав-Хмельницький, ДВНЗ «Переяслав-Хмельницький ДПУ ім. Григорія Сковороди»; науково-технічній конференції «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека» 16.11.2017 - 17.11.2017.- Одеса, НУ «ОМА»; 72-ої науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів, 13.12.2017-15.12.2017, Одеса, ОНАЗ;
X науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті - MINTT-2018» (29-31 травня 2018 р.), Херсон, ХДМА; 73-ої науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (12-14 грудня 2018 р.), Одеса, ОНАЗ; науково-технічній конференції «Транспортні технології(Морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» 14-15.11.2019, Одеса, НУ ОМА; XII Міжнародній наук. -практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті - MINTT-2020» 27–29. 05.2020, Херсон, ХДМА; Міжнародних наукових інтернет-конференціях «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» з 2020 - 2024рр. – Тернопіль; науково-технічній конференції «Транспортні технології (Морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» 17.11.2020, Одеса, НУ ОМА; 75-ої науково-технічній конференції професорсько-виклад. складу, науковців, аспірантів та студентів, 11-15.12.2020, Одеса, ОНАЗ; Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні тенденції розвитку морської галузі, підвищення ефективності та безпеки судноплавства»,23.04.2021, Маріуполь, АМІ НУ «ОМА»; XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті-MINTT-21» 22-27.05.2021, Херсон, ХДМА; Першій Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі - PSDMI-2021» 3-5.11.2021, Херсон, ХДМА; International Conference on Science and Technology «Navigation, Shipping and Technology» NST November 18th – November 19th 2021 Odessa, National University “ОМА”; Першій Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі - PSDMI-2022» 7.12.2022, Херсон, ХДМА; науково-технічній конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт»,

24.03.2022 – 25.03.2022, Одеса, НУ "ОМА"; науково-технічній конференції судноводіння, морські перевезення та технології «NAVIGATION, SHIPPING AND TECHNOLOGY» NST-2022 з нагоди 50-ти річчя Морського Інституту Великобританії 17-18.11.2022, Одеса, НУ ОМА; XV Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2023» 24–25.05.2023, Херсон, ХДМА; The First International Symposium "Special Ships and Intelligent Systems 2023" on December 16-18, 2023 in Sanya, China.

Публікації. Основні наукові положення та результати дисертації висвітлено у 57 наукових працях, з яких 9 опубліковано одноосібно. Серед них: 23 статті – у наукових фахових виданнях України; 5 статей – в іноземних виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science; 3 патенти та свідоцтва про реєстрацію авторського права; 26 тез доповідей – у збірниках матеріалів міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з переліку умовних скорочень, вступу, шістьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 353 сторінок, зокрема: основний текст – 240 сторінок з анотацією на 23 сторінках, список використаних джерел із 224 найменувань на 28 сторінках, додатки – 57 сторінок, 45 рисунків, 17 таблиць.

РОЗДІЛ 1
ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУДНОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ

Суднові радіолокаційні комплекси (СРК) є багатофункціональними структурними, що забезпечують безпеку судноводіння, при цьому:

- ефективність їхньої роботи залежить від процесу радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів по траєкторії руху судна за будь-яких умов атмосферного середовища;
- їхнім основним експлуатаційним завданням є більш повніше використання енергетичних та інформаційних параметрів, що застосовуються в СРК електромагнітних хвиль під час забезпечення радіовидимості навігаційних об'єктів;
- завершальним етапом для ухвалення рішення про радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферного утворення, є використання методів селекції їхніх луна-сигналів.

СРК необхідно реалізовувати селекцію луна-сигналів навігаційних об'єктів за будь-яких умов атмосферного середовища за траєкторією руху судна.

1.1. Сучасні концепції підвищення ефективності функціонування СРК у складних умовах атмосферного середовища

У суднових радіолокаційних комплексах селекція навігаційних об’єктів здійснюється в основному на довжині хвилі 3,2 см і для цієї довжини хвилі на функціонування СРК сильний вплив чинять атмосферні утворення, у вигляді зливових опадів відповідних інтенсивностей [1-15], що погіршують їхню селективну здатність, утворюючи радіолокаційний фон. Зливові опади, а також град, створюють зворотне розсіювання електромагнітних хвиль, що засвічує великі ділянки індикатора СРК і повністю маскують луна-сигнали навігаційних об'єктів за траєкторією руху судна [16 - 30] .

Зменшення заважаючої дії атмосферних опадів на оперативну роботу суднових радіолокаційних комплексів є актуальним завданням підвищення ефективності їхнього функціонування в складних умовах атмосферного середовища.

До теперішнього часу радіолокаційне виділення луна-сигналів навігаційних об'єктів із луна-сигналів складних об'єктів (навігаційний об'єкт і атмосферне утворення) розглянуте як вітчизняними, так і зарубіжними авторами з використанням загальних методів поліпшення виділення луна-сигналів навігаційних об'єктів, так і методів, що ґрунтуються на використанні характерних особливостях поляризаційної структури луна-сигналів атмосферних утворень [31-42].

У СРК для виділення навігаційних об'єктів, що рухаються, на тлі заважаючих відбиттів від атмосферних утворень використовують доплерівський зсув частоти $F_д$ (ефект Доплера) сигналу відбитого від навігаційного об'єкта, який рухається, відносно частоти сигналу, випромінюваного передавачем СРК [43-54] , тобто:

$$F_д = \pm \frac{2v_r}{\lambda}, \tag{1.1}$$

де v_r - радіальна швидкість руху навігаційного об'єкта, спрямована по прямій, що з'єднує навігаційний об'єкт і СРК, см/с;

λ - довжина хвилі радіолокаційного сигналу, що дорівнює:

$$\lambda = \frac{c}{f}\ (см), \tag{1.2}$$

де c - швидкість поширення хвилі;

f - частота радіолокаційного сигналу, *Гц*.

Для нерухомих об'єктів частота прийнятих сигналів дорівнює частоті випромінюваних антеною СРК сигналів.

Для рухомих навігаційних об'єктів частота сигналів, що приймаються, відрізняється від частоти випромінюваних сигналів на величину поправки Доплера, яка залежить від радіальної швидкості руху навігаційного об'єкта та від довжини хвилі передавача СРК. Автоматична система змінює величину поправки Доплера, яка

вводиться, на частоту когерентного гетеродина, і в такий спосіб зменшуються завади від атмосферних утворень на індикаторі СРК.

Розроблені до теперішнього часу методи, що ґрунтуються на використанні ефекту Доплера, також як когерентний метод безперервного випромінювання та когерентно-імпульсний метод порівняння, мають суттєві недоліки під час виділення луна-сигналів навігаційного об'єкта на тлі заважаючих луна-сигналів атмосферного утворення. Так, за деяких значень радіальної швидкості навігаційного об'єкта амплітудна модуляція вихідних сигналів детектора відсутня, а різниця фаз когерентної напруги та відбитої від навігаційного об'єкта в кожному циклі роботи СРК залишається постійною. Під час використання методу порівняння виникають труднощі в забезпеченні великого часу затримки луна-сигналів і високої стабільності швидкості обертання антени СРК.

Застосування методу порівняння обмежується необхідністю високої розрішувальної здатності СРК за координатами, що практично не завжди можна виконати. Проблему виділення луна-сигналів навігаційних об'єктів не можна вважати повністю розв'язаною, доки з приймально-індикаторного тракту не буде включено заважаючі луна-сигнали утворень. Застосування спектрального способу придушення заважаючих відбиттів, заснованого на використанні відмінностей у структурі спектрів луна-сигналів навігаційних об'єктів, що рухаються, та нерухомих (під час заходу судна в порт), накладає жорсткі вимоги до стабільності роботи різних вузлів апаратури СРК, і навіть невелика нестабільність їхньої роботи призводить до частотних неузгодженостей системи придушення заважаючих відбиттів від нерухомих об'єктів. Під час використання компенсаційного способу пригнічення заважаючих відбиттів, заснованого на відніманні луна-сигналів, коли в одному циклі роботи віднімаються луна-сигнали, прийняті в попередньому циклі й затримані на час, що дорівнює періоду повторення імпульсів і порівняння їх у протифазі. Однак застосування схем затримок пов'язане зі значним ослабленням луна-сигналів навігаційних об'єктів, які передають за ними.

Водночас завади, що потрапили в приймальний тракт СРК, маскують луна-сигнали навігаційних об'єктів аж до їхнього повного зникнення, створюють додаткові

зображення на екрані індикатора СРК і перезавантаження відеопідсилювача або підсилювача проміжної частоти. Для усунення перевантаження приймача використовуються підсилювачі проміжної частоти з логарифмічною амплітудною характеристикою, миттєве автоматичне регулювання посилення, регулювання чутливості приймача за часом (ТАРП) і автоматичний зсув робочої точки детектора. Використання антени кругової поляризації, яка задовольняє принципу взаємності в поляризаційному сенсі, що зводиться до того, що антена приймає хвилю тільки такої поляризації, яку і випромінює. Хвиля, поляризована ортогонально випромінюваній, не проходить на вхід антени. Якщо атмосферні частинки мають сферичну форму, то луна-сигнал від них не приймається антеною СРК. Однак частинки мають сферичну форму тільки у мрячних опадів, які не чинять негативного впливу на радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів. У зливових опадів частинки мають форму еліпса і луна-сигнал від них потрапляє на індикатор кругового огляду СРК разом із луна-сигналом навігаційного об'єкта, і реальний виграш у помітності навігаційного об'єкта виявляється незначним. Для снігу виграшу у спостереженні навігаційних об'єктів не виходить. Загалом ефект ослаблення від атмосферних утворень із використанням електромагнітних хвиль кругових поляризацій для взаємних і невзаємних антен зумовлений поляризаційними властивостями частинок атмосферних утворень. Крім взаємних антен кругової поляризації використовується спосіб двох антен, за якого на приймання луна-сигналів і на випромінювання використовуються окремі антени лінійної поляризації, у яких вектори діючих висот ортогональні один одному. Недоліком під час розв'язання задачі пригнічення завад від атмосферних утворень є наявність двох антен. Використання однієї антени з перемиканням приймального і передавального каналів (невзаємна антенна система) і два роздільних хвилеводних тракти, один передавальний, а інший приймальний. У хвилеводному тракті повинно бути передбачено обертове сполучення, яке буде впливати на інтенсивність відбиття від навігаційних об'єктів і від атмосферних утворень (зливові опади, які складаються з частинок несферичної форми).

Використання системи з невзаємним елементом у хвилеводному тракті (круглі хвилеводневі секції з феритовими стрижнями в поздовжньому магнітному полі) не

призводить до повного пригнічення луна-сигналів атмосферних утворень. Ефективність виділення луна-сигналів навігаційних об'єктів на тлі луна-сигналів атмосферних утворень визначається ступенем відмінності між собою коефіцієнтів деполяризації луна-сигналів навігаційного об'єкта й атмосферного утворення, і повного пригнічення луна-сигналів атмосферних утворень, на тлі яких проводиться радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів, не буде.

Наведені методи підвищення помітності луна-сигналів навігаційних об'єктів на тлі луна-сигналів атмосферних утворень, розроблені в сімдесяті роки, могли застосовуватися, коли експлуатувалися нешвидкісні торговельні судна, з урахуванням їхнього призначення, умов експлуатації та основних технічних і конструктивних параметрів.

Нині за різкого кількісного збільшення світового морського торговельного флоту, зі швидкісними показниками їхнього руху, виникла потреба в якісному управлінні суднами в складних умовах атмосферного середовища з розробленням методів і радіолокаційних суднових засобів, що забезпечують постійне спостереження за радіолокаційним простором по трасі руху судна. З урахуванням чинних стратегій розвитку торговельного флоту Євросоюзу та України, як морської держави, починаючи з 2000 року почало розвиватися наукове обґрунтування безпеки судноплавства в морських портах і на підходах до них, по трасах руху суден, підвищення якості та ефективності радіолокаційної інформації СРК.

До теперішнього часу наукові розробки з безпечного розходження суден виконані провідними українськими вченими д. т. н., професором В. А. Голіковим, д. т. н., професором А. С. Мальцевим, д. т. н., професором В. М. Кошовим, д. т. н., професором М. М. Цимбалом, д. т. н. І. І. Ворохобіним, д. т. н., професором І. О. Бурмака та інш.

Сучасні СРК для забезпечення безпеки судноплавства в складних умовах атмосферного середовища потребують реалізації не тільки сучасного підходу побудови самих СРК, а й створення нових методів селекції луна-сигналів навігаційних об'єктів, використання найінформативніших параметрів електромагнітної хвилі, що випромінюється та приймається антеною СРК, нових

інформаційних технологій виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта, розробки алгоритмів використання радіолокаційних методів селекції навігації, розробки нових алгоритмів використання радіолокаційних методів селекції навігаційного об'єкту, розробки алгоритмів селекції навігаційного об'єкту. При цьому одним із важливих моментів буде аналіз характеристик СРК, залежно від його вхідних параметрів, параметрів атмосферних об'єктів, поляризації хвилі, що опромінює складний об'єкт радіолокаційного спостереження. Для врахування впливу середовища на процес радіолокаційного спостереження виникає необхідність створення радіолокаційної моделі атмосферного утворення і відбиваючих властивостей навігаційного об'єкта.

Радіолокаційні методи мають бути доведені в СРК до їхнього практичного використання з одного боку, і з іншого боку, їхня інформація має бути достовірною для ухвалення правильного рішення щодо наявності або відсутності навігаційного об'єкта, який перебуває у складних умовах атмосферного середовища за трасою руху судна.

Наразі розглянуто процеси розсіювання електромагнітних хвиль повітряними і наземними радіолокаційними об'єктами, розроблено методи радіолокаційного виявлення та ідентифікації металевих і діелектричних об'єктів резонансних розмірів, розташованих у діелектричному середовищі.

При створенні сучасних радіолокаційних комплексів досить повна радіолокаційна інформація про атмосферні утворення представлена новим поколінням МРЛ, створеним після 1999 року, які об'єднані в національні автоматизовані мережі, в районах з найбільшою повторюваністю небезпечних атмосферних процесів, на європейському континенті, в Канаді, в Японії, які реалізують проекти NEXRAD в США, МАРС в Західній Європі, з аналізом цінності й першочерговості представлення радіолокаційної інформації [55-58].

Автоматизоване опрацювання радіолокаційної інформації про небезпечні атмосферні утворення дає змогу використовувати автоматизований МЕТЕОКОМІРКА для порівняльного аналізу радіолокаційної інформації, отриманої на МРЛ, з радіолокаційною інформацією, отриманою експериментальним методом

макетом суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу (СРПК) [59]. На основі аналізу луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта (навігаційний об'єкт і атмосферне утворення) дає змогу отримати нові радіолокаційні критерії реалізації поляризації навігаційних об'єктів.

До теперішнього часу створено і функціонують сучасні радіолокаційні комплекси МРЛ у всіх економічно розвинених країнах. Радіолокаційні комплекси продовжують функціонувати, використовуючи тільки один інформаційний енергетичний параметр електромагнітної хвилі - її амплітуду, під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів за трасою руху судна, а з метою зменшення впливу пасивних атмосферних завад - доплерівську частоту. Однак забезпечити радіолокаційну видимість навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища, СРК у повному обсязі не можуть.

Радіолокаційна видимість навігаційних об'єктів зливових опадів по трасі руху судна досягається в СРПК розподілом луна-сигналів навігаційного об'єкта й атмосферного утворення на виході лінійного двоканального приймача.

1.2 Аналіз основних напрямів підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних систем

Ефективність функціонування радіолокаційних систем, стосовно проблем виявлення радіолокаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища, розглядали в різних наукових публікаціях і спеціальних журналах, зокрема тих, що стосуються і морської радіолокації. Однак за сучасних темпів технічного прогресу окреслилася низка нових напрямів під час проектування радіолокаційних систем і пристроїв, що входять до них, а також способів ухвалення інженерних рішень. Суднові радіолокаційні системи є важливим елементом сучасних систем управління їхнім рухом у нічний час і за несприятливих атмосферних умов, що виникають по траєкторії руху судна. Судновий імпульсний радіолокаційний комплекс дає змогу кожне радіолокаційне вимірювання виконувати на одній лінії, що з'єднує СРК і навігаційний об'єкт за відсутності наземних або супутникових засобів

зв'язку. Однак між навігаційним об'єктом і СРК за певних умов перебуває атмосферне середовище, що погіршує радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів, аж до повного зникнення радіолокаційної інформації про навігаційний об'єкт, що міститься у відбитому сигналі. Облік аномалій поширення радіохвиль в атмосфері дасть змогу розробити й використовувати радіолокаційні методи, за допомогою яких можна виділити луна-сигнал навігаційного об'єкта із сумарного луна-сигналу (навігаційний об'єкт і атмосферне утворення). Інтенсивний розвиток техніки НВЧ діапазону дає можливість сформувати всеполяризаційну антену СРК із регульованими поляризаціями електромагнітної хвилі на випромінювання та розділити вхідний луна-сигнал на шість поляризаційних компонентів поляризаційним розділювачем [60-68].

У сучасному судноплавстві радіолокаційні методи і СРК посідають особливе місце, проте проблема селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у складних атмосферних утвореннях, залишається дотепер актуальною у зв'язку з недостатньою інформативністю енергетичного параметра електромагнітної хвилі, що використовується, - її амплітуди.

Найважливішою тенденцією розвитку сучасної суднової радіолокації є збільшення обсягу інформації, одержуваної про навігаційні об'єкти, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища.

Оцінювання ефективності просторово-часової та часово-просторової фільтрації сигналів у когерентно-імпульсних СРК, а також характеристики розсіювання об’єктів, розглянуто українськими вченими А. П. Залевським, Д. М. Пізою, І. С. Пресняком, О. С. Сіренком і О. Л. Кузнєцовим [3, 69-71].

Принципи доплерівського сучасного імпульсного радару розглянуто також у роботі [9]. Вплив інтерференції завад на системи завадозахисту імпульсно-доплерівських радарів обґрунтовано Д. М. Пізою, А. П. Залевським та А. С. Сіренком [72]. Порівняння суднових радарів, що працюють у S-, X- і K- діапазонах розглянуто А. П. Горобцовим, О. М. Мариничем, Ю. М. Устиновим у роботі [73]. Воробйовим В. І., Дороніним В. В Роднянськиим Р. О. розглянуто тенденції розвитку суднових навігаційних радіолокаційних станцій у роботі [74]. Підхід до моделювання радіолокаційних сигналів, відбитих від об'єктів складної просторової конфігурації,

розглянуто в роботі [3]. Будова та аналіз основних вузлів сучасного багатофункціонального радару розглянуто у роботі [75]. Використання надширокосмугової апаратури для вирішення завдань морської радіолокації розглянуто в роботі [76]. Поляриметричний радар, принцип побудови і технологію отримання інформації, а також проектування радіолокаційних систем розглянуто в роботах [77, 78]. Суднові радіолокаційні станції розглянуто у роботах [74, 79, 80].

Принципи сучасної радіолокації та її використання розглянуто в роботах [81, 82]. Передові технології в радіолокації представлено в роботах [83, 84] за редакцією В. Л. Мельвіна та Д. А. Шеєра. Роботу ВЧ океанічного радара WERA розглянуто на Міжнародному радіолокаційному симпозіумі А. Дзвонковською і Т. Хельцер [85]. Синтез складових двофазних сигналів для радарів безперервних хвиль представлено в роботі [86].

Оброблення просторових даних на основі корабельної антенної решітки з мінімальною кількістю керованих елементів представлено в роботі [87]. Формування зображень і стеження за цілями в радіолокаційних системах із решіткою з реальною апертурою представлено в роботі [88]. Сучасна радіолокація представлена в роботах [89-91]. Керівництво радарами та спостереження за цілями для користувачів морських радарів надано у роботі [92]. Розглянуто досвід роботи з новим поколінням швейцарських радарів у роботі [93].

Сучасні високоточні інтелектуальні системи керування рухом морських суден і навігаційне забезпечення їхнім рухом розглянуто в роботах [94, 95]. Особливості аналітичного забезпечення експлуатації суден у сучасних умовах з використанням методів прогнозу та функції невизначеності двоантенних радіометричних комплексів розглянуто в роботах [96-100]. Радіолокаційне вимірювання доплерівської частоти луна-сигналу від цілі, що локаціюється за межами радіообзору над морем, розглянуто в роботі [101]. Підвищення інформованості про морську обстановку завдяки інтеграції суднових навігаційних радіолокаційних комплексів із використанням методу автоматичного пасивного огляду повітряного простору і модуля імітації цільової та завадової обстановки розглянуто в роботах [102-106]. Удосконалення вторинної обробки радіолокаційної інформації та впливу умов середовища на

точність вимірювання частоти луна-сигналів представлено в роботах [107,108]. Тенденції розвитку радіолокаційних методів контролю повітряного простору розглянуто в робот [109-110]. Цифрова радіолокація представлена у роботі [111], а радари з решіткою, пасивні та радари формування зображення у роботі [112].

Проведений аналіз використання різних за своєю структурою РЛС під час розв'язання певних завдань, зокрема й із селекції та спостереження за радіолокаційною інформацією, показав, що суднові радіолокатори за своєю структурою не можуть забезпечити ефективного виявлення навігаційних об'єктів, які перебувають у складних умовах атмосферного середовища, а вдосконалення СРК необхідно вести в таких напрямах:

- забезпечення можливості використання поляризаційних ефектів для підвищення їхнього потенціалу та спостереження завдань розпізнавання і селекції навігаційних об'єктів;

- використання всеполяризованої антени, що дає змогу випромінювати електромагнітну хвилю певної поляризації, зокрема й неполяризовану, і приймати частково поляризовану хвилю, відбиту від складного об'єкта радіолокаційного спостереження;

- розділення луна-сигналу складного об'єкта на шість поляризованих компонент;

- посилення і перетворення прийнятих всеполяризаційною антеною луна-сигналів складного об'єкта лінійним двоканальним приймачем;

- формування енергетичних дійсних параметрів Стокса на виході лінійного приймача, які дають змогу визначити параметри луна-сигналу складного об'єкта і забезпечують універсальність побудови СРПК для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів;

- формування пристрою визначення елементів сумарної матриці когерентності луна-сигналу частково поляризованої хвилі для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у складних умовах атмосферного середовища;

- формування пристрою визначення елементів енергетичної матриці луна-сигналу частково поляризованої хвилі для вирішення задачі поляризаційної селекції навігаційних об’єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища з використанням тезауруса який складається з елементів матриці атмосферного утворення;

- формування пристрою поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення, за значеннями ступеня поляризації частково поляризованої хвилі.

Реалізація цих завдань з удосконалення СРК має враховувати відмінність СРПК від мережевих СРК наявністю в антенно-хвильоводному тракті всеполяризованої антени спеціальних елементів, що перетворюють поляризаційні параметри електромагнітних хвиль під час випромінювання та приймання луна-сигналів складних об'єктів. У СРПК передавальна і приймальні системи мають свої особливості побудови. Шестикомпонентний поляризаційний роздільник у режимі приймання розщеплює електромагнітну хвилю довільної поляризації на чотири лінійно поляризовані компоненти і дві компоненти, поляризовані по колу. При цьому для всіх видів поляризації аналізованої хвилі, що приймається СРПК, потужність її ділиться порівну між каналами лінійних і кругових компонент. Шестикомпонентний роздільник поляризації містить три основні частини, які складаються з роздільника лінійних компонент, двох дільників потужності з коефіцієнтами 1:1 і подвійного хвилеводного трійника, на один з його входів надходить сигнал із фазовою затримкою 90^{o}. Роздільник виконується на основі круглих і прямокутних хвилеводів, а лінійні приймачі повинні бути узгоджені з вихідними плечима роздільника з коефіцієнтом стоячої хвилі, що дорівнює 1,13. Довжина хвилеводу фазозсувної секції Т-подібного трійника підбирається так, щоб різниця фаз сигналів в Е і Н плечах становила 90^{o}. У цьому разі на його виходах сигнали будуть пропорційні компонентам вхідної хвилі, поляризованим за правим і лівим колом. Матриця розсіювання Т-подібного трійника S_T має такий вигляд за умови повністю узгоджених входів лінійних приймачів:

$$S_T = \frac{\sqrt{2}}{2}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.3)$$

Пристрій формування електромагнітної хвилі заданої поляризації на випромінювання має давати змогу формувати як неполяризовану хвилю, так і електромагнітні хвилі трьох лінійних поляризацій та електромагнітну хвилю кругової поляризації. Передачу електромагнітної енергії від антени до лінійних приймачів можна здійснювати за допомогою стандартних прямокутних і круглих хвилеводів, у діапазоні довжин хвиль, який використовується в судновій СРК. Під час інтерпретації радіолокаційних спостережень будуть використані енергетичні дійсні параметри Стокса.

1.3 Розробка алгоритму оптимізації, що забезпечує розв’язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об’єкту на тлі атмосферного утворення

У реальних умовах функціонування СРПК за траєкторією руху судна навігаційні об'єкти часто перебувають у складних умовах атмосферного середовища. Оскільки гідрометеорний фон, на якому СРПК спостерігає навігаційні об'єкти, під час розсіювання, загалом, змінює поляризацію електромагнітної хвилі, яка опромінює складний об'єкт, то матриця розсіювання Мюллера складного об'єкта відрізнятиметься від матриці розсіювання Мюллера об'єктів, які спостерігає СРПК у вільному просторі [113-114]. Луна-сигнали складних об'єктів, у загальному випадку, є частково поляризованими, і використовувані нині методи селекції не вирішують проблему радіолокаційної видимості навігаційних об'єктів, які перебувають у складних умовах атмосферного середовища (опади, що випадають, різної інтенсивності).

Нині спостерігається тенденція підвищення надійності розпізнавання навігаційних об'єктів, що знаходяться на тлі атмосферних утворень. Судноводієві

потрібно бачити навігаційний об'єкт на дисплеї суднового комп'ютера або на індикаторі СРПК незалежно від того, яка наразі інтенсивність атмосферного утворення, тобто під час радіолокаційного спостереження виникають невизначеності щодо фізичного стану складного об'єкта.

У рамках теорії когерентності, пов'язаної з іменами таких видатних учених, як А. Майкельсон, М. Лауе, П. Х. Ван Ціттерт, Н. Вінер, Д. Церніке, Е. Вольф, Г. Гопкінс, Д. Габор, А. Блан-Ланьєр, Л. Бріллюен, Л. Мандельштам, В. Потєхін та ін., використано матричний підхід до опису роботи СРПК і поляризаційні методи для частково поляризованих і неполяризованих електромагнітних полів, сформованих складними об'єктами радіолокаційного спостереження СРПК, і систематизовано відповідні матричні методи поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у складних умовах атмосферного середовища за траєкторією руху судна [115-120].

До теперішнього часу в роботі представлено модель розсіяного електромагнітного поля в міліметровому і сантиметровому діапазонах довжин хвиль від різних поверхонь із використанням дифракційних формул Френеля-Кірхгофа. Однак, розглянутий метод розрахунку розсіяного поля вимагає проведення додаткового контролю і нормування результатів з урахуванням теоретичних і експериментальних даних.

Для більшості розглянутих у роботах [121-125] алгоритмів характеристики розсіювання вдається розрахувати аналітично, однак, за когерентного опрацювання алгоритми суттєво залежать від ракурсу об'єкта. При цьому проблема математичного опису процесу розсіювання радіохвиль за неоднорідності атмосфери настільки складна, що найвірогіднішим джерелом інформації про характеристику відбитих сигналів є експериментальні дослідження та статистичні методи обробки результатів досліджень.

У наукових публікаціях [126-130] проведено аналіз управління безпекою суден на морі з використанням динамічного моделювання безпеки, теорії грубих множин, інтелектуальної системи підтримки ухвалення рішень для управління рухом судна з урахуванням втоми судноводія, нечіткого методу DEMATEL, у якому не враховано

особливостей радіолокаційних методів, що забезпечують безпеку судна в разі несприятливих умов атмосферного середовища по трасі руху судна.

У зв'язку з інженерною спрямованістю досліджень, що проводяться, виникає необхідність у розробленні методів та їхнього експериментального представлення в області поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища [131-141].

Єдність математичного представлення фізичних характеристик структури радіолокаційних сигналів досягається представленням усього радіолокаційного каналу у вигляді лінійної системи, що дає змогу розглядати поляризаційну селекцію радіолокаційних сигналів за кількома параметрами.

Перспективні суднові СРК пов'язують свій прогрес із використанням поляризаційної структури радіолокаційних сигналів [142-148]. Якщо є будь-яка апріорна інформація про складний об'єкт радіолокаційного спостереження (навігаційний об'єкт і атмосферне утворення) за траєкторією руху судна, то вона значно спрощує реалізацію методів вимірювання характеристик розсіювання. Оператор розсіювання або матриця розсіювання об'єкта радіолокаційного спостереження СРПК характеризує тільки розсіювальну здатність.

Наразі під час розв'язання задач спостереження і селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища, для формування радіолокаційних характеристик складних об'єктів використовують матрицю розсіювання. При цьому суднова СРК у конкретних умовах повинна отримати надійний радіолокаційний луна-сигнал від даного об'єкта. Розглянуте судновою СРК електромагнітне поле можна представляти моделлю сумарного поля, що являє собою сукупність повністю поляризованого сигналу (навігаційний об'єкт) і частково поляризованої завади (атмосферне утворення). Для аналітичних полів можна ввести лінійний оператор або матрицю Стокса на випромінювання і на приймання луна-сигналів складного об'єкта. Стосовно частково поляризованих хвиль (ЧПХ), відбитих від складного об'єкта радіолокаційного спостереження СРПК, використовують теорему Стокса, що встановлює можливість розкладання ЧПХ з вектором Стокса S_m на суму двох незалежних потоків, відбитих від складного об'єкта радіолокаційного

спостереження СРПК $S_{(m=1)} = \left[\sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}, S_2, S_3, S_4 \right]$ и $S_{(m=0)} = \left[S_1 - \sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}, 0, 0, 0 \right]$ [149-151].

Із введенням дійсних, енергетичних параметрів Стокса, що визначають енергетичні характеристики ЧПХ, виникає необхідність у поданні опромінювального складного об'єкта радіолокаційного спостереження СРПК електромагнітного поля та розсіяного поля цим об'єктом, матрицями Мюллера, елементами яких є поляризаційні параметри Стокса, квадратичні відносно напруженості поля електромагнітної хвилі. У лінійному поляризаційному базисі параметри Стокса пов'язані з амплітудами ортогонально поляризованих компонент хвилі E_x і E_y та різницею їхніх фаз $\Phi_{xy} = \varphi_y - \varphi_x$ відомими співвідношеннями [145]:

$$\left.\begin{aligned} S_1 &= E_x^2 + E_y^2; \\ S_2 &= E_x^2 - E_y^2; \\ S_3 &= 2E_x E_y \cos\Phi_{xy}; \\ S_4 &= 2E_x E_y \sin\Phi_{xy}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.4)$$

З (1.4) видно, що S_1 являє собою інтенсивність еліптично поляризованої хвилі і під час переходу з одного поляризаційного базису до іншого параметр Стокса S_1 залишається незмінним. Параметр Стокса S_2 являє собою різницю інтенсивностей ортогональних лінійно поляризованих компонент хвилі. Параметри S_3 і S_4 визначають кореляцію між ортогонально поляризованими компонентами хвилі.

У лінійно поляризованому базисі під час повороту прямокутної системи координат навколо осі OZ на кут $\theta = \pi/4$ параметри Стокса мають такі співвідношення:

$$\left.\begin{aligned} S_1 &= E_x^2 + E_y^2; \\ S_2 &= -2E_x E_y \cos\Phi_{xy}; \\ S_3 &= E_x^2 - E_y^2; \\ S_4 &= 2E_x E_y \sin\Phi_{xy}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.5)$$

При розкладанні еліптично поляризованої хвилі на кругові компоненти правого (*п*) і лівого (*л*) напряму обертання електромагнітного вектору хвилі (круговий базис), параметри Стокса запишуться у вигляді:

$$\left.\begin{aligned} S_1 &= E_л^2 + E_п^2; \\ S_2 &= 2E_л E_п \sin \Phi_{лп}; \\ S_3 &= 2E_л E_п \cos \Phi_{лп}; \\ S_4 &= E_л^2 - E_п^2. \end{aligned}\right\}, \qquad (1.6)$$

де $\Phi_{лп} = \varphi_л - \varphi_п$.

Із рівнянь (1.4), (1.5) і (1.6) випливає фізичне значення всіх чотирьох параметрів Стокса. Перший параметр Стокса S_1 являє собою суму квадратів амплітуд (інтенсивностей) ортогонально поляризованих компонент еліптично поляризованої хвилі. Другий параметр Стокса S_2 є різницею інтенсивностей ортогональних лінійно поляризованих компонент хвилі. Третій параметр Стокса S_3 являє собою різницю інтенсивностей ортогонально поляризованих компонент хвилі в лінійному базисі, повернутому щодо вихідного на кут $\theta = \pi/4$. Четвертий параметр Стокса S_4 являє собою різницю інтенсивностей поляризованих по колу компонент хвилі з протилежним напрямком обертання.

У підсумку з урахуванням фізичного сенсу чотирьох параметрів Стокса їх можна представити у вигляді:

$$\left.\begin{aligned} S_1 &= E_x^2 + E_y^2; \\ S_2 &= E_x^2 - E_y^2; \\ S_3 &= E_{x(45^o)}^2 - E_{y(45^o)}^2; \\ S_4 &= E_л^2 - E_п^2. \end{aligned}\right\}, \qquad (1.7)$$

Усі чотири параметри Стокса мають одну й ту саму розмірність, легко вимірюються СРПК і можуть бути використані в розв'язанні задачі поляризаційної

селекції луна-сигналів навігаційного об'єкта, який перебуває в складних умовах атмосферного середовища за траєкторією руху судна.

Оскільки луна-сигнал складного об'єкта є частково поляризованим, то параметри Стокса в рівняннях (1.4) - (1.7) записуються з усередненою правою частиною:

$$\left.\begin{aligned} S_1 &= \left\langle E_x^2 \right\rangle + \left\langle E_y^2 \right\rangle; \\ S_2 &= \left\langle E_x^2 \right\rangle - \left\langle E_y^2 \right\rangle; \\ S_3 &= \left\langle E_{x(45^o)}^2 \right\rangle - \left\langle E_{y(45^o)}^2 \right\rangle; \\ S_4 &= \left\langle E_л^2 \right\rangle - \left\langle E_п^2 \right\rangle. \end{aligned}\right\}. \qquad (1.8)$$

Для частково поляризованої хвилі перший параметр Стокса є загальним для інтенсивностей поляризованої та неполяризованої компонент електромагнітної хвилі. У реальних умовах функціонування суднової РЛС поляризація хвилі, що приймається антеною суднової РЛС від складного об'єкта, залежить від властивостей атмосферного утворення та навігаційного об'єкта, які розсіюють (відбивають), і не збігається з поляризацією приймальної антени. Обробка луна-сигналу сумарної частково поляризованої хвилі відбувається без урахування її поляризаційних характеристик і тому не є оптимальною, що не дає змоги розв'язати задачу поляризаційної селекції луна-сигналу навігаційного об'єкта. Тому виникає необхідність раціональної побудови суднового радіолокаційного комплексу, що реалізує поляризаційні ефекти з використанням енергетичних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі та оптимального статистичного синтезу алгоритмів виявлення та розрізнення поляризованих луна-сигналів навігаційного об'єкта за наявності луна-сигналів частково поляризованих завад атмосферного утворення. При цьому сумарний частково поляризований луна-сигнал характеризується поляризаційною матрицею Мюллера, елементами якої є дійсні енергетичні параметри Стокса. Електромагнітна хвиля на випромінювання і приймання подається у вигляді двох матриць.

Відбита від складного об'єкта електромагнітна хвиля характеризує поле, індуковане невідомим розподілом відбивачів складного об'єкта під час їхнього опромінення повністю поляризованими електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій у лінійному та круговому базисах, а в окремому разі використовується й неполяризована хвиля на випромінювання. Результат взаємодії опромінюваної хвилі зі складним об'єктом отримують шляхом множення вектору Стокса опромінюваної хвилі певної поляризації на матрицю Мюллера, унаслідок чого обчислюють вектор Стокса відбитої хвилі й утворюють інформаційний канал, представлений трьома матрицями:

$$\begin{bmatrix} S_{1від} \\ S_{2від} \\ S_{3від} \\ S_{4від} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ S_{3вип} \\ S_{4вип} \end{bmatrix}. \qquad (1.9)$$

Для кожної поляризації електромагнітної хвилі, яка опромінює складний об'єкт, матриці в (1.9) матимуть свої елементи. Елементи матриці Мюллера визначають експериментально під час послідовного опромінення складного об'єкта неполяризованою хвилею, хвилею лінійної поляризації (вертикальною або горизонтальною), хвилею лінійної поляризації з нахилом вектору хвилі 45° і хвилею кругової поляризації. Отримана поляризаційна структура луна-сигналу складного об'єкта дасть змогу розрізнити за поляризаційною структурою луна-сигналу індивідуальні характеристики спостережуваного СРПК навігаційного об'єкта на тлі атмосферного утворення.

Поляризаційний напрям компенсації атмосферних завад під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів є альтернативним вирішенням наявної проблеми. При цьому може використовуватися поляризаційна енергетична матриця розсіювання, у якої всі її елементи є дійсними енергетичними параметрами Стокса і легко вимірюються СРПК. Для виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта можна також використовувати і матрицю когерентності, яка складається з двох матриць, матриці когерентності

монохроматичної складової та матриці когерентності флуктуаційної складової, тобто у вигляді суми матриць когерентності незалежних енергетичних потоків. Використання ж комплексних статистичних елементів матриці Джонса в оперативній практиці не дає змоги розв'язати задачу поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень за траєкторією руху судна. В оперативній практиці СРПК розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів може бути виконано також із використанням ступеня поляризації луна-сигналів складного об'єкта.

Для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища за траєкторією руху судна, може бути використано статистичний синтез алгоритмів виявлення та розрізнення поляризаційних луна-сигналів навігаційного об'єкта за наявності частково поляризованої завади атмосферного утворення, що ґрунтується на статистичних критеріальних параметрах Стокса. При цьому використовується апріорна інформація, що характеризує навігаційний об'єкт і атмосферне утворення. Сукупністю ознак, якими характеризуються розпізнавані СРПК об'єкти, є параметри Стокса, які утворюють предиктор, складовими якого є самі параметри Стокса $\overline{S}(S_1, S_2, S_3, S_4)$, а ймовірнісними характеристиками предиктора є відомі закони розподілу параметрів Стокса, які використані для навігаційного об'єкта й атмосферного утворення [146]:

$$\begin{aligned}
&\frac{W(S_1/HO)}{W(S_1/AУ)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{HO}}\cdot e^{-\frac{(S_1-m_{HO})^2}{2\sigma_{HO}^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{AУ}}\cdot e^{-\frac{(S_1-m_{AУ})^2}{2\sigma_{AУ}^2}}};\ \frac{W(S_2/HO)}{W(S_2/AУ)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{HO}}\cdot e^{-\frac{(S_2-m_{HO})^2}{2\sigma_{HO}^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{AУ}}\cdot e^{-\frac{(S_2-m_{AУ})^2}{2\sigma_{AУ}^2}}};\\
&\frac{W(S_3/HO)}{W(S_3/AУ)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{HO}}\cdot e^{-\frac{(S_3-m_{HO})^2}{2\sigma_{HO}^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{AУ}}\cdot e^{-\frac{(S_3-m_{AУ})^2}{2\sigma_{AУ}^2}}};\ \frac{W(S_4/HO)}{W(S_4/AУ)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{HO}}\cdot e^{-\frac{(S_4-m_{HO})^2}{2\sigma_{HO}^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{AУ}}\cdot e^{-\frac{(S_4-m_{AУ})^2}{2\sigma_{AУ}^2}}},
\end{aligned} \tag{1.10}$$

Розв'язання цих рівнянь дасть змогу отримати критеріальні параметри Стокса . Якщо виміряні СРПК параметри Стокса $S_{вим}$ більші за критеріальні $S_{кр}$, то на індикаторі СРПК або дисплеї комп'ютера є луна-сигнал тільки навігаційного об'єкта, а якщо $S_{вим}$ виміряні СРПК менші за $S_{кр}$, то на індикаторі СРПК або дисплеї комп'ютера є луна-сигнал тільки атмосферного утворення.

1.4 Висновки за розділом 1

1 Недостатнє наукове обґрунтування положень щодо забезпечення необхідного рівня підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів потребує узагальнення та подальшого розвитку методології наукового дослідження поляризаційної структури відбитих від складних об'єктів сигналів у поєднанні з відповідними методами їх селекції.

2 Процеси поляризаційної селекції СРПК забезпечуються поліпшенням їхніх технічних характеристик включенням до складу пристроїв, які використовують поляризаційні ефекти в радіолокаційному каналі, що дають змогу реалізувати методи вимірювання поляризаційних параметрів луна-сигналів складних об'єктів.

3 Теоретична і практична реалізація методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів радіолокаційного спостереження СРПК пов'язана з відбивною здатністю складних об'єктів за допомогою матриць Мюллера та матричним параметричним представленням випромінюваних і відбитих електромагнітних хвиль.

4 Наявні поляризаційні моделі об'єктів радіолокаційного спостереження, представлені матрицями Джонса, не відображають поляризаційних властивостей складних об'єктів під час радіолокаційного розпізнавання навігаційних об'єктів, які перебувають у складних умовах атмосферного середовища, а тому виникає потреба у використанні таких поляризаційних матричних моделей, як енергетична матриця розсіювання, матриця когерентності, а також ступеня поляризації луна-сигналів частково поляризованої хвилі та статистичних критеріальних параметрів Стокса.

5 Реалізація методологічних підходів до розв'язання науково-прикладних задач підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів

пов'язана з розробкою та використанням методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів і вдосконаленням вузлів та елементів СРПК, які реалізують методи поляризаційної селекції та забезпечують ефективність функціонування СРПК у складних умовах атмосферного середовища.

Викладені наявні проблеми функціонування суднових радіолокаційних комплексів, що забезпечують безпеку судноводіння, підкреслюють доцільність наукових досліджень, результати яких забезпечать підвищення ефективності функціонування суднових РЛС у складних умовах атмосферного середовища по траєкторії руху судна.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СРК

2.1 Обґрунтування вибору напряму наукового дослідження

Кліматичні умови в глобальному масштабі нині істотно змінилися. Періодичність катастрофічних явищ погоди за траєкторією руху судна не відповідають багаторічному тренду, що призводить до значних помилок у їхньому прогнозі. Ефективність функціонування суднових СРК є недостатньою для радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах небезпечних атмосферних перешкод. Виникла необхідність у підвищенні ефективності функціонування суднових СРК.

Наукове дослідження, виконане в дисертації, належить до сфери функціонального і структурного аналізу суднового радіолокаційного комплексу (СРК), що реалізує методи поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні атмосферних утворень.

По суті, з Максвелла йде розуміння поляризаційних явищ, що призвели в радіофізиці до поляризаційних досліджень, а в радіолокації до використання запропонованих у 1852 році Дж. Стоксом чотирьох енергетичних (дійсні) параметрів, що дають змогу описати частково поляризовані, повністю поляризовані та неполяризовані електромагнітні хвилі за допомогою цих, параметрів, які можуть бути виміряні на практиці. З урахуванням матричного підходу Г. Мюллера в теорії поляризації з'явилася можливість використовувати матриці Мюллера до опису роботи радіолокаційних поляриметричних систем з поляризаційною селекцією радіолокаційних сигналів.

Роботи Р. Джонсона, М. Вінера, Г. Мюллера та низки інших, переважно американських учених у 50-х роках, стимулювали інтерес радіофізиків до частково поляризованих хвиль, не тільки в оптиці, а й у радіолокації. Початком радіолокаційної

поляриметрії можна вважати дослідження Дж. Сінклера (George Sinelair) у 1946 році, який ввів матричне уявлення радіолокаційної цілі як перетворювача поляризаційного стану зондувального сигналу.

Процес розвитку радіолокаційної поляриметрії дає змогу ефективно використовувати накопичену інформацію щодо попередніх розробок і повною мірою врахувати чинники навколишнього середовища. Філософське осмислення розвитку розглядають під час проведення наукового дослідження як методологію, як систему змін і спадкоємності змін та нездоланність нового. Без розгляду процесу розвитку об'єкта (у цьому разі суднової радіолокаційної системи з погляду її ефективності) застосування системного підходу не дає змоги одержати жодних нових нетривіальних і серйозних наукових результатів, актуальних у цей час. Тому філософське осмислення процесу розвитку дає змогу визначити як "об'єкт дослідження", так і "предмет дослідження" під час дослідження власне суднових СРК (активне формування зондувальних сигналів, пасивний об'єкт радіолокаційного спостереження), які наразі є найскладнішим, найбільш інформаційно насиченим видом суднового радіоелектронного комплексу (РЕК), основне завдання якого відповідає удосконаленню функцій отримання радіолокаційних даних про пасивний об'єкт. Виходячи з основного завдання вдосконалення суднової СРК, вибір напряму наукового дослідження ґрунтується на проведенні експертного оцінювання можливих варіантів розв'язання задачі з отримання повнішої інформації про навігаційний об'єкт радіолокаційного спостереження в складних умовах атмосферного середовища з використанням відомостей про зв'язок параметрів складного об'єкта з радіолокаційними сигналами за такими критеріями:

- актуальність;
- наукова новизна;
- економічна ефективність;
- удосконалення функцій отримання радіолокаційних даних;
- відповідність паспорту спеціальності;
- реалізованість у суднових СРК.

Крім традиційних завдань (функцій) виявлення та отримання кількісної інформації про рух об'єктів спостереження, суднова СРК має здійснювати їхню селекцію (виявлення навігаційних об'єктів на тлі атмосферних утворень), а її багатофункціональність і поляризаційна ефективність спрямовані на збільшення енергетичних показників і безпеки транспортних перевезень. Можливість використання експертних оцінок під час аналізу та синтезу багатофункціональних поляриметричних суднових РЛС ґрунтується на аргументації та кількісних оцінках розв'язання задачі методами, що використовуються, які дають змогу забезпечити стійке функціонування в умовах можливої протидії антисистеми.

Глибина вивченості обраного напряму дослідження визначається рівнем методологічної забезпеченості, що включає вихідні вимоги та принципи, теоретичне обґрунтування використовуваних методів, алгоритмів і процедур, а його важливість відповідає міжнародним договорам і законам України. Оцінювання напрямів наукового дослідження ґрунтується на наведених у табл. 2.1 показниках з урахуванням критеріальних значень оцінюваних чинників кожного напряму.

Існуючий принцип побудови суднових СРК і використовувані в них методи селекції луна-сигналів зустрічних за траєкторією руху судна об'єктів за наявності небезпечних атмосферних утворень (випадні опади великої інтенсивності та низька купчасто-дощова хмарність) не дають змоги впевнено виділити луна-сигнал зустрічного навігаційного об'єкта з луна-сигналу атмосферного утворення.

Наведена і представлена в табл. 2.1 експертна оцінка значущості досліджень технологічного вдосконалення систем радіолокаційного спостереження об'єктів за траєкторією руху судна засвідчила, що на сучасному етапі розвитку суднових радіолокаційних комплексів такий варіант розв'язання поставленої задачі всебічно вивчений і не є актуальним. Технологічне вдосконалення елементів конструкції систем суднових радіолокаційних комплексів на цей час також досягло свого максимуму, а окремі варіанти розв'язання задачі не впливають на вдосконалення функціональних можливостей суднових СРК. Розроблення напрямів щодо технологічного вдосконалення наявної в суднових СРК системи селекції корисних сигналів, елементів конструкції антенної системи, системи розділення

радіолокаційних сигналів за їхнім поляризаційним станом не відповідають паспорту спеціальності, не підтверджуються їхньою економічною ефективністю і не можуть бути використані в існуючих суднових СРК.

Таблиця 2.1

Вибір напряму наукового дослідження з використанням експертної оцінки можливих варіантів вирішення завдання підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів

Проблема	Критерії						
	Актуальність	Наукова новизна	Економічна ефективність	Реалізованість	Важливість вирішення завдання	Відповідність паспорту спеціальності	Оцінка
1 Технологічне вдосконалення системи селекції корисних сигналів у суднових СРК	+	+	-	-	+	-	3
2 Технологічне вдосконалення елементів конструкції антенної системи суднової СРК	+	+	-	-	+	-	3
3 Удосконалення системи розділення радіолокаційних сигналів за їх поляризованим станом електромагнітної хвилі	+	+	-	+	+	-	4
4 Розроблення системи опрацювання луна-сигналів складних об'єктів радіолокаційного спостереження	+	+	-	+	+	+	5
5 Удосконалення теоретичного опису та розроблення практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності функціонування СРК за рахунок використання енергетичних поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі, що забезпечують дистанційне радіолокаційне виявлення навігаційних об'єктів за траєкторією судна в складних умовах атмосферного середовища	+	+	+	+	+	+	6

Експертне оцінювання значущості щодо розроблення системи оброблення луна-сигналів складних об'єктів радіолокаційного спостереження засвідчило, що здебільшого всі критерії, що оцінюються, мають позитивну оцінку, окрім економічної, яку можна забезпечити лише в процесі розроблення процедур оцінювання та реалізації шляхів функціонального і конструктивного розвитку суднового радіолокаційного комплексу.

За результатами експертних оцінок найактуальнішим і найдоцільнішим слід визнати спосіб удосконалення теоретичного опису та розроблення практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів за рахунок використання енергетичних поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі, що забезпечують дистанційне радіолокаційне виявлення навігаційних об'єктів за траєкторією судна у складних умовах атмосферного середовища, у зв'язку з цим саме на його розв'язання спрямоване наукове дослідження і тема дисертації.

З огляду на обраний напрям наукового дослідження, а також на підставі результатів аналізу інформаційного пошуку, виконаного в першому розділі, було визначено тему наукового дослідження - підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів.

Проблема підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів ґрунтується на використанні накопиченої інформації про попередні розробки, а також на результатах експлуатації і не є новою, проте шляхи функціонального та конструктивного розвитку суднових радіолокаційних комплексів мають бути надалі пристосовані також до існуючих методів моделювання та ухвалення ефективних рішень з урахуванням накопиченої інформації про попередні розробки.

Розв'язання проблем, визначених у дисертаційному дослідженні, є продовженням розробок з радіолокаційної поляриметрії В. М. Бернера, Д. Габора, А. та інш., де виконані дослідження щодо підвищення інформаційної спроможності сигналів транспортних радіолокаційних комплексів за рахунок використання їхньої поляризаційної структури.

До теперішнього часу виконано також наукові дослідження, в яких представлено можливості використання поляризаційних методів у морській радіонавігації. При цьому ці дослідження призначені для отримання деякої додаткової інформації про об'єкти, що міститься в поляризаційному стані відбитих радіолокаційних сигналів від берегових і плавучих радіомаяків, які випромінюють сигнали неоднакової поляризації. Такі суднові радіолокаційні поляриметри працюють в активному режимі під час розв'язання навігаційних задач (судноплавство у вузькостях із визначенням власного місця судна) і в пасивному режимі виявлення об'єктів, що мають власне випромінювання. Розглянуті поляризаційні методи не розв'язують основне завдання безпеки судноводіння під час знаходження навігаційного об'єкта в складних умовах атмосферного середовища судновими СРК - радіовидимість об'єкта радіолокаційного спостереження. Це свідчить про наявність невирішеної наукової проблеми - підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів.

Розв'язання цієї проблеми є особливо актуальним в умовах функціонування суднового радіолокаційного комплексу в складних умовах атмосферного середовища під час забезпечення радіовидимості навігаційних об'єктів на тлі заважаючих відбиттів від атмосферних утворень.

До актуальності цієї теми дослідження необхідно також віднести наступне.

Суднові радіолокаційні комплекси морських транспортних засобів є багатокомпонентними структурними об'єктами, що використовують сукупність радіотехнічних методів для дистанційного спостереження навігаційних об'єктів у навколишньому просторі та точного позиціювання свого судна, при цьому: їхнє функціонування (виявлення навігаційних об'єктів і вимірювання їхніх координат) починається за будь-яких умов атмосферного середовища; їхнім основним експлуатаційним завданням є виявлення навігаційних об'єктів на траєкторії судна, радіолокаційне спостереження за їхнім переміщенням, визначення параметрів їхнього руху для безпечної розбіжності з ними.

При цьому необхідно забезпечити ефективність виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта з луна-сигналу пасивних перешкод із використанням методу поляризаційної селекції.

Важливість вирішення нових завдань зі збільшення функціональних можливостей суднових СРК з метою збереження їхньої працездатності в складних умовах атмосферного середовища визначається Концепцією стійкої національної транспортної політики розвитку всіх видів транспорту на 2007 - 2014 р.р. (Наказ Мінтрансзв'язку України від 05.05.2007 року №360).

Таким чином, можна сформулювати актуальну науково-технічну проблему у сфері розвитку суднових радіолокаційних систем, радіолокаційних технологій та їхньої відповідної структури - дослідження та розробка методів удосконалення інформаційних та експлуатаційних характеристик суднових радіолокаційних комплексів, які б забезпечували підвищення ефективності їхнього функціонування в складних умовах атмосферного середовища.

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до положень транспортної стратегії України на період до 2020 року (Розпорядження КМУ від 20.10.2010 року №2174-р); міжнародної конвенції SOLAS (Safety of life at Sea), (Правило 19); Резолюції MSC. 64(67), 1996; Резолюції А.820 (19), 1995 к експлуатаційним вимогам до РЛС; Державна програма удосконалення функціонування державної системи забезпечення безпеки судноплавства на 2002-2006 р.р. (Постанова КМУ від 28.012002 р., №2961); Положень транспортної стратегії України на період до 2030 року; Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 року «Про заходи щодо забезпечення розвитку України, як морської Держави» (Указ Президента України від 20.05.2008 року №463/2008), а також у рамках наступних держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія»:
«Удосконалення методів безпечного управління судном» № ДР 011U005133 (2020-2022рр.) НДР, розділ 13 «Альтернативний метод визначення характеристик судна», «Удосконалення методів управління та експлуатації суден» № ДР 0123U101463 (2023-2025рр.) НДР , розділ 4 дисертаційної роботи «Розробка стратегії формування системи радіолокаційних сигналів, що базуються на їх поляризаційних параметрах»,

у яких автор дисертації брав участь як виконавець теми.

Наукова спрямованість досліджень відповідає паспорту спеціальності, профілю досліджень, що проводяться кафедрою керування судном Національного університету "Одеська морська академія", основним напрямам спеціальності 05.22.13 - навігація та керування рухом.

2.2 Обґрунтування мети та завдань дисертаційного дослідження

Необхідність підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів визначає вимога практики, яка пов'язана з необхідністю забезпечення селекції навігаційних об'єктів на тлі завад від небезпечних атмосферних утворень.

Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів.

Основною науковою гіпотезою дослідження є теза про те, що підвищення функціональних можливостей суднових радіолокаційних комплексів забезпечується організацією процесів випромінювання, приймання, обробки та аналізу електромагнітних хвиль певної поляризації.

Для досягнення мети та підтвердження наукової гіпотези під час проведення досліджень вирішувалися такі завдання:

Комплексне завдання наукового дослідження - підвищення інформаційних та експлуатаційних характеристик суднових радіолокаційних комплексів, що мають забезпечити їх ефективне функціонування в умовах атмосферних завад. Розв'язання комплексного завдання забезпечується синтезом розв'язання головних завдань.

- Головне завдання №1 - побудова системи моніторингу поляризаційної структури радіолокаційних сигналів з ідентифікацією їх поляризаційних параметрів.
- Головне завдання №2 - розроблення стратегії формування системи радіолокаційних сигналів, що базуються на їх поляризаційних параметрах.
- Головне завдання №3 - розроблення методології підвищення ефективності

функціонування суднових радіолокаційних поляризаційних комплексів в умовах атмосферних перешкод.

Вирішення головних завдань дисертаційної роботи забезпечується виконанням низки додаткових завдань.

Для першого головного завдання:

- розроблення структури суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу;
- розроблення структури антено-хвилеводного тракту суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу.
- аналіз фізичних процесів і методики побудови шестикомпонентного поляризаційного хвилеводного роздільника.

Для другого головного завдання:

- розроблення радіолокаційної моделі основного інформаційного потоку в судновому радіолокаційному поляризаційному комплексі;
- розроблення радіолокаційної моделі відбивних властивостей об'єктів, що спостерігаються судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом;
- структурний аналіз радіолокаційної інформації щодо об'єктів радіолокаційного спостереження судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом.

Для третього головного завдання:

- розроблення методології поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах атмосферних перешкод, з використанням енергетичної матриці розсіювання;
- розроблення методології поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах атмосферних завад, з використанням матриці когерентності;
- розроблення методології поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах атмосферних завад, з використанням ступеня поляризації та статистичних властивостей поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі.

Під час розв’язання кожного головного завдання отримані відповідні наукові результати, а саме:

- **розв'язання головного завдання №1**: побудову системи моніторингу поляризаційної структури радіолокаційних сигналів з ідентифікацією їх поляризаційних параметрів необхідно розглядати з урахуванням режимів функціонування та забезпечення екіпажу судна необхідною для навігації судноводіння повнотою радіолокаційної інформації, шляхом визначення структури і властивостей об'єктів моніторингу, а функціональні можливості СРПК оцінюються поляризаційним виявленням і селекцією як навігаційних об'єктів, так і атмосферних утворень;

- **розв'язання головного завдання №2**: забезпечення радіолокаційної інформації щодо джерела прийнятої системи сигналів, що базуються на тимчасових, просторових і поляризаційних параметрах, які відповідають просторової, тимчасової і поляризаційної структурам електромагнітних хвиль;

- **розв'язання головного завдання №3**: забезпечення ефективності функціонування СРПК в умовах атмосферних завад.

Узагальнення наукових результатів, що отримані під час розв'язання головних завдань дослідження, обумовлено якісним оновленням торговельного флоту, що дає можливість провести наукові дослідження стосовно розвитку суднових СРК і сформулювати наукові положення теорії та практики підвищення ефективності їхнього функціонування в умовах атмосферних завад:

- наукове положення №1 - система моніторингу поляризаційної структури радіолокаційних сигналів, що випромінюються та приймаються антеною СРПК, дає змогу сформувати алгоритм поляризаційних сигналів випромінювання й приймання, здійснити їхній аналіз та інтерпретацію для розв'язання задач поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційного об'єкта, що перебуває в складних умовах атмосферного середовища;

- наукове положення №2 - система сигналів, що базуються на поляризаційних параметрах електромагнітної хвилі є математичною конструкцією, яка відображає особливості перетворення, отримання та опрацювання інформації, щодо ситуації, яка спостерігається СРПК на шляху судна;

- наукове положення №3 – ефективність функціонування СРПК в умовах

атмосферних завад забезпечується процесом керування поляризаційною селекцією шляхом вибору зондуючого сигналу і виділення певної частини відбитих навігаційним об'єктом сигналів.

Наукова значимість розв'язання комплексного завдання полягає у підвищенні інформаційних та експлуатаційних характеристик суднових радіолокаційних комплексів, які мають забезпечувати їх ефективне функціонування в умовах атмосферних завад.

2.3 Системний та структурний підхід до розробки технологічної карти наукового дослідження

Під структурою СРПК або радіолокаційної системи розуміють характер взаємозв'язків і відносин між їхніми елементами, як єдиного цілого, а під перебудовою структури - залежну від обстановки та умов радіолокаційного спостереження зміну складу та функціональної взаємодії частин або системи СРПК, яка забезпечує виконання поставленого завдання. Основне завдання СРПК відповідає вдосконаленню функцій отримання радіолокаційних даних про об'єкти спостереження за будь-яких умов атмосферного середовища. Крім традиційних функцій виявлення та отримання кількісної інформації про рух навігаційного об'єкта, СРПК має здійснювати його селекцію.

Якби СРПК під час розв'язання радіолокаційних задач не потребував би через присутню невизначеність у апріорній інформації про розсіювальні властивості об'єктів радіолокаційного спостереження (навігаційний об'єкт і атмосферне утворення) та статистичних характеристиках, то не було б жодної потреби у формуванні "радіусу" (радіолокаційний канал), що об'єднує СРПК, об'єкт і трасу розповсюдження радіолокаційного сигналу. Використання відомостей про зв'язок параметрів об'єкта з радіолокаційними сигналами дає змогу здійснювати СРПК функціонування в умовах атмосферних завад.

Внутрішньосистемні зв'язки визначають зростання функціональної системи СРПК, що призводить до поліпшення всіх основних функцій і забезпечення

виявлення структури об'єкта моніторингу з необхідною для екіпажу судна повнотою. Зростання функціональних можливостей СРПК як системи також пов'язане з тезаурусом і має безпосередній зв'язок із проведеним імітаційним моделюванням. Однак, імітація функціонування СРПК є досить серйозною і новою проблемою і в літературі з моделювання майже не розглянута [152-164]. Використання тезаурусу в СРПК необхідне через розв'язання задачі з радіолокаційного виявлення та селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень. Оперативна частина тезауруса організована у формі відомостей про радіолокаційні характеристики, спостережуваних СРПК, небезпечних атмосферних утворень і містить інформацію про зв'язок прийнятих всеполяризованою антеною радіолокаційних сигналів з їхніми параметрами.

Селекція навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних утворень, здійснюється порівнянням прийнятих радіолокаційних сигналів з наявними в банку даних СРПК сигналами від відомих атмосферних об'єктів (атмосферні опади різної інтенсивності та фазового стану, які випали назовні), причому прийняті луна-сигнали параметризуються поляризаційними, енергетичними, дійсними параметрами Стокса.

Розв'язання задачі підвищення ефективності функціонування СРПК, як складних технічних систем, виконано розробленням підсистем, кожна з яких виконує певну функцію єдиної складної системи радіолокаційного виявлення та селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у складних умовах атмосферного середовища на шляху судна. Такий підхід забезпечує досягнення високої ефективності функціонування СРПК під час розв'язання поставленої задачі за будь-яких атмосферних умов радіолокаційного спостереження навігаційного об'єкта безпосереднім аналізом з позицій системних методів.

СРПК, як складна технічна система, забезпечує проходження прийнятого всеполяризованою антеною сигналу, його оброблення та подання на екрані дисплея комп'ютера або індикатора для розв'язання основної задачі і складається з таких підсистем:

- процес формування сигналів певної поляризації, що опромінюють об'єкти радіолокаційного спостереження;

- процес випромінювання певної поляризації;
- процес приймання відбитих від об'єктів сигналів і їх поділ за поляризаційними параметрами;
- процес посилення і перетворення відбитих від об'єктів сигналів;
- процес формування енергетичних, дійсних, поляризаційних параметрів Стокса сигналів, відбитих від об'єктів;
- процес побудови фізико-математичних моделей, що дають змогу розв'язувати задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів.

Такий підхід, поряд з аналізом системних і структурних властивостей СРПК, дає змогу сформувати положення щодо спільного дослідження та управління СРПК, що розробляється, з вимогою паралельності здійснення циклів моделювання та його розроблення, а функціональна структура дає змогу описувати взаємозв'язок процедур, які відбуваються в процесі його функціонування. Реалізація певних етапів у розвитку СРПК представляє замкнений цикл наукового дослідження, який системно представлений у вигляді технологічної карти дослідження на рис. 2.1.

2.4 Вибір та обгрунтування методів наукових досліджень

Вибір методів наукового дослідження пов'язаний із теорією розвитку, що має у своєму арсеналі методологічні засоби для моделювання процесу розвитку радіолокаційної системи. Теорія розвитку СРПК полягає в аналізі його системних, структурних і організаційних властивостей, підвищенні якості та можливостей функціонування в умовах атмосферного середовища. Вихідним моментом у дослідженні розвитку суднової радіолокаційної системи є аналіз двох видів структур - морфологічної (МС) і функціональної (ФС), які при взаємодії утворюють основний каркас розвитку СРПК. Функціональна структура описує взаємозв'язок процедур у процесі функціонування СРПК з урахуванням зміни окремих елементів системи.

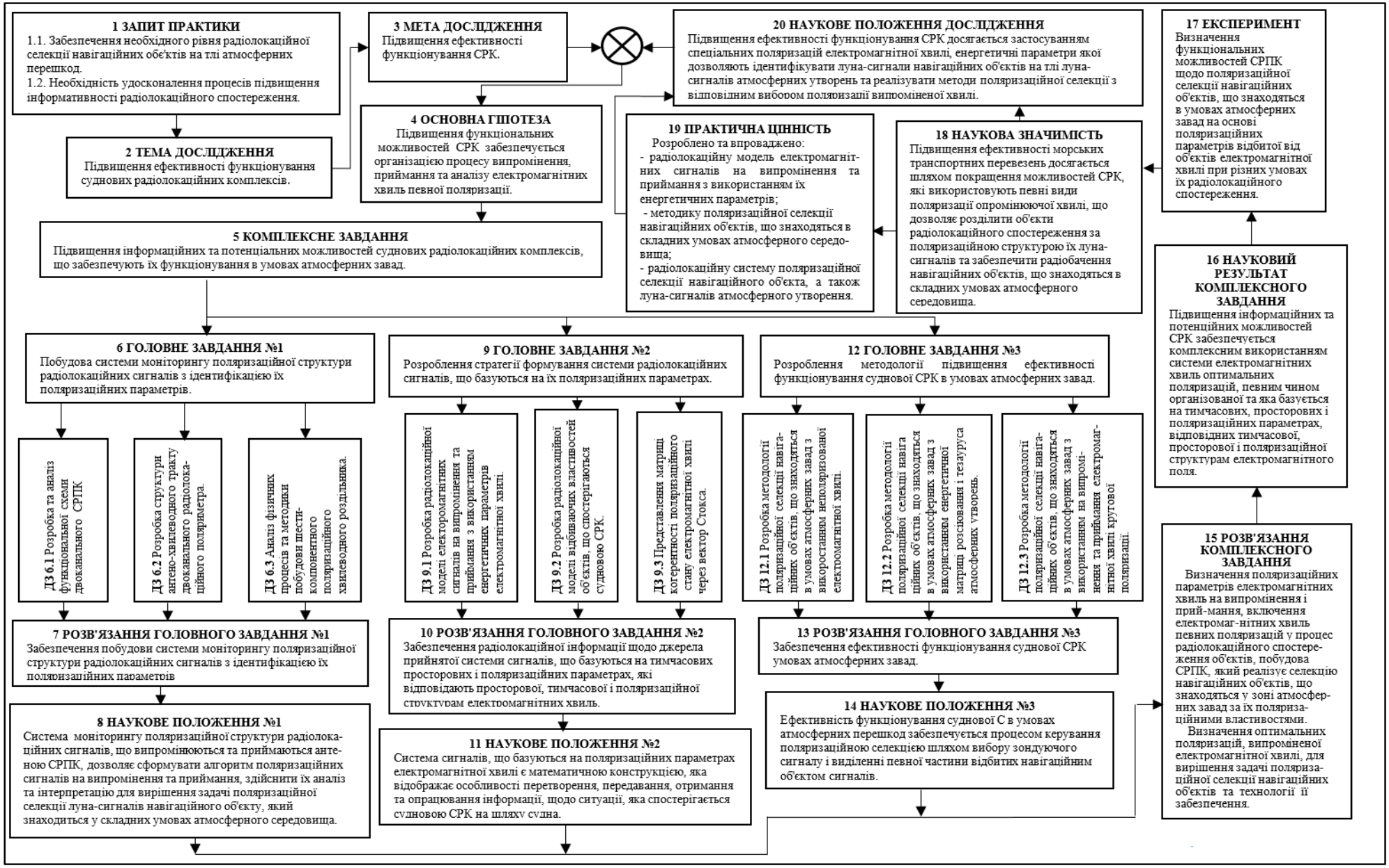


Рис.2.1 – Технологічна карта дослідження

Морфологічна структура відображає спосіб вивчення властивостей суднової радіолокаційної системи від "частини до цілого", від дослідження підсистем до визначення функції СРПК [64]. Процедури оцінювання та реалізації шляхів функціонального розвитку СРПК мають бути пристосовані до фізико-математичних методів моделювання розглянуті у наступних розділах.

Нині в радіолокаційній поляриметрії при виконанні наукових досліджень, пов'язаних із завданнями радіолокаційного виявлення об'єктів, розпізнавання, поляризаційної селекції, оброблення прийнятих сигналів і формування сигналу на випромінювання, імітаційному й експериментальному моделюванні використано такі методи: статистичний, фізико-математичного моделювання, матричний, поляризаційних вимірювань і оброблення радіолокаційної інформації. Будемо вважати, що після опромінення об'єкта радіолокаційного спостереження електромагнітними хвилями фіксованих поляризацій, на вхід СРПК надходить певна система сигналів у найзагальнішому випадку часткової поляризації, яку необхідно інтерпретувати стосовно завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів. Невизначеності, спричинені атмосферними завадами, шумами збоями, відходженнями параметрів, заважають зазначеній інтерпретації, призводять до хибних щодо реальної ситуації рішень. Тут необхідно використовувати статистичний метод, за критеріальними параметрами якого ухвалюється рішення, що відповідає поточній обстановці [165] .

Складність системи сигналів пов'язана з її просторово-часовими і поляризаційними характеристиками і розглядається як математична структура, що відображає особливості перетворення, передавання, приймання, оброблення та аналізу інформації про спостережувану ситуацію на шляху судна. При цьому використовуються фізико-математичні моделі та матричні методи розв'язання задач поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, а також зв'язок із тезаурусом, що утворює відомості про атмосферний об'єкт.

Особливу роль у складній системі сигналів СРПК відіграють методи аналітико-імітаційного моделювання, що базуються на дійсних, енергетичних, поляризаційних параметрах Стокса. При цьому комбінування процедур оцінювання

параметрів складного об'єкта радіолокаційного спостереження дає змогу виокремити луна-сигнал навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта за допомогою енергетичної матриці, матриці когерентності, ступеня поляризації та статистичних критеріальних параметрів [119, 134, 150, 165].

З метою підвищення енергетичного потенціалу СРПК використовується метод повного приймання луна-сигналів складних об'єктів радіолокаційного спостереження (всеполяризована антена, шестикомпонентний роздільник поляризації та лінійний двоканальний приймач). Для дослідження фізичних процесів, що протікають в атмосферному утворенні, яке входить до складу складного об'єкта радіолокаційного спостереження, використовується метод математичного моделювання, що враховує феноменологічний (причинно-наслідковий) стан об'єкта.

Радіолокаційна система сигналів має всі системні атрибути, такі як цілісність, структуру, елементи, організацію. Ці ознаки випливають із просторово-часової та поляризаційної структур електромагнітної хвилі, а також з особливостей їхнього формування, динаміки радіолокаційного каналу, функцій, що реалізуються СРПК. Структурно система радіолокаційних сигналів забезпечується матеріальністю і фізичними характеристиками випромінюваного або розсіяного складним об'єктом електромагнітного поля. Під час формування СРПК з окремих сигналів відповідної поляризаційної системи виникає певний якісний стрибок у властивостях, а використання експериментального методу дослідження системи сигналів відповідає виявленню механізму цього якісного стрибка, за якого кожний порційний луна-сигнал має доставляти нову інформацію про навігаційний об'єкт.

2.5 Експериментальний метод порівняльного аналізу радіолокаційної інформації щодо об'єктів радіолокаційного спостереження СРПК

Будемо виходити з того, що джерелом розсіяного поля є струми, що збуджуються в деякому обмеженому об'ємі атмосфери, де розташований навігаційний об'єкт, падаючим полем, сформованим плоскою електромагнітною хвилею, на досить великій відстані від цього об'єму (розсіювача). Характеристики

розсіяного поля також оцінюються на досить великій відстані від розсіювача. Ці дві частини у своїй сукупності формують повне поле з урахуванням особливості поляризаційної структури хвиль, що поширюються, та обмеженості об'єму.

Експериментальні радіолокаційні спостереження проводилися одночасно на СРПК і АМРК у 2019 і 2020 р.р. у районі аеропорту Запоріжжя з порівняльною оцінкою за отриманими знімками з екранів дисплеїв комп'ютерів випадних опадів у даному регіоні. Радіолокаційна поляризаційна селекція навігаційних об'єктів, що перебувають в зоні випадних опадів різної інтенсивності у прибережній території Азовського моря здійснювалась за допомогою СРПК по кольоровим знімкам з екрану комп'ютера, результати якої представлені у розд.6 і додатках А і Б.

2.6 Висновки за розділом 2

Безпека судноплавства на сучасному етапі, з одного боку, залежить від рівня професійної підготовки судноводіїв, оснащення судна високотехнологічними навігаційними засобами, а з іншого боку - складним станом атмосферного середовища за траєкторією руху судна, яке значною мірою погіршує дистанційне, радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів судновими СРК. У суднових СРК дотепер ще недостатня інформативність використаних методів селекції навігаційних об'єктів, а в радіолокаційних системах селекції компенсація луна-сигналів атмосферних утворень є незначною та не знижує їхньої маскувальної дії, що створює хибні луна-сигнали на дисплеї суднового комп'ютера або індикатора.

1 З урахуванням актуальності, наукової новизни, практичної значущості, відповідності паспорту спеціальності за основними напрямами спеціальності 05.22.13 - навігація та керування рухом, визначено тему наукового дослідження, спрямовану на підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів.

2 Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів необхідно забезпечити опроміненням об'єктів радіолокаційного спостереження електромагнітними хвилями чотирьох фіксованих поляризацій і неполяризованої хвилі, повним прийомом луна-сигналів спостережуваних об'єктів,

їхньою обробкою, а також розділенням та поданням на індикаторі або дисплеї комп'ютера окремо кожного об'єкта. Це завдання може бути вирішене шляхом теоретичного опису і практичної рекомендації щодо використання основних інформаційних параметрів електромагнітної хвилі - поляризаційних параметрів, що забезпечують функціонування суднового радіолокаційного комплексу в складних умовах атмосферного середовища на шляху судна.

3 Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування СРПК в умовах атмосферних перешкод.

4 Комплексною задачею дисертаційного дослідження є підвищення інформативних та експлуатаційних характеристик СРПК одночасною селекцією навігаційних об'єктів за кількома поляризаційними параметрами радіолокаційних сигналів, що забезпечують його функціонування за будь-яких умов атмосферного середовища.

5 Розв'язання комплексної задачі в дисертаційному дослідженні виконано шляхом синтезу наукових результатів трьох головних і дев'яти додаткових задач.

6 На базі системного підходу замкнутий цикл наукового дослідження представлено у вигляді технологічної карти наукового дослідження.

7 Наукові дослідження, що виконуються в дисертації, розглядають аналіз радіолокаційних методів та їх удосконалення, функціональні і структурні особливості суднових СРК, що реалізують поляризаційну селекцію навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень за траєкторією руху судна.

РОЗДІЛ 3

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ З ІДЕНТИФІКАЦІЄЮ ЇХ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ

Побудова експериментального СРПК нерозривно пов'язана з розвитком, під яким розуміють кількісну і якісну зміну його структури, що полягає в приймальності змін і розробленні нового. При цьому використовується спосіб вивчення властивостей "від частини до цілого", від дослідження пристроїв і вузлів до визначення функцій СРПК. Збільшення його функціональних можливостей полягає в розширенні реалізованих функцій і в переході до поляризаційного режиму з виявлення навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних утворень [166-170]. При цьому критерієм функціонування СРПК є ефективність радіолокаційного розв'язання задач поляризаційної селекції навігаційних об'єктів. Процес удосконалення СРПК передбачає зміну функцій окремих елементів системи, а концепція нерозривного зв'язку та єдності принципів системності та розвитку є центральною. Під час розвитку СРПК накопичується тезаурус, що відповідає інформації, яка забезпечує самовідображення системи та накопичення його відомостей про зовнішнє середовище.

У структурі СРПК визначається характер зв'язків і відносин між елементами, як єдиного цілого, а перебудова структури містить зміну складу та функціональної взаємодії його частин залежно від виконання завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферного утворення. СРПК має відповідати вдосконаленню функцій отримання радіолокаційної інформації про об'єкти радіолокаційного спостереження. Тому, крім традиційних функцій отримання кількісної інформації про рух навігаційних об'єктів, СРПК необхідно здійснювати їх поляризаційну селекцію на тлі атмосферних утворень, оскільки поляризаційні характеристики електромагнітної хвилі є надійним інформаційним параметром про навігаційні об'єкти.

Поляризаційна селекція ґрунтується на використанні елементів матриці когерентності, ступеня поляризації луна-сигналів об'єктів, які спостерігаються СРПК, елементах енергетичної матриці розсіювання об'єктів, а також статистичних параметрів Стокса луна-сигналів об'єктів, що спостерігаються.

Практичне застосування поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі пов'язане з використанням елементів і пристроїв, які дають змогу СРПК випромінювати електромагнітні хвилі певних поляризацій, а також неполяризовану хвилю й аналізувати поляризаційні параметри луна-сигналів навігаційного об'єкта й атмосферного утворення.

У цьому розділі розглянуто принцип побудови експериментального макета СРПК, що дає змогу практично реалізувати поляризаційну селекцію луна-сигналів навігаційного об'єкта, який перебуває в зоні атмосферного утворення.

В основу поляризаційних методів, що реалізуються в СРПК, покладено взаємозв'язок поляризаційної структури електромагнітного поля як на випромінювання, так і на приймання, із визначеними поляризаційними параметрами на виході та вході всеполяризованої антени СРПК, а також на виході систем оброблення радіолокаційної інформації.

Якщо на випромінювання використовується електромагнітна хвиля певної поляризації (лінійної, кругової, еліптичної або неполяризованої хвилі), то на вхід всеполяризованої антени в режимі приймання надходить відбита від об'єктів частково поляризована хвиля, аналіз поляризаційних параметрів якої дає змогу використовувати поляризаційні методи селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у складних атмосферних умовах середовища на шляху судна.

У зв'язку з тим, що традиційні методи представлення поляризації електромагнітної хвилі за допомогою параметрів поляризаційного еліпса виявляються в практичних додатках незручними, у СРПК перевагу надано параметричним методам аналізу поляризаційної структури електромагнітної хвилі як на випромінювання, так і на приймання. Висновок про параметри частково поляризованого поля роблять за середніми в часі значеннями поляризаційних

параметрів Стокса, пов'язаних лінійними залежностями з елементами поляризаційних матриць.

3.1 Структурна схема СРПК

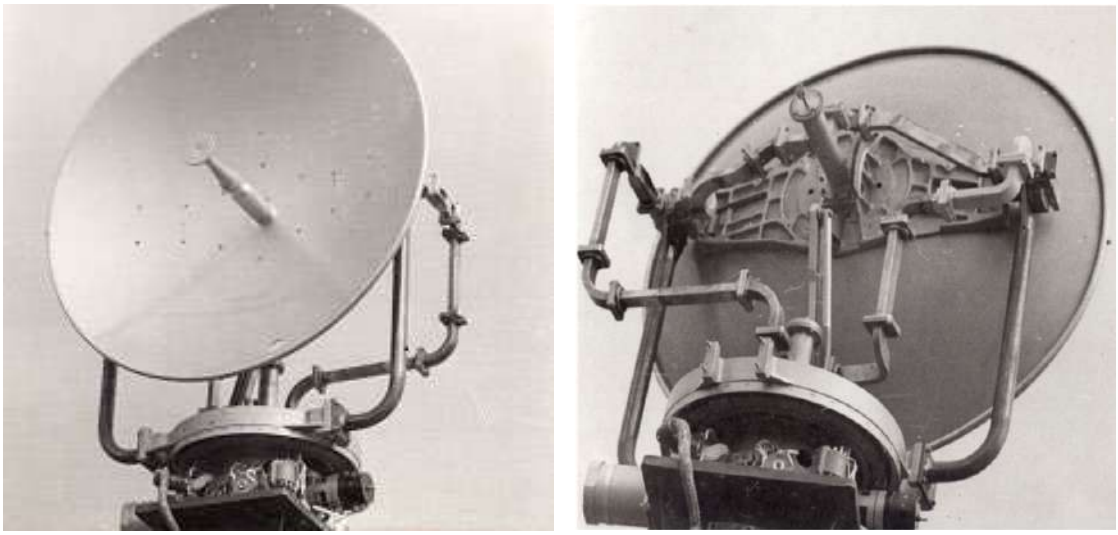
У СРПК аналіз поляризації луна-сигналів частково поляризованої хвилі, що надходить на вхід всеполяризованої антени, здійснюється за двома ортогональними компонентами, кожна з яких перетворюється і посилюється в окремому лінійному каналі. Використовується всеполяризована антена з регульованими поляризаційними параметрами електромагнітної хвилі на випромінювання. Антенна система СРПК дає змогу послідовно випромінювати електромагнітні хвилі чотирьох фіксованих поляризацій (три лінійні, одна кругова, а також неполяризовану хвилю). Для підвищення перешкодозахищеності, надійності та безпеки транспортних перевезень СРПК забезпечує селекцію луна-сигналів навігаційних об'єктів під час одночасного здійснення кількох функцій із певною динамікою їхньої зміни. Для цього в структурі СРПК застосовуються пристрої, які реалізують подібні функції, і кожне з них відповідає окремому каналу оброблення отриманої інформації, що дає змогу оцінювати навколишнє середовище й керування рухом судна з урахуванням даних СРПК за наявності складних умов атмосферного середовища. СРПК, функціонуючи в складному атмосферному середовищі, забезпечує одержання повнішої інформації про навігаційний об'єкт, що перебуває в зоні атмосферних утворень. У разі використання на випромінювання неполяризованої хвилі та вимірювання її луна-сигналів від об'єктів радіолокаційного спостереження, у пристроях оброблення застосовуються лінії затримки для накопичення прийнятої інформації.

Практичне використання поляризаційних ефектів для підвищення ефективності функціонування СРПК за рахунок збільшення їхнього енергетичного потенціалу, а також для розв'язання задач поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища, пов'язане з необхідністю застосовувати в СРПК елементи та пристрої, які дають змогу випромінювати електромагнітні хвилі з певною фіксованою поляризацією та аналізувати

поляризаційні параметри луна-сигналів, спостережуваних об'єктів. СРПК з поляризаційною селекцією луна-сигналів у загальному випадку частково поляризованої хвилі відрізняються від існуючих суднових РЛС наявністю в антенно-хвильоводному тракті спеціальних високочастотних елементів, призначених для певного перетворення поляризаційних параметрів випромінюваних і прийнятих радіолокаційних сигналів. Усі високочастотні елементи і пристрої антенно-хвильоводного тракту СРПК є стандартними, заводського виготовлення і використані для конструкції всеполяризованої антени з регульованими поляризаційними характеристиками на випромінювання, що підвищує енергетичний потенціал СРПК залежно від типу атмосферних утворень і поляризації випромінюваної хвилі.

Для формування електромагнітних хвиль певних поляризацій використано хвилеводний пристрій на прямокутному хвилеводі ($\lambda = 3{,}2$ см) з двома щілинними мостами, двома феритовими фазообертачами, узгодженим навантаженням, керованим регулятором фаз. Розв'язку каналів здійснюють феритові хвилеводні циркулятори, антенні перемикачі, Е, Н, Т - хвилеводні мости, поляризаційний селектор, комутатори і хвилеводні переходи.

Як антенний пристрій у СРПК використано всеполяризовану антену з керованою поляризацією на випромінювання (Рис. 3.1), що дає змогу оптимально реалізувати енергетичні можливості СРПК шляхом представлення поляризації електромагнітної хвилі на випромінювання та прийом дійсними енергетичними параметрами Стокса. Оскільки питання розрахунку й розроблення антен суднових СРК у діапазоні НВЧ уже достатньо розроблено й описано в спеціальній літературі [171-174], то розглянуто особливість побудови антени СРПК з керованою поляризацією на випромінювання електромагнітних хвиль і специфіку перетворення електромагнітної хвилі, що надходить на вхід антени в режимі приймання, з огляду на те, що найважливішим напрямком сучасної радіолокації є створення й практична реалізація методів одержання найповнішої радіолокаційної інформації про складні об'єкти в режимі приймання [175-195].



а) *б*)

Рис.3.1. Зовнішній вигляд всеполяризованої антени СРПК

Радіолокаційне бачення навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферного утворення (зливові опади певної інтенсивності), на екранах індикаторів СРПК (Рис. 3.2) є частиною розв'язання задачі їх поляризаційної селекції.



Рис.3.2. Індикаторна система СРПК

При цьому можливі кілька підходів до класифікації методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, залежно від виду поляризації сигналу, що зондує обидва об'єкти одночасно. Радіолокаційними характеристиками як навігаційних об'єктів, так і атмосферних утворень у СРПК є дійсні енергетичні поляризаційні елементи матриць Мюллера, що володіють високою інформативною ознакою під час розв'язання задачі радіолокаційного виявлення і спостереження навігаційних об'єктів на шляху судна. При цьому використовується розсіяне випромінювання складних об'єктів, а радіолокаційними характеристиками складного об'єкта є поляризаційні параметри луна-сигналів електромагнітної хвилі. Структурно система луна-сигналів має всі системні атрибути: цілісність, структуру, елементи, організацію. Ці ознаки випливають із просторово-часової та поляризаційної структур електромагнітної хвилі. Цілісність структури системи сигналів у СРПК забезпечується матеріальністю і фізичними характеристиками випромінюваного і розсіяного складним об'єктом електромагнітного поля, інформативними властивостями сигналів, які входять до системи, а також певною автономністю цієї системи від структури, цілей, завдань і функцій аналізатора і споживача, що доставляється системою сигналів СРПК інформацією екіпажу судна. Автономність системи поляризаційних сигналів у СРПК споріднена автономності тезаурусу атмосферних утворень, найважливішою частиною якого є екіпаж судна, а саме те, що він є частиною системи сигналів. СРПК має забезпечити, з урахуванням побудови його функціональної схеми, розв'язання прямої задачі виявлення луна-сигналу складного об'єкта і селекцію луна-сигналу навігаційного об'єкта в конкретних умовах навколишнього середовища на шляху судна. При цьому джерела луна-сигналів складного об'єкта вважаються відомими за своїми некоординатними параметрами та співвідносяться з їхньою розсіювальною здатністю шляхом визначення універсального оператора, тобто матриці розсіювання об'єктів.

СРПК відрізняється від наявних суднових радіолокаторів своїми надвисокочастотними трактами, що використовують стандартні блоки, вузли та елементи, а також розв'язанням задач поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища на шляху судна.

Використання в СРПК всеполяризованої антени дало змогу розробити й використовувати, під час розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, методи та пристрої поляризаційного аналізу луна-сигналів частково поляризованої хвилі, що надходять на вхід приймальної антени із суцільним розкривом. Поляризація випромінювання такої антени мало залежить від напрямку в межах головної пелюстки її діаграми спрямованості і під час проведення поляризаційного аналізу ця залежність не враховується. Тоді довільним чином поляризоване випромінювання представлено у вигляді суми двох ортогонально поляризованих складових, одна з яких лежить у площині його падіння (площина Е), а інша поляризована складова лежить у площині Н, що дає змогу за відмінністю коефіцієнтів посилення антени в площинах Е та Н визначити похибку в поляризаційних вимірюваннях.

Розроблену функціональну схему СРПК представлено на рис.3.3, до якої входять:

- *Всеполяризована антена А*, з регульованою поляризацією на випромінювання та шестиканальним поляризаційним роздільником луна-сигналів у режимі приймання, що дає змогу формувати поляризаційні параметри електромагнітної хвилі на випромінювання за допомогою пристрою 1, а приймання відбитої хвилі будь-якої поляризації здійснювати дзеркалом 2, що виконане у вигляді параболоїда обертання діаметром 76 см, зі встановленим у фокусі дзеркала випромінювачем із контррефлектором. З виходу пристрою 1 електромагнітна хвиля певної поляризації через антенні перемикачі 3 і поляризаційний роздільник 4 (у режимі приймання - хвилеводний роздільник) надходить на антену і випромінюється в простір.

У режимі приймання луна-сигнал частково поляризованої електромагнітної хвилі розділяється на чотири лінійні ортогональні компоненти роздільником 4 - лінійну вертикальну, лінійну горизонтальну та дві лінійні з нахилом електричного вектору 45^{o} і 135^{o}, а для формування двох компонент електромагнітної хвилі кругової поляризації правого й лівого напряму обертання використано хвилеводний Н-міст 6, хвилеводний Е-міст 8, а також фазорозподілювач 7 для створення різності фаз між

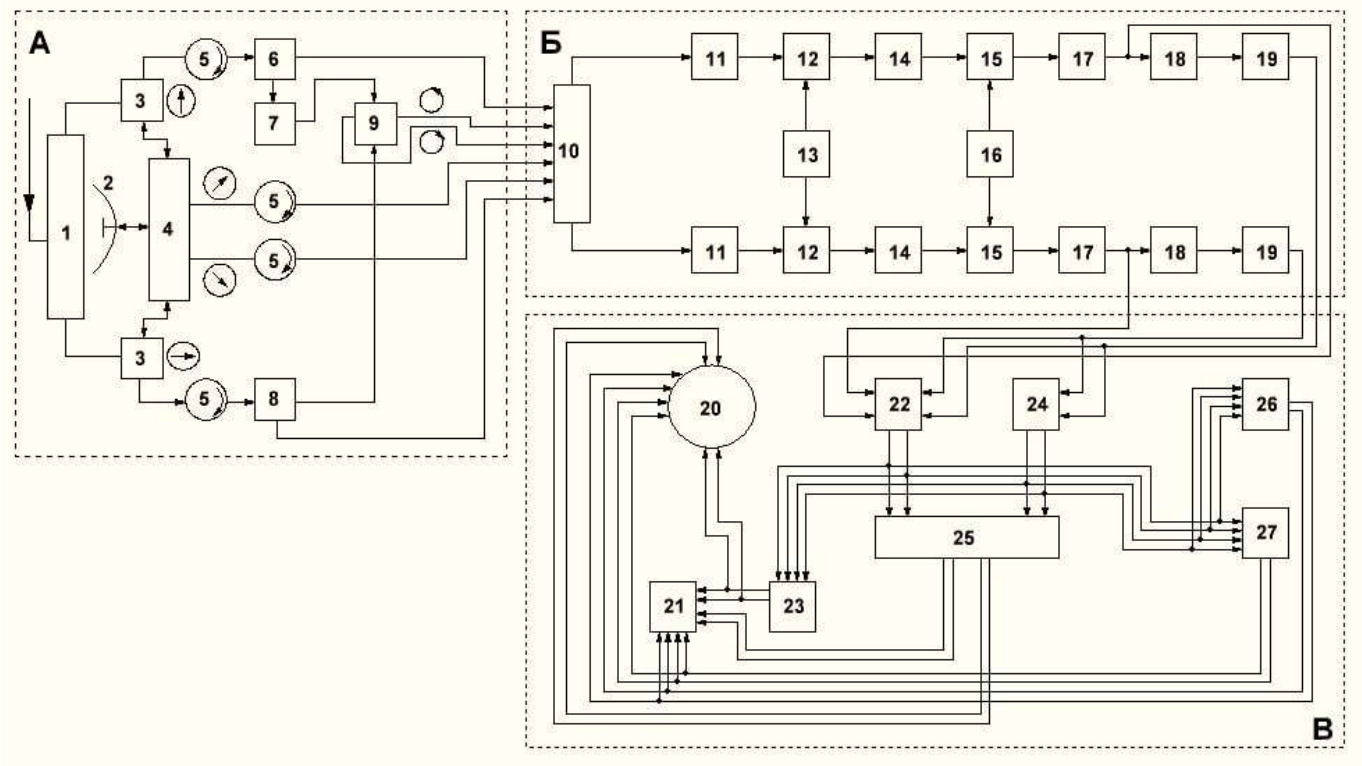


Рис.3.3. Універсальна функціональна схема СРПК:

А – всеполяризована антенна; **Б** – двоканальний лінійний приймач із хвилеводним комутатором; **В** – пристрій поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційного об'єкта з їх індикаціями.

1 - пристрій формування електромагнітної хвилі певної поляризації на випромінювання; 2 - дзеркало антени; 3 - антенні перемикачі; 4 - поляризаційний роздільник у режимі прийому (або селектор у режимі випромінювання); 5 - фазові циркулятори;6 - хвилеводний Н-міст; 7 - фазорозподілювач на 90^{o}; 8 - хвилеводний Е-міст; 9 - хвилеводний Т-міст; 10 - хвилеводний комутатор;11 - підсилювачі високої частоти; 12 - змішувачі сигналів проміжної частоти 30 МГц; 13 - гетеродин проміжної частоти 30 МГц; 14 - підсилювачі проміжної частоти 30 МГц; 15 - змішувачі проміжної частоти 4 МГц; 16 - гетеродин проміжної частоти 4 МГц; 17 - підсилювачі проміжної частоти 4 МГц; 18 - детектори; 19 - підсилювачі низької частоти; 20 - індикатор СРПК; 21 - дисплей комп'ютера СРПК; 22 - формувач третього і четвертого поляризаційних параметрів Стокса; 23 - формувач ступеня поляризації луна-сигналів складного об'єкта; 24 - формувач першого і другого поляризаційних параметрів Стокса; 25 - формувач енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта; 26 - формувач статистичних критеріальних поляризаційних параметрів Стокса складного об'єкта; 27 - формувач матриці когерентності складного об'єкта.

ортогональними компонентами, вертикальної та горизонтальної поляризаціями, що надходять з виходу поляризаційного роздільника 4 через циркулятори 5. Ортогональні компоненти електромагнітної хвилі, з фазовим зсувом між ними 90^{o}, надходять на Т-хвилеводний міст 9, який і формує дві компоненти електромагнітної хвилі кругової поляризації правого і лівого напрямку обертання. Сформовані шестиканальним поляризаційним роздільником 4 шість компонент луна-сигналу складного об'єкта електромагнітної хвилі, прийнятої всеполяризованою антеною, через хвилеводний комутатор 10 надходять на вхід двоканального лінійного приймача.

- *Двоканальний лінійний приймач Б* з подвійним перетворенням луна-сигналів шести компонент у проміжні частоти (30 МГц і 4 МГц) електромагнітної хвилі, що надходить із хвилеводного комутатора 10, до функціональної схеми якого включено підсилювачі високої частоти прийнятих луна-сигналів 11, змішувачі 12 і гетеродин 13 для проміжної частоти 30 МГц, підсилювачі 14 проміжної частоти 30 МГц, змішувачі 15, гетеродин 16 і лінійні підсилювачі 17 луна-сигналів проміжної частоти 4 МГц з аналого-цифровою масштабованою системою, амплітудні детектори 18 і підсилювачі низької частоти 19.

- *Пристрій В*, що реалізує поляризаційну селекцію навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення і спостерігається СРПК, до якого входять:

  - формувачі 22, 24 чотирьох дійсних поляризаційних параметрів Стокса;
  - формувач 23 ступеня поляризації електромагнітної хвилі, відбитої від складного об'єкта;
  - формувач 25 енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта;
  - формувач 26 статистичних критеріальних поляризаційних параметрів Стокса складного об'єкта;
  - формувач 27 матриці когерентності складного об'єкта.

З виходів формувачів 23, 25-27 луна-сигнали навігаційних об'єктів надходять на електронно-променеві індикатори СРПК 20 і дисплей суднового комп'ютера 21

для їхніх спостережень та отримання дистанційної інформації про траєкторію руху судна.

3.2 Функціональна схема високочастотної частини всеполяризованої антени СРПК.

Функціональна схема високочастотної частини антени представлена на рис.3.4, а її структурна схема на рис.3.5

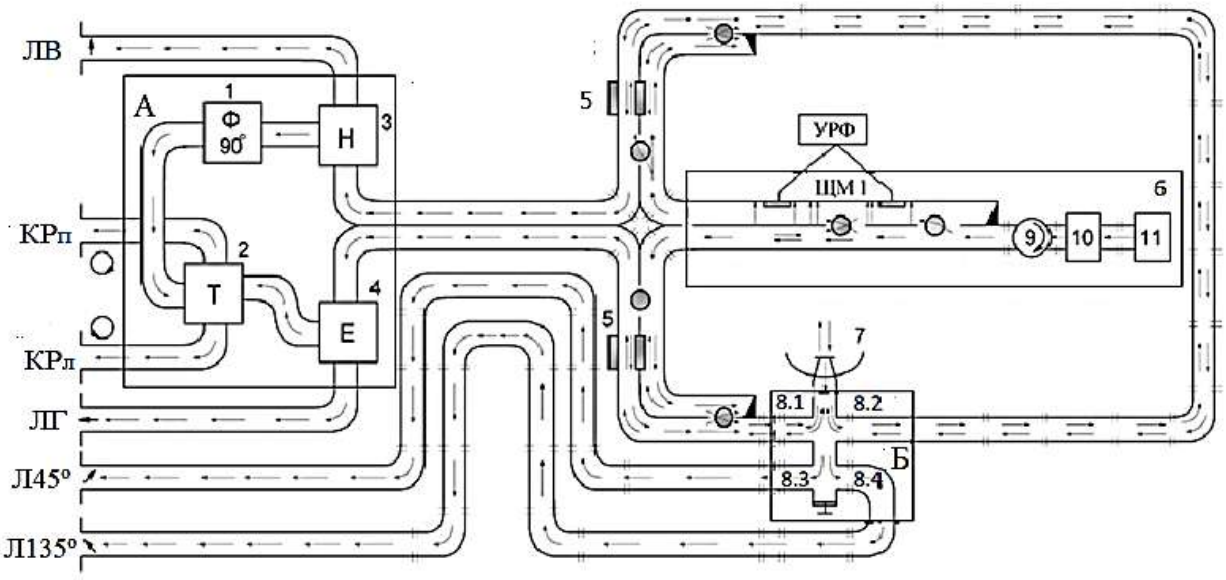


Рис.3.4. Функціональна схема високочастотної частини всеполяризованої антени СРПК

А - роздільник поляризацій луна-сигналів частково поляризованої хвилі на кругові компоненти;

Б - роздільник поляризацій луна-сигналів частково поляризованої хвилі на лінійні поляризовані компоненти.

1 - фазообертач на 90°; 2 - хвилеводний Т-міст; 3 - хвилеводний Н-міст; 4 - хвилеводний Е-міст; 5 - хвилеводні антенні перемикачі; 6 - пристрій формування електромагнітної хвилі певної поляризації на випромінювання; 7 - всеполяризована антена; 8.1...8.4 - прямокутні хвилеводи роздільника лінійних поляризацій; 9 - фазовий циркулятор; 10 - модулятор прямокутних імпульсів; 11 - магнетронний НВЧ-генератор.

У функціональну схему (рис.3.4) входять: роздільник А луна-сигналів електромагнітної хвилі складного об'єкта на кругові поляризовані компоненти, що складається з фазообертача 1 на 90°, хвилеводних мостів 2, 3, 4; роздільник луна-сигналів електромагнітної хвилі складного об'єкта на лінійні поляризовані компоненти Б; хвилеводні антенні перемикачі 5 електромагнітної хвилі на випромінювання та приймання; пристрій формування електромагнітної хвилі певної поляризації на випромінювання 6 з регулятором фази УРФ; дзеркало антени з випромінювачем 7; фазовий циркулятор 9; модулятор прямокутних імпульсів 10; магнетронний НВЧ-генератор 11.

Роботу представленої схеми (рис.3.4) розглядають у режимі випромінювання електромагнітних хвиль певних поляризацій, а також неполяризованої хвилі та в режимі приймання луна-сигналів складного об'єкта під час його послідовного опромінення електромагнітними хвилями сформованих поляризацій.

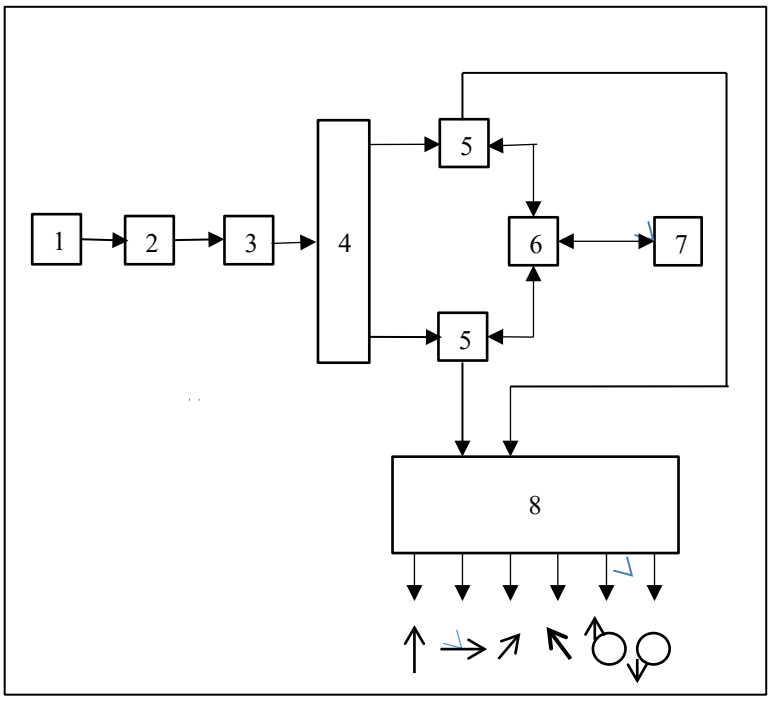


Рис.3.5. Структурна схема антени СРПК:

1 – магнітрон; 2 - модулятор; 3 - циркулятор; 4 - пристрій формування поляризації електромагнітної хвилі на випромінювання; 5 - антенні перемикачі; 6 - поляризаційний селектор; 7 - випромінювач; 8 - шестикомпонентний поляризаційний роздільник.

3.2.1 Функціонування антени в режимі випромінювання електромагнітних хвиль певних поляризацій.

У режимі випромінювання формування поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі здійснюється хвилеводним пристроєм 6 (рис.3.4).

На рис.3.6 - 3.9 представлено схеми пристрою для формування різних видів поляризацій електромагнітних хвиль, які використовуються для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечних атмосферних утворень.

Для передавання електромагнітної енергії від магнетрона до всеполяризованої антени певної поляризації та прийнятого антеною луна-сигналу складного об'єкта, у загальному випадку елептичної поляризації, на вхід лінійного двоканального приймача, використано стандартні хвилеводні високочастотні елементи, такі як антенні перемикачі, циркулятори та хвилеводні з'єднання, що обертаються.

Хвилеводний пристрій (рис.3.6) складається з двох прямокутних хвилеводів (1) і (2), що мають загальну вузьку стінку, у якій прорізано дві щілини, що утворюють ділянки зв'язку між двома хвилеводами, тобто два щілинних мости $ЩМ_1$, $ЩМ_2$, два феритових фазообертача $Ф_1$, $Ф_2$, які працюють за заданою програмою керованого регулятора фази УРФ, спільно зі щілинними мостами $ЩМ_1$, $ЩМ_2$ створюють певні фазові зрушення між компонентами електромагнітної хвилі в пристрої 6 (рис.3.4) і які формують на виході випромінювача антени електромагнітні хвилі лінійної вертикальної, лінійної горизонтальної, кругової поляризації та лінійної поляризації з кутом нахилу електричного вектору хвилі 45^o. Для компенсації потужності вищих типів хвиль, що виникають під час роботи пристрою, використовується узгоджене поглинаюче навантаження (СН).

Розглянемо процеси формування хвилеводним пристроєм 6 (рис.3.4) електромагнітних хвиль наведених поляризацій на випромінювання.

На рис.3.6 представлено формування електромагнітної хвилі *лінійної вертикальної поляризації* (ЛВ) на випромінювання.

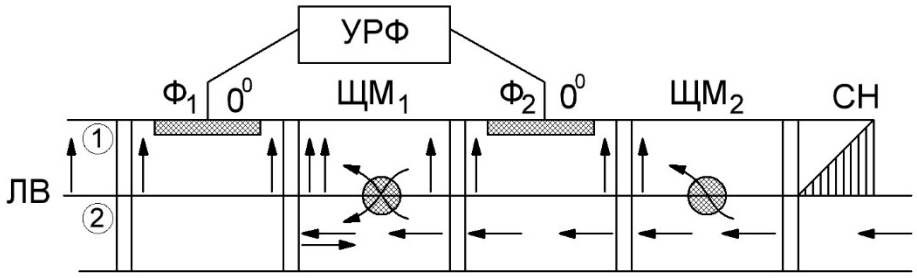


Рис.3.6. Хвилеводний пристрій формування електромагнітної хвилі лінійної вертикальної поляризації на випромінювання

У хвилеводному пристрої використовуються тільки фазові зрушення між компонентами електромагнітної хвилі в щілинних мостах $ЩМ_1$ і $ЩМ_2$. При цьому пристрій УРФ не створює за допомогою фазообертачів $Ф_1$, $Ф_2$ фазових зсувів між компонентами електромагнітної хвилі. Електромагнітна хвиля з виходу магнетрона 11 (рис.3.4) через модулятор 10 і циркулятор 9 надходить по прямокутному хвилеводу (2) (рис. 3.6) на щілинний міст $ЩМ_2$, який поділяє її на дві складові рівної амплітуди, при цьому одна зі складових проходить з прямокутного хвилеводу (2) через щілинний міст $ЩМ_2$ у прямокутний хвилевід (1) й одержує фазове зсунення 90^o. Ці дві складові з виходу щілинного моста $ЩМ_2$ своїми прямокутними хвилеводами надходять на вхід щілинного моста $ЩМ_1$, при цьому щілинний міст $ЩМ_1$ ділить обидві складові на дві рівні за амплітудою компоненти. Одна з двох компонент проходить на виходи хвилеводного пристрою по своїх хвилеводах, а друга компонента проходить через щілинний міст $ЩМ_1$ зі зсувом фази 90^o. На виході щілинного моста $ЩМ_1$, у нижньому прямокутному хвилеводі (2) дві компоненти електромагнітної хвилі складаються у протифазі, бо компонента з хвилеводу (1), проходячи через щілинний міст $ЩМ_1$ у хвилевід (2), отримує додатковий зсув за фазою 90^o і в підсумку у хвилеводі (2) має сумарний зсув за фазою 180^o, а у складової у хвилеводі (2) на виході щілинного моста $ЩМ_2$ нуль, тобто вони компенсували один одного і на вхід антени по хвилеводу (2) ніякої енергії від магнетрона не надходить. Компонента хвилі з хвилеводу (2) проходить через щілинний міст $ЩМ_1$ з фазовим зсувом 90^o і на виході з нього вона складається у фазі зі складовою хвилі, яка перебуває у хвилеводі (1). У підсумку

сумарна електромагнітна хвиля лінійної вертикальної поляризації від магнетронного генератора по прямокутному хвилеводу (1) надходить на випромінювач через антенний перемикач. У результаті антена СРПК випромінює електромагнітну хвилю лінійної вертикальної поляризації.

Формування електромагнітної хвилі *лінійної горизонтальної поляризації* (ЛГ) на випромінювання (рис.3.7) здійснюється за допомогою фазових зсувів між компонентами електромагнітної хвилі, що надходить з виходу магнетрона, двох щілинних мостів і фазового зсуву 180° фазообертача $Ф_2$. Між щілинними мостами поміщена діелектрична пластина, яка переміщується за допомогою асинхронного двигуна з редуктором за сигналами з пристрою регулювання фази УРФ. Для створення лінійної горизонтальної поляризації на випромінювання діелектричну пластину встановлюють на таку відстань від верхньої стінки хвилеводу (1), що відповідає фазовому зсуву 180° . Фазові зсуви щілинних мостів $ЩМ_1$ і $ЩМ_2$ по 90° кожний і фазовий зсув 180°, створюваний діелектричною пластиною, дають змогу на виході хвилеводного пристрою сформувати електромагнітну хвилю лінійної горизонтальної поляризації на випромінювання.

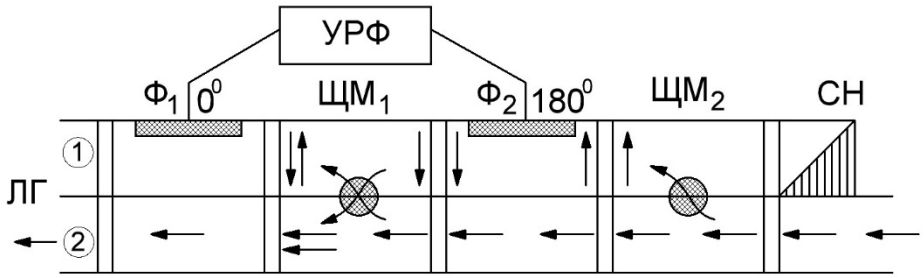


Рис.3.7. Хвилеводний пристрій формування електромагнітної хвилі лінійної горизонтальної поляризації на випромінювання

Формування електромагнітної хвилі *кругової поляризації* (КР) на випромінювання (рис.3.8) здійснюється за допомогою фазових зрушень між компонентами електромагнітної хвилі, що надходить з виходу магнетрона, що створюють фазові зрушення по 90°, двома щілинними мостами $ЩМ_1$ та $ЩМ_2$ і

фазообертачами $Ф_2$ та $Ф_1$ за допомогою діелектричних пластин. Фазові зсуви по 90^o в щілинних мостах $ЩМ_1$ і $ЩМ_2$ і фазові зсуви по 90^o, що створюються діелектричними пластинами, дають змогу на виході хвилеводного пристрою сформувати електромагнітну хвилю кругової поляризації на випромінювання.

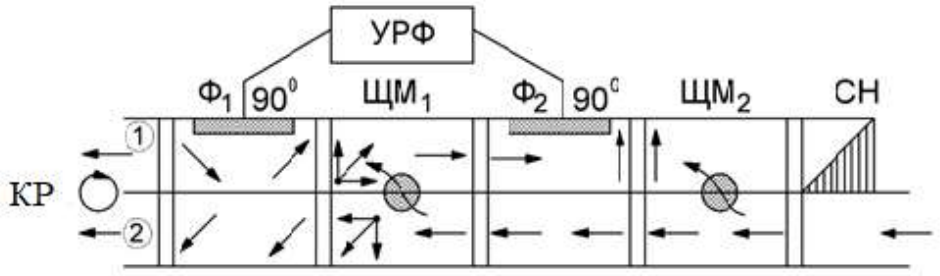


Рис.3.8. Хвилеводний пристрій формування електромагнітної хвилі кругової поляризації на випромінювання

Формування електромагнітної хвилі *лінійної поляризації з кутом нахилу електричного вектору хвилі 45°* (Л45°) на випромінювання (рис.3.9) здійснюється за допомогою фазових зрушень між компонентами електромагнітної хвилі, що надходить із виходу магнетрона, двома щілинними мостами $ЩМ_1$ та $ЩМ_2$ і фазообертачами $Ф_2$ та $Ф_1$, що створюють фазові зрушення 90^o та 180^o за допомогою діелектричних пластин, що дає змогу на виході хвилеводного пристрою сформувати електромагнітну хвилю лінійної поляризації з кутом нахилу електричного вектора хвилі 45^o на випромінювання.

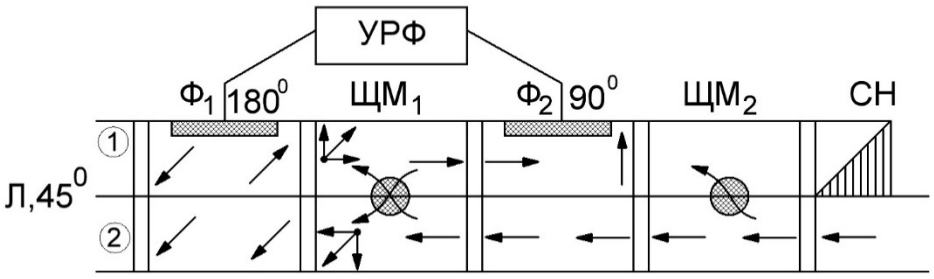


Рис.3.9. Хвилеводний пристрій формування електромагнітної хвилі лінійної поляризації з кутом нахилу електричного вектору хвилі 45^o на випромінювання

Для формування *неполяризованої хвилі* на випромінювання в пристрої УРФ встановлений *p-i-n* діодний перемикач каналів лінійної вертикальної та лінійної горизонтальної поляризацій, який підключає попеременно, з певною частотою, канали цих поляризацій. Площинні *p-i-n* діоди, виготовлені з кремнію, мають області *p* і *n* з відносно великою провідністю, відокремлені одна від одної ширшою областю типу *i* , що забезпечує малу ємність діодів (Рис.3.10).

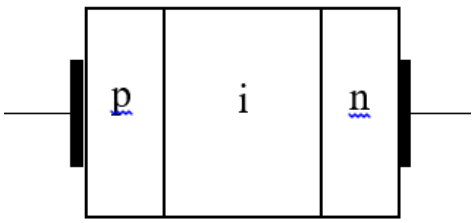


Рис.3.10. Структура *p-i-n* діоду.

За відсутності зовнішньої напруги опір *i* - області великий і стає ще більшим за зворотної напруги, оскільки області в цьому разі об'єднуються основними носіями. Пряма напруга викликає інтенсивну інжекцію в *i* - область дірок з *p* - області та електронів з *n* - області. Унаслідок цього опір *i* - області та всього діода загалом різко знижується в 103 - 104 рази. У потужних *p* - *i* - *n* діодів напруга пробою *i* - області становить кілька кіловольт і тому такі діоди можуть застосовуватися для перемикання потужності до десятків кіловат в імпульсі.

Схему вмикання діода для перемикання каналів формування неполяризованої хвилі під час її випромінювання наведено на рис.3.11.

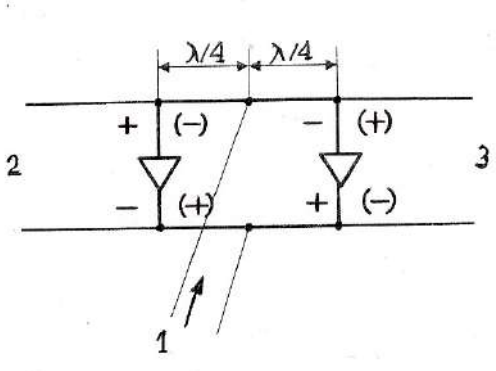


Рис.3.11. Схема перемикання діодів під час комутації хвилеводних каналів

Робота схеми рис.3.11 відбувається таким чином. Під час подавання на лівий діод прямої напруги, а на правий зворотної, лівий діод матиме малий опір, а правий діод великий. Тому сигнал із лінії 1 буде практично проходити тільки в лінію 3, а чвертьхвильовий відрізок лівої лінії 2, замкнений майже на коротко діодом, відіграватиме роль металевого ізолятора. За зворотної полярності керуючих напруг (знаки на схемі в дужках) діоди поміняються ролями, і сигнал передаватиметься тільки в лінію 2.

За допомогою наведеної схеми на час τ у певній послідовності вмикається на випромінювання тільки одна лінійна вертикальна поляризація, а потім лінійна горизонтальна також на час τ , тобто поляризація випромінюваної хвилі через рівні проміжки часу τ змінюється з вертикальної на горизонтальну і навпаки. Отже, кожна пара породжує повністю неполяризовану хвилю. Оскільки ці хвилі повністю незалежні одна від одної, то їхня сума буде знову повністю неполяризованою хвилею. У разі попеременного включення двох ортогональних поляризацій забезпечується рівність випромінюваної енергії кожним видом ортогональних поляризацій за час усереднення. У системі координат *YOZ* всеполяризованою антеною випромінюється неполяризована хвиля рис.3.12.

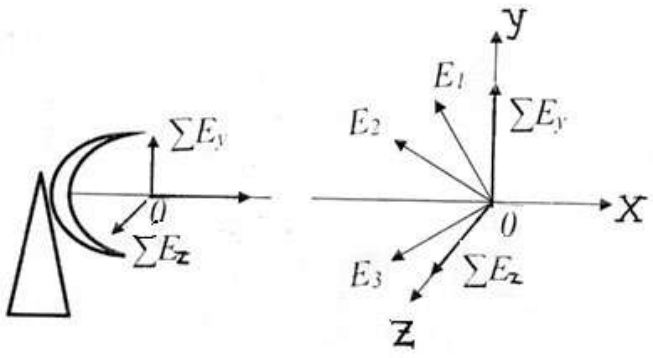
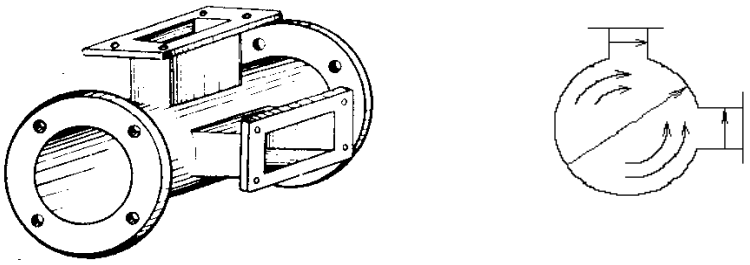


Рис.3.12. Система координат, випромінюваної неполяризованої хвилі всеполяризованою антеною СРПК

У системі координат *YOZ* проекція на осі електричного вектору неполяризованої хвилі дає суму *Y* і *Z* компонентів електричного вектору, тобто суму E_y і суму E_z , які некогерентні при будь-якій орієнтації системи координат і дорівнюють між собою $\sum E_y = \sum E_z$.

Випромінювання неполяризованої хвилі передбачає усереднення за час $t_0 = 5\tau$, за якого ступінь поляризації випромінюваної хвилі $m \to 0$, а час усереднення t_0 має бути більшим за час перемикання. Для неполяризованої хвилі необхідна рівність середніх потужностей компонент і відсутність статистичного зв'язку між ними $\left|\overline{E}_{ЛВ}\right| = \left|\overline{E}_{ЛГ}\right|$ і $\overline{E}_{ЛВ} \cdot \overline{E}_{ЛГ} = 0$.

Вихідні прямокутні хвилеводи (1) і (2) (Рис.3.6 – 3.9) пристроїв формування електромагнітних хвиль певних поляризацій і неполяризованої хвилі на випромінювання 6 (рис.3.4) сполучені через антенні перемикачі 5 та через поляризаційний хвилевідний трійник (рис.3.13) на круглому хвилеводі з випромінювачем антени 7. Електромагнітні хвилі, сформованих поляризацій, що відрізняються одна від одної за фазою на деяку величину, складаються у трійнику і випромінюються в простір випромінювачем 7.



а) *б*)

Рис. 3.13. Хвилеводний трійник на круглому хвилеводі:

а - влаштування хвилеводного трійника;

б - вигляд електромагнітного поля хвилі TE_{11} у поперечному перерізі хвилеводного трійника.

Магнетронний генератор 11 (рис.3.4) і випромінювач антени 7 розв'язані фазовим циркулятором 9 і хвилеводними антенними перемикачами 5. Циркулятор 9 складається з двох щілинних мостів $ЩМ_1$, $ЩМ_2$, двох феритових невзаємних фазообертачів $Ф_1$ і $Ф_2$ і діелектричної пластини Д (рис.3.14).

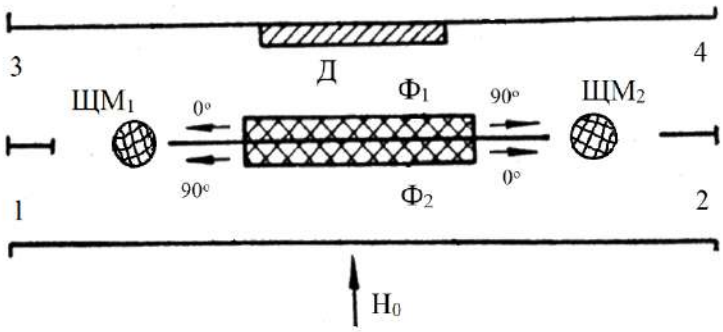


Рис. 3.14. Фазовий циркулятор:

$Ф_1$, $Ф_2$ – фазообертачі; Д – діелектрична пластина;
1,2,3,4 – плечі циркулятора; $ЩМ_1$, $ЩМ_2$ – щілинні мости.

Параметри феритових фазообертачів і поперечне підмагнічувальне поле H_0 підібрані так, що електромагнітна енергія від магнетрона надходить у плече 1 циркулятора 9 і проходить через нього тільки в плече 2 на вхід пристрою 6 (рис. 3.4), а виходи 3 і 4 з'єднано з поглинаючими навантаженнями. Під час роботи циркулятора 9, за рахунок фазових зсувів у щілинних мостах, фазообертачах і фазорухомої діелектричної пластини в плечі 4, електромагнітні хвилі з плеча 1 через щілинні мости, випробовуючи фазові зсуви у феритах фазообертачів і діелектричній пластині, будуть у протифазі, а в плечі 2 будуть у фазі.

Хвилеводний антенний перемикач наведено на рис.3.15. Хвилеводний антенний перемикач у режимі передачі працює так. Енергія магнетрона з виходу пристрою регулювання фази підводиться до плеча В першого щілинного моста $ЩМ_1$ антенного перемикача, де вона розділяється на дві рівні компоненти, одна з яких проходить через щілинний міст у нижній хвилевід із фазовим зсувом 90^o.

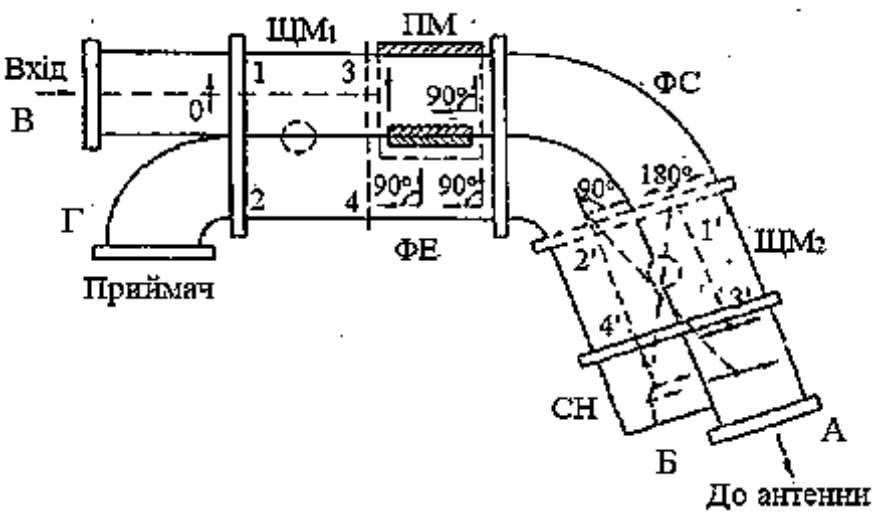


Рис.3.15. Антенний перемикач у режимі випромінення електромагнітної енергії

Полярність постійного магніту ПМ обрано таким чином, що під час поширення енергії до антени, феритовий елемент ФЕ змінює фазу компоненти хвилі на 90°, а фаза компоненти хвилі в нижньому хвилеводі, після проходження феритового елемента, не змінюється.

У результаті проходження енергії через ферити і щілинний міст $ЩМ_1$ фази компонент хвилі у верхньому і нижньому хвилеводах стають рівними, тобто 90°. Після проходження компонент електромагнітної хвилі через фазозсувну секцію ФС, фаза компоненти хвилі у верхньому хвилеводі випереджає на 90° фазу компоненти хвилі в нижньому хвилеводі. Підійшовши до другого щілинного мосту $ЩМ_2$ із зазначеними фазами і пройшовши через нього у верхньому хвилеводі компоненти хвилі складаються у фазі, а в нижньому хвилеводі - у протифазі, і вся енергія магнетрона спрямовується в антену через плече А і випромінюється в простір. Під час складання в протифазі залишкова енергія в нижньому хвилеводі поглинається узгодженим навантаженням СН.

3.2.2 Функціонування антени в режимі приймання електромагнітних хвиль еліптичної поляризації, відбитих від складного об'єкта.

Приймання луна-сигналів електромагнітної хвилі еліптичної поляризації здійснюється тією ж всеполяризованою антеною, що й на випромінювання електромагнітної хвилі певної поляризації, а високочастотні хвилеводні елементи

(антенні перемикачі, циркулятори) працюють у режимі приймання. Найпростішими способами представлення еліптично поляризованої хвилі є представлення її у вигляді суми двох ортогональних лінійно поляризованих або поляризованих по колу компонентів, а розкладання хвилі на ортогональні лінійно поляризовані складові здійснюється за допомогою спеціального хвилеводного розділювача поляризації 3 та 4, конструкцію якого наведено на рис.3.16.

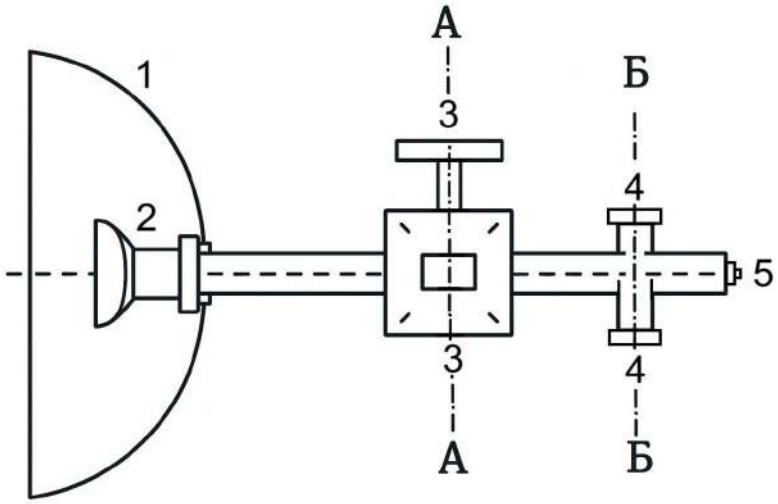


Рис.3.16. Хвилеводний роздільник луна-сигналів лінійних поляризацій:

1, 2 - антена з випромінювачем;

3 - хвилеводний роздільник луна-сигналів на лінійні ортогональні поляризації;

4 - хвилеводний роздільник луна-сигналів на лінійні ортогональні поляризації з орієнтацією прямокутних хвилеводів 45^{o} і 135^{o};

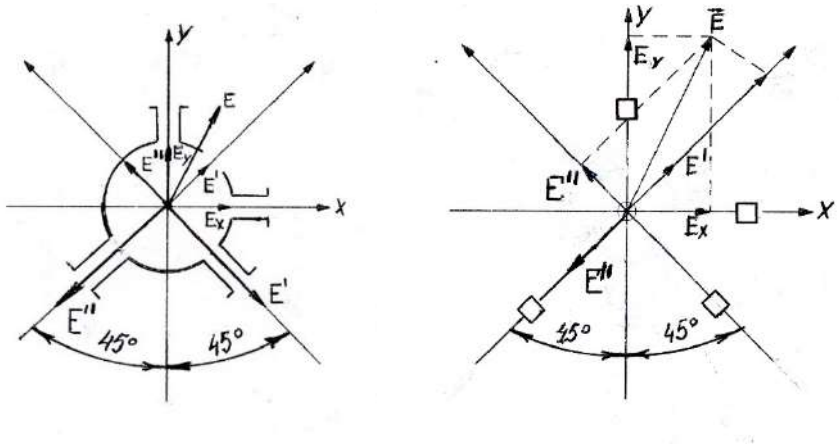
5 - плунжер налаштування хвилеводного роздільника.

Для розділення луна-сигналу еліптично поляризованої хвилі складного об'єкта, який надходить на вхід антени, на дві ортогональні лінійно поляризовані компоненти використовується роздільник поляризації 3 (Рис.3.16) на круглому хвилеводі з переходом з круглого перерізу на два ортогонально розміщених прямокутних хвилеводи та роздільник 4 із поділом луна-сигналу еліптично поляризованої хвилі з використанням також двох прямокутних хвилеводів з орієнтацією електричного

вектору 45° і 135°. У зв'язку з використанням СРПК електромагнітних хвиль лінійної поляризації з нахилом електричного вектору 45° і 135° застосовується хвилеводний роздільник 4 луна-сигналу лінійної поляризації на дві складові, який є продовженням круглого хвилеводу. Хвилеводний роздільник 4 також є пристроєм трійникового переходу з хвилеводу круглого перерізу на два ортогонально розташованих хвилеводи прямокутного перерізу, до яких надходять лінійно поляризовані компоненти луно-сигналів, площина поляризації яких становить кут 45° та 135°. З'єднання цих хвилеводів (круглого та чотирьох прямокутних), утворює власне поляризаційний роздільник. Круглий хвилевод роздільника закінчується плунжером налаштування 5, підключеним на відстані λ/4 від місця підключення прямокутних хвилеводів.

Поділ електромагнітної хвилі еліптичної поляризації відбувається в такий спосіб. У круглому хвилеводі при поділі хвилі на лінійні компоненти має місце хвиля типу TE_{11}, силові лінії електричного поля якої розподіляються в поперечному перерізі роздільника. На вході прямокутних хвилеводів, на деякій відстані від місця їх з'єднання з круглим хвилеводом, силові лінії електричного поля будуть орієнтовані уздовж вузької стінки прямокутних хвилеводів і таким чином забезпечується збудження електромагнітної хвилі TE_{10} в обох хвилеводах. Якщо в круглий хвилевод з виходу антени надходить лінійно поляризована хвиля з кутом нахилу електричного вектору 45° і 135°, то і в цьому випадку потужність хвилі буде ділитися порівну в прямокутних хвилеводах, розташованих у розділювачі 4. З'єднання хвилеводів, що утворює поляризаційний роздільник представлено на рис. 3.16 у перерізах А-А та Б-Б, а розподіл електричних векторів електромагнітної хвилі, що надходить з виходу антенної системи та з'єднання хвилеводів у роздільниках 3 та 4 представлений на рис.3.17.

При надходженні в режимі приймання з виходу антени в круглий хвилевод довільно поляризованої хвилі потужності в прямокутних ортогональних каналах роздільника визначатимуться відношенням амплітуд відповідних компонент.



а) *б)*

Рис. 3.17. З'єднання хвилеводів (*а*) і векторна діаграма розподілу напруженості електричного поля (*б*) у хвилеводних роздільниках на чотири ортогональні компоненти

Для формування з луна-сигналу, що надійшов на вхід всеполяризованої антени електромагнітної хвилі еліптичної поляризації, електромагнітної хвилі кругової поляризації використовується функціональна схема, що представлена на рис. 3.18.

Всеполяризована антена СРПК у режимі приймання приймає луна-сигнал будь-якої поляризації. Нас цікавить під час розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні зливових опадів різної інтенсивності, приймання луна-сигналу складного об'єкта, що має еліптичну поляризацію, у окремому випадку - лінійну та кругову поляризації. Нехай на вхід поляризаційного роздільника в режимі приймання надходить електромагнітна хвиля еліптичної поляризації, електричний вектор якої в круглому хвилеводі представлений електричним вектором E лінійної поляризації (Рис. 3.17). Лінійно поляризовані компоненти цього вектору E' і E'' представлені в системі хвилеводного роздільника стосовно перетину прямокутних хвилеводів, які приєднані до круглого хвилеводу.

Компоненти вектору E (E_x и E_y, E' и E'') збуджують відповідні хвилеводи 8.1, 8.2 і 8.3, 8.4 (рис.3.4). У круглому хвилеводі має місце хвиля типу TE_{11}, силові лінії електричного поля якої розподілені в поперечному перерізі (рис.3.13,*б*), а на входах

хвилеводів прямокутного перерізу вони виявляються орієнтованими вздовж їхньої вузької стінки. Це забезпечує умови збудження хвилі $ТЕ_{01}$ у чотирьох прямокутних хвилеводах. Такі умови виконуються для електромагнітної хвилі, що надходить на вхід антени, будь-якої поляризації.

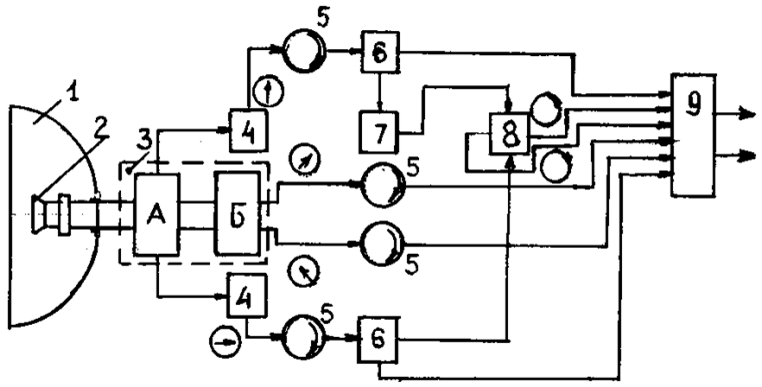


Рис.3.18. Функціональна схема формування луна-сигналу електромагнітної хвилі кругової поляризації в шестикомпонентному хвилеводному поляризаційному роздільнику

А - поляризаційний хвилеводний роздільник на ортогонально поляризовані компоненти; Б - поляризаційний хвилеводний роздільник на ортогонально поляризовані компоненти з орієнтацією електричного вектора під кутами 45° і 135°.

1, 2 - антена з випромінювачем; 3 - хвилеводний роздільник луна-сигналів лінійних поляризацій; 4 - антенні перемикачі; 5 - циркулятори; 6 - хвилеводні Н і Е-мости; 7 - фазорозподілювач лінійно поляризованої хвилі вертикальної поляризації на 90°; 8 - хвилеводний Т-міст; 9 - хвилеводний комутатор.

Якщо в круглому хвилеводі поширюється лінійно поляризована хвиля з кутом поляризації 45°, то потужність хвилі ділитиметься порівну між ортогональними каналами прямокутних хвилеводів 8.3, 8.4. Під час поширення в круглому хвилеводі роздільника поляризованої по колу хвилі її потужність буде також ділитися порівну в ортогональних каналах прямокутних хвилеводів 8.1, 8.2. Під час приймання всеполяризованою антеною луна-сигналу еліптичної поляризації, який може бути

представлений у вигляді суми двох компонент кругової поляризації та тих, що мають протилежний напрямок обертання векторів електричного поля, кожна компонента може бути представлена сумою двох ортогонально поляризованих складових із рівними амплітудами та фазовим зсувом між ними 90°. Кожна з цих складових проходитиме з однаковими амплітудами у хвилеводи прямокутного перерізу 8.1, 8.2.

Однак, виміряти фазовий зсув між ортогональними складовими хвилі в прямокутних хвилеводах у діапазоні НВЧ пов'язано з певними труднощами. Тому для отримання в шестикомпонентному хвилеводному роздільнику двох електромагнітних хвиль кругової поляризації з фазовим зсувом між ними 90° використовується функціональна схема, яка представлена на рис.3.18 [64]. Для одержання електромагнітної хвилі кругової поляризації ортогональні складові вертикальної та горизонтальної поляризацій, які після поділу електромагнітної хвилі хвилеводним поляризаційним розділювачем А, надходять через антенні перемикачі 4 та циркулятори 5 на роздільники потужності 6, що складаються з Н та Е хвилеводних мостів. Одна з ортогональних складових з одного виходу Н-моста надходить на фазообертач 7, що створює фазову затримку 90°, і з виходу фазообертача ця складова з фазовим зсувом 90° надходить на Н-вхід хвилеводного Т-моста 8. Друга ортогональна складова з виходу хвилеводного Е-моста 6 надходить на вхід Е хвилеводного Т-моста 8. Після розділення потужності ортогональних складових електромагнітної хвилі Е і Н-хвилеводними мостами на дві компоненти, інші компоненти з виходів цих мостів надходять на хвилеводний комутатор 9. Хвилеводний Т-міст формує з двох компонент, що мають фазовий зсув 90°, дві хвилі кругової поляризації правого та лівого напряму обертання електричного вектору, які з симетричних плечей Т-моста надходять на входи хвилеводного комутатора 9. Складові електромагнітної хвилі лінійної поляризації з виходу хвилеводного поляризаційного роздільника Б, з кутами орієнтації електричних векторів 45° і 135°, через циркулятори 5 також надходять на входи хвилеводного комутатора 9.

Конструкція хвилеводного шестикомпонентного роздільника забезпечує появу луна-сигналу тільки однієї поляризаційної компоненти електромагнітної хвилі в одному вихідному каналі поляризаційного роздільника, блок-схему, якого представлено на рис. 3.19, а його еквівалентну схему - на рис. 3.20.

У режимі приймання всеполяризованою антеною частково поляризований луна-сигнал складного об'єкта пов'язаний амплітудами своїх ортогонально поляризованих компонент E_1 та E_2 у дальній зоні всеполяризованої антени, на виході кожного з шести каналів поляризаційного розділювача (Рис.3.19 і Рис.3.20) через коефіцієнти передавання f_{k1} та f_{k2} з амплітудами нормованої напруги *V1-V6* на виході певного каналу розділювача такою залежністю у вигляді матричного рівняння:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11}\ f_{12} \\ f_{21}\ f_{22} \\ f_{31}\ f_{32} \\ f_{41}\ f_{42} \\ f_{51}\ f_{52} \\ f_{61}\ f_{62} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}. \tag{3.1}$$

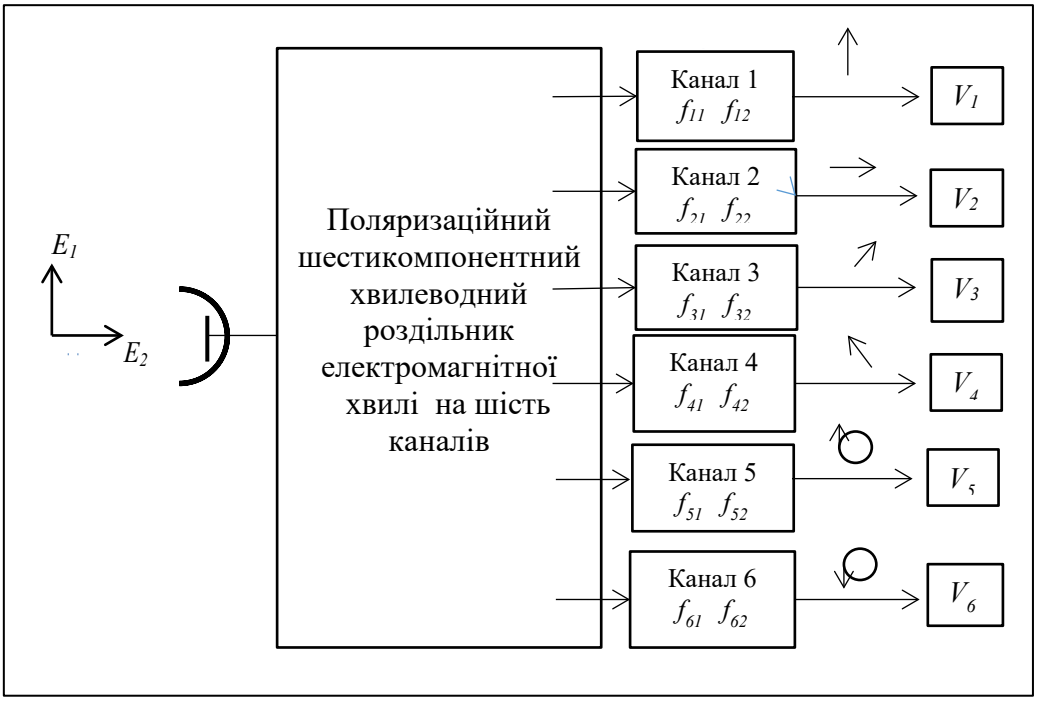


Рис. 3.19. Блок - схема шестикомпонентного поляризаційного роздільника електромагнітної хвилі на шість поляризованих компонент

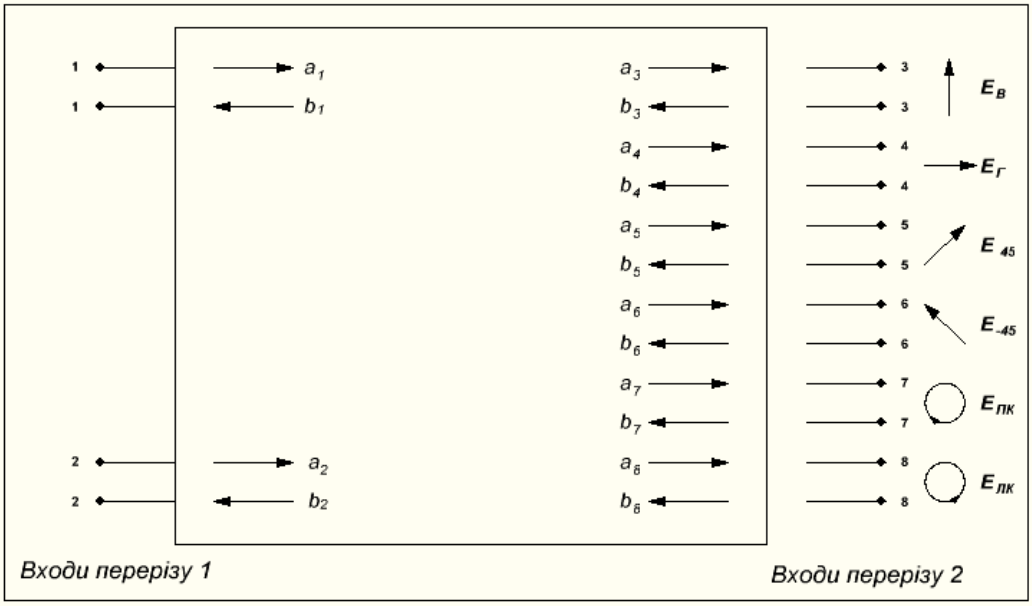


Рис.3.20. Еквівалентна схема шестикомпонентного хвилеводного поляризаційного роздільника електромагнітної хвилі на шість поляризованих компонент

Матриця розсіювання шестикомпонентного поляризаційного роздільника, що характеризує його роботу, записується у вигляді:

$$[S]=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} & S_{17} & S_{18} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} & S_{27} & S_{28} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} & S_{37} & S_{38} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} & S_{47} & S_{48} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} & S_{57} & S_{58} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} & S_{67} & S_{68} \\ S_{71} & S_{72} & S_{73} & S_{74} & S_{75} & S_{76} & S_{77} & S_{78} \\ S_{81} & S_{82} & S_{83} & S_{84} & S_{85} & S_{86} & S_{87} & S_{88} \end{bmatrix}. \qquad (3.2)$$

Матриця вхідного луна-сигналу $[S]_{вх}$ та матриця вихідного луна-сигналу $[S]_{вих}$ мають вигляд:

$$[S]_{вх} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \end{bmatrix}, \tag{3.3}$$

$$[S]_{вих} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_8 \end{bmatrix}, \tag{3.4}$$

При цьому зв'язок матриці вхідного сигналу (3.3), матриці вихідного сигналу (3.4) та матриці розсіювання (3.2) встановлюється наступним рівнянням:

$$[S]_{вих} = [S][S]_{вх}. \tag{3.5}$$

Діагональні коефіцієнти матриці розсіювання $[S]$ шестикомпонентного поляризаційного роздільника є коефіцієнтами відбиття по k -тому каналу за узгодженням інших каналів. При узгодженні інших каналів матриці відсутні зв'язки між вхідними і вихідними хвилями у кожному з плеч роздільника. Ця умова призводить до рівності нулю всіх діагональних елементів матриці розсіювання $[S]$, а також відсутності відбиттів у бік перерізу 1 для будь-якої компоненти при подачі лише однієї з них. Теж відноситься і до входів перерізу 2 (Рис.3.20). З огляду на це можна записати:

$$\left.\begin{array}{l} S_{12} = S_{21} = S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32} = S_{34} = S_{43} = S_{35} = S_{53} = S_{36} = S_{63} = S_{37} = S_{73} = \\ = S_{38} = S_{83} = S_{45} = S_{54} = S_{46} = S_{64} = S_{47} = S_{74} = S_{48} = S_{84} = S_{56} = S_{65} = S_{57} = S_{75} = \\ = S_{58} = S_{85} = S_{67} = S_{76} = S_{68} = S_{86} = S_{78} = S_{87} = 0 \\ S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = S_{55} = S_{66} = S_{77} = S_{88} = 0 \end{array}\right\}. \tag{3.6}$$

Тоді матриця розсіювання (3.2) ідеального шестикомпонентного поляризаційного роздільника без втрат запишеться у вигляді:

$$[S]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & S_{13} & 0 & S_{15} & S_{16} & S_{17} & S_{18} \\ 0 & 0 & 0 & S_{24} & S_{25} & S_{26} & S_{27} & S_{28} \\ S_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{51} & S_{52} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{61} & S_{62} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{71} & S_{72} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{81} & S_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (3.7)$$

Запишемо матрицю розсіювання роздільника для лінійних компонентів:

$$[S]_{лк}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & S_{13} & 0 & S_{15} & S_{16} & S_{17} & S_{18} \\ 0 & 0 & 0 & S_{24} & S_{25} & S_{26} & S_{27} & S_{28} \\ S_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{51} & S_{52} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{61} & S_{62} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (3.8)$$

Аналіз проводять у лінійному поляризаційному базисі, дійсні орти якого паралельні дійсним векторам амплітуд перших ортогональних поляризацій. Для лінійних поляризацій матриця розсіювання роздільника є одиничною. Формування кругових поляризацій проводиться розділенням лінійних компонент на лінійну вертикальну хвилеводним Н-мостом із затримкою по фазі сигналу на 90^{o} та Е-мостом на горизонтальну поляризацію з подальшою подачею сигналів цих компонент на Н і Е входи подвійного хвилеводного трійника, на виході симетричних плеч якого утворюються хвилі кругових поляризацій правого та лівого напряму обертання. Матриця розсіювання подвійного хвилеводного трійника $\left[S_{mp}\right]$ записується як:

$$\left[S_{mp}\right]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \end{bmatrix}=\frac{\sqrt{2}}{2}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (3.9)$$

Для кожного з восьми каналів поляризаційного роздільника з коефіцієнтами передачі f_{km} (Рис.3.19), що зв'язують амплітуду напруги на виході певного каналу з амплітудами ортогонально поляризованих компонент луна-сигналу електромагнітної хвилі в дальній зоні всеполяризованої антени СРПК можна записати наступні рівняння, які будуть справедливими тільки за умови узгодження всіх виходів поляризаційного роздільника. Тоді для кожного каналу залежність вихідної напруги від поляризації аналізованої хвилі запишеться у вигляді:

$$\begin{aligned} V_1 &= f_{11}E_1 + f_{12}E_2; & V_5 &= f_{51}E_1 + f_{52}E_2; \\ V_2 &= f_{21}E_1 + f_{22}E_2; & V_6 &= f_{61}E_1 + f_{62}E_2; \\ V_3 &= f_{31}E_1 + f_{32}E_2; & V_7 &= f_{71}E_1 + f_{72}E_2; \\ V_4 &= f_{41}E_1 + f_{42}E_2; & V_8 &= f_{81}E_1 + f_{82}E_2. \end{aligned} \qquad (3.10)$$

Для калібрування поляризаційного роздільника поляризації певного каналу можна скористатися відношенням амплітуд сигналів, виміряних на виходах різних каналів. Як вихідна амплітуда береться амплітуда першого каналу, тоді залежність відносин амплітуд кожного каналу шестикомпонентного роздільника до амплітуди першого каналу записується наступним чином:

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{V_1} &= \left|\frac{f_{21}E_1 + f_{22}E_2}{f_{11}E_1 + f_{12}E_2}\right|; & \frac{V_6}{V_1} &= \left|\frac{f_{61}E_1 + f_{62}E_2}{f_{11}E_1 + f_{12}E_2}\right|; \\ \frac{V_3}{V_1} &= \left|\frac{f_{31}E_1 + f_{32}E_2}{f_{11}E_1 + f_{12}E_2}\right|; & \frac{V_7}{V_1} &= \left|\frac{f_{71}E_1 + f_{72}E_2}{f_{11}E_1 + f_{12}E_2}\right|; \\ \frac{V_4}{V_1} &= \left|\frac{f_{41}E_1 + f_{42}E_2}{f_{11}E_1 + f_{12}E_2}\right|; & \frac{V_8}{V_1} &= \left|\frac{f_{81}E_1 + f_{82}E_2}{f_{11}E_1 + f_{12}E_2}\right|; \\ \frac{V_5}{V_1} &= \left|\frac{f_{51}E_1 + f_{52}E_2}{f_{11}E_1 + f_{12}E_2}\right|; & \frac{V_9}{V_1} &= \left|\frac{f_{91}E_1 + f_{92}E_2}{f_{11}E_1 + f_{12}E_2}\right|. \end{aligned} \qquad (3.11)$$

Практична задача налаштування поляризаційного роздільника, який характеризується відсутністю хвиль, відбитих від входів двоканального лінійного приймача, зводиться до вимірювання амплітуд напруги на виходах всіх каналів.

Сформовані луна-сигнали шести поляризацій з виходу шестикомпонентного поляризаційного роздільника надходять послідовно на входи двоканального лінійного приймача через хвилеводний комутатор, зовнішній вигляд якого наведено на рис.3.21.

Для обертання дзеркала антени з випромінювачем у горизонтальній площині (0^o - 360^o) і обертання у вертикальній площині (0^o - 90^o) під час передання до антени хвилеводними каналами енергії електромагнітної хвилі певної поляризації як у режимі випромінювання, так і в режимі прийому, відбитої від складного об'єкта та прийнятої всеполяризованою антеною на вхід лінійного двоканального приймача під час обертання дзеркала антени в горизонтальній площині використано обертове хвилеводне з'єднання (рис.3.22), що складається з двох секцій на круглому хвилеводі з переходом на прямокутні хвилеводи, одна із секцій нерухома, друга обертається за азимутом.

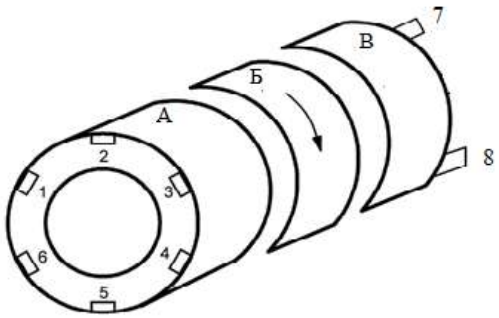


Рис.3.21. Хвилеводний комутатор:

А - вхідні хвилеводні канали (1...6), з'єднані з вихідними каналами шестикомпонентного хвилеводного поляризаційного роздільника;

Б - циліндр, що обертається, який з'єднує певні вхідні хвилеводи за допомогою крокового електродвигуна з вихідними хвилеводами комутатора (7,8);

В - вихідні хвилеводи, з'єднані з входом лінійного двоканального приймача.

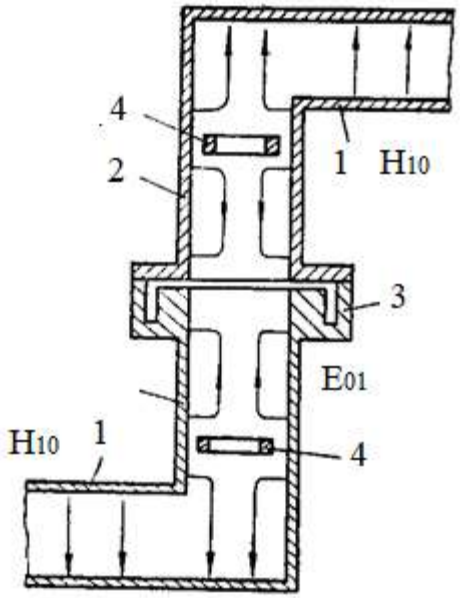


Рис.3.22. Хвилеводне дросельно-фланцеве обертове з'єднання:

1 - нерухома частина обертового з'єднання; 2 - обертова частина з'єднання;

3 - дросельно-фланцева частина з'єднання; 4 - елементи налаштування.

Для обертання секції 2, відносно нерухомої секції 1, використано дросельно-фланцеве з'єднання двох круглих хвилеводів 3 з основним типом хвилі E_{01}, що дає змогу завдяки своїй осьовій симетрії зберегти незмінною поляризацію електромагнітної хвилі, яку прийняла або випромінює антена, у будь-якому положенні круглого хвилеводу, що обертається. Як в обертовій частині круглого хвилеводу, так і в нерухомій його частині, приєднані прямокутні хвилеводи, в яких основним типом хвилі є H_{10} .

Для відключення магнетрона від ланцюга поляризаційного розподільника використовують антенний перемикач, який працює в режимі приймання луна-сигналу складного об'єкта електромагнітної хвилі еліптичної поляризації (Рис. 3.23).

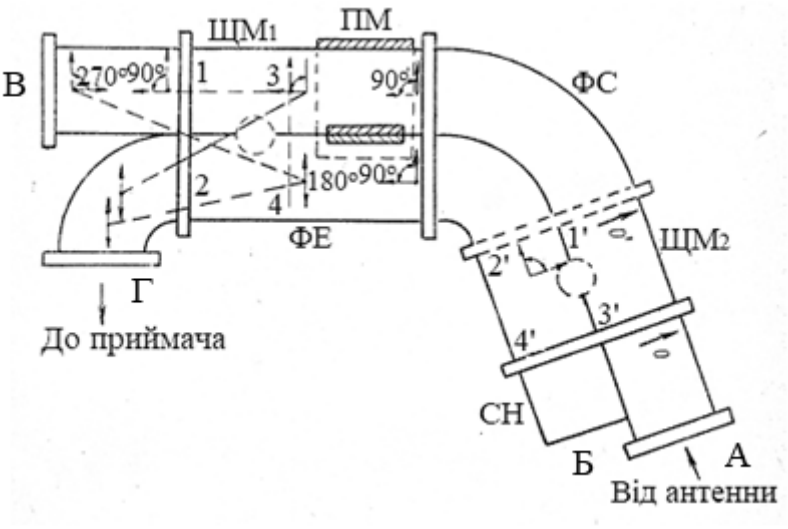


Рис.3.23. Антенний перемикач у режимі приймання

Відбита від складного об'єкта електромагнітна хвиля з виходу антени через розподільник лінійних поляризацій (рис.3.4) прямокутними хвилеводами 8.1...8.4 і через антенний перемикач 5 надходить на вхід шестикомпонентного розподільника А-Б. Антенний перемикач 5 у цьому разі працює в режимі приймання, при цьому електромагнітна енергія з виходу поляризаційного розподільника лінійних поляризацій надходить через вхід А (рис.3.23) на щілинний міст $ЩМ_2$ і, проходячи через нього, розділяється на дві компоненти. При цьому на виході щілинного моста $ЩМ_2$ фаза компоненти в каналі 2' випереджає на 90^o фазу компоненти хвилі в каналі 1'. Обидві компоненти хвилі, проходячи через фазозсувну секцію ФС, на її виході мають рівні фази, внаслідок фазового зсуву 90^o у верхньому хвилеводі. Обидві компоненти з рівними фазами підходять до феритових елементів ФЕ. Компонента хвилі в нижньому хвилеводі, проходячи через феритовий елемент ФЕ, отримує додатковий фазовий зсув 90^o. Після проходження ФЕ компонента хвилі в нижньому хвилеводі матиме фазовий зсув 180^o, а компонента хвилі у верхньому хвилеводі не отримує додаткового фазового зсуву та проходить феритовий елемент із тим самим фазовим зсувом 90^o. Обидві компоненти проходять через щілинний міст $ЩМ_1$ і кожна з них розділяється на дві складові. Одна складова хвилі у верхньому хвилеводі після $ЩМ_1$ проходить з тим самим фазовим зсувом 90^o до виходу В. Складова в нижньому хвилеводі проходить через щілинний міст $ЩМ_1$ і отримує фазовий зсув 90^o. На вихід

В обидві складові матимуть фазові зсуви 90^o і 270^o, тобто будуть у протифазі й під час складання компенсують одна одну. Складова компоненти хвилі з верхнього хвилеводу з фазовим зсувом 90^o, проходячи через щілинний міст $ЩМ_1$, отримує додатковий фазовий зсув 90^o і до виходу Г ця складова приходить з фазовим зсувом 180^o. Складова компоненти хвилі в нижньому хвилеводі з фазовим зсувом 180^o проходить до виходу Г. Ці дві складові з однаковим фазовим зсувом складаються у фазі і проходять на вхід шестикомпонентного роздільника поляризацій.

Двоканальний лінійний приймач підсилює і перетворює луна-сигнали складного об'єкта, які надходять, для формування поляризаційних параметрів Стокса, які використовуються для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у складних умовах атмосферного середовища на шляху судна.

3.3 Висновки за розділом 3

1 Розроблено принцип побудови експериментального суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу (СРПК), що дає змогу для підвищення його енергетичного потенціалу та розв'язання задач поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень, за траєкторією руху судна, використовувати дійсні енергетичні поляризаційні параметри Стокса електромагнітної хвилі, як на її випромінювання, так і на приймання луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта.

2 В основу поляризаційних методів, розроблених і реалізованих у СРПК, покладено взаємозв'язок поляризаційної структури електромагнітного поля під час його випромінювання та під час приймання з певними поляризаційними параметрами на виході та вході всеполяризованої антени та системи оброблення радіолокаційної інформації.

3 Розроблена функціональна схема всеполяризованої антени дає змогу виконувати всі поляризаційні виміри на шестиканальному СРПК, який містить шість однакових амплітудних каналів оброблення та реєстрації луна-сигналів частково

поляризованої електромагнітної хвилі складного об'єкта радіолокаційного спостереження.

4 Поляризаційний хвилеводний шестикомпонентний роздільник поляризації луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта, виконаний на круглих і прямокутних хвилеводах, є основною ланкою всеполяризованої антени і визначає принцип і точність роботи шестиканального СРПК.

5 Всеполяризована антена СРПК дає змогу випромінювати неполяризовану хвилю, електромагнітні хвилі лінійної та кругової поляризацій, що сформовані розробленою схемою хвилеводного пристрою з фазовими співвідношеннями між ортогональними компонентами хвилі у двох прямокутних хвилеводах у межах 0^o - 180^o.

6 Розроблена універсальна функціональна схема СРПК дає можливість сформувати поляризаційні стани електромагнітних хвиль, що опромінюють складний об'єкт радіолокаційного спостереження, та визначати відбивну здатність складного об'єкта під час його послідовного опромінення електромагнітними хвилями, використовуваних поляризацій, за зміною поляризацій луна-сигналів складного об'єкта частково поляризованих хвиль, що надходять на вхід всеполяризованої антени.

РОЗДІЛ 4
РОЗРОБЛЕННЯ СТРАТЕГІЇ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ, ЩО БАЗУЮТЬСЯ НА ЇХ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРАХ

4.1 Модель основного інформаційного потоку в судновому радіолокаційному поляризаційному комплексі

Розглядається модель взаємодії СРПК із зовнішнім середовищем під час однопозиційної радіолокації, коли навігаційний об'єкт перебуває в зоні атмосферного утворення (складний об'єкт) [196]. Електромагнітна хвиля на випромінювання і приймання представлена у вигляді двох матриць, які складаються з дійсних енергетичних параметрів Стокса, а відбивні властивості складного об'єкта характеризуються 16 елементами, які об'єднані в матрицю Мюллера та складаються з чотирьох стовпців і чотирьох рядків. Віддзеркалена хвиля представлена чотирма параметрами Стокса, як поле, що індукується невідомим розподілом відбивачів складного об'єкта, під час їхнього опромінення електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій у лінійному і круговому базисах. Визначення елементів матриці розсіювання Мюллера складного об'єкта здійснюється шляхом його опромінення електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій і прийомом луна-сигналів всеполяризованою антеною СРПК з вимірюванням параметрів Стокса для кожної випромінюваної хвилі певної поляризації, за значеннями яких визначають усі елементи матриці Мюллера складного об'єкта [197].

Практична реалізація моделі взаємодії СРПК з атмосферним середовищем ґрунтується на вимірюванні елементів матриці розсіювання Мюллера під час послідовного опромінення складного об'єкта неполяризованою хвилею, хвилею лінійної вертикальної (горизонтальної) поляризацій, лінійною з нахилом електричного вектору 45^{o} у декартовій системі координат та круговою поляризацією правого або лівого напрямку обертання вектору.

Під час функціонування СРПК на вхід пристрою прийняття рішення надходить сигнал, джерелом якого є навігаційний об'єкт радіолокаційного спостереження за відсутності сигналу атмосферного середовища. Модель радіолокаційного інформаційного каналу описує процес перетворення характеристик сигналів по трасі від передавача до об'єкта, від об'єкта до приймача і далі до пристрою обробки прийнятих сигналів. При цьому всі процеси задаються в дискретному часі.

Для аналізу принципу переходу під час опису функціонування СРПК від безперервного часу до дискретного використовується математична структура, яка називається динамічною системою, що є абстрактною моделлю і задовольняє принципу причинності. При цьому найважливішим класом динамічних систем за безперервного часу їхнього завдання є гладкі динамічні системи, описувані перехідною функцією стану.

Теорію інформаційного каналу розглянуто D. A. Middleton, E. M. Kennaugh, J. R. Huynen, W. M. Boerner та ін., а отримані результати щодо стану теорії радіолокаційного каналу наведено в [34,35]. Параметричне уявлення поляризації радіохвиль, які використовуються в СРПК, ґрунтується на чотирьох дійсних поляризаційних параметрах Стокса, що мають розмірність інтенсивностей. З урахуванням того, що взаємодія випромінюваної хвилі з атмосферним утворенням, у якому перебуває навігаційний об'єкт, відбувається некогерентно, використовують матрицю Мюллера з 16 дійсними елементами, формалізм якої ґрунтується на використанні стану поляризації хвилі вектором Стокса та розсіювальних властивостей атмосферного утворення [198-204].

Результат взаємодії хвилі, випромінюваної антеною СРПК, з атмосферним утворенням, у якому перебуває навігаційний об'єкт, отримують шляхом множення вектору Стокса випромінюваної хвилі на матрицю Мюллера складного об'єкта, унаслідок чого обчислюють вектор Стокса відбитої хвилі [205, 206].

Система сигналів $S_{вх}(t)$, що надходять на вхід СРПК, і вихідних сигналів $S_{вих}(t)$, пов'язані матричними рівняннями, що подані енергетичними параметрами Стокса:

$$S_{вх}(t)=\begin{bmatrix} S_{1вх}(t) \\ S_{2вх}(t) \\ S_{3вх}(t) \\ S_{4вх}(t) \end{bmatrix}, \tag{4.1}$$

$$S_{вих}(t)=\begin{bmatrix} S_{1вих}(t) \\ S_{2вих}(t) \\ S_{3вих}(t) \\ S_{4вих}(t) \end{bmatrix}. \tag{4.2}$$

У разі використання моделі взаємодії СРПК з атмосферним середовищем, у якому перебуває навігаційний об'єкт, коли враховується реакція атмосферного середовища на функціонування СРПК під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів в умовах атмосферних перешкод, фіксовану послідовність операторів, що змінюються в часі, подано як матриці Мюллера *S(t)*, що характеризують набір атмосферних середовищ (дощі різної інтенсивності та фазового стану):

$$S_1(t_1)=\begin{bmatrix} \alpha_{11}(t_1) & \alpha_{12}(t_1) & \alpha_{13}(t_1) & \alpha_{14}(t_1) \\ \alpha_{21}(t_1) & \alpha_{22}(t_1) & \alpha_{23}(t_1) & \alpha_{24}(t_1) \\ \alpha_{31}(t_1) & \alpha_{32}(t_1) & \alpha_{33}(t_1) & \alpha_{34}(t_1) \\ \alpha_{41}(t_1) & \alpha_{42}(t_1) & \alpha_{43}(t_1) & \alpha_{44}(t_1) \end{bmatrix}; \tag{4.3}$$

$$S_2(t_2)=\begin{bmatrix} \alpha_{11}(t_2) & \alpha_{12}(t_2) & \alpha_{13}(t_2) & \alpha_{14}(t_2) \\ \alpha_{21}(t_2) & \alpha_{22}(t_2) & \alpha_{23}(t_2) & \alpha_{24}(t_2) \\ \alpha_{31}(t_2) & \alpha_{32}(t_2) & \alpha_{33}(t_2) & \alpha_{34}(t_2) \\ \alpha_{41}(t_2) & \alpha_{42}(t_2) & \alpha_{43}(t_2) & \alpha_{44}(t_2) \end{bmatrix}; \tag{4.4}$$

……..

$$S_n(t_n)=\begin{bmatrix} \alpha_{11}(t_n) & \alpha_{12}(t_n) & \alpha_{13}(t_n) & \alpha_{14}(t_n) \\ \alpha_{21}(t_n) & \alpha_{22}(t_n) & \alpha_{23}(t_n) & \alpha_{24}(t_n) \\ \alpha_{31}(t_n) & \alpha_{32}(t_n) & \alpha_{33}(t_n) & \alpha_{34}(t_n) \\ \alpha_{41}(t_n) & \alpha_{42}(t_n) & \alpha_{43}(t_n) & \alpha_{44}(t_n) \end{bmatrix}, \tag{4.5}$$

де $\alpha_{nn}(t_n)$- елементи матриц $S_1(t_1)$, $S_2(t_2)$ ... $S_n(t_n)$, що характеризують відбивні властивості атмосферного середовища, у якому перебуває навігаційний об'єкт.

З урахуванням співвідношень (4.1) - (4.5) для СРПК, у загальному вигляді для будь-якого моменту часу, основний інформаційний потік є суцільним від входу до виходу, сформованим атмосферним середовищем і навігаційним об'єктом. Тоді модель основного інформаційного потоку подається у вигляді трьох матриць:

$$\begin{bmatrix} S_{1вх}(t_n) \\ S_{2вх}(t_n) \\ S_{3вх}(t_n) \\ S_{4вх}(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}(t_n) & \alpha_{12}(t_n) & \alpha_{13}(t_n) & \alpha_{14}(t_n) \\ \alpha_{21}(t_n) & \alpha_{22}(t_n) & \alpha_{23}(t_n) & \alpha_{24}(t_n) \\ \alpha_{31}(t_n) & \alpha_{32}(t_n) & \alpha_{33}(t_n) & \alpha_{34}(t_n) \\ \alpha_{41}(t_n) & \alpha_{42}(t_n) & \alpha_{43}(t_n) & \alpha_{44}(t_n) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вих}(t_n) \\ S_{2вих}(t_n) \\ S_{3вих}(t_n) \\ S_{4вих}(t_n) \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Синтаксичний підхід до дослідження процесів або отримання інформації СРПК спрямований на структурний аналіз інформації, тобто зняття невизначеності під час надходження повідомлення про навігаційний об'єкт, що перебуває в умовах атмосферного середовища, з урахуванням просторово-часової та поляризаційної структур луна-сигналу. Семантичний підхід передбачає аналіз смислового змісту інформації, що надходить на вхід СРПК, а прагматичний - оцінювання корисності та цінності одержуваної інформації. Систему сигналів розглядають як деяку математичну конструкцію, що відображає здатність перетворення, передавання, одержання й оброблення радіолокаційної інформації про спостережувану ситуацію.

4.2 Моделювання відбивної здатності складних об'єктів під час їх спостереження СРПК

Розглядається знаходження в зоні атмосферного утворення навігаційного об'єкта. Електромагнітна хвиля, яку випромінює всеполяризована антена СРПК і яку

приймають під час відбиття від зони випадних опадів, у якій перебуває навігаційний об'єкт, представляється чотирма дійсними параметрами Стокса S_1, S_2, S_3, S_4 :

$$\begin{aligned} S_1 &= I_x + I_y = I_{+\pi/4} + I_{-\pi/4} = I_л + I_п; \\ S_2 &= I_x - I_y; \\ S_3 &= I_{+\pi/4} + I_{-\pi/4}; \\ S_4 &= I_п - I_л. \end{aligned} \qquad (4.7)$$

Параметри Стокса називаються параметричними й описують поляризацію поля хвилі за допомогою системи квадратичних відносно напруженості поля дійсних параметрів через інтенсивності хвилі, що позначаються через I_x, I_y, $I_{+\pi/4}$, $I_{-\pi/4}$, $I_л$, $I_п$, де перші чотири відносяться до лінійних поляризацій, а останні дві - до кругової поляризації лівого і правого напряму обертання.

Відбивні властивості радіолокаційного об'єму в (4.6) атмосферного утворення, в якому перебуває навігаційний об'єкт, характеризуються елементами (α_{11} ... α_{44}), а електромагнітна хвиля на випромінювання і на приймання представлена у вигляді двох матриць, що складаються з параметрів Стокса. Тоді рівняння зв'язку між випромінюваною хвилею, хвилею відбитою від складного об'єкта і властивостями відбиваючого радіолокаційного об'єму складного об'єкта, записуються у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1від} \\ S_{2від} \\ S_{3від} \\ S_{4від} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ S_{3вип} \\ S_{4вип} \end{bmatrix}, \qquad (4.8)$$

або у вигляді чотирьох лінійних рівнянь:

$$\left.\begin{aligned} S_{1від} &= \alpha_{11} S_{1вип} + \alpha_{12} S_{2вип} + \alpha_{13} S_{3вип} + \alpha_{14} S_{4вип} \\ S_{2від} &= \alpha_{21} S_{1вип} + \alpha_{22} S_{2вип} + \alpha_{23} S_{3вип} + \alpha_{24} S_{4вип} \\ S_{3від} &= \alpha_{31} S_{1вип} + \alpha_{32} S_{2вип} + \alpha_{33} S_{3вип} + \alpha_{34} S_{4вип} \\ S_{4від} &= \alpha_{41} S_{1вип} + \alpha_{42} S_{2вип} + \alpha_{43} S_{3вип} + \alpha_{44} S_{4вип} \end{aligned}\right\}. \qquad (4.9)$$

Визначення відбивних властивостей певного виду атмосферного утворення, в якому перебуває навігаційний об'єкт, проводиться шляхом теоретичного або

експериментального дослідження елементів матриці (α_{11} ... α_{44}), які несуть всю інформацію про фізичні властивості складного об'єкта. Під час моделювання відбивних властивостей складного об'єкта використовують параметри Стокса випромінюваної хвилі чотирьох поляризацій, а також параметри Стокса відбитої хвилі для кожного виду поляризації випромінюваної хвилі.

Тоді під час опромінення складного об'єкта, що складається із зони опадів певної інтенсивності з навігаційним об'єктом, який перебуває в ній, електромагнітною хвилею лінійної вертикальної або горизонтальної поляризації, рівняння (4.8) запишеться так:

$$\begin{bmatrix} S_{1від} \\ S_{2від} \\ S_{3від} \\ S_{4від} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & 0 & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & 0 & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & 0 & 0 \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{4.10}$$

або у такому вигляді:

$$\left[S_{від}\right] = \left[\alpha\right] \cdot \left[S_{вип.ЛГ(ЛВ)}\right], \tag{4.11}$$

а матриця елементів $\left[\alpha\right]$ запишеться:

$$\left[\alpha\right] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} \end{bmatrix}. \tag{4.12}$$

Оскільки параметри Стокса випромінюваної та відбитої хвиль не є незалежними, то між ними існують чотири лінійні рівняння:

$$\left.\begin{aligned} S_{1від} &= \alpha_{11} S_{1вип} + \alpha_{12} S_{2вип} \\ S_{2від} &= \alpha_{21} S_{1вип} + \alpha_{22} S_{2вип} \\ S_{3від} &= \alpha_{31} S_{1вип} + \alpha_{32} S_{2вип} \\ S_{4від} &= \alpha_{41} S_{1вип} + \alpha_{42} S_{2вип} \end{aligned}\right\}, \tag{4.13}$$

розв'язання яких дає змогу визначити елементи матриці (4.12).

Під час опромінення зони випадних опадів, у якій перебуває навігаційний об'єкт, електромагнітною хвилею лінійної поляризації з нахилом електричного вектору під кутом 45° рівняння (4.8) подається у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1від} \\ S_{2від} \\ S_{3від} \\ S_{4від} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & \alpha_{13} & 0 \\ \alpha_{21} & 0 & \alpha_{23} & 0 \\ \alpha_{31} & 0 & \alpha_{33} & 0 \\ \alpha_{41} & 0 & \alpha_{43} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ 0 \\ S_{3вип} \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{4.14}$$

або у такому вигляді:

$$\left[S_{від}\right] = \left[\alpha\right] \cdot \left[S_{вип.Л45^0}\right], \tag{4.15}$$

а матриця елементів $\left[\alpha\right]$ запишеться таким чином:

$$\left[\alpha\right] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{33} \\ \alpha_{41} & \alpha_{43} \end{bmatrix}. \tag{4.16}$$

З (4.14) лінійні співвідношення між параметрами Стокса випромінюваної та відбитої хвиль подаються у вигляді:

$$\left.\begin{aligned} S_{1від} &= \alpha_{11} S_{1вип} + \alpha_{13} S_{2вип} \\ S_{2від} &= \alpha_{21} S_{1вип} + \alpha_{23} S_{2вип} \\ S_{3від} &= \alpha_{31} S_{1вип} + \alpha_{33} S_{2вип} \\ S_{4від} &= \alpha_{41} S_{1вип} + \alpha_{43} S_{2вип} \end{aligned}\right\}. \tag{4.17}$$

У разі опромінення зони випадних опадів, у якій перебуває навігаційний об'єкт, хвилею кругової поляризації лівого або правого напряму обертання електричного вектору, рівняння (4.9) подається у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1від} \\ S_{2від} \\ S_{3від} \\ S_{4від} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & 0 & 0 & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & 0 & 0 & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & 0 & 0 & \alpha_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ 0 \\ 0 \\ S_{4вип} \end{bmatrix}, \tag{4.18}$$

а також у вигляді трьох матриць:

$$[S_{від}] = [\alpha] \cdot [S_{вип.КР}], \tag{4.19}$$

а матриця елементів $[\alpha]$ запишеться таким чином:

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{44} \end{bmatrix}. \tag{4.20}$$

Між параметрами Стокса випромінюваної і відбитої хвиль лінійні співвідношення запишуться у вигляді чотирьох рівнянь:

$$\left.\begin{aligned} S_{1від} &= \alpha_{11} S_{1вип} + \alpha_{14} S_{2вип} \\ S_{2від} &= \alpha_{21} S_{1вип} + \alpha_{24} S_{2вип} \\ S_{3від} &= \alpha_{31} S_{1вип} + \alpha_{34} S_{2вип} \\ S_{4від} &= \alpha_{41} S_{1вип} + \alpha_{44} S_{2вип} \end{aligned}\right\}. \tag{4.21}$$

У СРПК, за однопозиційної радіолокації, радіолокаційне спостереження навігаційного об'єкта, що перебуває в атмосферному утворенні, здійснюється тоді, коли передавальна антена та приймальна антена розташовані в одній точці простору, а матриця елементів $[\alpha]$, є матрицею зворотного розсіювання:

$$[\alpha]=\begin{bmatrix}\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14}\\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24}\\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34}\\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44}\end{bmatrix}. \tag{4.22}$$

Матриця зворотного розсіювання (4.22) характеризує розсіювальні властивості складного об'єкта радіолокаційного спостереження в разі протилежних напрямків поширення випромінюваної (падаючої на об'єкт) та розсіяної об'єктом (відбитої) електромагнітної хвилі, тобто є оператором розсіювання з погляду перетворення поляризації хвилі складним об'єктом у разі зворотного розсіювання, відносно лінійного та кругового базисів.

Елементи матриці (4.22) α_{ij} є функціями однієї змінної t, тобто:

$$\alpha_{ij}=\alpha_{ij}(t). \tag{4.23}$$

Для теоретичного обчислення елементів матриці (4.22) можуть використовуватися їхні похідні та інтеграли.

Похідна матриці (4.22) визначається таким співвідношенням:

$$\frac{d}{dt}[\alpha]=\begin{bmatrix}\frac{d\alpha_{11}}{dt} & \frac{d\alpha_{12}}{dt} & \frac{d\alpha_{13}}{dt} & \frac{d\alpha_{14}}{dt}\\ \frac{d\alpha_{21}}{dt} & \frac{d\alpha_{22}}{dt} & \frac{d\alpha_{23}}{dt} & \frac{d\alpha_{24}}{dt}\\ \frac{d\alpha_{31}}{dt} & \frac{d\alpha_{32}}{dt} & \frac{d\alpha_{33}}{dt} & \frac{d\alpha_{34}}{dt}\\ \frac{d\alpha_{41}}{dt} & \frac{d\alpha_{42}}{dt} & \frac{d\alpha_{43}}{dt} & \frac{d\alpha_{44}}{dt}\end{bmatrix}, \tag{4.24}$$

а інтеграл матриці (4.22) подається у вигляді:

$$\int_{t_0}^{t}[\alpha]dt=\begin{bmatrix}\int_{t_0}^{t}\alpha_{11}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{12}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{13}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{14}dt\\ \int_{t_0}^{t}\alpha_{21}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{22}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{23}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{24}dt\\ \int_{t_0}^{t}\alpha_{31}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{32}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{33}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{34}dt\\ \int_{t_0}^{t}\alpha_{41}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{42}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{43}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{44}dt\end{bmatrix}. \tag{4.25}$$

Тоді з урахуванням (4.22) і (4.23) похідні та інтеграли матриць (4.12), (4.16) і (4.20) запишуться такими співвідношеннями:

Похідна матриці (4.12):

$$\frac{d}{dt}[\alpha]=\begin{bmatrix} \frac{d\alpha_{11}}{dt} & \frac{d\alpha_{12}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{21}}{dt} & \frac{d\alpha_{22}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{31}}{dt} & \frac{d\alpha_{32}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{41}}{dt} & \frac{d\alpha_{42}}{dt} \end{bmatrix}, \tag{4.26}$$

а її інтеграл:

$$\int_{t_0}^{t}[\alpha]dt=\begin{bmatrix} \int_{t_0}^{t}\alpha_{11}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{12}dt \\ \int_{t_0}^{t}\alpha_{21}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{22}dt \\ \int_{t_0}^{t}\alpha_{31}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{32}dt \\ \int_{t_0}^{t}\alpha_{41}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{42}dt \end{bmatrix}. \tag{4.27}$$

Похідна матриці (4.16):

$$\frac{d}{dt}[\alpha]=\begin{bmatrix} \frac{d\alpha_{11}}{dt} & \frac{d\alpha_{13}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{21}}{dt} & \frac{d\alpha_{23}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{31}}{dt} & \frac{d\alpha_{33}}{dt} \\ \frac{d\alpha_{41}}{dt} & \frac{d\alpha_{43}}{dt} \end{bmatrix}, \tag{4.28}$$

а її інтеграл:

$$\int_{t_0}^{t}[\alpha]dt=\begin{bmatrix}\int_{t_0}^{t}\alpha_{11}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{13}dt\\ \int_{t_0}^{t}\alpha_{21}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{23}dt\\ \int_{t_0}^{t}\alpha_{31}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{33}dt\\ \int_{t_0}^{t}\alpha_{41}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{43}dt\end{bmatrix}. \qquad (4.29)$$

Похідна матриці (4.20):

$$\frac{d}{dt}[\alpha]=\begin{bmatrix}\frac{d\alpha_{11}}{dt} & \frac{d\alpha_{14}}{dt}\\ \frac{d\alpha_{21}}{dt} & \frac{d\alpha_{24}}{dt}\\ \frac{d\alpha_{31}}{dt} & \frac{d\alpha_{34}}{dt}\\ \frac{d\alpha_{41}}{dt} & \frac{d\alpha_{44}}{dt}\end{bmatrix}, \qquad (4.30)$$

а її інтеграл:

$$\int_{t_0}^{t}[\alpha]dt=\begin{bmatrix}\int_{t_0}^{t}\alpha_{11}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{14}dt\\ \int_{t_0}^{t}\alpha_{21}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{24}dt\\ \int_{t_0}^{t}\alpha_{31}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{34}dt\\ \int_{t_0}^{t}\alpha_{41}dt & \int_{t_0}^{t}\alpha_{44}dt\end{bmatrix}. \qquad (4.31)$$

У загальному вигляді рішення системи лінійних диференціальних рівнянь першого порядку запишеться:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{dS_{1від}}{dt} &= \alpha_{11}S_{1вип} + \alpha_{12}S_{2вип} + \alpha_{13}S_{3вип} + \alpha_{14}S_{4вип} \\
\frac{dS_{2від}}{dt} &= \alpha_{21}S_{1вип} + \alpha_{22}S_{2вип} + \alpha_{23}S_{3вип} + \alpha_{24}S_{4вип} \\
\frac{dS_{3від}}{dt} &= \alpha_{31}S_{1вип} + \alpha_{32}S_{2вип} + \alpha_{33}S_{3вип} + \alpha_{34}S_{4вип} \\
\frac{dS_{4від}}{dt} &= \alpha_{41}S_{1вип} + \alpha_{42}S_{2вип} + \alpha_{43}S_{3вип} + \alpha_{44}S_{4вип}
\end{aligned}\right\}. \qquad (4.32)$$

Для визначення елементів матриці (4.22)) (α_{11} ... α_{44}) із системи рівнянь (4.32) необхідно мати відомості про параметри Стокса $S_{1від}$, $S_{2від}$, $S_{3від}$, $S_{4від}$, під час опромінення складного об'єкта радіолокаційного спостереження СРПК електромагнітними хвилями чотирьох фіксованих поляризацій, розглянутих вище, або неполяризованою хвилею, хвилею лінійної вертикальної (горизонтальної) поляризації, хвилею лінійною з кутом нахилу вектору поля у 45° і хвилею кругової поляризації (правого або лівого обертання вектору). Однак параметри Стокса відбитої хвилі пов'язані з мікроструктурою складного об'єкта, що відбиває, і їх теоретичне обчислення є складним завданням [207]. Позначаючи через D операцію диференціювання, система рівнянь (4.32) запишеться за допомогою матричних позначень так:

$$\left[DS_{від}\right] = \left[\alpha\right] \cdot \left[S_{вип}\right]. \qquad (4.33)$$

Параметри Стокса електромагнітної хвилі, випромінюваної антеною СРПК, не залежать від часу t і приймаються рівними одиниці. Тоді рівняння (4.32) набуде вигляду:

$$\left[DS_{від}\right] = \left[\alpha\right], \qquad (4.34)$$

або

$$\frac{d}{dt}\left(S_{від}\right) = \left[\alpha\right]. \qquad (4.35)$$

За початкових умов для відбитої хвилі $t = t_0$, а параметри Стокса відбитої хвилі в момент часу t_0 у загальному вигляді запишуться так:

$$\left[S_{відб}\right]=\left[S_{відб}\left(t_0\right)\right], \tag{4.36}$$

при цьому інтегральне рівняння набуде такого вигляду:

$$\left[S_{відб}\left(t\right)\right]=\left[S_{відб}\left(t_0\right)\right]+\int_{t_0}^{t}\left[\alpha\left(t\right)\right]\left[S_{відб}\left(t\right)\right]dt\,. \tag{4.37}$$

Розв'язання інтегрального рівняння (4.37) можна здійснити послідовним наближенням (метод Пікара) із введенням оператора інтегрування $Q = \int_{t_0}^{t}\alpha\left(t\right)dt$, що дає змогу отримати такий результат:

$$\left[S_{відб}\left(t\right)\right]=\left\{\left[1\right]+Q\left[\alpha\right]+Q\left[\alpha\right]Q\left[\alpha\right]+Q\left[\alpha\right]Q\left[\alpha\right]Q\left[\alpha\right]+...\right\}\left[S_{відб}\left(t_0\right)\right]. \tag{4.38}$$

Для отримання результату операції над матрицею (4.32) вводимо оператор інтегрування $\Omega^{t_0,t}$, визначений таким чином:

$$\Omega^{t_0,t}=\left\{\left[1\right]+\int_{t_0}^{t}\left[\alpha\right]dt+\int_{t_0}^{t}\left[\alpha\right]dt\int_{t_0}^{t}\left[\alpha\right]dt+\int_{t_0}^{t}\left[\alpha\right]dt\int_{t_0}^{t}\left[\alpha\right]dt\int_{t_0}^{t}\left[\alpha\right]dt+...\right\}. \tag{4.39}$$

У підсумку рішення системи (4.32) запишеться у вигляді:

$$\left[S_{відб}\left(t\right)\right]=\Omega^{t_0,t}\left[\alpha\right]\left[S_{відб}\left(t_0\right)\right], \tag{4.40}$$

Або за допомогою оператора інтегрування $\Omega^{t_0,t}$ рішення системи (4.40) подається у вигляді $\Omega^{t_0,t}\left[\alpha\right]=1$.

Диференціювання інтегрального оператора $\Omega^{t_0,t}[\alpha]$ за t , дає змогу отримати такий результат:

$$\frac{d}{dt}\Omega^{t_0,t}[\alpha]=[\alpha]\Omega^{t_0,t}[\alpha]. \tag{4.41}$$

Однак, елементи матриці (4.32) є функціями змінної t , кінцевими для всіх значень інтервалу (t_0, t), тому обчислення $\Omega^{t_0,t}[\alpha(t)]$ є ускладненим і для отримання наближеного рішення інтервал (t_0, t) розділяють на відрізки, в яких елементи α розглядаються як постійні, і тоді (4.41) записують у вигляді:

$$\Omega^{t_0,t}[\alpha]=e^{[\alpha](t-t_0)}, \tag{4.42}$$

тому що в цьому випадку:

$$Q[\alpha]Q[\alpha]Q[\alpha]...Q[\alpha]=\frac{(t-t_0)^n}{n!}[\alpha]^n. \tag{4.43}$$

З урахуванням (4.42) рівняння (4.41) записується у вигляді:

$$[S_{від}(t)]=e^{[\alpha](t-t_0)}[S_{від}(t_0)]. \tag{4.44}$$

Елементи α в рівняннях системи (4.32) є функціями змінної t, скінченними для всіх значень інтервалу (t_0, t), тому виникає потреба в поділі інтервалу (t_0, t), на відрізки, в яких елементи (α_{11} ... α_{44}) можна розглядати як постійні. Якщо (t_k, t_{k+1}) один із таких проміжків, то розв'язок системи (4.32) записується у вигляді:

$$[S_{від}(t_{k+1})]=e^{[\alpha](t_{k+1})-t_k}[S_{від}(t_k)]. \tag{4.45}$$

Однак, параметри Стокса $S_{від}(t)$ луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта не відомі, тому теоретичне розв'язання рівнянь (4.32), які ми розглядаємо, вельми скрутне. У СРПК в оперативній роботі визначення відбивних

властивостей об'єктів радіолокаційного спостереження здійснюють шляхом опромінення спостережуваного об'єкта неполяризованою хвилею, хвилею лінійної вертикальної (горизонтальної) поляризації, лінійною з нахилом електричного вектору 45° у декартовій системі координат і круговою поляризацією правого чи лівого напряму обертання вектору з вимірюванням параметрів Стокса відбитої від складного об'єкта частково поляризованої електромагнітної хвилі (за умови, що параметри Стокса випромінюваної хвилі приймаються рівними одиниці), за значеннями яких і визначаються елементи матриці (α_{11} ... α_{44}) [207, 208].

Так під час опромінення складного об'єкта радіолокаційного спостереження неполяризованою хвилею рівняння (4.8) запишеться так:

$$\begin{bmatrix} S'_{1від} \\ S'_{2від} \\ S'_{3від} \\ S'_{4від} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{21} & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{31} & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S'_{1вип} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{4.46}$$

З (4.46) виходять чотири лінійні рівняння:

$$\begin{aligned} S'_{1від} &= \alpha_{11} S'_{1вип} \\ S'_{2від} &= \alpha_{21} S'_{1вип} \\ S'_{3від} &= \alpha_{31} S'_{1вип} \\ S'_{4від} &= \alpha_{41} S'_{1вип} \end{aligned} . \tag{4.47}$$

Із рівнянь (4.47) визначають елементи першого стовпця матриці (4.22):

$$\alpha_{11} = \frac{S'_{1від}}{S'_{1вип}}; \alpha_{21} = \frac{S'_{2від}}{S'_{1вип}}; \alpha_{31} = \frac{S'_{3вип}}{S'_{1вип}}; \alpha_{41} = \frac{S'_{4від}}{S'_{1вип}}. \tag{4.48}$$

Параметри Стокса відбитої хвилі $S'_{1від}, S'_{2від}, S'_{3від}, S'_{4від}$ вимірюються СРПК, а параметр Стокса відомий заздалегідь, тому елементи першого стовпчика матриці легко визначаються експериментально та їхні значення виводяться на дисплей комп'ютера СРПК.

Для визначення елементів другого стовпця матриці (4.22) складний об'єкт радіолокаційного спостереження опромінюють електромагнітною хвилею лінійної вертикальної (горизонтальної) поляризації, для якої рівняння (4.8) запишеться у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S''_{1від} \\ S''_{2від} \\ S''_{3від} \\ S''_{4від} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & 0 & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & 0 & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & 0 & 0 \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S''_{1вип} \\ S''_{2вип} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{4.49}$$

а лінійні рівняння представляються такими залежностями:

$$\begin{aligned} S''_{1від} &= \alpha_{11} S''_{1вип} + \alpha_{12} S''_{2вип} \\ S''_{2від} &= \alpha_{21} S''_{1вип} + \alpha_{22} S''_{2вип} \\ S''_{3від} &= \alpha_{31} S''_{1вип} + \alpha_{32} S''_{2вип} \\ S''_{4від} &= \alpha_{41} S''_{1вип} + \alpha_{42} S''_{2вип} \end{aligned}, \tag{4.50}$$

з яких визначаються елементи другого стовпця матриці (4.22):

$$\alpha_{12} = \frac{S''_{1від}}{S''_{1вип}} - \alpha_{11}; \alpha_{22} = \frac{S''_{2від}}{S''_{1вип}} - \alpha_{21}; \alpha_{32} = \frac{S''_{3від}}{S''_{1вип}} - \alpha_{31}; \alpha_{42} = \frac{S''_{4від}}{S''_{1вип}} - \alpha_{41}, \tag{4.51}$$

де $S''_{1вип} = S''_{2вип}$, а елементи матриці α_{11}, α_{21}, α_{31}, α_{41} визначені у співвідношенні (4.47).

Для визначення елементів третього стовпця матриці (4.22) складний об'єкт радіолокаційного спостереження необхідно опромінити електромагнітною хвилею лінійної поляризації з кутом нахилу вектору поля 45°. Для такої хвилі $S'''_{1вип} = S'''_{3вип}$ і за аналогією з (4.51) елементи третього стовпця матриці (4.8) визначатимуться співвідношеннями:

$$\alpha_{13} = \frac{S'''_{1від}}{S'''_{1вип}} - \alpha_{11}; \alpha_{23} = \frac{S'''_{2від}}{S'''_{1вип}} - \alpha_{21}; \alpha_{33} = \frac{S'''_{3від}}{S'''_{1вип}} - \alpha_{31}; \alpha_{43} = \frac{S'''_{4від}}{S'''_{1вип}} - \alpha_{41}. \tag{4.52}$$

Опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею кругової поляризації дає змогу визначити четвертий стовпець елементів матриці (4.8) з урахуванням того, що $S''''_{1вип} = S''''_{4вип}$ і тоді за аналогією з (4.51) елементи матриці запишуться у вигляді:

$$\alpha_{14} = \frac{S''''_{1від}}{S''''_{1вип}} - \alpha_{11}; \alpha_{24} = \frac{S''''_{2від}}{S''''_{1вип}} - \alpha_{21}; \alpha_{34} = \frac{S''''_{3від}}{S''''_{1вип}} - \alpha_{31}; \alpha_{44} = \frac{S''''_{4від}}{S''''_{1вип}} - \alpha_{41}. \quad (4.53)$$

У результаті послідовного опромінення складного об'єкта електромагнітними хвилями чотирьох фіксованих поляризацій і вимірювання параметрів Стокса відбитої хвилі для кожної поляризації опромінюваної хвилі повністю визначається матриця розсіювання складного об'єкта, що характеризує його відбивні властивості. Розбіжності в значеннях елементів матриць визначених об'єктів використовуються надалі в методиці їхньої ідентифікації, а також для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферного утворення. Випромінювання електромагнітної хвилі певної поляризації здійснюється автоматично за визначеною програмою, а весь процес вимірювання елементів матриці становить кілька секунд, що перебуває в межах зміни фізичного стану внутрішньої структури радіолокаційного об'єму, який спостерігається СРПК складного об'єкта.

4.3 Структурний аналіз радіолокаційної інформації про об'єкти спостереження СРПК

4.3.1 Структурний аналіз радіолокаційного каналу під час розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення

Як сигнали, що зондують складний об'єкт радіолокаційного спостереження, та луна-сигнали частково поляризованої хвилі, що надходять на вхід всеполяризованої антени СРПК, обрано їхнє представлення дійсними енергетичними параметрами

Стокса. Перетворювачем зондувальних сигналів є складний об'єкт, що характеризується матрицею розсіювання Мюллера, елементи *α(t)* якої є дійсними і позитивними. Під час аналізу процесу перетворення сигналів, що зондують складний об'єкт, приймаються такі умови:

- *лінійності,* за якої сигналам, що зондують складний об'єкт, відповідно відповідають їхні луна-сигнали

$$S_{від}(t) = \alpha(t) S_{вип}(t), \tag{4.54}$$

де *α(t)* - матриця Мюллера;

- *речовинності (дійсності),* при опроміненні складного об'єкта електромагнітною хвилею електромагнітною хвилею, представленою дійсними енергетичними параметрами Стокса для певних поляризацій, на випромінювання і прийом луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта, також представленого дійсними енергетичними параметрами Стокса;

- *трансляційної інваріантності*, що полягає у відгуку на складний об'єкт радіолокаційного спостереження СРПК, що зондує, електромагнітною хвилею певної поляризації за певного часового зсуву, тобто

$$S_{вип}(t-\tau) \to S_{від}(t-\tau). \tag{4.55}$$

За допомогою матриці *α(t)* за формулою (4.54) визначається відгук на будь-який сигнал заданої поляризації, що зондує складний об'єкт. Вхід і вихід сигналу складного об'єкта радіолокаційного спостереження пов'язані системою лінійних рівнянь (4.54). Властивості складного об'єкта, що розсіюють, представлені матрицями розсіювання *α(t)* для кожної поляризації електромагнітної хвилі, що опромінює складний об'єкт, і є універсальними, оскільки за допомогою матриць *α(t)* можна визначити внутрішню структуру складного об'єкта, як розсіювача, під час опромінення його електромагнітною хвилею певної поляризації. Елементи матриці *α(t)* характеризують розсіювальну здатність складного об'єкта під час його радіолокаційного дистанційного спостереження СРПК. Для розглянутого складного об'єкта, що складається з навігаційного об'єкта й атмосферного утворення,

залежність від часу елементів матриці $\alpha(t)$ жорстка, що відповідає відгуку луна-сигналу $S_{від}(t)$.

Елементи матриці $S(t)$ записуються у двокомпонентних позначеннях і складаються для складного об'єкта (CO) радіолокаційного спостереження СРПК у вигляді суми елементів навігаційного об'єкта й атмосферного утворення. Тоді матриця розсіювання складного об'єкта $\alpha_{CO}(t)$ запишеться у вигляді:

$$\alpha_{CO}(t)=\begin{bmatrix} \alpha_{11НО}(t)+\alpha_{11АУ}(t) & \alpha_{12НО}(t)+\alpha_{12АУ}(t) & \alpha_{13НО}(t)+\alpha_{13АУ}(t) & \alpha_{14НО}(t)+\alpha_{14АУ}(t) \\ \alpha_{21НО}(t)+\alpha_{21АУ}(t) & \alpha_{22НО}(t)+\alpha_{22АУ}(t) & \alpha_{23НО}(t)+\alpha_{23АУ}(t) & \alpha_{24НО}(t)+\alpha_{24АУ}(t) \\ \alpha_{31НО}(t)+\alpha_{31АУ}(t) & \alpha_{32НО}(t)+\alpha_{32АУ}(t) & \alpha_{33НО}(t)+\alpha_{33АУ}(t) & \alpha_{34НО}(t)+\alpha_{34АУ}(t) \\ \alpha_{41НО}(t)+\alpha_{41АУ}(t) & \alpha_{42НО}(t)+\alpha_{42АУ}(t) & \alpha_{43НО}(t)+\alpha_{43АУ}(t) & \alpha_{44НО}(t)+\alpha_{44АУ}(t) \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

Магнітна складова електромагнітної хвилі в матриці розсіювання складного об'єкта не використовується, оскільки напрямок опромінення і його радіолокаційне спостереження однопозиційною радіолокацією жорстко пов'язані. У процесі радіолокаційного спостереження за складним об'єктом, залежно від його внутрішньої структури, змінюються радіолокаційні параметри луна-сигналів електромагнітної хвилі, що надходять на вхід СРПК і характеризують стан складного об'єкта. Взаємодія СРПК і складного об'єкта функціонально пов'язані, тому основний інформаційний потік є наскрізним від входу до виходу і сформованим складним об'єктом. На виході СРПК здійснюється як структурний аналіз радіолокаційної інформації про об'єкти спостереження (навігаційний об'єкт і атмосферне утворення) з урахуванням характеристик просторово-часової та поляризаційної структур луна-сигналу електромагнітної хвилі, так і семантичний і прагматичний аналіз.

Семантика луна-сигналів, за їхнього поділу на луна-сигнал навігаційного об'єкта й луна-сигнал атмосферного утворення, пов'язана з їхніми тезаурусами, які відповідають інформації про структуру, стан, передісторію, характеристики, цілі,

цінності, накопиченої на теперішній час про навігаційний об'єкт і атмосферне утворення. Тезаурус дає змогу спільно із системою луна-сигналів інтерпретувати її в межах накопиченого тезаурусу, а також використовувати семантичну і прагматичну інформацію про об'єкти радіолокаційного спостереження СРПК. Тезаурус для СРПК утворює відомості про джерело зондувальних (випромінюваних) сигналів, структуру СРПК і його характеристики. Щодо структури радіолокаційного каналу, то в ній можна виділити морфологічну, функціональну та інформаційну.

Морфологічна структура встановлює взаємозв'язок етапів отримання радіолокаційної інформації про об'єкти радіолокаційного спостереження від частини до цілого і в кінцевому підсумку до визначення функцій і характеристик усього СРПК (Рис.4.1).

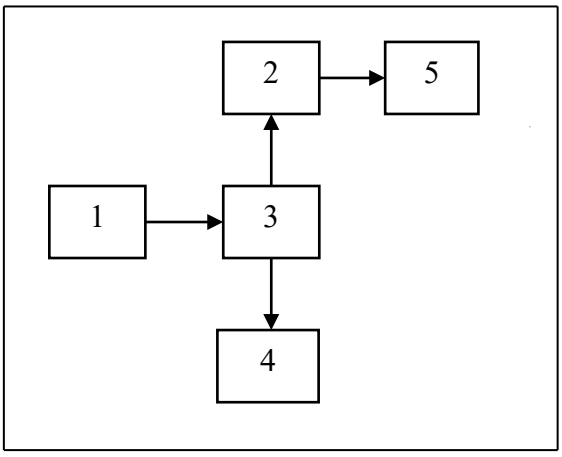


Рис.4.1. Морфологічна структура радіолокаційного каналу

1 - передавальний пристрій СРПК, що формує електромагнітну хвилю певної поляризації на випромінювання; 2 - траса поширення випромінюваної антеною СРПК електромагнітної хвилі до об'єкта радіолокаційного спостереження та від об'єкта до антени (атмосферне середовище); 3 - всеполяризована антена СРПК; 4 - пристрій оброблення луна-сигналу об'єкта СРПК; 5 - об'єкт радіолокаційного спостереження СРПК.

Морфологічна структура визначає етапи отримання радіолокаційної інформації про об'єкти радіолокаційного спостереження СРПК з урахуванням

створення та аналізу поляризаційної структури сигналів під час селекції навігаційного об'єкта на тлі луна-сигналів атмосферного утворення, а також визначає функції СРПК у процесі його функціонування.

Функціональна структура радіолокаційного каналу описує призначення СРПК і взаємозв'язок процедур, які виконуються під час його функціонування, а також під час оцінювання поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої електромагнітної хвилі, об'єктів, що спостерігаються, та порівняння радіолокаційних параметрів із даними наявного тезаурусу об'єктів спостереження. Функціональну структуру радіолокаційного каналу представлено на рис.4.2.

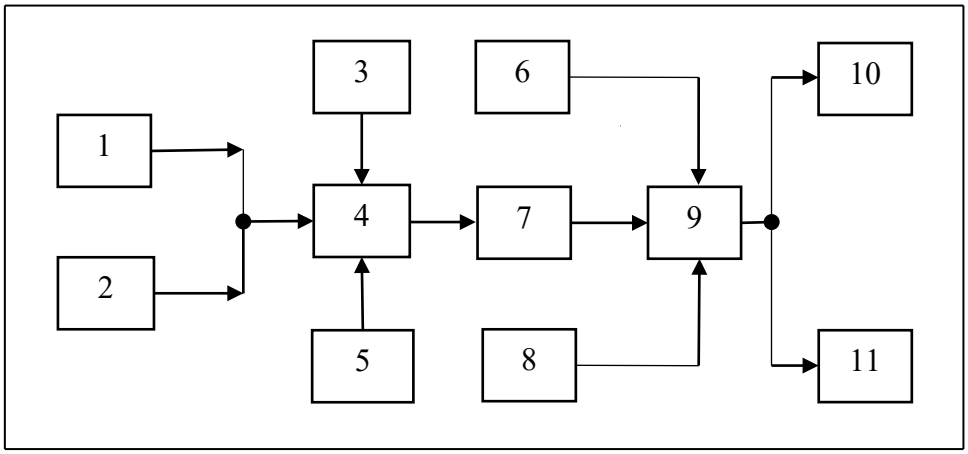


Рис.4.2. Функціональна структура радіолокаційного каналу

1 - параметри навігаційного об'єкта; 2 - параметри атмосферного утворення;
3 - характеристики СРПК; 4 - формування радіолокаційного сигналу;
5 - характеристики траси розповсюдження радіолокаційного сигналу;
6 - характеристики тракту СРПК оброблення радіолокаційного луна-сигналу;
7 - параметри радіолокаційного сигналу;
8 - тезаурус атмосферного утворення;
9 - оцінка навколишньої обстановки по трасі руху судна (складного об’єкта);
10 - оцінка параметрів навігаційного об'єкта радіолокаційного спостереження;
11 - оцінка параметрів атмосферного утворення.

Інформаційна структура СРПК здійснює оцінку радіолокаційного спостереження навігаційного об'єкта й атмосферного утворення за результатами синтезування морфологічної та функціональної структур із погляду формування радіолокаційної інформації про навігаційний об'єкт і атмосферне утворення, що дає змогу ефективно виконати завдання радіолокаційного спостереження як навігаційного об'єкта, так і атмосферного утворення і в такий спосіб забезпечити безпеку судноплавства.

Поляризаційні режими функціонування СРПК реалізуються на основі інформації, одержуваної системою луна-сигналів складного об'єкта частково поляризованої хвилі, і дають змогу розв'язати СРПК задачу поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, який перебуває в зоні атмосферного утворення. Інформаційну структуру СРПК наведено на рис.4.3.

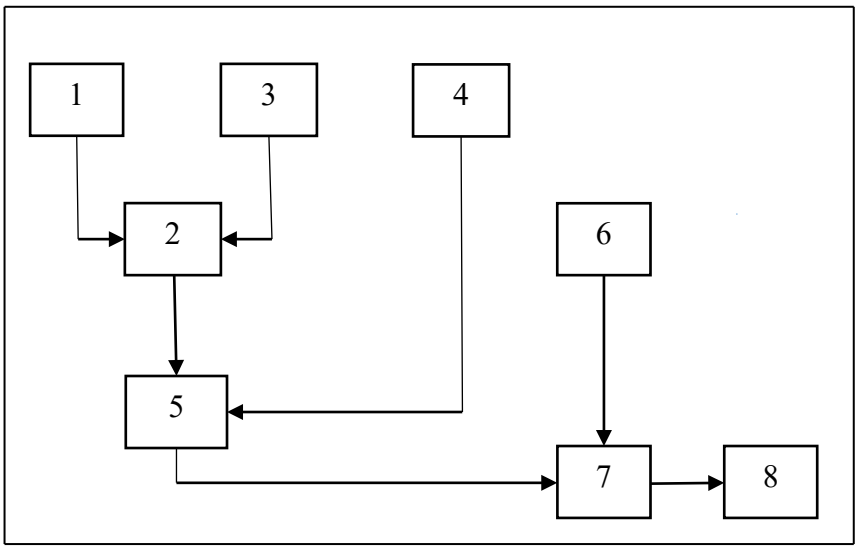


Рис.4.3. Інформаційна структура радіолокаційного каналу

1 - радіолокаційна обстановка по трасі руху судна; 2 - радіолокаційний сигнал навігаційного об'єкта; 3 - СРПК; 4 – атмосферне утворення; 5 - складний радіолокаційний сигнал; 6 - накопичений тезаурус про параметри атмосферного утворення; 7 – обробка радіолокаційної інформації; 8 - інформаційне забезпечення за оцінкою радіолокаційної обстановки.

Розсіювальна здатність складного об'єкта передбачає отримання інформації про об'єкт аналітично та експериментально. СРПК під час функціонування використовує відомості про розсіювальну здатність складного об'єкта у вигляді дійсних енергетичних поляризаційних параметрів Стокса, представлених своєрідними інформаційними блоками (енергетична матриця, матриця когерентності, ступінь поляризації, критеріальні параметри Стокса), за якими розв'язуються задачі виявлення і селекції навігаційних об'єктів. Рішення про об'єкти радіолокаційного спостереження СРПК за виміряними значеннями параметрів Стокса здійснюється з урахуванням даних інформаційних блоків за певним алгоритмом за векторами ознак, у якості яких, використовуються параметри Стокса. Під час радіолокаційного дослідження СРПК просторово-часових і поляризаційних характеристик луна-сигналів складного об'єкта для розв'язання задачі селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень, необхідною умовою на перший план винесено проблему створення поляризаційної моделі відбивних властивостей навігаційного об'єкта і атмосферного утворення. Під час дослідження відбивних властивостей складного об'єкта електромагнітне поле розглядають як модель сумарного поля, що являє собою сукупність повністю поляризованого луна-сигналу і частково поляризованого. При поляризаційних дослідженнях особливу увагу приділяють полю, представленому дійсними енергетичними параметрами Стокса. Результати вимірювання будь-якого елемента матриці розсіювання є суто фізичною величиною.

Параметрична модель складного об'єкта являє собою модель векторного випадкового поля у вигляді матриці, що складається з 16 дійсних елементів (матриці Мюллера). В основі процесу радіолокаційного спостереження складного об'єкта лежить акт розсіювання зондувального сигналу певної поляризації, випромінюваного всеполяризованою антеною СРПК. Розглядається, стосовно розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, необхідність відділення з розсіяного поля, що формується складним об'єктом у радіолокаційному об'ємі струмами, створеними зондувальним полем.

В однопозиційному СРПК реєструються часова і поляризаційна структури розсіяного складним об'єктом електромагнітного поля на досить віддаленій від нього відстані. Інформацію про поляризаційну структуру луна-сигналу складного об'єкта можна отримати введенням у розгляд дійсного чотиривимірного вектору Стокса *S(t)*:

$$S(t) = \{S_1(t), S_2(t), S_3(t), S_4(t)\}, \tag{4.57}$$

де $S_1(t) \ldots S_4(t)$ – параметри Стокса.

Перший параметр Стокса $S_1(t)$ - це повна енергія частково поляризованої хвилі, другий параметр Стокса $S_2(t)$ – це різниця енергій у горизонтально-вертикально поляризованих складових частково поляризованої хвилі, третій параметр Стокса $S_3(t)$ – це різниця енергій лінійно поляризованих складових частково поляризованої хвилі під кутами 45° і 135°, четвертий параметр Стокса $S_4(t)$ - це різниця енергій складових частково поляризованої хвилі, поляризованих за правим і лівим колом. Параметри Стокса виражаються через інтенсивності частково поляризованої хвилі, що надходить на вхід шестикомпонентного поляризаційного роздільника всеполяризованої антени СРПК.

Параметри Стокса виражені через інтенсивності I_x , I_y , $I_{\pi/4}$, $I_{-\pi/4}$, $I_Л$, $I_П$ запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} S_1(t) &= I_0 = (I_x + I_y) = (I_{\pi/4}, I_{-\pi/4}) = I_Л + I_П; \\ S_2(t) &= I_x - I_y; \\ S_3(t) &= I_{\pi/4} - I_{-\pi/4}; \\ S_4(t) &= I_Л - I_П . \end{aligned} \tag{4.58}$$

Зв'язок поляризаційних структур розсіяного і опромінювального складний об'єкт полів, представлених параметрами Стокса, формується характеристикою, що повністю визначає розсіювач, тобто матрицею розсіювання складного об'єкта, радіолокаційного спостереження СРПК. Матриця розсіювання формує алгоритм узгодженого приймання луна-сигналів складного об'єкта і дає змогу визначити

параметри його луна-сигналу через параметри Стокса. Матричне подання перетворювача (складного об'єкта) при поляризаційному описі поляризаційного стану опромінювальної та розсіяної хвиль матрицею Мюллера є справедливим і відрізняється від подання матрицею Джонса. Під час синтезу алгоритмів поляризаційного спостереження атмосферного утворення матрицю Мюллера доцільно використовувати під назвою статистичної матриці розсіювання атмосферного утворення, в якому перебуває навігаційний об'єкт, а також при радіолокаційному спостереженні складного об'єкта під час його опромінення повністю поляризованими хвилями трьох лінійних та однієї кругової поляризацій лівого або правого напряму обертання електричного вектору, а також неполяризованою хвилею. При цьому відповідними алгоритмами та високочастотними хвилеводними пристроями забезпечується формування приведених електромагнітних коливань, що зондують складний об'єкт, із відповідними векторами Стокса. Оцінка поляризованого стану луна-сигналів частково поляризованих хвиль складного об'єкта за допомогою векторів Стокса може бути синтезована коефіцієнтами матриць когерентності, енергетичної та статистичної, а також ступенями поляризацій. Детерміністський підхід до вибору поляризаційного стану хвиль, що аналізуються, забезпечує універсальність побудови СРПК для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні випадних опадів різної інтенсивності за траєкторією судна.

4.3.2 Моделювання відбивної здатності навігаційного об'єкта

Матрицю розсіювання навігаційного об'єкта представляють деяким канонічним розсіювачем у вигляді плоскої пластини, випуклих і увігнутих поверхонь пластини, на яких можуть утворюватися двогранні кутові відбивачі, які створюють луна-сигнали кругової поляризації, які приймає всеполяризована антена СРПК. Реальний же навігаційний об'єкт має відбивну поверхню великого розміру і під час падіння на неї електромагнітної хвилі певної поляризації, яка випромінюється всеполяризованою антеною СРПК. Поверхневі струми, що збуджуються на

відбиваючих елементах навігаційного об'єкта, представляють собою векторну суму полів, збуджуваних кожним елементом. З урахуванням малих відстаней між відбивними елементами металевої поверхні навігаційного об'єкта, порівняно з відстанню d_k від кожного елемента до приймальної антени СРПК, ефективна відбивальна площа (*ЕВП*) навігаційного об'єкта $\sigma_{НО}$ записується у відомому вигляді:

$$\sigma_{НО} = \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|^2 , \qquad (4.59)$$

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

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

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

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

$$[S_{від}]_{НО} = \begin{bmatrix} \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{11}^2 & \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{12}^2 & \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{13}^2 & \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{14}^2 \\ \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{21}^2 & \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{22}^2 & \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{23}^2 & \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{24}^2 \\ \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{31}^2 & \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{32}^2 & \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{33}^2 & \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{34}^2 \\ \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{41}^2 & \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{42}^2 & \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{43}^2 & \left| \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\sigma_k} e^{4\pi d_k / \lambda} \right|_{44}^2 \end{bmatrix} \qquad (4.60)$$

Елементи матриці (4.60) є функцією поляризації електромагнітної хвилі, що опромінює навігаційний об'єкт, яка характеризує орієнтацію вектору електричного поля відносно поверхні навігаційного об'єкта, що відбиває. До теперішнього часу визначення елементів матриці розсіювання луна-сигналів навігаційних об'єктів (4.60) представляє собою складне завдання. Будемо виходити з представлення відбивної здатності навігаційного об'єкта за допомогою елементів матриці Мюллера, опроміненням його відбивної поверхні повністю поляризованою електромагнітною хвилею, представленою матрицею параметрів Стокса. Приймання луна-сигналу електромагнітної хвилі навігаційного об'єкта також представлено матрицею параметрів Стокса. Тоді рівняння, що пов'язує параметри опромінювальної та відбитої хвиль з розсіювальними властивостями навігаційного об'єкта, запишеться в такому вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1відо} \\ S_{2відо} \\ S_{3відо} \\ S_{4відо} \end{bmatrix}_{НО} = \begin{bmatrix} \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{11}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{12}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{13}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{14}^2 \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{21}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{22}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{23}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{24}^2 \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{31}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{32}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{33}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{34}^2 \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{41}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{42}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{43}^2 & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{44}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ S_{3вип} \\ S_{4вип} \end{bmatrix}. \tag{4.61}$$

Перемноження матриць у (4.61) дає змогу отримати чотири лінійні рівняння:

$$S_{1відНО} = \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{11}^2 \cdot S_{1вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{12}^2 \cdot S_{2вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{13}^2 \cdot S_{3вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{14}^2 \cdot S_{4вип}; \tag{4.62}$$

$$S_{2відНО} = \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{21}^2 \cdot S_{1вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{22}^2 \cdot S_{2вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{23}^2 \cdot S_{3вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{24}^2 \cdot S_{4вип}; \tag{4.63}$$

$$S_{3відНО} = \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{31}^{2}\cdot S_{1вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{32}^{2}\cdot S_{2вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{33}^{2}\cdot S_{3вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{34}^{2}\cdot S_{4вип}; \quad (4.64)$$

$$S_{4відНО} = \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{41}^{2}\cdot S_{1вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{42}^{2}\cdot S_{2вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{43}^{2}\cdot S_{3вип} + \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k}e^{4\pi d_k/\lambda}\right|_{44}^{2}\cdot S_{4вип}; \quad (4.65)$$

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

4.3.3 Моделювання відбивної здатності атмосферного утворення

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

Електромагнітне поле, що збуджується зондувальною хвилею певної поляризації в частинках атмосферного утворення, є лінійною комбінацією полів, що збуджуються в кожній частинці, відповідно до її фізичних властивостей. Вплив атмосферних утворень на радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів СРПК проявляється не тільки у вигляді ослаблення луна-сигналу навігаційного об'єкта, а й погіршення їхньої радіолокаційної спостережуваності на траєкторії

судна завдяки розсіянню електромагнітної енергії частками атмосферного утворення у зворотному напрямку та створенню неправдивих луна-сигналів, що можуть бути сприйняті за луна-сигнали навігаційного об'єкта на індикаторі СРПК.

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

Атмосферні утворення є падаючими або зваженими водяними краплями або крижаними кристалами, які є елементарними відбивачами електромагнітної енергії, що падає на них, і характеризуються певною геометричною конфігурацією (сфера, сплюснуті та витягнуті еліпсоїди обертання) за величиною відношення їхніх основних розмірів до довжини опромінюваної хвилі. Так, під час випадання облогових опадів довжина опромінювальної хвилі значно більша за розміри їхніх частинок і такі атмосферні утворення характеризуються релеєвським розсіюванням електромагнітної енергії (розглядається частинка опадів як електричний диполь, у якому опромінювальна хвиля збуджує відповідні струми).

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

Атмосферні утворення, як об'єкти, що заважають радіолокаційному спостереженню навігаційних об'єктів СРПК, складаються із сукупностей N_0 рідких і

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

$$V = \frac{2\pi R^2 c\tau_u}{D}, \tag{4.66}$$

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

c – швидкість світла, м/с;

τ_u – тривалість випромінюваного імпульсу, мкс;

D – коефіцієнт направленої дії антени СРПК.

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

$$\bar{\sigma}_{AУ} = N_0 \sigma_0 V \ , \tag{4.67}$$

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

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

$$\bar{\sigma}_{AУ} = 2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D} \ . \tag{4.68}$$

З урахуванням (4.68) розсіювальні властивості атмосферного утворення можна представити такою матрицею:

$$\left[S_{від}\right]_{АУ}=\begin{bmatrix}\left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{11} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{12} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{13} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{14}\\ \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{21} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{22} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{23} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{24}\\ \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{31} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{32} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{33} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{34}\\ \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{41} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{42} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{43} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{44}\end{bmatrix}. \tag{4.69}$$

Матриця розсіювання атмосферного утворення (4.69) входить до рівняння, що зв'язує параметри опромінювальної та відбитої хвиль, представлених параметрами Стокса:

$$\begin{bmatrix}S_{1від}\\ S_{2від}\\ S_{3від}\\ S_{4від}\end{bmatrix}_{АУ}=\begin{bmatrix}\left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{11} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{12} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{13} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{14}\\ \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{21} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{22} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{23} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{24}\\ \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{31} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{32} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{33} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{34}\\ \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{41} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{42} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{43} & \left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{44}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}S_{1вип}\\ S_{2вип}\\ S_{3вип}\\ S_{4вип}\end{bmatrix}. \tag{4.70}$$

Перемноження матриць у рівнянні (4.70) дає змогу отримати чотири лінійні рівняння, що представляють луна-сигнал атмосферного утворення:

$$\begin{aligned}S_{1відАУ}=&\left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{11}\cdot S_{1вип}+\left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{12}\cdot S_{2вип}+\left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{13}\cdot S_{3вип}+\\ &+\left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{14}\cdot S_{4вип};\end{aligned} \tag{4.71}$$

$$\begin{aligned}S_{2відАУ}=&\left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{21}\cdot S_{1вип}+\left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{22}\cdot S_{2вип}+\left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{23}\cdot S_{3вип}+\\ &+\left(2\pi\sigma_0 N_0\frac{R^2c\tau_u}{D}\right)_{24}\cdot S_{4вип};\end{aligned} \tag{4.72}$$

$$S_{3відАУ} = \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{31} \cdot S_{1вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{32} \cdot S_{2вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{33} \cdot S_{3вип} + \\ + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{34} \cdot S_{4вип}; \quad (4.73)$$

$$S_{4відАУ} = \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{41} \cdot S_{1вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{42} \cdot S_{2вип} + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{43} \cdot S_{3вип} + \\ + \left(2\pi\sigma_0 N_0 \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{44} \cdot S_{4вип}. \quad (4.74)$$

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

4.3.4 Моделювання відбивної здатності складного об'єкта

Суднові радіолокаційні поляризаційні комплекси функціонують у складних умовах атмосферного середовища, за яких погіршується радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів. Якщо визначити рівень безпеки виникнення катастрофічної, аварійної та складної ситуації за допомогою математичного моделювання, під час якого відмови тих чи інших видів вводяться у функціональні системи суден, то моделювання функціонування суднових радіолокаційних комплексів під час впливу перешкод від атмосферного утворення є складною задачею, розв'язання якої потребує відомостей як про структуру та властивості навігаційного об'єкта радіолокаційного моніторингу, так про атмосферного утворення. Незважаючи на доведення до розробників і виробників суднового радіолокаційного устаткування вимог і рекомендацій технічного персоналу суден до нових розробок суднових радіолокаційних комплексів, дотепер в експлуатованих суднових СРК повною мірою ще не враховані фактори впливу атмосферних

утворень на радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів, не використовується поляризаційна структура радіолокаційних сигналів, а поляризацію електромагнітної хвилі не розглядають як важливе потенційне джерело інформації щодо навігаційного об'єкта.

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

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

$$\begin{vmatrix}
\left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{13}^{2}+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{13} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{14}^{2}+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{14} \\
\left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{23}^{2}+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{23} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{24}^{2}+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{24} \\
\left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{33}^{2}+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{33} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{34}^{2}+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{34} \\
\left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{43}^{2}+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{43} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{44}^{2}+\left(2\pi\sigma_o N_o\frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{44}
\end{vmatrix}. \quad (4.75)$$

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

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

$$\begin{bmatrix} \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{13}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{13} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{14}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{14} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{23}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{23} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{24}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{24} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{33}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{33} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{34}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{34} \\ \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{43}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{43} & \left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|_{44}^2 + \left(2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D}\right)_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ S_{3вип} \\ S_{4вип} \end{bmatrix}. \quad (4.76)$$

Для середньої *ЕВП* відбиваючого радіолокаційного об'єму атмосферного утворення було зроблено припущення про однакові *ЕВП* усіх елементарних відбивачів σ_0, однак, у складному об'єкті наявні *ЕВП* із різними σ_i, тоді $2\pi\sigma_o N_o \frac{R^2 c\tau_u}{D} = \bar{\sigma}_{AV}$, а $\left|\sum_{k=1}^{n}\sqrt{\sigma_k e^{(4\pi d_k)/\lambda}}\right|^2 = \sigma_{HO}$ і рівняння (4.76) набуде вигляду:

$$\begin{bmatrix} S_{1від CO} \\ S_{2від CO} \\ S_{3від CO} \\ S_{4від CO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11HO} + \bar{\sigma}_{11AV} & \sigma_{12HO} + \bar{\sigma}_{12AV} & \sigma_{13HO} + \bar{\sigma}_{13AV} & \sigma_{14HO} + \bar{\sigma}_{14AV} \\ \sigma_{21HO} + \bar{\sigma}_{21AV} & \sigma_{22HO} + \bar{\sigma}_{22AV} & \sigma_{23HO} + \bar{\sigma}_{23AV} & \sigma_{24HO} + \bar{\sigma}_{24AV} \\ \sigma_{31HO} + \bar{\sigma}_{31AV} & \sigma_{32HO} + \bar{\sigma}_{32AV} & \sigma_{33HO} + \bar{\sigma}_{33AV} & \sigma_{34HO} + \bar{\sigma}_{34AV} \\ \sigma_{41HO} + \bar{\sigma}_{41AV} & \sigma_{42HO} + \bar{\sigma}_{42AV} & \sigma_{43HO} + \bar{\sigma}_{43AV} & \sigma_{44HO} + \bar{\sigma}_{44AV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ S_{3вип} \\ S_{4вип} \end{bmatrix}. \quad (4.77)$$

Опромінюючи складний об'єкт електромагнітною хвилею певної поляризації визначаються елементи матриці розсіювання складного об'єкта (4.77). При цьому розсіювачі в атмосферному утворенні змінюють свою орієнтацію відносно один одного, форму, розміри, фазовий стан, а відбитий луна-сигнал навігаційного об'єкта є результатом інтерференції хвиль, відбитих від його окремих елементів поверхні. Тому відбивні властивості складного об'єкта визначаються внутрішньою структурою його двох характерних частин, що мають певні особливості. Під час опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею певної поляризації луна-сигнал матиме еліптичну поляризацію, а відбита хвиля стає частково поляризованою. Елементи матриці розсіювання складного об'єкта можна подати у вигляді сумарних ефективних площ розсіювання складного об'єкта $\sigma_{mnHO} + \sigma_{mnAУ} = \sigma_{mnCO}$.

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

$$\begin{bmatrix} S_{1відCO} \\ S_{2відCO} \\ S_{3відCO} \\ S_{4відCO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11CO} & \sigma_{12CO} & \sigma_{13CO} & \sigma_{14CO} \\ \sigma_{21CO} & \sigma_{22CO} & \sigma_{23CO} & \sigma_{24CO} \\ \sigma_{31CO} & \sigma_{32CO} & \sigma_{33CO} & \sigma_{34CO} \\ \sigma_{41CO} & \sigma_{42CO} & \sigma_{43CO} & \sigma_{44CO} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ S_{3вип} \\ S_{4вип} \end{bmatrix} . \qquad (4.78)$$

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

поляризаційної селекції луна-сигналів, що дає змогу за поляризаційною структурою луна-сигналу складного об'єкта розрізнити індивідуальні характеристики навігаційного об'єкта, що спостерігається судновою СРК, на тлі атмосферного утворення.

4.4 Висновки за розділом 4

1 Обґрунтовано параметричне представлення поляризації електромагнітних хвиль, як основного інформативного параметра СРПК, у вигляді чотирьох дійсних, енергетичних параметрів Стокса, що мають однакову розмірність, з яких сформульовано матриці опромінювальних складних об'єктів та матриці відбитих від них електромагнітних хвиль, а відбивні властивості складних об'єктів охарактеризовано матрицями Мюллера, що складаються з 16 елементів і визначаються послідовним опромінюванням складного об'єкта електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій та прийманням всеполяризованою антеною їхніх луна-сигналів.

2 Представлено модель відбивної здатності складних об'єктів, під час їхнього радіолокаційного спостереження СРПК, у вигляді рівняння зв'язку між трьома матрицями, що визначають енергетичні, параметричні характеристики повністю поляризованих хвиль, які опромінюють складний об'єкт радіолокаційного спостереження, луна-сигналів частково поляризованих хвиль складного об'єкта, що враховують їхні енергетичні параметри, та матриці зворотного розсіювання, елементи якої характеризують розсіювальні властивості складного об'єкта, при протилежних напрямках поширення опромінювальних і розсіяних електромагнітних хвиль.

3 У зв'язку з тим, що в процесі радіолокаційного спостереження складного об'єкта СРПК використано радіолокаційний канал, у якому залежність від його внутрішньої структури змінюються радіолокаційні параметри луно-сигналів електромагнітної хвилі, що надходить на його вхід, та характеризує стан складного

об'єкта, під час його теоретичного аналізу необхідно враховувати морфологічну, функціональну та інформаційну структури, що визначають етапи одержання радіолокаційної інформації про об'єкти, з урахуванням створення й аналізу їхньої поляризаційної структури, взаємозв'язок процедур під час функціонування СРПК і під час оцінювання поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів.

4 Розроблена модель відбивної здатності навігаційного об'єкта у вигляді чотирьох лінійних рівнянь, дає змогу визначити ефективні відбивні властивості його поверхні шляхом вимірювання СРПК чотирьох параметрів Стокса луна-сигналів відбитої хвилі.

5 З урахуванням розсіювальних властивостей атмосферних утворень обґрунтовано модель їхніх відбивних властивостей, представлену у вигляді матриці, що складається з 16 елементів, якими є середні для радіолокаційного об'єму ефективні поверхні розсіювання частинок атмосферного утворення, а поляризаційні властивості його визначають чотирикратним послідовним опроміненням повністю поляризованими хвилями визначених поляризацій і вимірюванням параметрів Стокса для кожної поляризації опромінювальної хвилі.

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

РОЗДІЛ 5
РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУДНОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ В УМОВАХ АТМОСФЕРНИХ ЗАВАД

5.1 Розроблення методології поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах атмосферних завад, з використанням *енергетичної матриці* розсіювання

Просторово-часова фільтрація перешкод може здійснюватися радіолокаційними комплексами, що мають антени різного типу, зокрема й фазовані антенні решітки [209]. 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 λ/2, із середньою ефективною поверхнею розсіювання $\overline{\sigma}_{еф}$ диполя, що дорівнює 0,17 λ^2 [210-216]. При множенні $\overline{\sigma}_{еф}$ на кількість дипольних відбивачів *n* у радіолокаційному об'ємі атмосферного утворення, виходить значення сумарної ефективної поверхні розсіювання частинок атмосферного утворення (*АУ*), які одночасно розсіюють енергію опромінюваної хвилі, тобто

$$\sigma_{\Sigma ефАУ} = 0{,}17\lambda^2 n \ . \tag{5.1}$$

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

$$\sigma_{\Sigma ефАУ} << N \cdot \sigma_{ефНО}, \tag{5.2}$$

де $N = \frac{\sigma_{ефАУ}}{\sigma_{ефНО}}$ - коефіцієнт пригнічення заважаючого фону атмосферного утворення.

Однак реальних $\sigma_{\Sigma ефАУ}$ і $\sigma_{ефНО}$ 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 перешкод, 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 перешкодами, призводять до помилкових, щодо реальної ситуації, рішень. Різноманітні ситуації, наявні під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, змушують ураховувати семантику та прагматику луна-сигналів атмосферних перешкод. Виникає необхідність використовувати тезаурус, який утворює відомості про атмосферні перешкоди (інтенсивність випадних опадів). Характеристики луна-сигналів під час спостереження навігаційного об'єкта в атмосферних перешкодах базуються на часових, просторових і поляризаційних параметрах. Поляризаційні дійсні параметри дають змогу здійснювати розпізнавання об'єкта на тлі атмосферних перешкод 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 перешкод 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, проводили в лінійному (*Л*) і круговому (*КР*) 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 відомих співвідношень:

$$\begin{aligned} S_1^{Л} &= \left\langle E_{x\max}^2 \right\rangle + \left\langle E_{y\max}^2 \right\rangle, \\ S_2^{Л} &= \left\langle E_{x\max}^2 \right\rangle - \left\langle E_{y\max}^2 \right\rangle, \\ S_3^{Л} &= 2\left\langle E_{x\max} \right\rangle \left\langle E_{y\max} \right\rangle \cos\Phi_{xy}, \\ S_4^{Л} &= 2\left\langle E_{x\max} \right\rangle \left\langle E_{y\max} \right\rangle \sin\Phi_{xy}. \end{aligned} \tag{5.3}$$

У разі використання кругового базису взаємозв'язок параметрів Стокса з амплітудами ортогональних компонент правого і лівого обертання електричного вектору хвилі $E_{пт}$, $E_{лт}$ і різницею фаз між ними $\Phi_{пл}$ записується у вигляді:

$$\begin{aligned} S_1^{КР} &= \left\langle E_{п\max}^2 \right\rangle + \left\langle E_{л\max}^2 \right\rangle, \\ S_2^{КР} &= \left\langle E_{п\max}^2 \right\rangle - \left\langle E_{л\max}^2 \right\rangle, \\ S_3^{КР} &= 2\left\langle E_{п\max} \right\rangle \left\langle E_{л\max} \right\rangle \cos\Phi_{пл}, \\ S_4^{КР} &= 2\left\langle E_{п\max} \right\rangle \left\langle E_{л\max} \right\rangle \sin\Phi_{пл}. \end{aligned} \tag{5.4}$$

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 4х4 вектор-стовпець:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix}. \tag{5.5}$$

Спостережуваний СРПК навігаційний об'єкт послідовно опромінюють 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:

$$\begin{aligned} S_{вип}^{ЛВ} &= S_{1вип}, S_{2вип}, 0, 0; \\ S_{вип}^{ЛГ} &= S_{1вип}, -S_{2вип}, 0, 0; \\ S_{вип}^{Л45^o} &= S_{1вип}, 0, S_{3вип}, 0; \\ S_{вип}^{КР} &= S_{1вип}, 0, 0, S_{4вип}. \end{aligned} \tag{5.6}$$

Під час розсіювання опромінюваної хвилі будь-якої з наведених чотирьох поляризацій навігаційним об'єктом, атмосферним утворенням або навігаційним об'єктом і атмосферним утворенням (складний об'єкт), 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 матриці розсіювання складного об'єкта для кожної з наведених поляризацій опромінюваної хвилі в загальному вигляді визначається співвідношенням [11, 61]:

$$\begin{bmatrix} S_{1від}(t) \\ S_{2від}(t) \\ S_{3від}(t) \\ S_{4від}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}(t) & \alpha_{12}(t) & \alpha_{13}(t) & \alpha_{14}(t) \\ \alpha_{21}(t) & \alpha_{22}(t) & \alpha_{23}(t) & \alpha_{24}(t) \\ \alpha_{31}(t) & \alpha_{32}(t) & \alpha_{33}(t) & \alpha_{34}(t) \\ \alpha_{41}(t) & \alpha_{42}(t) & \alpha_{43}(t) & \alpha_{44}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип}(t) \\ S_{2вип}(t) \\ S_{3вип}(t) \\ S_{4вип}(t) \end{bmatrix} . \quad (5.7)$$

У разі опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею лінійної вертикальної поляризації рівняння (5.7), що характеризує зв'язок трьох матриць, запишеться у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S^{ЛВ}_{1від}(t) \\ S^{ЛВ}_{2від}(t) \\ S^{ЛВ}_{3від}(t) \\ S^{ЛВ}_{4від}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha^{ЛВ}_{11}(t) & \alpha^{ЛВ}_{12}(t) & 0 & 0 \\ \alpha^{ЛВ}_{21}(t) & \alpha^{ЛВ}_{22}(t) & 0 & 0 \\ \alpha^{ЛВ}_{31}(t) & \alpha^{ЛВ}_{32}(t) & 0 & 0 \\ \alpha^{ЛВ}_{41}(t) & \alpha^{ЛВ}_{42}(t) & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S^{ЛВ}_{1вип}(t) \\ S^{ЛВ}_{2вип}(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} . \quad (5.8)$$

Тоді перемноження трьох матриць у рівнянні (5.8) дає змогу отримати такі чотири лінійні рівняння:

$$\left.\begin{aligned} S^{ЛВ}_{1від} &= \alpha^{ЛВ}_{11} S^{ЛВ}_{1вип} + \alpha^{ЛВ}_{12} S^{ЛВ}_{2вип} \\ S^{ЛВ}_{2від} &= \alpha^{ЛВ}_{21} S^{ЛВ}_{1вип} + \alpha^{ЛВ}_{22} S^{ЛВ}_{2вип} \\ S^{ЛВ}_{3від} &= \alpha^{ЛВ}_{31} S^{ЛВ}_{1вип} + \alpha^{ЛВ}_{32} S^{ЛВ}_{2вип} \\ S^{ЛВ}_{4від} &= \alpha^{ЛВ}_{41} S^{ЛВ}_{1вип} + \alpha^{ЛВ}_{42} S^{ЛВ}_{2вип} \end{aligned}\right\} . \quad (5.9)$$

Оскільки інтенсивність випроміненої хвилі не змінюється, то можна прийняти, що $S^{ЛВ}_{1вип} = S^{ЛВ}_{2вип} = 1$, тоді (5.9) запишеться у вигляді:

$$\left.\begin{aligned} S^{ЛВ}_{1від} &= \alpha^{ЛВ}_{11} + \alpha^{ЛВ}_{12} \\ S^{ЛВ}_{2від} &= \alpha^{ЛВ}_{21} + \alpha^{ЛВ}_{22} \\ S^{ЛВ}_{3від} &= \alpha^{ЛВ}_{31} + \alpha^{ЛВ}_{32} \\ S^{ЛВ}_{4від} &= \alpha^{ЛВ}_{41} + \alpha^{ЛВ}_{42} \end{aligned}\right\} . \quad (5.10)$$

У разі опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею лінійної горизонтальної поляризації рівняння (5.7), що характеризує зв'язок трьох матриць, запишеться у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1від}^{ЛГ}(t) \\ S_{2від}^{ЛГ}(t) \\ S_{3від}^{ЛГ}(t) \\ S_{4від}^{ЛГ}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^{ЛГ}(t) & \alpha_{12}^{ЛГ}(t) & 0 & 0 \\ \alpha_{21}^{ЛГ}(t) & \alpha_{22}^{ЛГ}(t) & 0 & 0 \\ \alpha_{31}^{ЛГ}(t) & \alpha_{32}^{ЛГ}(t) & 0 & 0 \\ \alpha_{41}^{ЛГ}(t) & \alpha_{42}^{ЛГ}(t) & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип}^{ЛГ}(t) \\ -S_{2вип}^{ЛГ}(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} . \quad (5.11)$$

Тоді перемноження трьох матриць у рівнянні (5.11) дає змогу отримати такі чотири лінійні рівняння:

$$\left.\begin{aligned} S_{1від}^{ЛГ} &= \alpha_{11}^{ЛГ} S_{1вип}^{ЛГ} - \alpha_{12}^{ЛГ} S_{2вип}^{ЛГ} \\ S_{2від}^{ЛГ} &= \alpha_{21}^{ЛГ} S_{1вип}^{ЛГ} - \alpha_{22}^{ЛГ} S_{2вип}^{ЛГ} \\ S_{3від}^{ЛГ} &= \alpha_{31}^{ЛГ} S_{1вип}^{ЛГ} - \alpha_{32}^{ЛГ} S_{2вип}^{ЛГ} \\ S_{4від}^{ЛГ} &= \alpha_{41}^{ЛГ} S_{1вип}^{ЛГ} - \alpha_{42}^{ЛГ} S_{2вип}^{ЛГ} \end{aligned}\right\} . \quad (5.12)$$

Оскільки інтенсивність випроміненої хвилі не змінюється, то можна прийняти, що $S_{1вип}^{ЛВ} = -S_{2вип}^{ЛВ} = 1$, тоді (5.12) запишеться у вигляді:

$$\left.\begin{aligned} S_{1від}^{ЛГ} &= \alpha_{11}^{ЛГ} - \alpha_{12}^{ЛГ} \\ S_{2від}^{ЛГ} &= \alpha_{21}^{ЛГ} - \alpha_{22}^{ЛГ} \\ S_{3від}^{ЛГ} &= \alpha_{31}^{ЛГ} - \alpha_{32}^{ЛГ} \\ S_{4від}^{ЛГ} &= \alpha_{41}^{ЛГ} - \alpha_{42}^{ЛГ} \end{aligned}\right\} . \quad (5.13)$$

Під час опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею лінійної поляризації з нахилом електричного вектору 45° рівняння (5.7), що характеризує зв'язок трьох матриць, запишеться у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1від}^{Л45^o}(t) \\ S_{2від}^{Л45^o}(t) \\ S_{3від}^{Л45^o}(t) \\ S_{4від}^{Л45^o}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^{Л45^o}(t) & 0 & \alpha_{13}^{Л45^o}(t) & 0 \\ \alpha_{21}^{Л45^o}(t) & 0 & \alpha_{23}^{Л45^o}(t) & 0 \\ \alpha_{31}^{Л45^o}(t) & 0 & \alpha_{33}^{Л45^o}(t) & 0 \\ \alpha_{41}^{Л45^o}(t) & 0 & \alpha_{43}^{Л45^o}(t) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип}^{Л45^o}(t) \\ 0 \\ S_{3вип}^{Л45^o}(t) \\ 0 \end{bmatrix} . \quad (5.14)$$

Тоді перемноження трьох матриць у рівнянні (5.14) дає змогу отримати такі чотири лінійні рівняння:

$$\left.\begin{aligned} S_{1від}^{Л45^o} &= \alpha_{11}^{Л45^o} S_{1вип}^{Л45^o} + \alpha_{13}^{Л45^o} S_{3вип}^{Л45^o} \\ S_{2від}^{Л45^o} &= \alpha_{21}^{Л45^o} S_{1вип}^{Л45^o} + \alpha_{23}^{Л45^o} S_{3вип}^{Л45^o} \\ S_{3від}^{Л45^o} &= \alpha_{31}^{Л45^o} S_{1вип}^{Л45^o} + \alpha_{33}^{Л45^o} S_{3вип}^{Л45^o} \\ S_{4від}^{Л45^o} &= \alpha_{41}^{Л45^o} S_{1вип}^{Л45^o} + \alpha_{43}^{Л45^o} S_{3вип}^{Л45^o} \end{aligned}\right\} . \quad (5.15)$$

Оскільки інтенсивність випроміненої хвилі не змінюється, то можна прийняти, що $S_{1вип}^{Л45^o} = S_{3вип}^{Л45^o} = 1$, тоді (5.15) запишеться у вигляді:

$$\left.\begin{aligned} S_{1від}^{Л45^o} &= \alpha_{11}^{Л45^o} + \alpha_{13}^{Л45^o} \\ S_{2від}^{Л45^o} &= \alpha_{21}^{Л45^o} + \alpha_{23}^{Л45^o} \\ S_{3від}^{Л45^o} &= \alpha_{31}^{Л45^o} + \alpha_{33}^{Л45^o} \\ S_{4від}^{Л45^o} &= \alpha_{41}^{Л45^o} + \alpha_{43}^{Л45^o} \end{aligned}\right\} . \quad (5.16)$$

Під час опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею кругової поляризації правого або лівого напрямку обертання електричного вектору рівняння (5.7), що характеризує зв'язок трьох матриць, запишеться у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1від}^{KP}(t) \\ S_{2від}^{KP}(t) \\ S_{3від}^{KP}(t) \\ S_{4від}^{KP}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^{KP}(t) & 0 & 0 & \alpha_{14}^{KP}(t) \\ \alpha_{21}^{KP}(t) & 0 & 0 & \alpha_{24}^{KP}(t) \\ \alpha_{31}^{KP}(t) & 0 & 0 & \alpha_{34}^{KP}(t) \\ \alpha_{41}^{KP}(t) & 0 & 0 & \alpha_{44}^{KP}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип}^{KP}(t) \\ 0 \\ 0 \\ S_{4вип}^{KP}(t) \end{bmatrix} . \quad (5.17)$$

Тоді перемноження трьох матриць у рівнянні (5.17) дає змогу отримати такі чотири лінійні рівняння:

$$\left.\begin{aligned} S_{1від}^{КР} &= \alpha_{11}^{КР} S_{1вип}^{КР} + \alpha_{14}^{КР} S_{4вип}^{КР} \\ S_{2від}^{КР} &= \alpha_{21}^{КР} S_{1вип}^{КР} + \alpha_{24}^{КР} S_{4вип}^{КР} \\ S_{3від}^{КР} &= \alpha_{31}^{КР} S_{1вип}^{КР} + \alpha_{34}^{КР} S_{4вип}^{КР} \\ S_{4від}^{КР} &= \alpha_{41}^{КР} S_{1вип}^{КР} + \alpha_{44}^{КР} S_{4вип}^{КР} \end{aligned}\right\}. \tag{5.18}$$

Оскільки інтенсивність випроміненої хвилі не змінюється, то можна прийняти, що $S_{1вип}^{КР} = S_{4вип}^{КР} = 1$, тоді (5.18) запишеться у вигляді:

$$\left.\begin{aligned} S_{1від}^{КР} &= \alpha_{11}^{КР} + \alpha_{14}^{КР} \\ S_{2від}^{КР} &= \alpha_{21}^{КР} + \alpha_{24}^{КР} \\ S_{3від}^{КР} &= \alpha_{31}^{КР} + \alpha_{34}^{КР} \\ S_{4від}^{КР} &= \alpha_{41}^{КР} + \alpha_{44}^{КР} \end{aligned}\right\}. \tag{5.19}$$

Згрупуємо отримані лінійні рівняння (5.10), (5.13), (5.16) і (5.19) за першим, другим, третім і четвертим параметрами Стокса луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта за умов опромінення складного об'єкта електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій (*ЛВ, ЛГ, Л45°* и *КР*), у результаті отримаємо чотири системи лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} S_{1від}^{ЛВ} &= \alpha_{11}^{ЛВ} + \alpha_{12}^{ЛВ}; \\ S_{1від}^{ЛГ} &= \alpha_{11}^{ЛГ} - \alpha_{12}^{ЛГ}; \\ S_{1від}^{Л45^o} &= \alpha_{11}^{Л45^o} + \alpha_{13}^{Л45^o}; \\ S_{1від}^{КР} &= \alpha_{11}^{КР} + \alpha_{14}^{КР}. \end{aligned} \tag{5.20}$$

$$\begin{aligned} S_{2від}^{ЛВ} &= \alpha_{21}^{ЛВ} + \alpha_{22}^{ЛВ}; \\ S_{2від}^{ЛГ} &= \alpha_{21}^{ЛГ} - \alpha_{22}^{ЛГ}; \\ S_{2від}^{Л45^o} &= \alpha_{21}^{Л45^o} + \alpha_{23}^{Л45^o}; \\ S_{2від}^{КР} &= \alpha_{21}^{КР} + \alpha_{24}^{КР}. \end{aligned} \tag{5.21}$$

$$\begin{aligned} S_{3від}^{ЛВ} &= \alpha_{31}^{ЛВ} + \alpha_{32}^{ЛВ}; \\ S_{3від}^{ЛГ} &= \alpha_{31}^{ЛГ} - \alpha_{32}^{ЛГ}; \\ S_{3від}^{Л45^o} &= \alpha_{31}^{Л45^o} + \alpha_{33}^{Л45^o}; \\ S_{3від}^{КР} &= \alpha_{31}^{КР} + \alpha_{34}^{КР}. \end{aligned} \tag{5.22}$$

$$\begin{aligned} S_{4від}^{ЛВ} &= \alpha_{41}^{ЛВ} + \alpha_{42}^{ЛВ}; \\ S_{4від}^{ЛГ} &= \alpha_{41}^{ЛГ} - \alpha_{42}^{ЛГ}; \\ S_{4від}^{Л45^o} &= \alpha_{41}^{Л45^o} + \alpha_{43}^{Л45^o}; \\ S_{4від}^{КР} &= \alpha_{41}^{КР} + \alpha_{44}^{КР}. \end{aligned} \tag{5.23}$$

Із (5.20) - (5.23) визначають елементи α_{11} … α_{44}, які входять до матриці (5.7).

Для визначення елемента α_{11} із системи рівнянь (5.20) складаються перше і друге рівняння:

$$S_{1від}^{ЛВ} + S_{1від}^{ЛГ} = \alpha_{11}^{ЛВ} + \alpha_{12}^{ЛВ} + \alpha_{11}^{ЛГ} - \alpha_{12}^{ЛГ} = 2\alpha_{11}, \tag{5.24}$$

тоді

$$\alpha_{11} = \frac{S_{1від}^{ЛВ} + S_{1від}^{ЛГ}}{2}. \tag{5.25}$$

Для визначення елемента α_{12} із системи рівнянь (5.20) віднімається друге рівняння від першого:

$$S_{1від}^{ЛВ} - S_{1від}^{ЛГ} = \alpha_{11}^{ЛВ} + \alpha_{12}^{ЛВ} - \alpha_{11}^{ЛГ} + \alpha_{12}^{ЛГ} = 2\alpha_{12}, \tag{5.26}$$

тоді

$$\alpha_{12} = \frac{S_{1від}^{ЛВ} - S_{1від}^{ЛГ}}{2}. \tag{5.27}$$

Елемент α_{13} знаходиться з третього рівняння системи (5.20) за відомим елементом α_{11}, тобто

$$S_{1від}^{Л45^o} = \alpha_{11}^{Л45^o} + \alpha_{13}^{Л45^o},$$

$$\alpha_{13}^{Л45^o} = S_{1від}^{Л45^o} - \alpha_{11}^{Л45^o} = S_{1від}^{Л45^o} - \frac{S_{1від}^{ЛВ} + S_{1від}^{ЛГ}}{2}. \tag{5.28}$$

Із четвертого рівняння системи рівнянь (5.20) визначається елемент α_{14}, тобто

$$\alpha_{14}^{KP} = S_{1від}^{KP} - \frac{S_{1від}^{ЛВ} + S_{1від}^{ЛГ}}{2}. \tag{5.29}$$

У такий самий спосіб визначаються решта елементів матриці (5.7) із систем рівнянь (5.21) - (5.23).

У результаті опромінення складного об'єкта електромагнітними хвилями чотирьох фіксованих поляризацій визначено всі елементи $\alpha_{11}...\alpha_{44}$ матриці (5.7), що є дійсними енергетичними параметрами Стокса, які утворюють енергетичну матрицю розсіювання складного об'єкта (*СО*) та повністю характеризують його відбивні властивості [134, 150], тобто

$$\left[S_{енСО}(t)\right] = \begin{bmatrix} \frac{S_{1від}^{ЛВ}(t)+S_{1від}^{ЛГ}(t)}{2} & \frac{S_{1від}^{ЛВ}(t)-S_{1від}^{ЛГ}(t)}{2} & S_{1від}^{Л45^o}(t)-\frac{S_{1від}^{ЛВ}(t)+S_{1від}^{ЛГ}(t)}{2} & S_{1від}^{KP}(t)-\frac{S_{1від}^{ЛВ}(t)+S_{1від}^{ЛГ}(t)}{2} \\ \frac{S_{2від}^{ЛВ}(t)+S_{2від}^{ЛГ}(t)}{2} & \frac{S_{2від}^{ЛВ}(t)-S_{2від}^{ЛГ}(t)}{2} & S_{2від}^{Л45^o}(t)-\frac{S_{2від}^{ЛВ}(t)+S_{2від}^{ЛГ}(t)}{2} & S_{2від}^{KP}(t)-\frac{S_{2від}^{ЛВ}(t)+S_{2від}^{ЛГ}(t)}{2} \\ \frac{S_{3від}^{ЛВ}(t)+S_{3від}^{ЛГ}(t)}{2} & \frac{S_{3від}^{ЛВ}(t)-S_{3від}^{ЛГ}(t)}{2} & S_{3від}^{Л45^o}(t)-\frac{S_{3від}^{ЛВ}(t)+S_{3від}^{ЛГ}(t)}{2} & S_{3від}^{KP}(t)-\frac{S_{3від}^{ЛВ}(t)+S_{3від}^{ЛГ}(t)}{2} \\ \frac{S_{4від}^{ЛВ}(t)+S_{4від}^{ЛГ}(t)}{2} & \frac{S_{4від}^{ЛВ}(t)-S_{4від}^{ЛГ}(t)}{2} & S_{4від}^{Л45^o}(t)-\frac{S_{4від}^{ЛВ}(t)+S_{4від}^{ЛГ}(t)}{2} & S_{4від}^{KP}(t)-\frac{S_{4від}^{ЛВ}(t)+S_{4від}^{ЛГ}(t)}{2} \end{bmatrix} \tag{5.30}$$

Усі елементи, які входять в енергетичну матрицю розсіювання (5.30) 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 опромінювальні 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 виміряних 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.

5.1.1 Практичне розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта з використанням енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта.

Для розв'язання поставленої задачі проводиться виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта шляхом використання двох енергетичних матриць $[S_{енСО}]$ і $[S_{енАУ}]$. Енергетична матриця атмосферного утворення $[S_{енАУ}]$ відома заздалегідь з урахуванням його співвідношення *z - I*, наведеного в табл.5.1 для певних регіонів (1-8) за даними метеорологічних РЛС. За допомогою СРПК вимірюються параметри Стокса атмосферного утворення для різних інтенсивностей випадних опадів, зокрема, і для інтенсивностей випадних опадів, наведених у табл.5.1. За даними радіолокаційних вимірювань параметрів Стокса СРПК складають енергетичні матриці розсіювання випадних опадів для кожної інтенсивності. За допомогою виміряного першого параметра Стокса луна-сигналу складного об'єкта визначається інтенсивність випадних опадів на шляху судна, яка вводиться в програму пошуку енергетичної матриці атмосферного утворення виміряної інтенсивності.

Таблиця 5.1

Радіолокаційна відбиваність опадів z залежно від інтенсивності I випадних опадів

I, мм/год	Радіолокаційна відбиваність опадів *z*, *дБz*							
	Регіони							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	23,0	24,4	23,1	23,6	-	22,6	-	-
5	34,2	34,2	35,0	34,1	34,7	35,4	35,1	-
10	39,0	38,4	40,1	38,6	38,9	41,3	40,7	33,4
15	41,1	42,1	43,0	40,1	40,1	45,2	42,4	36,1
25	45,0	45,2	46,0	45,0	45,2	49,1	47,3	39,2
50	50,2	48,3	52,0	49,1	48,7	54,4	53,9	44,6
100	55,0	52,4	57,1	53,6	52,9	60,0	59,5	49,4
150	57,9	54,8	60,2	56,3	55,4	63,4	62,9	52,2

За допомогою пристроїв (рис.5.1 і рис.5.2) проводиться віднімання в автоматичному режимі з енергетичної матриці луна-сигналу складного об'єкта енергетичної матриці атмосферного утворення, відповідного дощовим опадам виміряної інтенсивності, які випадають у момент радіолокаційного спостереження складного об'єкта. Отримана в результаті віднімання енергетична матриця навігаційного об'єкта складається з елементів представлених параметрами Стокса і на індикатор СРПК або дисплей комп’ютера надходить сума її діагональних елементів (енергетичний слід) для дистанційного спостереження навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення на траєкторії руху судна.

Так, для рідких випадних опадів інтенсивністю $I = 25$ мм/год їхня енергетична матриця розсіювання луна-сигналу частково поляризованої хвилі має такі значення її елементів (параметрів Стокса):

$$\left[S_{енАУ}\right] = \begin{bmatrix} 12,75 & 12,25 & 0,25 & 0,25 \\ 12,75 & 12,25 & -0,75 & -0,75 \\ 0 & 0 & 3,50 & 0,40 \\ 0 & 0 & 0,40 & 3,50 \end{bmatrix}.$$

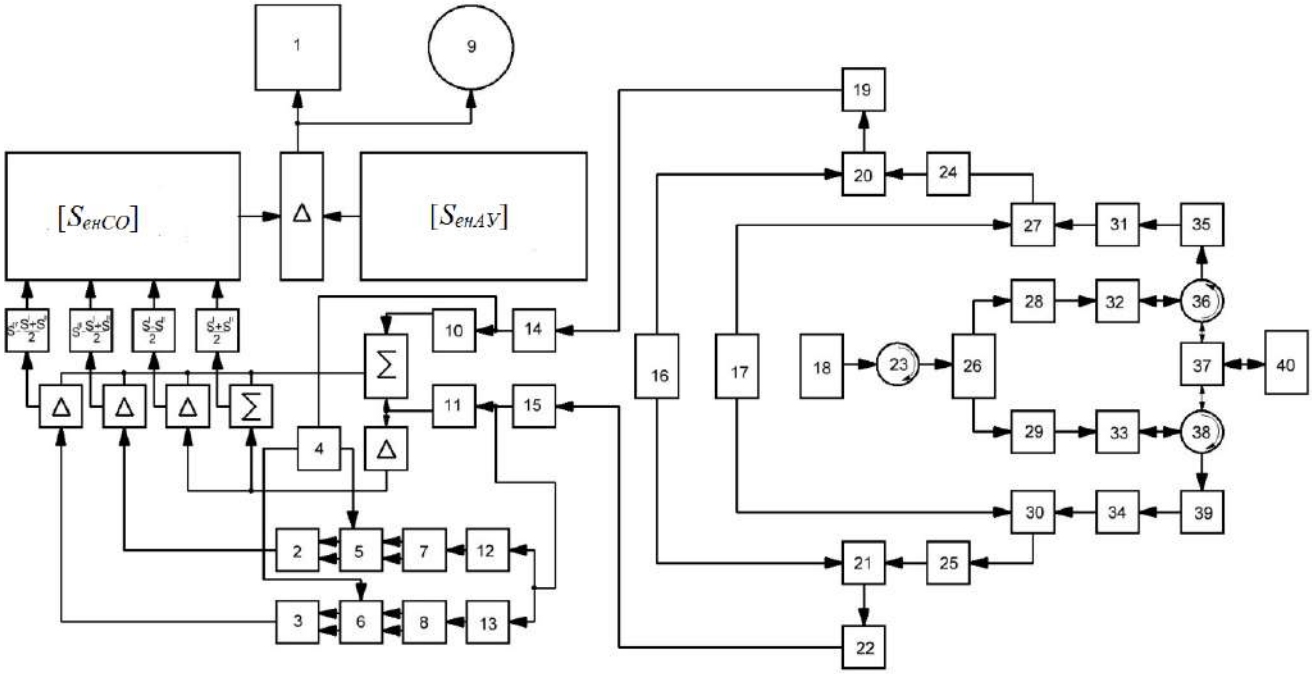


Рис.5.1. Функціональна схема пристрою СРПК, що синтезує алгоритм розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, який перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення:

$[S_{енСО}]$ - енергетична матриця розсіювання складного об'єкта;

$[S_{енНО}]$ - енергетична матриця розсіювання навігаційного об'єкта;

$[S_{енАУ}]$ - енергетична матриця розсіювання атмосферного утворення;

Δ - віднімачі;

∑ - 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;
16,17 - 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.

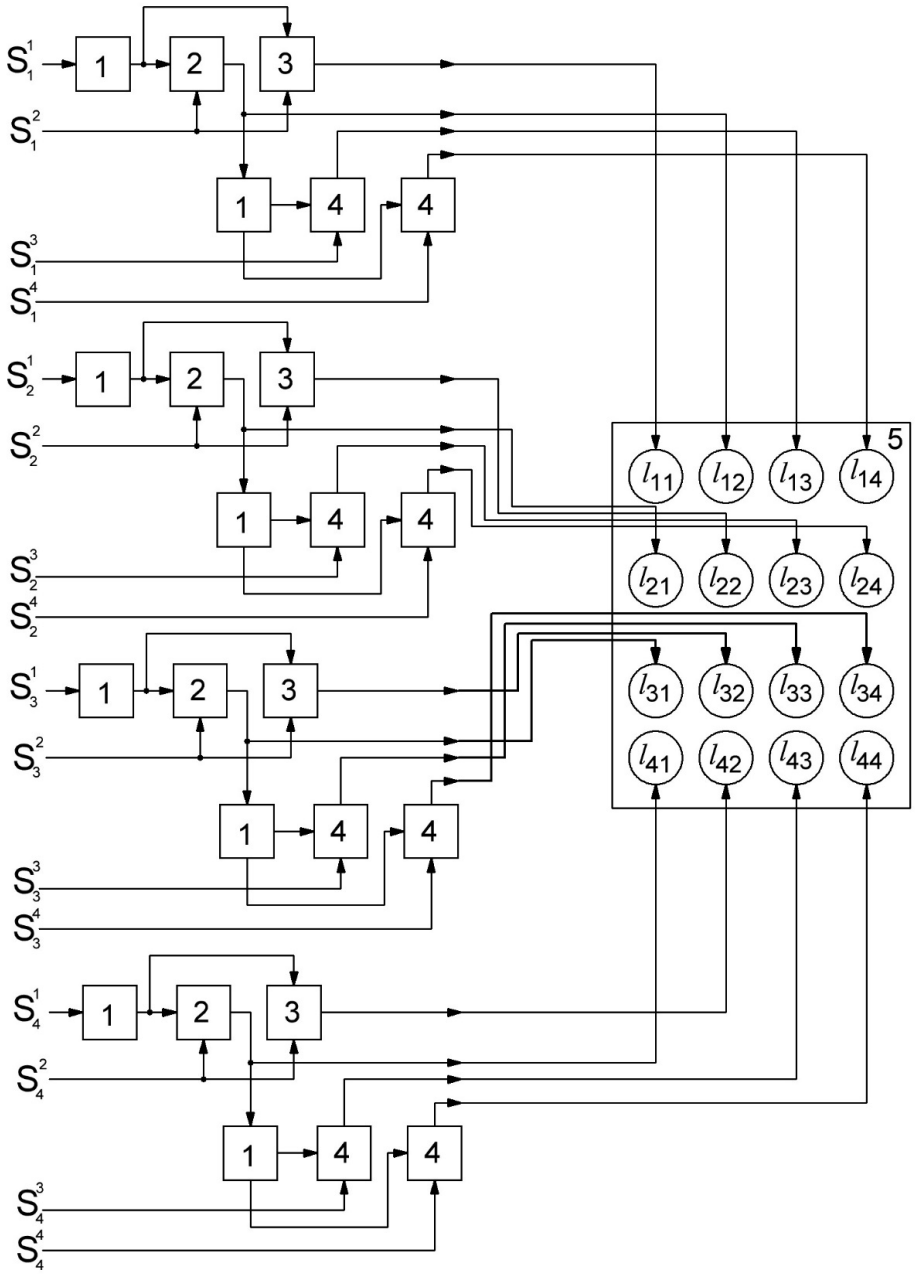


Рис.5.2. Функціональна схема пристрою отримання енергетичної матриці розсіювання луна-сигналу складного об'єкта (СО)

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

1 – ультрозвукові лінії затримки RLT – D6386;

2, 3, 4 – підсумовуючий і віднімаючий блоки;

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

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

$S_1^1, S_1^2, S_1^3, S_1^4 \left(S_{1від}^{ЛВ}, S_{1від}^{ЛГ}, S_{1від}^{Л45^o}, S_{1від}^{КР} \right)$ - перший параметр;

$S_2^1, S_2^2, S_2^3, S_2^4 \left(S_{2від}^{ЛВ}, S_{2від}^{ЛГ}, S_{2від}^{Л45^o}, S_{2від}^{КР} \right)$ - другий параметр;

$S_3^1, S_3^2, S_3^3, S_3^4 \left(S_{3від}^{ЛВ}, S_{3від}^{ЛГ}, S_{3від}^{Л45^o}, S_{3від}^{КР} \right)$ - третій параметр;

$S_4^1, S_4^2, S_4^3, S_4^4 \left(S_{4від}^{ЛВ}, S_{4від}^{ЛГ}, S_{4від}^{Л45^o}, S_{4від}^{КР} \right)$ - четвертий параметр.

Енергетична матриця розсіювання луна-сигналу складного об'єкта $[S_{енСО}]$ має таке значення елементів:

$$[S_{енСО}] = \begin{bmatrix} 15,40 & 14,50 & 0,45 & 0,45 \\ 15,40 & 14,50 & -0,45 & -0,45 \\ 0 & 0 & 4,20 & 0,70 \\ 0 & 0 & 0,70 & 4,20 \end{bmatrix}.$$

Тоді енергетична матриця розсіювання луна-сигналу навігаційного об'єкта $[S_{енНО}]$, яка визначається як різниця $[S_{енСО}]$ і $[S_{енАУ}]$, запишеться у вигляді:

$$[S_{енНО}] = [S_{енСО}] - [S_{енАУ}] = \begin{bmatrix} 2,65 & 2,25 & 0,20 & 0,20 \\ 2,65 & 2,25 & 0,30 & 0,30 \\ 0 & 0 & 0,70 & 0,30 \\ 0 & 0 & 0,30 & 0,70 \end{bmatrix}.$$

Потім обчислюємо слід отриманої матриці (суму елементів головної діагоналі):

$$tr(S_{енНО}) = \sum_{i=1}^{4} s_{ii} = 2.65 + 2.25 + 0.70 + 0.70 = 6.3$$

За інтенсивності випадання рідких опадів I = 10 мм/год енергетична матриця розсіювання атмосферного утворення має такі значення її елементів:

$$[S_{енАУ}] = \begin{bmatrix} 1,18 & 0,35 & 0 & 0,01 \\ 0,35 & 1,18 & -0,84 & -0,01 \\ 0 & 0 & 1,12 & 0,04 \\ 0 & 0 & -0,04 & 1,12 \end{bmatrix}.$$

Енергетична матриця розсіювання луна-сигналів складного об'єкта $[S_{енСО}]$ має наступні значення своїх елементів:

$$[S_{енСО}] = \begin{bmatrix} 3,05 & 2,10 & 0,85 & 0,85 \\ 3,05 & 2,10 & -0,75 & -0,75 \\ 0 & 0 & 1,90 & 0,08 \\ 0 & 0 & -0,08 & 1,90 \end{bmatrix}.$$

Енергетична матриця розсіювання луна-сигналів навігаційного об'єкта $[S_{енНО}]$, що спостерігається СРПК запишеться у вигляді:

$$[S_{енНО}] = [S_{енСО}] - [S_{енАУ}] = \begin{bmatrix} 1,87 & 1,75 & 0,85 & 0,84 \\ 2,70 & 0,92 & 0,09 & -0,74 \\ 0 & 0 & 0,78 & 0,04 \\ 0 & 0 & -0,04 & 0,78 \end{bmatrix}.$$

Потім обчислюємо слід отриманої матриці (суму елементів головної діагоналі):

$$tr(S_{енНО}) = \sum_{i=1}^{4} s_{ii} = 1,87 + 0,92 + 0,78 + 0,78 = 4,35$$

При температурі повітря нижче мінус 2°С інтенсивність снігопаду визначається за трьома градаціями: слабка (I = 0,02 - 0,10 мм/год), помірна (I = 0,11 - 1,00 мм/год) і сильна (I > 1,00 мм/год). Енергетична матриця розсіювання луна-сигналів снігопаду сильної інтенсивності запишеться у вигляді:

$$[S_{енАУ}] = \begin{bmatrix} 1,48 & 0,75 & 0,1 & 0,01 \\ 1,48 & 0,75 & -0,73 & -0,73 \\ 0 & 0 & 1,26 & 0,22 \\ 0 & 0 & -0,04 & 1,12 \end{bmatrix}.$$

Енергетична матриця розсіювання луна-сигналів складного об'єкта $[S_{енСО}]$, спостережуваного СРПК, запишеться у вигляді:

$$[S_{енСО}] = \begin{bmatrix} 1,83 & 1,01 & -0,02 & -0,02 \\ 1,83 & 1,01 & 0,85 & 0,85 \\ 0 & 0 & 1,83 & 0,53 \\ 0 & 0 & 0,53 & 1,83 \end{bmatrix}.$$

Енергетична матриця розсіювання луна-сигналів навігаційного об'єкта $[S_{енНО}]$, що перебуває в зоні снігопаду, який випадає інтенсивністю понад 1мм/год, спостережуваного СРПК, запишеться у вигляді:

$$[S_{енНО}] = [S_{енСО}] - [S_{енАУ}] = \begin{bmatrix} 0,35 & 0,26 & -0,12 & -0,03 \\ 0,35 & 0,26 & 1,58 & 1,58 \\ 0 & 0 & 0,57 & 0,31 \\ 0 & 0 & 0,57 & 0,71 \end{bmatrix}.$$

Потім обчислюємо слід отриманої матриці (суму елементів головної діагоналі):

$$tr(S_{енНО}) = \sum_{i=1}^{4} s_{ii} = 0,35 + 0,26 + 0.57 + 0.71 = 1,89$$

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. 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. З енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта, отриманої пристроєм її формування СРПК (рис.5.1 і рис.5.2) 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.

Отримані результати методологічного характеру можуть бути надалі втілені в задачі уніфікації процедур з удосконалення певного типу суднового радіолокаційного комплексу та його функціональних можливостей, а практична корисність розглянутої методики розпізнавання навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні небезпечного атмосферного утворення, спрямована на застосування програмно-цільових методів виявлення, селекції та розпізнавання навігаційних об'єктів.

Під час реалізації алгоритму радіолокаційного виявлення і поляризаційної селекції навігаційних об'єктів радіолокаційна антена є основним елементом структури СРПК, що реалізує алгоритм радіолокаційного виявлення і поляризаційної селекції навігаційного об'єкта з використанням його енергетичної матриці розсіювання. Під час розв'язання цієї задачі використовується всеполяризована антена, що є аналізатором поляризації, у якій здійснюється керування амплітудою, фазою і поляризацією випромінюваної електромагнітної хвилі.

5.2 Розроблення методології поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах атмосферних завад, з використанням матриці когерентності

Навігаційні об'єкти, які спостерігаються судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом (СРПК), у реальних умовах можуть перебувати в небезпечному атмосферному утворенні (зони випадних опадів великої інтенсивності твердого і рідкого фазового стану, які складаються з великої кількості елементарних відбивачів). Під час опромінення такого складного об'єкта (навігаційний об'єкт - атмосферне утворення) повністю поляризованою електромагнітною хвилею луна-сигнал визначатиметься взаємним переміщенням СРПК і складного об'єкта, а також хаотичним коливанням часток атмосферного утворення, що призводить до випадкових змін ортогональних компонентів вектору розсіяного складним об'єктом електромагнітного поля та формування частково поляризованої хвилі, яка надходить на вхід приймальної антени і складається з поляризованого і неполяризованого полів. Ортогональні компоненти такої хвилі не є повністю детермінованими величинами,

але водночас не відповідають умовам неполяризованої хвилі. Тому параметри, що характеризують поляризаційну структуру частково поляризованої хвилі, є випадковими функціями часу та простору.

Для розв'язання задачі радіолокаційної поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень, будемо використовувати матрицю когерентності $R_k(t)$, що дає змогу виділити луна-сигнал навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта. Луна-сигнал складного об'єкта частково поляризованої хвилі розглядають, як такий, що складається з двох незалежних потоків, один із яких повністю поляризований, а другий повністю неполяризований. Відповідно до цього матриця когерентності частково поляризованої хвилі складатиметься з двох матриць: матриці когерентності монохроматичної стабільної складової та матриці когерентності флуктуючої складової, тобто як суми матриць когерентності незалежних потоків, адже фазові фронти цих сигналів навігаційного об'єкта й атмосферного утворення збігаються і поширюються в одному напрямку. Тому в обраній точці простору СРПК спостерігає луна-сигнал сумарної частково поляризованої хвилі складного об'єкта з властивостями, визначеними характером хвиль, що складаються. Для використання зв'язку, матриці когерентності луна-сигналів складного об'єкта з параметрами Стокса, поляризація луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта в довільному базисі подається вектором параметром Стокса $S(t)$ у вигляді матриці стовпчика, що дає змогу сформувати сумарну матрицю когерентності частково поляризованої хвилі об'єкта, що розглядається:

$$[S(t)] = \begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_3(t) \\ S_4(t) \end{bmatrix}, \tag{5.31}$$

де $S_1(t), S_2(t), S_3(t), S_4(t)$ - параметри Стокса, які у довільному базисі записуються у вигляді:

$$\begin{aligned} S_1(t) &= \overline{|E_1(t)|^2} + \overline{|E_2(t)|^2}, \\ S_2(t) &= \overline{|E_1(t)|^2} - \overline{|E_2(t)|^2}, \\ S_3(t) &= 2\overline{|E_1(t)E_2(t)|}\cos\Phi_{12}, \\ S_4(t) &= 2\overline{|E_1(t)E_2(t)|}\sin\Phi_{12}. \end{aligned} \tag{5.32}$$

Для розглянутого частково поляризованого поля хвилі, заданого в деякому базисі вектором Стокса (5.31), утворюється допоміжна матриця *C(t)*, елементами першого стовпця якої є параметри Стокса, а елементами другого - нулі:

$$[C(t)] = \begin{bmatrix} S_1(t) & 0 \\ S_2(t) & 0 \\ S_3(t) & 0 \\ S_4(t) & 0 \end{bmatrix}, \tag{5.33}$$

та ермітово-сполучена матриця $C^*(t)$, яка записується у вигляді:

$$\left[C^*(t)\right] = \begin{bmatrix} S_1^*(t) & S_2^*(t) & S_3^*(t) & S_4^*(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{5.34}$$

Тоді добуток матриць (5.33) і (5.34) дасть матрицю когерентності $R_k(t)$ луна-сигналу частково поляризованої електромагнітної хвилі складного об'єкта, спостережуваного СРПК [119, 217]:

$$[R_k(t)] = [C(t)]\left[C^*(t)\right] = \begin{bmatrix} S_1(t)S_1^*(t) & S_1(t)S_2^*(t) & S_1(t)S_3^*(t) & S_1(t)S_4^*(t) \\ S_2(t)S_1^*(t) & S_2(t)S_2^*(t) & S_2(t)S_3^*(t) & S_2(t)S_4^*(t) \\ S_3(t)S_1^*(t) & S_3(t)S_2^*(t) & S_3(t)S_3^*(t) & S_3(t)S_4^*(t) \\ S_4(t)S_1^*(t) & S_4(t)S_2^*(t) & S_4(t)S_3^*(t) & S_4(t)S_4^*(t) \end{bmatrix}. \tag{5.35}$$

Діагональні елементи матриці (5.35) є потужністю луна-сигналів ортогонально поляризованих компонент частково поляризованої хвилі, що представлені дійсними енергетичними параметрами Стокса.

Сумарна потужність частково поляризованої хвилі складного об'єкта дорівнює сумі діагональних елементів матриці когерентності (5.35):

$$P_{\Sigma} = S_1(t)S_1^*(t) + S_2(t)S_2^*(t) + S_3(t)S_3^*(t) + S_4(t)S_4^*(t)\,.$$

Недіагональні елементи матриці (5.35) визначають їхню взаємну кореляцію. Оскільки луна-сигнал частково поляризованої хвилі складається із суми двох статистично незалежних компонент - стабільної та флюктуючої, то під час аналізу її луна-сигналу необхідно розглядати матрицю когерентності стабільної компоненти та матрицю когерентності флюктуючої компоненти, що дають змогу знайти енергетичні характеристики луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта. Матриці когерентності кожної плоскої хвилі визначаються енергетичними властивостями електромагнітного поля в усьому радіолокаційному просторово-часовому обсязі складного об'єкта. Для розв'язання задачі поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційного об'єкта необхідно кількісно оцінити поляризаційно-когерентні властивості луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта шляхом вилучення інформації про ці властивості з виміряних на виході лінійних приймачів чотирьох дійсних параметрів Стокса, за якими визначити кількісні характеристики когерентності, тобто матриць когерентності луна-сигналу складного об'єкта. Матриця когерентності дає змогу провести аналіз поляризаційної структури луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта. Луна-сигнал частково поляризованої хвилі складного об'єкта складається із суми двох статистично незалежних компонент, стабільної та флуктуаційної, і під час його аналізу розглядають матрицю когерентності стабільної та матрицю когерентності флуктуаційної компонент. Матриця когерентності стабільної компоненти $R_{k.cm}$(t) луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта визначається як

математичне очікування добутку вектору-параметра Стокса S(t), представленого елементами матриці-стовпчика стабільної складової параметрів Стокса частково поляризованої хвилі M [S(t)] та вектору M [S*(t)] ермітово-сполученого з вектором [S(t)], також представленого параметрами Стокса:

$$R_{k.cm}(t) = M\left[S_{cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{cm}(t)\right] =$$
$$= \begin{bmatrix} M\left[S_{1cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{1cm}(t)\right] & M\left[S_{1cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{2cm}(t)\right] \\ M\left[S_{2cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{1cm}(t)\right] & M\left[S_{2cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{2cm}(t)\right] \\ M\left[S_{3cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{1cm}(t)\right] & M\left[S_{3cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{2cm}(t)\right] \\ M\left[S_{4cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{1cm}(t)\right] & M\left[S_{4cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{2cm}(t)\right] \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} M\left[S_{1cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{3cm}(t)\right] & M\left[S_{1cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{4cm}(t)\right] \\ M\left[S_{2cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{3cm}(t)\right] & M\left[S_{2cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{4cm}(t)\right] \\ M\left[S_{3cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{3cm}(t)\right] & M\left[S_{3cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{4cm}(t)\right] \\ M\left[S_{4cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{3cm}(t)\right] & M\left[S_{4cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{4cm}(t)\right] \end{bmatrix} =$$
$$= \begin{bmatrix} S_{11cm}(t) & S_{12cm}(t) & S_{13cm}(t) & S_{14cm}(t) \\ S_{21cm}(t) & S_{22cm}(t) & S_{23cm}(t) & S_{24cm}(t) \\ S_{31cm}(t) & S_{32cm}(t) & S_{33cm}(t) & S_{34cm}(t) \\ S_{41cm}(t) & S_{42cm}(t) & S_{43cm}(t) & S_{44cm}(t) \end{bmatrix} . \qquad (5.36)$$

Вектор $S^{*}_{cm}(t)$ ермітово-сполучений вектору S(t) і являє собою вектор-рядок, записаний у вигляді:

$$M\left[S^{*}_{cm}(t)\right] = M\left[S^{*}_{1cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{2cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{3cm}(t)\right]\cdot M\left[S^{*}_{4cm}(t)\right]. \qquad (5.37)$$

Визначник Δ_{cm} матриці (5.36) запишеться у вигляді:

$$\Delta_{cm} = S_{11cm}(t)\,A_1 + S_{12cm}(t)\,B_1 + S_{13cm}(t)\,C_1 + S_{14cm}(t)\,D_1, \qquad (5.38)$$

де A_1, B_1, C_1, D_1 - алгебраїчні доповнення елементів матриць $S_{11cm}(t), S_{22cm}(t), S_{33cm}(t), S_{44cm}(t)$, тобто

$$A_1=\begin{bmatrix} S_{22cm}(t) & S_{23cm}(t) & S_{24cm}(t) \\ S_{32cm}(t) & S_{33cm}(t) & S_{34cm}(t) \\ S_{42cm}(t) & S_{43cm}(t) & S_{44cm}(t) \end{bmatrix}; B_1=\begin{bmatrix} S_{21cm}(t) & S_{23cm}(t) & S_{24cm}(t) \\ S_{31cm}(t) & S_{33cm}(t) & S_{34cm}(t) \\ S_{41cm}(t) & S_{43cm}(t) & S_{44cm}(t) \end{bmatrix};$$
$$C_1=\begin{bmatrix} S_{21cm}(t) & S_{22cm}(t) & S_{24cm}(t) \\ S_{31cm}(t) & S_{32cm}(t) & S_{34cm}(t) \\ S_{41cm}(t) & S_{42cm}(t) & S_{44cm}(t) \end{bmatrix}; D_1=\begin{bmatrix} S_{21cm}(t) & S_{22cm}(t) & S_{23cm}(t) \\ S_{31cm}(t) & S_{32cm}(t) & S_{33cm}(t) \\ S_{41cm}(t) & S_{42cm}(t) & S_{43cm}(t) \end{bmatrix}. \quad (5.39)$$

Тоді з урахуванням (5.39) рівняння (5.38) запишеться таким чином:

$$\Delta_{cm}=S_{11cm}(t)\begin{bmatrix} S_{22cm}(t) & S_{23cm}(t) & S_{24cm}(t) \\ S_{32cm}(t) & S_{33cm}(t) & S_{34cm}(t) \\ S_{42cm}(t) & S_{43cm}(t) & S_{44cm}(t) \end{bmatrix}+S_{12cm}(t)\begin{bmatrix} S_{21cm}(t) & S_{23cm}(t) & S_{24cm}(t) \\ S_{31cm}(t) & S_{33cm}(t) & S_{34cm}(t) \\ S_{41cm}(t) & S_{43cm}(t) & S_{44cm}(t) \end{bmatrix}+$$
$$+S_{13cm}(t)\begin{bmatrix} S_{21cm}(t) & S_{22cm}(t) & S_{24cm}(t) \\ S_{31cm}(t) & S_{32cm}(t) & S_{34cm}(t) \\ S_{41cm}(t) & S_{42cm}(t) & S_{44cm}(t) \end{bmatrix}+S_{14cm}(t)\begin{bmatrix} S_{21cm}(t) & S_{22cm}(t) & S_{23cm}(t) \\ S_{31cm}(t) & S_{32cm}(t) & S_{33cm}(t) \\ S_{41cm}(t) & S_{42cm}(t) & S_{43cm}(t) \end{bmatrix}. \quad (5.40)$$

Визначник матриці когерентності $R_{k.cm}$(t) стабільної компоненти поляризованого поля частково поляризованого луна-сигналу є визначником четвертого порядку і визначається за рівнянням (5.40).

Алгебраїчні доповнення A_1, B_1, C_1, D_1 обчислюються так:

$$A_1=S_{22cm}(t)\cdot S_{33cm}(t)\cdot S_{44cm}(t)-S_{22cm}(t)\cdot S_{43cm}(t)\cdot S_{34cm}(t)+S_{23cm}(t)\cdot S_{34cm}(t)\cdot S_{42cm}(t)-$$
$$-S_{23cm}(t)\cdot S_{44cm}(t)\cdot S_{32cm}(t)+S_{24cm}(t)\cdot S_{22cm}(t)\cdot S_{43cm}(t)-S_{24cm}(t)\cdot S_{42cm}(t)\cdot S_{23cm}(t);$$

$$B_1=S_{21cm}(t)\cdot S_{33cm}(t)\cdot S_{44cm}(t)-S_{21cm}(t)\cdot S_{43cm}(t)\cdot S_{34cm}(t)+S_{23cm}(t)\cdot S_{34cm}(t)\cdot S_{41cm}(t)-$$
$$-S_{22cm}(t)\cdot S_{44cm}(t)\cdot S_{31cm}(t)+S_{24cm}(t)\cdot S_{31cm}(t)\cdot S_{43cm}(t)-S_{24cm}(t)\cdot S_{41cm}(t)\cdot S_{33cm}(t);$$

$$C_1=S_{21cm}(t)\cdot S_{32cm}(t)\cdot S_{44cm}(t)-S_{21cm}(t)\cdot S_{32cm}(t)\cdot S_{34cm}(t)+S_{22cm}(t)\cdot S_{34cm}(t)\cdot S_{41cm}(t)-$$
$$-S_{22cm}(t)\cdot S_{44cm}(t)\cdot S_{31cm}(t)+S_{24cm}(t)\cdot S_{31cm}(t)\cdot S_{42cm}(t)-S_{24cm}(t)\cdot S_{41cm}(t)\cdot S_{32cm}(t);$$

$$D_1=S_{21cm}(t)\cdot S_{32cm}(t)\cdot S_{43cm}(t)-S_{21cm}(t)\cdot S_{42cm}(t)\cdot S_{43cm}(t)+S_{22cm}(t)\cdot S_{33cm}(t)\cdot S_{41cm}(t)-$$
$$-S_{22cm}(t)\cdot S_{43cm}(t)\cdot S_{31cm}(t)+S_{23cm}(t)\cdot S_{31cm}(t)\cdot S_{43cm}(t)-S_{23cm}(t)\cdot S_{41cm}(t)\cdot S_{32cm}(t)$$

(5.41)

Енергетичні параметри Стокса, які є елементами матриці когерентності компоненти частково поляризованої хвилі, що флюктуює, дають змогу представити її за аналогією з матрицею когерентності стабільної компоненти.

Матриця когерентності флуктуаційної компоненти $R_{k.ф}$(t) луна-сигналу частково поляризованої хвилі також є математичним очікуванням добутку векторів Стокса $S_ф$(t) і $S_ф^*$(t), що зумовлено фізичною природою явищ у внутрішній структурі атмосферного утворення і записується у вигляді:

$$
\begin{aligned}
&R_{k.ф}(t) = M\left[\overline{S}_ф(t)\cdot S_ф^*(t)\right] = \\
&= \begin{bmatrix}
M\left[S_{1ф}(t)\cdot S_{1ф}^*(t)\right] & M\left[S_{1ф}(t)\cdot S_{2ф}^*(t)\right] M\left[S_{1ф}(t)\cdot S_{3ф}^*(t)\right] & M\left[S_{1ф}(t)\cdot S_{4ф}^*(t)\right] \\
M\left[S_{2ф}(t)\cdot S_{1ф}^*(t)\right] & M\left[S_{2ф}(t)\cdot S_{2ф}^*(t)\right] M\left[S_{2ф}(t)\cdot S_{3ф}^*(t)\right] & M\left[S_{2ф}(t)\cdot S_{4ф}^*(t)\right] \\
M\left[S_{3ф}(t)\cdot S_{1ф}^*(t)\right] & M\left[S_{3ф}(t)\cdot S_{2ф}^*(t)\right] M\left[S_{3ф}(t)\cdot S_{3ф}^*(t)\right] & M\left[S_{3ф}(t)\cdot S_{4ф}^*(t)\right] \\
M\left[S_{4ф}(t)\cdot S_{1ф}^*(t)\right] & M\left[S_{4ф}(t)\cdot S_{2ф}^*(t)\right] M\left[S_{4ф}(t)\cdot S_{3ф}^*(t)\right] & M\left[S_{4ф}(t)\cdot S_{4ф}^*(t)\right]
\end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix}
S_{11ф}(t) & S_{12ф}(t) & S_{13ф}(t) & S_{14ф}(t) \\
S_{21ф}(t) & S_{22ф}(t) & S_{23ф}(t) & S_{24ф}(t) \\
S_{31ф}(t) & S_{32ф}(t) & S_{33ф}(t) & S_{34ф}(t) \\
S_{41ф}(t) & S_{42ф}(t) & S_{43ф}(t) & S_{44ф}(t)
\end{bmatrix}.
\end{aligned}
\qquad (5.42)
$$

Сума діагональних елементів матриці когерентності $R_{k.ф}(t)$ дорівнює повній потужності компоненти частково поляризованої хвилі, що флуктуює, тобто $P_ф = S_{11ф}(t) + S_{22ф}(t) + S_{33ф}(t) + S_{44ф}(t)$.

Елементи матриць когерентності стабільної та флюктуючої компонент, якими є параметри Стокса, мають розмірність потужності (інтенсивності), а сума діагональних елементів матриць когерентності дорівнює повній потужності луна-сигналу стабільної та флюктуючої компонент частково поляризованої хвилі, тобто

$$P_{cm} = S_{11cm}(t) + S_{22cm}(t) + S_{33cm}(t) + S_{44cm}(t). \qquad (5.43)$$

$$P_ф = S_{11ф}(t) + S_{22ф}(t) + S_{33ф}(t) + S_{44ф}(t). \qquad (5.44)$$

Повна потужність луна-сигналу частково поляризованої хвилі записується у вигляді:

$$P_{\Sigma} = P_{cm} + P_{\phi} = \\ = \left(S_{11cm}(t) + S_{11\phi}(t)\right) + \left(S_{22cm}(t) + S_{22\phi}(t)\right) + \left(S_{33cm}(t) + S_{33\phi}(t)\right) + \left(S_{44cm}(t) + S_{44\phi}(t)\right). \quad (5.45)$$

Матриця когерентності сумарного луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта об'єднує матриці когерентності стабільної та флюктуючої компонент і записується у вигляді сумарної матриці когерентності $R_{k\Sigma}(t)$ так:

$$\left[R_{k\Sigma}(t)\right] = \left[R_{k.cm}(t)\right] + \left[R_{k.\phi}(t)\right] = \\ = \begin{bmatrix} S_{11cm}(t) & S_{12cm}(t) & S_{13cm}(t) & S_{14cm}(t) \\ S_{21cm}(t) & S_{22cm}(t) & S_{23cm}(t) & S_{24cm}(t) \\ S_{31cm}(t) & S_{32cm}(t) & S_{33cm}(t) & S_{34cm}(t) \\ S_{41cm}(t) & S_{42cm}(t) & S_{43cm}(t) & S_{44cm}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{11\phi}(t) & S_{12\phi}(t) & S_{13\phi}(t) & S_{14\phi}(t) \\ S_{21\phi}(t) & S_{22\phi}(t) & S_{23\phi}(t) & S_{24\phi}(t) \\ S_{31\phi}(t) & S_{32\phi}(t) & S_{33\phi}(t) & S_{34\phi}(t) \\ S_{41\phi}(t) & S_{42\phi}(t) & S_{43\phi}(t) & S_{44\phi}(t) \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} S_{11\Sigma}(t) & S_{12\Sigma}(t) & S_{13\Sigma}(t) & S_{14\Sigma}(t) \\ S_{21\Sigma}(t) & S_{22\Sigma}(t) & S_{23\Sigma}(t) & S_{24\Sigma}(t) \\ S_{31\Sigma}(t) & S_{32\Sigma}(t) & S_{33\Sigma}(t) & S_{34\Sigma}(t) \\ S_{41\Sigma}(t) & S_{42\Sigma}(t) & S_{43\Sigma}(t) & S_{44\Sigma}(t) \end{bmatrix}. \quad (5.46)$$

де

$$S_{11\Sigma}(t) = S_{11cm}(t) + S_{11\phi}(t); S_{31\Sigma}(t) = S_{31cm}(t) + S_{31\phi}(t);$$
$$S_{12\Sigma}(t) = S_{12cm}(t) + S_{12\phi}(t); S_{32\Sigma}(t) = S_{32cm}(t) + S_{32\phi}(t);$$
$$S_{13\Sigma}(t) = S_{13cm}(t) + S_{13\phi}(t); S_{33\Sigma}(t) = S_{33cm}(t) + S_{33\phi}(t);$$
$$S_{14\Sigma}(t) = S_{14cm}(t) + S_{14\phi}(t); S_{34\Sigma}(t) = S_{34cm}(t) + S_{34\phi}(t);$$
$$S_{21\Sigma}(t) = S_{21cm}(t) + S_{21\phi}(t); S_{41\Sigma}(t) = S_{41cm}(t) + S_{41\phi}(t);$$
$$S_{22\Sigma}(t) = S_{22cm}(t) + S_{22\phi}(t); S_{42\Sigma}(t) = S_{42cm}(t) + S_{42\phi}(t);$$
$$S_{23\Sigma}(t) = S_{23cm}(t) + S_{23\phi}(t); S_{43\Sigma}(t) = S_{43cm}(t) + S_{43\phi}(t);$$
$$S_{24\Sigma}(t) = S_{24cm}(t) + S_{24\phi}(t); S_{44\Sigma}(t) = S_{44cm}(t) + S_{44\phi}(t).$$

Сумарна матриця когерентності $R_{k\Sigma}(t)$ дає змогу отримати інформацію про поляризацію луна-сигналу, частково поляризованої електромагнітної хвилі навігаційного об'єкта та атмосферного утворення, оскільки елементами кореляційної матриці є енергетичні дійсні параметри Стокса, які легко вимірюються судновим поляризаційним комплексом.

5.2.1 Розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що грунтується на властивостях енергетичних дійсних параметрах Стокса

Атмосферне утворення під час радіолокаційного спостереження навігаційного об'єкта є пасивною перешкодою, яка створюється за рахунок енергії зондувального імпульсу суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу, а для навігаційного об'єкта зберігає його форму.

Завдання поляризаційної селекції луна-сигналу навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні атмосферного утворення, полягає в розділенні луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта на луна-сигнал навігаційного об'єкта та луна-сигнал атмосферного утворення. Ці луна-сигнали представлені елементами матриць когерентності $R_{k.cm}(t)$ і $R_{k.ф}(t)$, з урахуванням належності $R_{k.cm}(t)$ навігаційному об'єкту, а $R_{k.ф}(t)$ - атмосферному утворенню (зливові опади), а також з урахуванням надходження на вхід всеполяризованої антени СРПК сумарного луна-сигналу частково поляризованої хвилі, представленого сумарною матрицею когерентності $R_{k\Sigma}(t)$.

Розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта ґрунтується на властивостях енергетичних дійсних параметрах Стокса, які є елементами статистично незалежних матриць когерентності $R_{k.cm}(t)$ і $R_{k.ф}(t)$. Матриці когерентності суперпозиції незалежних луна-сигналів частково поляризованої електромагнітної хвилі є сумою відповідних характеристик їхніх окремих компонентів, що представлені відповідними параметрами Стокса, і на підставі відомої теореми Стокса луна-сигнал частково поляризованої хвилі складного об'єкта розкладається на повністю поляризований і повністю неполяризований. Представлення елементів матриць когерентності $R_{k.cm}(t)$ і $R_{k.ф}(t)$ дійсними енергетичними параметрами Стокса звільняє процес поляризаційної селекції навігаційних об'єктів від роздільного вимірювання їхніх дійсних і уявних частин, а поляризація електромагнітних хвиль залишається сталою протягом часу усереднення. Для повністю неполяризованого луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта всеполяризована антена СРПК приймає однакову середню потужність (суперпозиція двох незалежних

ортогонально поляризованих компонент електромагнітної хвилі рівної інтенсивності).

Перейдемо від матриць когерентності $R_{k.cm}(t)$ і $R_{k.ф}(t)$ до матриці когерентності поляризованої компоненти $R_{kП}(t)$ і матриці когерентності неполяризованої компоненти $R_{kH}(t)$, тобто

$$R_{kП}(t)=\begin{bmatrix} S_{11П}(t) & S_{12П}(t) & S_{13П}(t) & S_{14П}(t) \\ S_{21П}(t) & S_{22П}(t) & S_{23П}(t) & S_{24П}(t) \\ S_{31П}(t) & S_{32П}(t) & S_{33П}(t) & S_{34П}(t) \\ S_{41П}(t) & S_{42П}(t) & S_{43П}(t) & S_{44П}(t) \end{bmatrix}, \tag{5.47}$$

$$R_{kH}(t)=\begin{bmatrix} S_{11H}(t) & S_{12H}(t) & S_{13H}(t) & S_{14H}(t) \\ S_{21H}(t) & S_{22H}(t) & S_{23H}(t) & S_{24H}(t) \\ S_{31H}(t) & S_{32H}(t) & S_{33H}(t) & S_{34H}(t) \\ S_{41H}(t) & S_{42H}(t) & S_{43H}(t) & S_{44H}(t) \end{bmatrix}, \tag{5.48}$$

Неполяризована компонента луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта спостереження СРПК з фізичного погляду еквівалентна сумі двох незалежних ортогонально поляризованих потоків рівної потужності з відсутністю кореляції між ними.

Тоді матриця когерентності неполяризованої компоненти луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта $R_{kH}(t)$ запишеться у вигляді суми двох матриць когерентності повністю поляризованих енергетичних потоків ортогональних поляризацій $R_{kПП}(t)$ и $R_{kПО}(t)$:

$$R_{kH}(t)= R_{kПП}(t) + R_{kПО}(t), \tag{5.49}$$

а кожна з матриць когерентності $R_{kПП}(t)$ і $R_{kПО}(t)$ записується наступним чином:

$$R_{kПП}(t)=\begin{bmatrix} S_{11ПП}(t) & S_{12ПП}(t) & S_{13ПП}(t) & S_{14ПП}(t) \\ S_{21ПП}(t) & S_{22ПП}(t) & S_{23ПП}(t) & S_{24ПП}(t) \\ S_{31ПП}(t) & S_{32ПП}(t) & S_{33ПП}(t) & S_{34ПП}(t) \\ S_{41ПП}(t) & S_{42ПП}(t) & S_{43ПП}(t) & S_{44ПП}(t) \end{bmatrix}, \quad (5.50)$$

$$R_{kПО}(t)=\begin{bmatrix} S_{11ПО}(t) & S_{12ПО}(t) & S_{13ПО}(t) & S_{14ПО}(t) \\ S_{21ПО}(t) & S_{22ПО}(t) & S_{23ПО}(t) & S_{24ПО}(t) \\ S_{31ПО}(t) & S_{32ПО}(t) & S_{33ПО}(t) & S_{34ПО}(t) \\ S_{41ПО}(t) & S_{42ПО}(t) & S_{43ПО}(t) & S_{44ПО}(t) \end{bmatrix}. \quad (5.51)$$

Матриця когерентності $R_{kПП}(t)$ (5.50) містить поляризовані компоненти параметрів Стокса з електричним вектором, паралельним до поляризації повністю поляризованої компоненти в матриці когерентності $R_{kП}(t)$ (5.47), а матриця когерентності $R_{kПО}(t)$ (5.51) містить поляризовані компоненти параметрів Стокса з електричним вектором, ортогональним до поляризації повністю поляризованої компоненти в матриці когерентності $R_{kП}(t)$ (5.47).

З урахуванням (5.47), (5.50) і (5.51) сумарна матриця когерентності луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта радіолокаційного спостереження СРПК запишеться у вигляді:

$$\begin{aligned} R_{k\Sigma}(t) &= R_{kП}(t)+R_{kПП}(t)+R_{kПО}(t)= \\ &= \begin{bmatrix} S_{11П}(t) & S_{12П}(t) & S_{13П}(t) & S_{14П}(t) \\ S_{21П}(t) & S_{22П}(t) & S_{23П}(t) & S_{24П}(t) \\ S_{31П}(t) & S_{32П}(t) & S_{33П}(t) & S_{34П}(t) \\ S_{41П}(t) & S_{42П}(t) & S_{43П}(t) & S_{44П}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{11ПП}(t) & S_{12ПП}(t) & S_{13ПП}(t) & S_{14ПП}(t) \\ S_{21ПП}(t) & S_{22ПП}(t) & S_{23ПП}(t) & S_{24ПП}(t) \\ S_{31ПП}(t) & S_{32ПП}(t) & S_{33ПП}(t) & S_{34ПП}(t) \\ S_{41ПП}(t) & S_{42ПП}(t) & S_{43ПП}(t) & S_{44ПП}(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} S_{11ПО}(t) & S_{12ПО}(t) & S_{13ПО}(t) & S_{14ПО}(t) \\ S_{21ПО}(t) & S_{22ПО}(t) & S_{23ПО}(t) & S_{24ПО}(t) \\ S_{31ПО}(t) & S_{32ПО}(t) & S_{33ПО}(t) & S_{34ПО}(t) \\ S_{41ПО}(t) & S_{42ПО}(t) & S_{43ПО}(t) & S_{44ПО}(t) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5.52)$$

У загальному випадку сумарна матриця когерентності $R_{k\Sigma}(t)$ луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта є сумою матриць когерентності трьох повністю поляризованих потоків, з яких складається луна-сигнал частково поляризованої хвилі складного об'єкта, тобто

$$R_{k\Sigma}(t) = R_k^1(t) + R_k^2(t) + R_k^3(t). \qquad (5.53)$$

У сумарній матриці когерентності (5.53) матриці $R_k^1(t)$ і $R_k^2(t)$ характеризують поляризацію повністю поляризованої компоненти луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта й утворюють її перший повністю поляризований потік , а матриця когерентності $R_k^3(t)$ характеризує поляризацію повністю поляризованої компоненти в луна-сигналі частково поляризованої хвилі складного об'єкта, що ортогональна до поляризацій матриць когерентності $R_k^1(t)$ та $R_k^2(t)$ складного об'єкта і утворює її другий повністю поляризований потік. Відповідно до цього в сумарну матрицю когерентності (5.53) входитимуть не три потоки луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта, а два повністю поляризовані потоки з матрицями когерентності луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта, записані у вигляді:

$$R_k^1(t) = \begin{bmatrix} S_{11ПП}^1(t) & S_{12ПП}^1(t) & S_{13ПП}^1(t) & S_{14ПП}^1(t) \\ S_{21ПП}^1(t) & S_{22ПП}^1(t) & S_{23ПП}^1(t) & S_{24ПП}^1(t) \\ S_{31ПП}^1(t) & S_{32ПП}^1(t) & S_{33ПП}^1(t) & S_{34ПП}^1(t) \\ S_{41ПП}^1(t) & S_{42ПП}^1(t) & S_{43ПП}^1(t) & S_{44ПП}^1(t) \end{bmatrix}, \qquad (5.54)$$

$$R_k^2(t) = \begin{bmatrix} S_{11ПО}^2(t) & S_{12ПО}^2(t) & S_{13ПО}^2(t) & S_{14ПО}^2(t) \\ S_{21ПО}^2(t) & S_{22ПО}^2(t) & S_{23ПО}^2(t) & S_{24ПО}^2(t) \\ S_{31ПО}^2(t) & S_{32ПО}^2(t) & S_{33ПО}^2(t) & S_{34ПО}^2(t) \\ S_{41ПО}^2(t) & S_{42ПО}^2(t) & S_{43ПО}^2(t) & S_{44ПО}^2(t) \end{bmatrix}, \qquad (5.55)$$

або

$$R_{k\Sigma}(t) = R_k^1(t) + R_k^2(t) \ . \qquad (5.56)$$

Для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень на шляху судна, з використанням сумарної матриці когерентності $R_{k\Sigma}(t)$ (5.56) двох поляризованих

потоків, виникає необхідність у визначенні елементів цих матриць. Для цього складний об'єкт радіолокаційного спостереження СРПК послідовно опромінюють неполяризованою хвилею, хвилею лінійної поляризації з орієнтацією електричного вектору у вертикальній площині, лінійною поляризацією з орієнтацією електричного вектору в 45° і круговою, правого або лівого напрямку обертання електричного вектору. Відповідні процедури, що забезпечують формування набору електромагнітних хвиль, які опромінюють складний об'єкт, з потрібними векторами Стокса та оцінювання елементів матриці когерентності луна-сигналу частково поляризованої хвилі, досить просто синтезовано в розробленій функціональній схемі СРПК (рис.5.3).

Визначення елементів матриць когерентності (5.54) і (5.55) луна-сигналу складного об'єкта частково поляризованої електромагнітної хвилі здійснюється під час його послідовного опромінення електромагнітними хвилями наведених чотирьох поляризацій:

1. Під час опромінення складного об'єкта *неполяризованою електромагнітною хвилею* визначається перший стовпчик елементів матриць когерентності луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта. Зв'язок матриць випромінюваної хвилі і хвилі відбитої з матрицями складного об'єкта записується у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S^{1H}_{1від} \\ S^{1H}_{2від} \\ S^{1H}_{3від} \\ S^{1H}_{4від} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S^{1}_{11\Sigma}(t) & 0 & 0 & 0 \\ S^{1}_{21\Sigma}(t) & 0 & 0 & 0 \\ S^{1}_{31\Sigma}(t) & 0 & 0 & 0 \\ S^{1}_{41\Sigma}(t) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S^{H}_{1вип} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{5.57}$$

$$\begin{bmatrix} S^{2H}_{1від} \\ S^{2H}_{2від} \\ S^{2H}_{3отр} \\ S^{2H}_{4від} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S^{2}_{11\Sigma}(t) & 0 & 0 & 0 \\ S^{2}_{21\Sigma}(t) & 0 & 0 & 0 \\ S^{2}_{31\Sigma}(t) & 0 & 0 & 0 \\ S^{2}_{41\Sigma}(t) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S^{H}_{1вип} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{5.58}$$

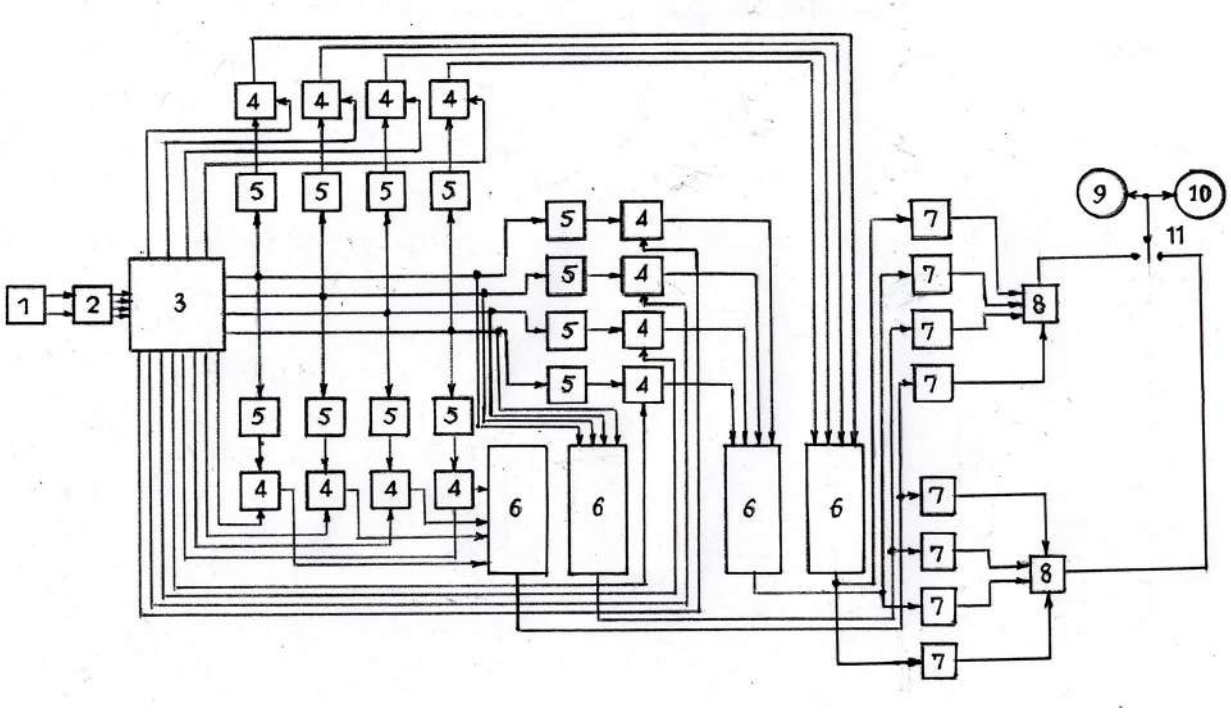


Рис.5.3 – Функціональна схема визначення елементів сумарної матриці когерентності

1 - хвилеводний роздільник луна-сигналів на ортогональні поляризації; 2 - пристрій отримання поляризаційних параметрів Стокса луна-сигналів складного об'єкта; 3 - комутатор; 4 - віднімальні пристрої; 5 - формувачі елементів першого стовпчика матриць когерентності; 6 - формувачі елементів матриць когерентності; 7 - формувачі двох повністю поляризованих потоків елементів матриць когерентності складного об'єкта; 8 - сумовувальні пристрої; 9 - дисплей комп'ютера; 10 - індикатор СРПК; 11 - перемикач.

За умови прийняття потужності випромінюваної хвилі, що дорівнює одиниці, тобто $S^{H}_{1вип}=1$, елементи першого стовпця матриць когерентності (5.54) та (5.55) з урахуванням (5.57) і (5.58) дорівнюватимуть значенням параметрів Стокса луна-сигналу частково поляризованої хвилі першого і другого енергетичних потоків складного об'єкта:

$$S^{1}_{11\Sigma}(t)=S^{1H}_{1від};S^{1}_{21\Sigma}(t)=S^{1H}_{2від};S^{1}_{31\Sigma}(t)=S^{1H}_{3від};S^{1}_{41\Sigma}(t)=S^{1H}_{4від}; \quad (5.59)$$

$$S^{2}_{11\Sigma}(t)=S^{2H}_{1від};S^{2}_{21\Sigma}(t)=S^{2H}_{2від};S^{2}_{31\Sigma}(t)=S^{2H}_{3від};S^{2}_{41\Sigma}(t)=S^{2H}_{4від}. \quad (5.60)$$

2. Елементи другого стовпця матриць когерентності (5.54) і (5.55) луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта визначають під час його опромінення електромагнітною хвилею *лінійної вертикальної (горизонтальної) поляризації* згідно з рівняннями зв'язку випромінюваної та відбитої хвиль, а також із матрицею складного об'єкта, який відбиває, для першого і другого енергетичних потоків:

$$\begin{bmatrix} S_{1від}^{1ЛВ} \\ S_{2від}^{1ЛВ} \\ S_{3від}^{1ЛВ} \\ S_{4від}^{1ЛВ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11\Sigma}^{1}(t) & S_{12\Sigma}^{1}(t) & 0 & 0 \\ S_{21\Sigma}^{1}(t) & S_{22\Sigma}^{1}(t) & 0 & 0 \\ S_{31\Sigma}^{1}(t) & S_{32\Sigma}^{1}(t) & 0 & 0 \\ S_{41\Sigma}^{1}(t) & S_{42\Sigma}^{1}(t) & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип}^{ЛВ} \\ S_{2вип}^{ЛВ} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \tag{5.61}$$

$$\begin{bmatrix} S_{1від}^{2ЛВ} \\ S_{2від}^{2ЛВ} \\ S_{3від}^{2ЛВ} \\ S_{4від}^{2ЛВ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11\Sigma}^{2}(t) & S_{12\Sigma}^{2}(t) & 0 & 0 \\ S_{21\Sigma}^{2}(t) & S_{22\Sigma}^{2}(t) & 0 & 0 \\ S_{31\Sigma}^{2}(t) & S_{32\Sigma}^{2}(t) & 0 & 0 \\ S_{41\Sigma}^{2}(t) & S_{42\Sigma}^{2}(t) & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип}^{ЛВ} \\ S_{2вип}^{ЛВ} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{5.62}$$

З (5.61) і (5.62) визначаються елементи другого стовпця матриць когерентності (5.54) і (5.55) з урахуванням (5.57) і (5.58):

$$S_{12\Sigma}^{1}(t) = S_{1від}^{1ЛВ} - S_{1від}^{H};\quad S_{22\Sigma}^{1}(t) = S_{2від}^{1ЛВ} - S_{2від}^{H};\quad S_{32\Sigma}^{1}(t) = S_{3від}^{1ЛВ} - S_{3від}^{H};\quad S_{42\Sigma}^{1}(t) = S_{4від}^{1ЛВ} - S_{4від}^{H}; \tag{5.63}$$

$$S_{12\Sigma}^{2}(t) = S_{1від}^{2ЛВ} - S_{1від}^{H};\quad S_{22\Sigma}^{2}(t) = S_{2від}^{2ЛВ} - S_{2від}^{H};\quad S_{32\Sigma}^{2}(t) = S_{3від}^{2ЛВ} - S_{3від}^{H};\quad S_{42\Sigma}^{2}(t) = S_{4від}^{2ЛВ} - S_{4від}^{H}. \tag{5.64}$$

3. Для визначення елементів третього стовпця матриць когерентності (5.54) і (5.55), складний об'єкт радіолокаційного спостереження СРПК необхідно опромінити електромагнітною хвилею *лінійної поляризації з кутом нахилу вектору в 45°*. Тоді рівняння зв'язку випромінюваної хвилі з відбивними елементами розглянутого складного об'єкта і дійсними параметрами Стокса відбитої від нього електромагнітної хвилі для першого і другого енергетичних потоків луна-сигналів частково поляризованої хвилі запишуться у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1вiд}^{1.Л45^o} \\ S_{2вiд}^{1.Л45^o} \\ S_{3вiд}^{1.Л45^o} \\ S_{4вiд}^{1.Л45^o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11\Sigma}^{1}(t) & 0 & S_{13\Sigma}^{1}(t) & 0 \\ S_{21\Sigma}^{1}(t) & 0 & S_{23\Sigma}^{1}(t) & 0 \\ S_{31\Sigma}^{1}(t) & 0 & S_{33\Sigma}^{1}(t) & 0 \\ S_{41\Sigma}^{1}(t) & 0 & S_{43\Sigma}^{1}(t) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип}^{Л45^o} \\ 0 \\ S_{3вип}^{Л45^o} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (5.65)$$

$$\begin{bmatrix} S_{1вiд}^{2.Л45^o} \\ S_{2вiд}^{2.Л45^o} \\ S_{3вiд}^{2.Л45^o} \\ S_{4вiд}^{2.Л45^o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11\Sigma}^{2}(t) & 0 & S_{13\Sigma}^{2}(t) & 0 \\ S_{21\Sigma}^{2}(t) & 0 & S_{23\Sigma}^{2}(t) & 0 \\ S_{31\Sigma}^{2}(t) & 0 & S_{33\Sigma}^{2}(t) & 0 \\ S_{41\Sigma}^{2}(t) & 0 & S_{43\Sigma}^{2}(t) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип}^{Л45^o} \\ 0 \\ S_{3вип}^{Л45^o} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5.66)$$

Из (5.64) и (5.65) определяется третий столбец элементов матриц когерентности (5.54) и (5.55) с учетом (5.57) и (5.58):

$$S_{13\Sigma}^{1}(t) = S_{1вiд}^{1.Л45^o} - S_{1вiд}^{H};\ S_{23\Sigma}^{1}(t) = S_{2вiд}^{1.Л45^o} - S_{2вiд}^{H};\ S_{33\Sigma}^{1}(t) = S_{3вiд}^{1.Л45^o} - S_{3вiд}^{H};\ S_{43\Sigma}^{1}(t) = S_{4вiд}^{1.Л45^o} - S_{4вiд}^{H}; \quad (5.67)$$

$$S_{13\Sigma}^{2}(t) = S_{1вiд}^{2.Л45^o} - S_{1вiд}^{H};\ S_{23\Sigma}^{2}(t) = S_{2вiд}^{2.Л45^o} - S_{2вiд}^{H};\ S_{33\Sigma}^{2}(t) = S_{3вiд}^{2.Л45^o} - S_{3вiд}^{H};\ S_{43)}^{2}(t) = S_{4вiд}^{2.Л45^o} - S_{4вiд}^{H}. \quad (5.68)$$

4. Для отримання четвертого стовпця елементів матриць когерентності (5.54) і (5.55), складний об'єкт опромінюється електромагнітною хвилею *кругової поляризації*. Рівняння зв'язку параметрів випромінюваної хвилі з відбивними елементами розглянутого складного об'єкта і дійсними параметрами Стокса відбитої від нього електромагнітної хвилі для першого і другого енергетичних потоків луна-сигналів частково поляризованої хвилі запишуться у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1вiд}^{1KP} \\ S_{2вiд}^{1KP} \\ S_{3вiд}^{1KP} \\ S_{4вiд}^{1KP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11\Sigma}^{1}(t) & 0 & 0 & S_{14\Sigma}^{1}(t) \\ S_{21\Sigma}^{1}(t) & 0 & 0 & S_{24\Sigma}^{1}(t) \\ S_{31\Sigma}^{1}(t) & 0 & 0 & S_{34\Sigma}^{1}(t) \\ S_{41\Sigma}^{1}(t) & 0 & 0 & S_{44\Sigma}^{1}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип}^{KP} \\ 0 \\ 0 \\ S_{4вип}^{KP} \end{bmatrix}; \quad (5.69)$$

$$\begin{bmatrix} S_{1вiд}^{2KP} \\ S_{2вiд}^{2KP} \\ S_{3вiд}^{2KP} \\ S_{4вiд}^{2KP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11\Sigma}^{2}(t) & 0 & 0 & S_{14\Sigma}^{2}(t) \\ S_{21\Sigma}^{2}(t) & 0 & 0 & S_{24\Sigma}^{2}(t) \\ S_{31\Sigma}^{2}(t) & 0 & 0 & S_{34\Sigma}^{2}(t) \\ S_{41\Sigma}^{2}(t) & 0 & 0 & S_{44\Sigma}^{2}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип}^{KP} \\ 0 \\ 0 \\ S_{4вип}^{KP} \end{bmatrix}. \quad (5.70)$$

Із (5.69) і (5.70) четвертий стовпчик елементів матриць когерентності (5.54) і (5.55) з урахуванням (5.57) і (5.58) визначається таким чином:

$$S_{14\Sigma}^{1}(t) = S_{1вiд}^{1KP} - S_{1вiд}^{H};\ S_{24\Sigma}^{1}(t) = S_{2вiд}^{1KP} - S_{2вiд}^{H};\ S_{34\Sigma}^{1}(t) = S_{3вiд}^{1KP} - S_{3вiд}^{H};\ S_{44\Sigma}^{1}(t) = S_{4вiд}^{1KP} - S_{4вiд}^{H}; \quad (5.71)$$

$$S_{14\Sigma}^{2}(t) = S_{1вiд}^{2KP} - S_{1вiд}^{H};\ S_{24\Sigma}^{2}(t) = S_{2вiд}^{2KP} - S_{2вiд}^{H};\ S_{34\Sigma}^{2}(t) = S_{3вiд}^{2KP} - S_{3вiд}^{H};\ S_{44\Sigma}^{2}(t) = S_{4вiд}^{2KP} - S_{4вiд}^{H}. \quad (5.72)$$

Отримані результати визначення шістнадцяти елементів матриць когерентності (5.54) і (5.55), що характеризують відбивні властивості складного об'єкта радіолокаційного спостереження СРПК, дають змогу записати матриці когерентності $R_k^1(t)$ і $R_k^2(t)$ луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта для двох енергетичних потоків так:

$$R_k^1(t) = \begin{bmatrix} S_{1вiд}^{1H}(t) & S_{1вiд}^{1ЛВ}(t) - S_{1вiд}^{1H}(t) & S_{1вiд}^{1Л45^o}(t) - S_{1вiд}^{1H}(t) & S_{1вiд}^{1KP}(t) - S_{1вiд}^{1H}(t) \\ S_{2вiд}^{1H}(t) & S_{2вiд}^{1ЛВ}(t) - S_{2вiд}^{1H}(t) & S_{2вiд}^{1Л45^o}(t) - S_{2вiд}^{1H}(t) & S_{2вiд}^{1KP}(t) - S_{2вiд}^{1H}(t) \\ S_{3вiд}^{1H}(t) & S_{3вiд}^{1ЛВ}(t) - S_{3вiд}^{1H}(t) & S_{3вiд}^{1Л45^o}(t) - S_{3вiд}^{1H}(t) & S_{3вiд}^{1KP}(t) - S_{3вiд}^{1H}(t) \\ S_{4вiд}^{1H}(t) & S_{4вiд}^{1ЛВ}(t) - S_{4вiд}^{1H}(t) & S_{4вiд}^{1Л45^o}(t) - S_{4вiд}^{1H}(t) & S_{4вiд}^{1KP}(t) - S_{4вiд}^{1H}(t) \end{bmatrix}; \quad (5.73)$$

$$R_k^2(t) = \begin{bmatrix} S_{1вiд}^{2H}(t) & S_{1вiд}^{2ЛВ}(t) - S_{1вiд}^{2H}(t) & S_{1вiд}^{2Л45^o}(t) - S_{1вiд}^{2H}(t) & S_{1вiд}^{2KP}(t) - S_{1вiд}^{2H}(t) \\ S_{2вiд}^{2H}(t) & S_{2вiд}^{2ЛВ}(t) - S_{2вiд}^{2H}(t) & S_{2вiд}^{2Л45^o}(t) - S_{2вiд}^{2H}(t) & S_{2вiд}^{2KP}(t) - S_{2вiд}^{2H}(t) \\ S_{3вiд}^{2H}(t) & S_{3вiд}^{2ЛВ}(t) - S_{3вiд}^{2H}(t) & S_{3вiд}^{2Л45^o}(t) - S_{3вiд}^{2H}(t) & S_{3вiд}^{2KP}(t) - S_{3вiд}^{2H}(t) \\ S_{4вiд}^{2H}(t) & S_{4вiд}^{2ЛВ}(t) - S_{4вiд}^{2H}(t) & S_{4вiд}^{2Л45^o}(t) - S_{4вiд}^{2H}(t) & S_{4вiд}^{2KP}(t) - S_{4вiд}^{2H}(t) \end{bmatrix}. \quad (5.74)$$

Усі елементи матриць когерентності (5.73) і (5.74) є дійсними енергетичними поляризаційними параметрами Стокса, які вимірює СРПК, що дає змогу розв'язати

задачі поляризаційної селекції луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта, які складаються з луна-сигналів навігаційного об'єкта та луна-сигналів атмосферного утворення, в якому перебуває навігаційний об'єкт.

З урахуванням знайдених значень елементів матриці (5.73) і (5.74) можуть бути записані у вигляді:

- для першого енергетичного потоку

$$R_e^1(t)=\begin{bmatrix} S_{1\text{в}i\text{д}}^{1H}(t) & S_{1\text{в}i\text{д}\Delta}^{1ЛВ}(t) & S_{1\text{в}i\text{д}\Delta}^{1Л45^o}(t) & S_{1\text{в}i\text{д}\Delta}^{1KP}(t) \\ S_{2\text{в}i\text{д}}^{1H}(t) & S_{2\text{в}i\text{д}\Delta}^{1ЛВ}(t) & S_{2\text{в}i\text{д}\Delta}^{1Л45^o}(t) & S_{2\text{в}i\text{д}\Delta}^{1KP}(t) \\ S_{3\text{в}i\text{д}}^{1H}(t) & S_{3\text{в}i\text{д}\Delta}^{1ЛВ}(t) & S_{3\text{в}i\text{д}\Delta}^{1Л45^o}(t) & S_{3\text{в}i\text{д}\Delta}^{1KP}(t) \\ S_{4\text{в}i\text{д}}^{1H}(t) & S_{4\text{в}i\text{д}\Delta}^{1ЛВ}(t) & S_{4\text{в}i\text{д}\Delta}^{1Л45^o}(t) & S_{4\text{в}i\text{д}\Delta}^{1KP}(t) \end{bmatrix}; \quad (5.75)$$

- для другого енергетичного потоку

$$R_e^2(t)=\begin{bmatrix} S_{1\text{в}i\text{д}}^{2H}(t) & S_{1\text{в}i\text{д}\Delta}^{2ЛВ}(t) & S_{1\text{в}i\text{д}\Delta}^{2Л45^o}(t) & S_{1\text{в}i\text{д}\Delta}^{2KP}(t) \\ S_{2\text{в}i\text{д}}^{2H}(t) & S_{2\text{в}i\text{д}\Delta}^{2ЛВ}(t) & S_{2\text{в}i\text{д}\Delta}^{2Л45^o}(t) & S_{2\text{в}i\text{д}\Delta}^{2KP}(t) \\ S_{3\text{в}i\text{д}}^{2H}(t) & S_{3\text{в}i\text{д}\Delta}^{2ЛВ}(t) & S_{3\text{в}i\text{д}\Delta}^{2Л45^o}(t) & S_{3\text{в}i\text{д}\Delta}^{2KP}(t) \\ S_{4\text{в}i\text{д}}^{2H}(t) & S_{4\text{в}i\text{д}\Delta}^{2ЛВ}(t) & S_{4\text{в}i\text{д}\Delta}^{2Л45^o}(t) & S_{4\text{в}i\text{д}\Delta}^{2KP}(t) \end{bmatrix}, \quad (5.76)$$

де

$$\begin{array}{lll} S_{\text{в}i\text{д}\Delta}^{ЛВ}(t)=S_{1\text{в}i\text{д}}^{ЛВ}(t)-S_{1\text{в}i\text{д}}^{H}(t) & S_{\text{в}i\text{д}\Delta}^{Л45^o}(t)=S_{1\text{в}i\text{д}}^{Л45^o}(t)-S_{1\text{в}i\text{д}}^{H}(t) & S_{\text{в}i\text{д}\Delta}^{KP}(t)=S_{1\text{в}i\text{д}}^{KP}(t)-S_{1\text{в}i\text{д}}^{H}(t) \\ S_{\text{в}i\text{д}\Delta}^{ЛВ}(t)=S_{2\text{в}i\text{д}}^{ЛВ}(t)-S_{2\text{в}i\text{д}}^{H}(t); & S_{\text{в}i\text{д}\Delta}^{Л45^o}(t)=S_{2\text{в}i\text{д}}^{Л45^o}(t)-S_{2\text{в}i\text{д}}^{H}(t); & S_{\text{в}i\text{д}\Delta}^{KP}(t)=S_{2\text{в}i\text{д}}^{KP}(t)-S_{2\text{в}i\text{д}}^{H}(t). \\ S_{\text{в}i\text{д}\Delta}^{ЛВ}(t)=S_{3\text{в}i\text{д}}^{ЛВ}(t)-S_{3\text{в}i\text{д}}^{H}(t) & S_{\text{в}i\text{д}\Delta}^{Л45^o}(t)=S_{3\text{в}i\text{д}}^{Л45^0}(t)-S_{3\text{в}i\text{д}}^{H}(t) & S_{\text{в}i\text{д}\Delta}^{KP}(t)=S_{3\text{в}i\text{д}}^{KP}(t)-S_{3\text{в}i\text{д}}^{H}(t) \\ S_{\text{в}i\text{д}\Delta}^{ЛВ}(t)=S_{4\text{в}i\text{д}}^{ЛВ}(t)-S_{4\text{в}i\text{д}}^{H}(t) & S_{\text{в}i\text{д}\Delta}^{Л45^o}(t)=S_{4\text{в}i\text{д}}^{Л45^o}(t)-S_{4\text{в}i\text{д}}^{H}(t) & S_{\text{в}i\text{д}\Delta}^{KP}(t)=S_{4\text{в}i\text{д}}^{KP}(t)-S_{4\text{в}i\text{д}}^{H}(t) \end{array}$$

Кожен стовпець елементів матриць (5.75) і (5.76) є сумою відповідних параметрів Стокса луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта, тобто

$$
\begin{aligned}
S^1_{1від\Sigma} &= S^{1H}_{1від}(t) + S^{1H}_{2від}(t) + S^{1H}_{3від}(t) + S^{1H}_{4від}(t);\\
S^1_{2від\Sigma} &= S^{1ЛВ}_{1від\Delta}(t) + S^{1ЛВ}_{2від\Delta}(t) + S^{1ЛВ}_{3від\Delta}(t) + S^{1ЛВ}_{4від\Delta}(t);\\
S^1_{3від\Sigma} &= S^{1Л45^o}_{1від\Delta}(t) + S^{1Л45^o}_{2від\Delta}(t) + S^{1Л45^o}_{3від\Delta}(t) + S^{1Л45^o}_{4від\Delta}(t);\\
S^1_{4від\Sigma} &= S^{1KP}_{1від\Delta}(t) + S^{1KP}_{2від\Delta}(t) + S^{1KP}_{3від\Delta}(t) + S^{1KP}_{4від\Delta}(t);
\end{aligned}
\tag{5.77}
$$

$$
\begin{aligned}
S^2_{1від\Sigma} &= S^{2H}_{1від}(t) + S^{2H}_{2від}(t) + S^{2H}_{3від}(t) + S^{2H}_{4від}(t);\\
S^2_{2від\Sigma} &= S^{2ЛВ}_{1від\Delta}(t) + S^{2ЛВ}_{2від\Delta}(t) + S^{2ЛВ}_{3від\Delta}(t) + S^{2ЛВ}_{4від\Delta}(t);\\
S^2_{3від\Sigma} &= S^{2Л45^o}_{1від\Delta}(t) + S^{2Л45^o}_{2від\Delta}(t) + S^{2Л45^o}_{3від\Delta}(t) + S^{2Л45^o}_{4від\Delta}(t);\\
S^2_{4від\Sigma} &= S^{2KP}_{1від\Delta}(t) + S^{2KP}_{2від\Delta}(t) + S^{2KP}_{3від\Delta}(t) + S^{2KP}_{4від\Delta}(t).
\end{aligned}
\tag{5.78}
$$

Частково поляризований луна-сигнал складного об'єкта, який характеризується системою з чотирьох дійсних енергетичних параметрів Стокса, відповідно до теореми Стокса, можна характеризувати таким, що складається з двох незалежних повністю поляризованих потоків з інтенсивностями $I^1(t)$ і $I^2(t)$. Поляризація потоку $I^1(t)$ збігається з поляризаційною складовою в частково поляризованому луна-сигналі, а поляризація потоку $I^2(t)$ їй ортогональна.

Відповідно до (5.77) і (5.78) інтенсивності $I^1(t)$ і $I^2(t)$ двох повністю поляризованих потоків луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта, при його опроміненні електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій, запишуться через виміряні сумарні енергетичні параметри Стокса в такий спосіб:

$$
I^1(t) = \frac{S_1(t) + \sqrt{S_2^2(t) + S_3^2(t) + S_4^2(t)}}{2}, \tag{5.79}
$$

$$
I^2(t) = \frac{S_1(t) - \sqrt{S_2^2(t) + S_3^2(t) + S_4^2(t)}}{2}, \tag{5.80}
$$

Параметри Стокса в (5.79) відповідають інтенсивності луна-сигналів частково поляризованої хвилі навігаційного об'єкта, а параметри Стокса (5.80) відповідають інтенсивності луна-сигналів частково поляризованої хвилі атмосферного утворення, в зоні якого перебуває навігаційний об'єкт.

Перший параметр Стокса (5.79) і (5.80) характеризує загальну інтенсивність луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта. Виміряні інтенсивності, що відповідають луна-сигналам навігаційного об'єкта та луна-сигналам атмосферного утворення, подаються на індикатор СРПК і дисплей комп'ютера.

З урахуванням інтенсивностей потоків $I^1(t)$ і $I^2(t)$ матриці когерентності луна-сигналу навігаційного об'єкта $R_{kHO}(t)$ та луна-сигналу атмосферного утворення $R_{kAV}(t)$ під час їх опромінення електромагнітними хвилями чотирьох наведених поляризацій запишуться у вигляді:

$$R_{kHO}(t)=\begin{bmatrix} \dfrac{S^{H}_{1вiд}(t)+\sqrt{S^{2H}_{2вiд}(t)+S^{2H}_{3вiд}(t)+S^{2H}_{4вiд}(t)}}{2} \\ \dfrac{S^{ЛВ}_{1вiд}(t)+\sqrt{S^{2ЛВ}_{2вiд}(t)+S^{2ЛВ}_{3вiд}(t)+S^{2ЛВ}_{4вiд}(t)}}{2} \\ \dfrac{S^{Л45^o}_{1вiд}(t)+\sqrt{S^{2Л45^o}_{2вiд}(t)+S^{2Л45^o}_{3вiд}(t)+S^{2Л45^o}_{4вiд}(t)}}{2} \\ \dfrac{S^{KP}_{1вiд}(t)+\sqrt{S^{2KP}_{2вiд}(t)+S^{2KP}_{3вiд}(t)+S^{2KP}_{4вiд}(t)}}{2} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} I^{H}_{1вiдHO}(t) \\ I^{ЛВ}_{2вiдHO}(t) \\ I^{Л45^0}_{3вiдHO}(t) \\ I^{KP}_{4вiдHO}(t) \end{bmatrix}=\left[I^1_{\Sigma}(t)\right]; \qquad (5.81)$$

$$R_{kAV}(t)=\begin{bmatrix} \dfrac{S^{H}_{1вiд}(t)-\sqrt{S^{2H}_{2вiд}(t)+S^{2H}_{3вiд}(t)+S^{2H}_{4вiд}(t)}}{2} \\ \dfrac{S^{ЛВ}_{1вiд}(t)-\sqrt{S^{2ЛВ}_{2вiд}(t)+S^{2ЛВ}_{3вiд}(t)+S^{2ЛВ}_{4вiд}(t)}}{2} \\ \dfrac{S^{Л45^o}_{1вiд}(t)-\sqrt{S^{2Л45^o}_{2вiд}(t)+S^{2Л45^o}_{3вiд}(t)+S^{2Л45^o}_{4вiд}(t)}}{2} \\ \dfrac{S^{KP}_{1вiд}(t)-\sqrt{S^{2KP}_{2вiд}(t)+S^{2KP}_{3вiд}(t)+S^{2KP}_{4вiд}(t)}}{2} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} I^{H}_{1вiдAV}(t) \\ I^{ЛВ}_{2вiдAV}(t) \\ I^{Л45^0}_{3вiдAV}(t) \\ I^{KP}_{4вiдAV}(t) \end{bmatrix}=\left[I^2_{\Sigma}(t)\right]. \qquad (5.82)$$

Матриці когерентності навігаційного об'єкта й атмосферного утворення визначено як лінійні комбінації чотирьох виміряних СРПК дійсних енергетичних параметрів Стокса, що входять до двох енергетичних потоків луна-сигналу частково

поляризованої хвилі складного об'єкта, і дають змогу розв'язати задачу поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, який перебуває в зоні атмосферного утворення певної інтенсивності на шляху судна. Інтенсивність атмосферного утворення вимірюється за поляризаційними параметрами другого енергетичного потоку.

5.3 Розроблення методології поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах атмосферних завад, з використанням ступеня поляризації та статистичних властивостей поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі

У судновій радіолокації до теперішнього часу завдання радіолокаційного розпізнавання і селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних утворень (випадні опади різної інтенсивності), повністю не вирішене. Луна-сигнал складного об'єкта є частково поляризованим, а оскільки навігаційний об'єкт перебуває в зоні випадних опадів, то виділення його луна-сигналу з луна-сигналу складного об'єкта в судноплавних радіолокаційних засобах, які використовуються, наявними методами є складним завданням, особливо в разі опадів великої інтенсивності. Ці методи не враховують поляризаційні властивості електромагнітної хвилі під час зондування складного об'єкта, а нехтування під час аналізу параметрів луна-сигналів їх поляризаційним станом призводить до втрати радіолокаційної інформації про навігаційний об'єкт. У методах і техніці радіолокаційного розпізнавання нині використовується розпізнавання за вузькосмуговим сигналом, за широкосмуговим сигналом і за поляризаційними відмінностями. Однак, використання результатів досліджень за вказаними напрямами для практичного використання в СРПК виявилося проблематичним. Тому виникла необхідність у розробленні та теоретичному обґрунтуванні методу поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних випадних опадів з використанням поляризаційних відмінностей параметрів їхніх луна-сигналів, які

надходять на вхід антени СРПК. При цьому семантика луна-сигналів відповідатиме певній апріорній інформації про співвідношення джерел луна-сигналів із поляризаційними параметрами аналізованої частково поляризованої хвилі. Семантичний підхід дає змогу провести аналіз смислового змісту отриманої за допомогою СРПК радіолокаційної інформації, а прагматичний підхід оцінює корисність і цінність отриманої радіолокаційної інформації про навігаційний об'єкт для екіпажу судна.

Результати наукових досліджень за розглянутим напрямом ґрунтуються на використанні матриці Джонса, елементами якої є комплексні амплітуди двох компонент електричного вектору хвилі, що повільно змінюються. Ці амплітуди повністю характеризують статистичні властивості частково поляризованих електромагнітних хвиль і містять інформацію про флуктуації їхніх поляризаційних параметрів. Огинаючи та фази ортогональних компонент частково поляризованої хвилі також містять інформацію про її статистичні властивості та використані як вихідні параметри радіолокаційних комплексів. Практичне використання комплексних статистичних елементів матриці Джонсона під час розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних утворень, у СРПК в оперативній практиці не дає змоги розв'язати задачу їхньої поляризаційної селекції. Тому для розв'язання цієї задачі необхідно використовувати матрицю Мюллера, яка характеризує процес розсіювання плоских електромагнітних хвиль на об'єкті, а поляризаційні властивості опромінювальної об'єкт і відбитої від нього електромагнітної хвилі представляти системою чотирьох дійсних енергетичних параметрів Стокса, які легко вимірюються на практиці СРПК.

Таким чином, з'являється необхідність у розробленні, теоретичному та експериментальному обґрунтуванні методу поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних утворень, з використанням поляризаційних відмінностей параметрів їхніх луна-сигналів, які надходять на вхід антени СРПК.

Для розв'язання поставленої задачі з поляризаційної селекції навігаційних об'єктів використано чотири поляризації електромагнітної хвилі на випромінювання, а приймання луна-сигналу будь-якої поляризації здійснюється всеполяризованою антеною СРПК з вимірюванням на виході двоканального лінійного приймача енергетичних параметрів Стокса, записаних у такий спосіб:

$$S_1 = \left\langle E_x^2(t) \right\rangle + \left\langle E_y^2(t) \right\rangle = \left\langle P_x(t) \right\rangle + \left\langle P_y(t) \right\rangle; \tag{5.83}$$

$$S_2 = \left\langle E_x^2(t) \right\rangle - \left\langle E_y^2(t) \right\rangle = \left\langle P_x(t) \right\rangle - \left\langle P_y(t) \right\rangle; \tag{5.84}$$

$$S_3 = 2\left\langle E_x(t) E_y(t) \cos\left[\varphi_y(t) - \varphi_x(t)\right] \right\rangle = 2\left\langle \sqrt{P_x(t) P_y(t)} \cos\left[\Phi_y(t) - \Phi_x(t)\right] \right\rangle; \tag{5.85}$$

$$S_4 = 2\left\langle E_x(t) E_y(t) \sin\left[\varphi_y(t) - \varphi_x(t)\right] \right\rangle = 2\left\langle \sqrt{P_x(t) P_y(t)} \sin\left[\Phi_y(t) - \Phi_x(t)\right] \right\rangle, \tag{5.86}$$

де $E_x(t)$ і $E_y(t)$ - амплітуди ортогонально поляризованих компонент луна-сигналу частково поляризованої хвилі;

$P_x(t)$ і $P_y(t)$ - потужності ортогональних компонент луна-сигналу частково поляризованої хвилі;

$\Phi_x - \Phi_y$ або $\varphi_x - \varphi_y$ - різниця фаз між ортогональними компонентами луна-сигналу $E_x(t)$ і $E_y(t)$ частково поляризованої хвилі.

Представимо в загальному вигляді поляризаційні характеристики випромінюваної антеною СРПК електромагнітної хвилі та хвилі, відбитої від складного об'єкта, дійсними параметрами Стокса у вигляді двох матриць випромінюваної хвилі $[S_{вип}]$ та відбитої хвилі $[S_{від}]$:

$$[S_{вип}] = \begin{bmatrix} S_{1вип}(t) \\ S_{2вип}(t) \\ S_{3вип}(t) \\ S_{4вип}(t) \end{bmatrix}; \tag{5.87}$$

$$\left[S_{від}\right]=\begin{bmatrix} S_{1від}(t) \\ S_{2від}(t) \\ S_{3вип}(t) \\ S_{4від}(t) \end{bmatrix}, \tag{5.88}$$

де $S_{вип}$ и $S_{від}$ – вектори Стокса випроміненої та відбитої електромагнітних хвиль, відповідно;

$S_{1вип}(t)$, $S_{2вип}(t)$, $S_{3вип}(t)$, $S_{4вип}(t)$ - енергетичні параметри Стокса випроміненої електромагнітної хвилі;

$S_{1від}(t)$, $S_{2від}(t)$, $S_{3від}(t)$, $S_{4від}(t)$ - енергетичні параметри Стокса відбитої електромагнітної хвилі.

А розсіювальні властивості складного об'єкта також представимо у вигляді матриці розсіювання Мюллера $\left[S_{роз}\right]$, що складається з 16 елементів:

$$\left[S_{роз}\right]=\begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & S_{13}(t) & S_{14}(t) \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & S_{23}(t) & S_{24}(t) \\ S_{31}(t) & S_{32}(t) & S_{33}(t) & S_{34}(t) \\ S_{41}(t) & S_{42}(t) & S_{43}(t) & S_{44}(t) \end{bmatrix}, \tag{5.89}$$

де $S_{11}(t)\ldots S_{44}(t)$ – елементи матриці Мюллера.

Тоді взаємозв'язок між трьома матрицями запишеться таким рівнянням:

$$\begin{bmatrix} S_{1від}(t) \\ S_{2від}(t) \\ S_{3від}(t) \\ S_{4від}(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & S_{13}(t) & S_{14}(t) \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & S_{23}(t) & S_{24}(t) \\ S_{31}(t) & S_{32}(t) & S_{33}(t) & S_{34}(t) \\ S_{41}(t) & S_{42}(t) & S_{43}(t) & S_{44}(t) \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} S_{1вип}(t) \\ S_{2вип}(t) \\ S_{3вип}(t) \\ S_{4вип}(t) \end{bmatrix}. \tag{5.90}$$

Рівняння (5.90) можна записати у вигляді чотирьох лінійних рівнянь з урахуванням фізичного сенсу параметрів Стокса відбитої від складного об'єкта електромагнітної хвилі:

$$\begin{aligned} &S_{1від}(t)=S_{11}(t)S_{1від}(t)+S_{12}(t)S_{2від}(t)+S_{13}(t)S_{3від}(t)+S_{14}(t)S_{4від}(t)= \\ &=S_{11}(t)\left[P_{x.вип}(t)+P_{y.вип}(t)\right]+S_{12}(t)\left[P_{x.вип}(t)-P_{y.вип}(t)\right]+ \\ &+S_{13}(t)2\sqrt{P_{x.вип}(t)P_{y.вип}(t)}\cos\Phi_{xy}(t)+S_{14}(t)2\sqrt{P_{x.вип}(t)P_{y.вип}(t)}\sin\Phi_{xy}(t); \end{aligned} \tag{5.91}$$

$$
\begin{aligned}
&S_{2від}(t) = S_{21}(t)S_{1від}(t) + S_{22}(t)S_{2від}(t) + S_{23}(t)S_{3від}(t) + S_{24}(t)S_{4від}(t) = \\
&= S_{21}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + S_{22}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + \\
&+ S_{23}(t)2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t) + S_{24}(t)2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t);
\end{aligned}
\tag{5.92}
$$

$$
\begin{aligned}
&S_{3від}(t) = S_{31}(t)S_{1від}(t) + S_{32}(t)S_{2від}(t) + S_{33}(t)S_{3від}(t) + S_{34}(t)S_{4від}(t) = \\
&= S_{31}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + S_{32}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + \\
&+ S_{33}(t)2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t) + S_{34}(t)2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t);
\end{aligned}
\tag{5.93}
$$

$$
\begin{aligned}
&S_{4від}(t) = S_{41}(t)S_{1від}(t) + S_{42}(t)S_{2від}(t) + S_{43}(t)S_{3від}(t) + S_{44}(t)S_{4від}(t) = \\
&= S_{41}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + S_{42}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + \\
&+ S_{43}(t)2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t) + S_{44}(t)2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t)
\end{aligned}
\text{ , } \tag{5.94}
$$

де $P_{х.вип}$ і $P_{у.вип}$ - потужності ортогональних компонент випромінюваної електромагнітної хвилі.

У загальному випадку відбиту від складного об'єкта, частково поляризовану електромагнітну хвилю можна розкласти на дві незалежні компоненти: повністю поляризовану і неполяризовану.

Повністю поляризована компонента луна-сигналу складного об'єкта частково поляризованої електромагнітної хвилі записується через параметри Стокса таким чином:

$$
\begin{aligned}
&П_{пол.від}(t) = \left[S^2_{2від}(t) + S^2_{3від}(t) + S^2_{4від}(t)\right]^{1/2} = \\
&= \Big\{S_{21}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + S_{22}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + \\
&+ S_{23}(t)\left[\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t)\right] + S_{24}(t)\left[2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t)\right]^2 + \\
&+ S_{31}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + S_{32}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + S_{33}(t)\left[2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t)\right] + \\
&+ S_{34}(t)\left[2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t)\right]^2 + S_{41}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + S_{42}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + \\
&+ S_{43}(t)\left[2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t)\right] + S_{44}(t)\left[2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t)\right]^2\Big\}^{1/2}.
\end{aligned}
\tag{5.95}
$$

Повністю неполяризована компонента луна-сигналу складного об'єкта частково поляризованої електромагнітної хвилі записується через параметри Стокса у вигляді:

$$
\begin{aligned}
&П_{непол.від}(t) = S_{1від}(t) - \left[S^2_{2від}(t) + S^2_{3від}(t) + S^2_{4від}(t)\right]^{1/2} = \\
&= S_{11}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + S_{12}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + S_{13}\left[\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t)\right] + \\
&+ S_{14}\left[\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t)\right] - \left\{S_{21}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + S_{22}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + \right. \\
&+ S_{23}(t)\left[\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t)\right] + S_{24}(t)\left[2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t)\right]^2 + \\
&+ S_{31}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + S_{32}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + S_{33}(t)\left[2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t)\right] + \\
&+ S_{34}(t)\left[2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t)\right]^2 + S_{41}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + S_{42}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + \\
&\left. + S_{43}(t)\left[2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t)\right] + S_{44}(t)\left[2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t)\right]^2\right\}^{1/2}.
\end{aligned}
\tag{5.96}
$$

Нормовану інтенсивність поляризованої компоненти в луна-сигналі складного об'єкта частково поляризованої хвилі можна представити у вигляді ступеня поляризації m і записати так:

$$
\begin{aligned}
m = \frac{\left(S^2_{2від} + S^2_{3від} + S^2_{4від}\right)^{1/2}}{S_{1від}} = &\frac{\left\{\left[S_{21}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + S_{22}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + \right.\right.}{S_{11}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + } \\
&\frac{\left. + S_{23}(t)2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t) + S_{24}(t)2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t)\right]^{1/2} + \left[S_{31}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + \right.}{S_{12}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + } \\
&\frac{\left. + S_{32}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + S_{33}(t)2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху} + S_{34}(t)2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t)\right]^{1/2} + }{S_{13}(t)2\left[\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t)\right] + } \\
&\frac{\left[S_{41}(t)\left[P_{х.вип}(t) + P_{у.вип}(t)\right] + S_{42}(t)\left[P_{х.вип}(t) - P_{у.вип}(t)\right] + S_{43}(t)2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\cos\Phi_{ху}(t) + \right.}{+ S_{14}(t)\left[2\sqrt{P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)}\sin\Phi_{ху}(t)\right]} \\
&\frac{\left. + S_{44}(t)2P_{х.вип}(t)P_{у.вип}(t)\sin\Phi_{ху}(t)\right]^2\Big\}^{1/2}}{}.
\end{aligned}
\tag{5.97}
$$

Однак співвідношення (5.97) не дає змоги розв'язати задачу поляризаційної селекції луна-сигналу навігаційного об'єкта. Для розв'язання цієї задачі повністю неполяризовану компоненту луна-сигналу складного об'єкта частково поляризованої хвилі необхідно подати у вигляді суми двох незалежних протилежно поляризованих потоків $I^1(t)$ і $I^2(t)$ з інтенсивностями $\frac{S_1+\sqrt{S_2^2+S_3^2+S_4^2}}{2}$ і $\frac{S_1-\sqrt{S_2^2+S_3^2+S_4^2}}{2}$ відповідно.

Причому поляризація потоку $I^1(t)$ збігатиметься з поляризацією потоку $П_{пол.від}(t)$, а поляризація потоку $I^2(t)$ буде ортогональна поляризації потоку $П_{пол.від}(t)$. У підсумку частково поляризований луна-сигнал складного об'єкта, спостережуваного СРПК на шляху судна, представлений поляризаційними параметрами Стокса S_1, S_2, S_3, S_4, є сумою двох незалежних повністю поляризованих потоків $I^1_{пол}(t)$ і $I^2_{пол}(t)$ з інтенсивностями:

$$I^1_{пол}(t)=\frac{S_1+\sqrt{S_2^2+S_3^2+S_4^2}}{2}, \tag{5.98}$$

$$I^2_{пол}(t)=\frac{S_1-\sqrt{S_2^2+S_3^2+S_4^2}}{2}. \tag{5.99}$$

Тоді нормовані інтенсивності повністю поляризованих потоків $I^1_{пол}(t)$ і $I^2_{пол}(t)$ у частково поляризованому луна-сигналі складного об'єкта являють собою ступені поляризації m_1 і m_2, записані у вигляді:

$$m_1=\frac{S_1+\sqrt{S_2^2+S_3^2+S_4^2}}{2S_1}, \tag{5.100}$$

$$m_2=\frac{S_1-\sqrt{S_2^2+S_3^2+S_4^2}}{2S_1}, \tag{5.101}$$

де S_1 представляє сумарну інтенсивність луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта.

5.3.1 Розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні атмосферного утворення з використанням ступеня поляризації електромагнітної хвилі

Практична реалізація поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного для судноводіння атмосферного утворення (зливові опади) здійснюється шляхом використання нормованої інтенсивності двох поляризованих потоків зі ступенями поляризації m_1 і m_2 [151, 170]. При цьому проводиться послідовне опромінення складного об'єкта електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій (трьома лінійними і однією круговою) з вимірами поляризаційних параметрів Стокса луна-сигналу на виході лінійного двоканального приймача для кожної поляризації випромінюваної хвилі антеною СРПК. За виміряними параметрами Стокса луна-сигналу складного об'єкта визначаються ступені поляризації кожного з двох об'єктів, m_1 відповідає навігаційному об'єкту (m_{HO}), а m_2 - атмосферному утворенню (m_{AY}).

Алгоритм методу поляризаційної селекції навігаційного об'єкта реалізується в такій послідовності:

- послідовно опромінюється складний об'єкт електромагнітною хвилею лінійної вертикальної поляризації, лінійної горизонтальної поляризації, лінійної поляризації з нахилом електричного вектору 45° і кругової поляризації;

- всеполяризованою антеною СРПК приймається луна-сигнал складного об'єкта і на виході лінійного приймача вимірюються енергетичні параметри Стокса для кожної поляризації хвилі, яка опромінює складний об'єкт;

- за виміряними параметрами Стокса обчислюються ступені поляризації кожного з об'єктів, за значенням яких, проводиться селекція навігаційного об'єкта і атмосферного утворення за такими формулами:

- для лінійної вертикальної поляризації (*ЛВП*):

$$m_{НО} = \frac{S_{1ЛВП} + \sqrt{S^2_{2ЛВП} + S^2_{3ЛВП} + S^2_{4ЛВП}}}{2S_{1ЛВП}}; \quad (5.102)$$

$$m_{АУ} = \frac{S_{1ЛВП} - \sqrt{S^2_{2ЛВП} + S^2_{3ЛВП} + S^2_{4ЛВП}}}{2S_{1ЛВП}}; \quad (5.103)$$

- для лінійної горизонтальної поляризації (*ЛГП*):

$$m_{НО} = \frac{S_{1ЛГП} + \sqrt{S^2_{2ЛГП} + S^2_{3ЛГП} + S^2_{4ЛГП}}}{2S_{1ЛГП}}; \quad (5.104)$$

$$m_{АУ} = \frac{S_{1ЛГП} - \sqrt{S^2_{2ЛГП} + S^2_{3ЛГП} + S^2_{4ЛГП}}}{2S_{1ЛГП}}; \quad (5.105)$$

- для лінійної поляризації з нахилом електричного вектору 45° (*ЛП45°*):

$$\pm m_{НО} = \frac{S_{1ЛП45^o} + \sqrt{S^2_{2ЛП45^o} + S^2_{3ЛП45^o} + S^2_{4ЛП45^o}}}{2S_{1ЛП45^o}}; \quad (5.106)$$

$$\pm m_{АУ} = \frac{S_{1ЛП45^o} - \sqrt{S^2_{2ЛП45^o} + S^2_{3ЛП45^o} + S^2_{4ЛП45^o}}}{2S_{1ЛП45^o}}; \quad (5.107)$$

- для кругової поляризації (*КРП*):

$$\pm m_{НО} = \frac{S_{1КРП} + \sqrt{S_{2КРП}^2 + S_{3КРП}^2 + S_{4КРП}^2}}{2S_{1КРП}}; \tag{5.108}$$

$$\pm m_{АУ} = \frac{S_{1КРП} - \sqrt{S_{2КРП}^2 + S_{3КРП}^2 + S_{4КРП}^2}}{2S_{1КРП}}. \tag{5.109}$$

В оперативній плавальній практиці залежно від інтенсивності випадних опадів, у зоні яких перебуває навігаційний об'єкт, для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта можна використовувати ступені поляризації $m_{НО}$ і $m_{АУ}$ для будь-якої з чотирьох поляризацій електромагнітної хвилі, яка опромінює складний об'єкт, або за великої інтенсивності випадних опадів для всіх чотирьох поляризацій електромагнітної хвилі, яка опромінює складний об'єкт. Розглянута можливість використання критеріїв оптимальності поляризаційних параметрів, якими є ступені поляризації луна-сигналів частково поляризованих електромагнітних хвиль чотирьох поляризацій, дає змогу розв'язати задачу поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, який перебуває в зоні випадних опадів різної інтенсивності на шляху судна.

Для випадних опадів певної інтенсивності та фазового стану (табл. 5.2) виконано розрахунок ступеня поляризації луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта, інтенсивність I яких змінювалася від 0,25 мм/год до 150 мм/год у разі зміни середнього радіусу частинок $r_{ср}$ від 0,75 мм до 1,8 мм. Розрахунок проведено для опромінюваного радіолокаційного об'єму випадних опадів електромагнітною хвилею трьох лінійних і однієї кругової поляризацій.

Таблиця 5.2

Середній радіус крапель $r_{ср}$ у дощі певної інтенсивності *I*

Інтенсивність дощу *I, мм / год*	Середній радіус крапель в дощі певної інтенсивності *r, мм*	Процент крапель, %	Інтенсивність дощу *I, мм / год*	Середній радіус крапель в дощі певної інтенсивності *r, мм*	Процент крапель, %
0,25	0,025 0,050 0,075 0,100 0,125 $r_{ср}$ **= 0,75**	0,28 0,50 0,18 0,03 0,01	**25,0**	0,025 0,050 0,075 0,100 0,125 0,150 0,175 0,200 0,225 0,250 0,275 $r_{ср}$ **= 1,5**	0,02 0,08 0,18 0,24 0,20 0,13 0,08 0,03 0.02 0,01 0,01
1,25	0,025 0,050 0,075 0,100 0,125 0,150 0,175 $r_{ср}$ **= 1,0**	0,11 0,37 0,31 0,14 0,05 0,02 0,01	**50,0**	0,025 0,050 0,075 0,100 0,125 0,150 0,175 0,200 0,225 0,250 0,275 0,300 $r_{ср}$ **= 1,63**	0,01 0,05 0,12 0,20 0,21 0,16 0,11 0,07 0.03 0,02 0,01 0,01
2,5	0,025 0,050 0,075 0,100 0,125 0,150 0,175 0,200 $r_{ср}$ **= 1,13**	0,07 0,28 0,33 0,19 0,08 0,03 0,01 0,01	**100,0**	0,025 0,050 0,075 0,100 0,125 0,150 0,175 0,200 0,225 0,250 0,275 0,300 0,325 $r_{ср}$ **= 1,75**	0,01 0,04 0,09 0,14 0,17 0,18 0,15 0,09 0.06 0,03 0,02 0,01 0,01
12,5	0,025 0,050 0,075 0,100 0,125 0,150 0,175 0,200 0,225 0,250 $r_{ср}$ **= 1,38**	0,03 0,12 0,25 0,25 0,17 0,10 0,04 0,02 0,01 0,01	**150,0**	0,025 0,050 0,075 0,100 0,125 0,150 0,175 0,200 0,225 0,250 0,275 0,300 0,325 $r_{ср}$ **= 1,81**	0,01 0,04 0,07 0,12 0,14 0,18 0,16 0,12 0.08 0,04 0,02 0,01 0,01

Розрахунок ступеня поляризації луна-сигналів частково поляризованої хвилі виконано для навігаційного об'єкта й атмосферного утворення і представлено в табл. 5.3 - 5.10.

Таблиця 5.3

Результати розрахунку ступеня поляризації луна-сигналів навігаційного об'єкта $m_{НО}$ й атмосферного утворення $m_{АУ}$ за певних інтенсивностей I випадних опадів, середнього радіусу $r_{ср}$ і виміряних параметрів Стокса під час опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею лінійної вертикальної поляризації (*ЛВП*) з діелектричною проникністю водяних часток випадних опадів $\varepsilon = 81$

I = 0,2мм/год ***$r_{ср}$= 0,75 мм***	***I = 1,25 мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,0 мм***	***I = 2,50 мм /год*** ***$r_{ср}$ = 1,13 мм***	***I = 12,50 мм /год*** ***$r_{ср}$ = 1,38 мм***
$S_{1ЛВП}$ =4,5 $S_{2\ ЛВП}$ =3,5 $S_{3\ ЛВП}$ =0,8 $S_{4\ ЛВП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,90 $m_{АУ}$ =0,10	$S_{1\ ЛВП}$ =5,5 $S_{2\ ЛВП}$ =4,0 $S_{3\ ЛВП}$ =1,6 $S_{4\ ЛВП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,93 $m_{АУ}$ =0,07	$S_{1\ ЛВП}$ =5,2 $S_{2\ ЛВП}$ =4,1 $S_{3\ ЛВП}$ =1,7 $S_{4\ ЛВП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,92 $m_{АУ}$ =0,08	$S_{1\ ЛВП}$ =6,0 $S_{2\ ЛВП}$ =5,2 $S_{3\ ЛВП}$ =1,9 $S_{4\ ЛВП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,96 $m_{АУ}$ =0,09
I = 25,0мм/год ***$r_{ср}$ = 1,5 мм***	***I = 50,0 мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,63 мм***	***I = 100,0мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,75 мм***	***I = 150,0 мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,81 мм***
$S_{1\ ЛВП}$ =7,2 $S_{2\ ЛВП}$ =5,4 $S_{3\ ЛВП}$ =2,1 $S_{4\ ЛВП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,89 $m_{АУ}$ =0,11	$S_{1\ ЛВП}$ =8,4 $S_{2\ ЛВП}$ =5,9 $S_{3\ ЛВП}$ =2,5 $S_{4\ ЛВП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,88 $m_{АУ}$ =0,12	$S_{1\ ЛВП}$ =12,0 $S_{2\ ЛВП}$ =10,0 $S_{3\ ЛВП}$ =3,2 $S_{4\ ЛВП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,94 $m_{АУ}$ =0,06	$S_{1\ ЛВП}$ =13,5 $S_{2\ ЛВП}$ =12,0 $S_{3\ ЛВП}$ =4,1 $S_{4\ ЛВП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,97 $m_{АУ}$ =0,03

Таблиця 5.4

Результати розрахунку ступеня поляризації луна-сигналів навігаційного об'єкта $m_{НО}$ й атмосферного утворення $m_{АУ}$ за певних інтенсивностей I випадних опадів, середнього радіусу $r_{ср}$ і виміряних параметрів Стокса під час опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею лінійної вертикальної поляризації (*ЛГП*) з діелектричною проникністю водяних часток випадних опадів $\varepsilon = 81$

I = 0,2мм/год ***$r_{ср}$= 0,75 мм***	***I = 1,25 мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,0 мм***	***I=2,50мм /год*** ***$r_{ср}$ = 1,13 мм***	***I = 12,50 мм /год*** ***$r_{ср}$ = 1,38 мм***
$S_{1\,ЛГП}$ =4,9 $S_{2\,ЛГП}$ =4,0 $S_{3\,ЛГП}$ =0,7 $S_{4\,ЛГП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,91 $m_{АУ}$ =0,09	$S_{1\,ЛГП}$ =5,3 $S_{2\,ЛГП}$ =4,4 $S_{3\,ЛГП}$ =0,9 $S_{4\,ЛГП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,92 $m_{АУ}$ =0,50	$S_{1\,ЛГП}$ =5,8 $S_{2\,ЛГП}$ =4,9 $S_{3\,ЛГП}$ =1,1 $S_{4\,ЛГП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,93 $m_{АУ}$ =0,07	$S_{1\,ЛГП}$ =6,5 $S_{2\,ЛГП}$ =5,3 $S_{3\,ЛГП}$ =1,4 $S_{4\,ЛГП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,92 $m_{АУ}$ =0,08
I = 25,0мм/год ***$r_{ср}$ = 1,5 мм***	***I = 50,0 мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,63 мм***	***I = 100,0мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,75 мм***	***I = 150,0мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,81 мм***
$S_{1\,ЛГП}$ =6,9 $S_{2\,ЛГП}$ =5,5 $S_{3\,ЛГП}$ =1,6 $S_{4\,ЛГП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,91 $m_{АУ}$ =0,09	$S_{1\,ЛГП}$ =7,3 $S_{2\,ЛГП}$ =5,9 $S_{3\,ЛГП}$ =1,8 $S_{4\,ЛГП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,93 $m_{АУ}$ =0,08	$S_{1\,ЛГП}$ =7,9 $S_{2\,ЛГП}$ =6,3 $S_{3\,ЛГП}$ =2,2 $S_{4\,ЛГП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,92 $m_{АУ}$ =0,08	$S_{1\,ЛГП}$ =11,2 $S_{2\,ЛГП}$ =9,4 $S_{3\,ЛГП}$ =3,9 $S_{4\,ЛГП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,96 $m_{АУ}$ =0,05

Таблиця 5.5

Результати розрахунку ступеня поляризації луна-сигналів навігаційного об'єкта $m_{НО}$ й атмосферного утворення $m_{АУ}$ за певних інтенсивностей I випадних опадів, середнього радіусу $r_{ср}$ і виміряних параметрів Стокса під час опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею лінійної поляризації з нахилом електричного вектору 45° ($ЛП45^{o}$) з діелектричною проникністю водяних частинок випадних опадів $\varepsilon = 81$

I = 0,2мм/год ***$r_{ср}$= 0,75 мм***	***I = 1,25 мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,0 мм***	***I = 2,50 мм /год*** ***$r_{ср}$ = 1,13 мм***	***I = 12,50мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,38 мм***
$S_{1ЛП45^{o}} = 13,5$ $S_{2ЛП45^{o}} = 10,4$ $S_{3\,ЛП45^{o}} = 3,2$ $S_{4\,ЛП45^{o}} = 0,0$ $m_{НО} = 0,90$ $m_{АУ} = 0,10$	$S_{1\,ЛП45^{o}} = 13,9$ $S_{2\,ЛП45^{o}} = 10,6$ $S_{3\,ЛП45^{o}} = 3,3$ $S_{4\,ЛП45^{o}} = 0,0$ $m_{НО} = 0,89$ $m_{АУ} = 0,10$	$S_{1\,ЛП45^{o}} = 14,0$ $S_{2\,ЛП45^{o}} = 11,0$ $S_{3\,ЛП45^{o}} = 3,5$ $S_{4\,ЛП45^{o}} = 0,0$ $m_{НО} = 0,91$ $m_{АУ} = 0,09$	$S_{1\,ЛП45^{o}} = 14,3$ $S_{2\,ЛП45^{o}} = 11,4$ $S_{3\,ЛП45^{o}} = 3,8$ $S_{4\,ЛП45^{o}} = 0,0$ $m_{НО} = 0,92$ $m_{АУ} = 0,08$
I = 25,0мм/год ***$r_{ср}$ = 1,5 мм***	***I = 50,0 мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,63 мм***	***I = 100,0 мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,75 мм***	***I = 150,0мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,81 мм***
$S_{1\,ЛП45^{o}} = 14,8$ $S_{2\,ЛП45^{o}} = 11,9$ $S_{3\,ЛП45^{o}} = 4,1$ $S_{4\,ЛП45^{o}} = 0,0$ $m_{НО} = 0,93$ $m_{АУ} = 0,07$	$S_{1\,ЛП45^{o}} = 15,1$ $S_{2\,ЛП45^{o}} = 12,4$ $S_{3\,ЛП45^{o}} = 4,8$ $S_{4\,ЛП45^{o}} = 0,0$ $m_{НО} = 0,94$ $m_{АУ} = 0,06$	$S_{1\,ЛП45^{o}} = 15,2$ $S_{2\,ЛП45^{o}} = 12,8$ $S_{3\,ЛП45^{o}} = 5,1$ $S_{4\,ЛП45^{o}} = 0,0$ $m_{НО} = 0,95$ $m_{АУ} = 0,03$	$S_{1\,ЛП45^{o}} = 15,9$ $S_{2\,ЛП45^{o}} = 13,0$ $S_{3\,ЛП45^{o}} = 5,9$ $S_{4\,ЛП45^{o}} = 0,0$ $m_{НО} = 0,95$ $m_{АУ} = 0,05$

Таблиця 5.6

Результати розрахунку ступеня поляризації луна-сигналів навігаційного об'єкта $m_{НО}$ й атмосферного утворення $m_{АУ}$ за певних інтенсивностей I випадних опадів, середнього радіусу $r_{ср}$ і виміряних параметрів Стокса під час опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею кругової поляризації *(КРП)* з діелектричною проникністю водяних частинок випадних опадів $\varepsilon = 81$

I = 0,25мм/год ***$r_{ср}$= 0,75 мм***	***I = 1,25 мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,0 мм***	***I = 2,50 мм /год*** ***$r_{ср}$ = 1,13 мм***	***I =12,50 мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,38 мм***
$S_{1КРП}$=13,0 $S_{2КРП}$ =10,4 $S_{3КРП}$ =3,2 $S_{4КРП}$ =2,2 $m_{НО}$ =0,93 $m_{АУ}$ =0,07	$S_{1КРП}$ =13,9 $S_{2КРП}$ =10,6 $S_{3КРП}$ =3,3 $S_{4КРП}$ =2,6 $m_{НО}$ =0,91 $m_{АУ}$ =0,09	$S_{1КРП}$ =14,0 $S_{2КРП}$ =11,0 $S_{3КРП}$ =3,6 $S_{4КРП}$ =2,7 $m_{НО}$ =0,93 $m_{АУ}$ =0,08	$S_{1КРП}$ =14,4 $S_{2КРП}$ =11,6 $S_{3КРП}$ =3,8 $S_{4КРП}$ =2,9 $m_{НО}$ =0,93 $m_{АУ}$ =0,07
I = 25,0мм/год ***$r_{ср}$ = 1,5 мм***	***I = 50,0 мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,63 мм***	***I = 100,0мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,75 мм***	***I = 150,0мм/год*** ***$r_{ср}$ = 1,81 мм***
$S_{1КРП}$ =14,8 $S_{2КРП}$ =11,9 $S_{3КРП}$ =4,2 $S_{4КРП}$ =2,9 $m_{НО}$ =0,94 $m_{АУ}$ =0,06	$S_{1КРП}$ =15,2 $S_{2КРП}$ =12,4 $S_{3КРП}$ =4,9 $S_{4КРП}$ =3,0 $m_{НО}$ =0,95 $m_{АУ}$ =0,05	$S_{1КРП}$ =15,3 $S_{2КРП}$ =12,9 $S_{3КРП}$ =5,2 $S_{4КРП}$ =3,1 $m_{НО}$ =0,97 $m_{АУ}$ =0,03	$S_{1КРП}$ =16,0 $S_{2КРП}$ =13,1 $S_{3КРП}$ =6,0 $S_{4КРП}$ =3,2 $m_{НО}$ =0,96 $m_{АУ}$ =0,04

Таблиця 5.7

Результати розрахунку ступеня поляризації луна-сигналів навігаційного об'єкта $m_{НО}$ й атмосферного утворення $m_{АУ}$ за певних інтенсивностей *I* твердих випадних опадів (сніг, град), середнього радіусу $r_{ср}$ і виміряних параметрів Стокса під час опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею лінійної вертикальної поляризації (*ЛВП*) із діелектричною проникністю твердих частинок випадних опадів ε = 3

***I* = 0,5 мм / год** **$r_{ср}$ = 2,0 мм**	***I* = 1,5 мм / год** **$r_{ср}$ = 5,0 мм**	***I* = 2,0мм/ год** **$r_{ср}$ = 9,0 мм**
$S_{1ЛВП}$ =4,2 $S_{2ЛВП}$ =3,1 $S_{3ЛВП}$ =1,6 $S_{4ЛВП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,917 $m_{АУ}$ =0,008	$S_{1ЛВП}$ =4,9 $S_{2ЛВП}$ =3,6 $S_{3ЛВП}$ =1,8 $S_{4ЛВП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,875 $m_{АУ}$ =0,042	$S_{1ЛВП}$ =5,0 $S_{2ЛВП}$ =3,8 $S_{3ЛВП}$ =1,9 $S_{4ЛВП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,920 $m_{АО}$ =0,080

Таблица 5.8

Результати розрахунку ступеня поляризації луна-сигналів навігаційного об'єкта $m_{НО}$ й атмосферного утворення $m_{АУ}$ за певних інтенсивностей *I* твердих випадних опадів (сніг, град), середнього радіусу $r_{ср}$ і виміряних параметрів Стокса під час опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею лінійної горизонтальної поляризації (*ЛГП*) із діелектричною проникністю твердих частинок випадних опадів $\varepsilon = 3$

***I* = 0,5 мм /** **$r_{ср}$ = 2,0 мм**	***I* = 1,5 мм / ч** **$r_{ср}$ = 5,0 мм**	***I* = 2,0мм/ ч** **$r_{ср}$ = 9,0 мм**
$S_{1ЛГП}$=3,1 $S_{2ЛГП}$ =2,8 $S_{3ЛГП}$ =0,9 $S_{4ЛГП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,968 $m_{АУ}$ =0,069	$S_{1\ ЛГП}$ =3,5 $S_{2\ ЛГП}$ =2,9 $S_{3\ ЛГП}$ =1,1 $S_{4\ ЛГП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,943 $m_{АУ}$ =0,057	$S_{1\ ЛГП}$ =4,0 $S_{2ЛГП}$ =3,1 $S_{3\ ЛГП}$ =1,5 $S_{4\ ЛГП}$ =0,0 $m_{НО}$ =0,925 $m_{АУ}$ =0,075

Таблица 5.9

Результати розрахунку ступеня поляризації луна-сигналів навігаційного об'єкта $m_{НО}$ й атмосферного утворення $m_{АУ}$ за певних інтенсивностей I твердих випадних опадів (сніг, град), середнього радіусу $r_{ср}$ і виміряних параметрів Стокса під час опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею лінійної поляризації з нахилом електричного вектору 45° ($ЛП45^{o}$) з діелектричною проникністю твердих частинок випадних опадів $\varepsilon = 3$

I = 0,5 мм / год ***$r_{ср}$ = 2,0 мм***	***I = 1,5 мм / год*** ***$r_{ср}$ = 5,0 мм***	***I = 2,0мм/ год*** ***$r_{ср}$ = 9,0 мм***
$S_{1ЛП45^{o}} = 5,0$ $S_{2ЛП45^{o}} = 3,8$ $S_{3ЛП45^{o}} = 1,9$ $S_{4ЛП45^{o}} = 0,0$ $m_{НО} = 0,946$ $m_{АУ} = 0,054$	$S_{1ЛП45^{o}} = 5,3$ $S_{2ЛП45^{o}} = 3,9$ $S_{3ЛП45^{o}} = 2,1$ $S_{4ЛП45^{o}} = 0,0$ $m_{НО} = 0,915$ $m_{АУ} = 0,085$	$S_{1ЛП45^{o}} = 5,5$ $S_{2ЛП45^{o}} = 4,1$ $S_{3ЛП45^{o}} = 2,6$ $S_{4ЛП45^{o}} = 0,0$ $m_{НО} = 0,945$ $m_{АУ} = 0,055$

Таблиця 5.10

Результати розрахунку ступеня поляризації луна-сигналів навігаційного об'єкта $m_{НО}$ й атмосферного утворення $m_{АУ}$ за певних інтенсивностей I твердих випадних опадів (сніг, град), середнього радіусу $r_{ср}$ і виміряних параметрів Стокса під час опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею кругової поляризації (*КРП*) з діелектричною проникністю твердих частинок випадних опадів $\varepsilon = 3$

I = 0,5 мм / год ***$r_{ср}$ = 2,0 мм***	***I = 1,5 мм / год*** ***$r_{ср}$ = 5,0 мм***	***I = 2,0мм/ год*** ***$r_{ср}$ = 9,0 мм***
$S_{1КРП} = 5,1$ $S_{2КРП} = 3,8$ $S_{3КРП} = 1,9$ $S_{4КРП} = 1,2$ $m_{НО} = 0,931$ $m_{АУ} = 0,069$	$S_{1КРП} = 5,2$ $S_{2КРП} = 3,8$ $S_{3КРП} = 2,1$ $S_{4КРП} = 1,3$ $m_{НО} = 0,901$ $m_{АУ} = 0,064$	$S_{1КРП} = 6,0$ $S_{2КРП} = 4,1$ $S_{3КРП} = 2,4$ $S_{4КРП} = 1,6$ $m_{НО} = 0,917$ $m_{АУ} = 0,083$

У дощі концентрація крапель коливається від 1 до 103 на кубічний метр і розсіювання електромагнітної енергії некогерентне. Відбивна здатність дощів, незалежно від їхньої інтенсивності, на довжині хвилі $\lambda = 3{,}2$ см більша, ніж відбивна здатність на довжині хвилі $\lambda = 10$ см у 100 разів. Відбивна здатність снігопадів у 10 разів вища відбивної здатності дощів, однак через меншу водність та інтенсивність снігопадів порівняно зі зливовими дощами їхня відбивна здатність у 102-103 рази менша, однак відбивна здатність талих вод становить на 10-16 дБ більшу, ніж у дощу такої самої водності. У сухих снігопадах за $\lambda = 3{,}2$ см і $\lambda = 10$ см відбивна здатність значно менша, ніж відбивна здатність дощів тієї ж інтенсивності.

У градових опадах розсіювання електромагнітних хвиль також має некогерентний характер і збільшується зі збільшенням інтенсивності граду, що випадає, і розмірів частинок граду.

Інтенсивність опадів має часову залежність, що призводить до певних співвідношень між потужністю розсіювання електромагнітної хвилі, що опромінює радіолокаційний об'єм дощу або снігопаду, і потужністю поглинання зондувального об'єму під час радіолокаційного спостереження за навігаційним об'єктом, який перебуває в зоні випадних опадів. Тому луна-сигнал навігаційного об'єкта буде спільним з луна-сигналом атмосферного утворення, у цьому разі граду або снігопаду. Максимальна інтенсивність випадання граду з максимальним середнім радіусом частинок граду спостерігається одразу після початку його випадання і зменшується до 15-ї хвилини його випадання з різким зменшенням середнього радіуса градин. Ширина градової смуги досягає 15 км. Під час снігопаду, тривалістю кількох днів, середній радіус плоских частинок і зернистих кристалів коливається від часток 1мм до 20-25 мм.

Для розв'язання задачі виділення луна-сигналу навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні граду або снігопаду, із сумарного луна-сигналу частково поляризованої хвилі необхідно визначити параметри Стокса за певних інтенсивностей граду або снігопаду, що випадає. У загальному випадку встановлено, що випадають тверді опади з частинками крижаної фази з діелектричною

проникністю ε = 3. Параметри Стокса для опадів крижаної фази визначатимуться луна-сигналом, який під час граду і снігопадів залежить від розмірів і концентрації частинок у радіолокаційному об'ємі, крижаності градового осередку, а також від форми та орієнтації частинок граду і сніжинок.

За виміряними параметрами Стокса центрів крижаної фракції опадів, у яких перебуває навігаційний об'єкт, під час їхнього послідовного опромінення електромагнітними хвилями трьох лінійних поляризацій і однієї кругової поляризації з урахуванням розміру частинок та інтенсивності випадних опадів твердої фази, було розв'язано задачу поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, який перебуває в зоні випадних опадів твердої фази, за значеннями ступеня поляризації луни-сигналу навігаційного об'єкта й атмосферного утворення (складний об'єкт).

Процес поляризаційної селекції луна-сигналу навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні атмосферного утворення (опади рідкої та твердої фаз), заснований на відмінності ступеня поляризації луна-сигналу навігаційного об'єкта й атмосферного утворення і складається з двох етапів.

На першому етапі складний об'єкт радіолокаційного спостереження всеполяризаційною антеною з регульованою поляризацією СРПК послідовно опромінюють електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій - трьох лінійних і однієї кругової (рис. 5.4).

На другому етапі луна-сигнали складного об'єкта частково поляризованої електромагнітної хвилі приймаються всеполяризаційною антеною 9 і через поляризаційний роздільник 6, комутатор приймальних каналів 11, подаються на двоканальний лінійний приймач 13, 14 і надходять на пристрій 15 отримання поляризаційних параметрів Стокса. Параметри Стокса S_1, S_2, S_3, S_4 у пристрої 16 формують ступінь поляризації луна-сигналу навігаційного об'єкта і ступінь поляризації луна-сигналу атмосферного утворення, за значеннями яких на індикаторі 17 СРПК або на дисплеї комп'ютера 18 спостерігається луна-сигнал навігаційного об'єкта або луна-сигнал атмосферного утворення.

Отримані результати розглянутого додаткового завдання з використання ступеня поляризації під час розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних утворень, засвідчили можливість поділу луна-сигналу складного об'єкта частково поляризованої хвилі на луна-сигнал навігаційного об'єкта і луна-сигнал атмосферного утворення та подавання їх роздільно на індикатор і дисплей комп'ютера на шляху судна.

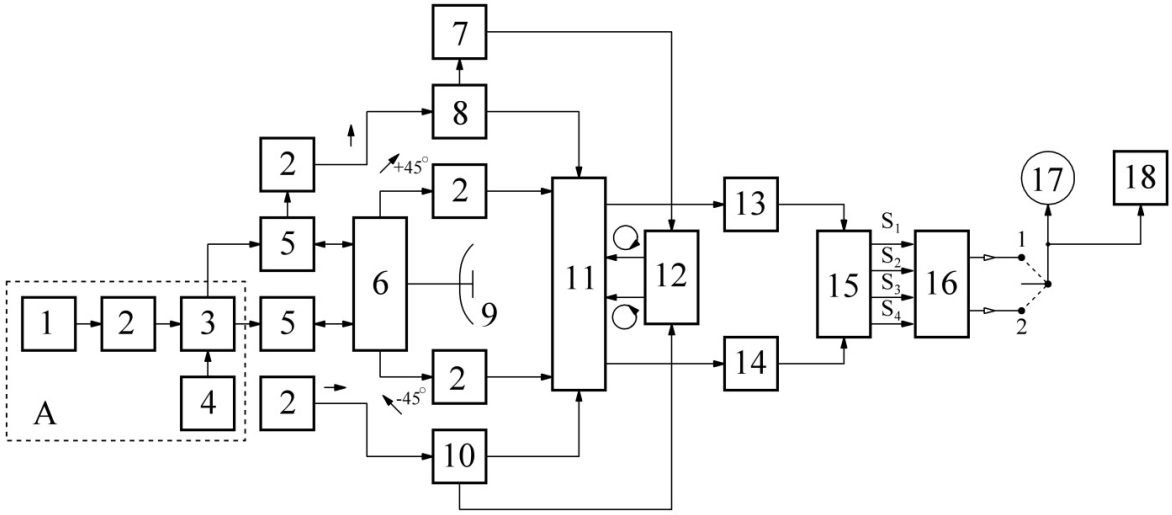


Рис. 5.4 - Функціональна схема пристрою поляризаційної селекції луна-сигналу навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення за значеннями ступеня поляризації електромагнітної хвилі:

А - пристрій формування електромагнітної хвилі певної поляризації на випромінювання.

1 - генератор НВЧ; 2 - циркулятори; 3,4 - пристрій формування електромагнітної хвилі певної поляризації на випромінювання; 5 - антенні перемикачі; 6 - поляризаційний роздільник; 7,8,10,12 - пристрої одержання електромагнітної хвилі кругової поляризації в режимі прийому; 9 - всеполяризована антена; 11 - комутатор приймальних каналів; 13, 14 - лінійні приймальні канали; 15 - пристрій отримання поляризаційних параметрів Стокса; 16 - пристрій отримання ступеня поляризації луна-сигналу навігаційного об'єкта й атмосферного утворення; 17,18 - індикатор і дисплей комп'ютера СРПК.

5.3.2 Розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що грунтується на статистичних властивостях поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі

Під час радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів на тлі атмосферних утворень, луна-сигнали, що надходять на вхід приймача СРПК, будуть являти собою відбиття від складного об'єкта. Вважаючи, що вектор Стокса складного об'єкта має в довільному базисі нормально розподілені компоненти, то для визначення властивостей луна-сигналу складного об'єкта, що надходить на вхід СРПК, використовують одновимірний закон розподілу параметрів Стокса навігаційного об'єкта й атмосферного утворення. Енергетичні параметри Стокса є квадратурними щодо напруженості поля частково поляризованої електромагнітної хвилі та однозначно визначають її поляризацію. Для повного визначення густини ймовірності параметрів Стокса луна-сигналу частково поляризованої електромагнітної хвилі, розсіяної складним об'єктом, необхідно обчислити їхні середні значення, дисперсії та середні квадратичні відхилення. Для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають на тлі атмосферних утворень, використано статистичні властивості параметрів Стокса луна-сигналів частково поляризованої електромагнітної хвилі складного об'єкта.

Для розв'язання поставленого завдання використовується апріорна інформація, що характеризує об'єкти радіолокаційного спостереження СРПК. До апріорної інформації віднесено кількість видів спостережуваних атмосферних утворень (опади різної інтенсивності), що створюють помилкові позначки на індикаторі СРПК, сукупність ознак, якими характеризуються спостережувані об'єкти, закони розподілу ймовірностей сукупності ознак. Сукупністю ознак, що характеризують розпізнавані об'єкти, є енергетичні поляризаційні параметри Стокса, що утворюють предиктор $\overline{S}$, складовими якого є самі параметри Стокса (S_1, S_2, S_3, S_4). Імовірнісними характеристиками предиктора $\overline{S}$ є закони розподілу параметрів Стокса навігаційного об'єкта й атмосферного утворення.

Луна-сигнали навігаційного об'єкта еквівалентні наявності поляризованої складової в луна-сигналі сумарної частково поляризованої хвилі складного об'єкта. Флуктуаційна складова луна-сигналу сумарної частково поляризованої хвилі складного об'єкта, зумовлена відбиттям від атмосферного утворення, за своїми статистичними властивостями відповідає луна-сигналу частково поляризованої хвилі, на яку поширюється дія центральної граничної теореми теорії ймовірностей. У разі знаходження навігаційного об'єкта в зоні атмосферного утворення (Рис.5.5.) відбиття електромагнітної хвилі, що опромінює одночасно два об'єкти (складний об'єкт), які мають різну електропровідність (метал і вода в рідкому або твердому стані), еквівалентне наявності поляризованої складової (навігаційний об'єкт) та флуктуючої складової (атмосферне утворення).

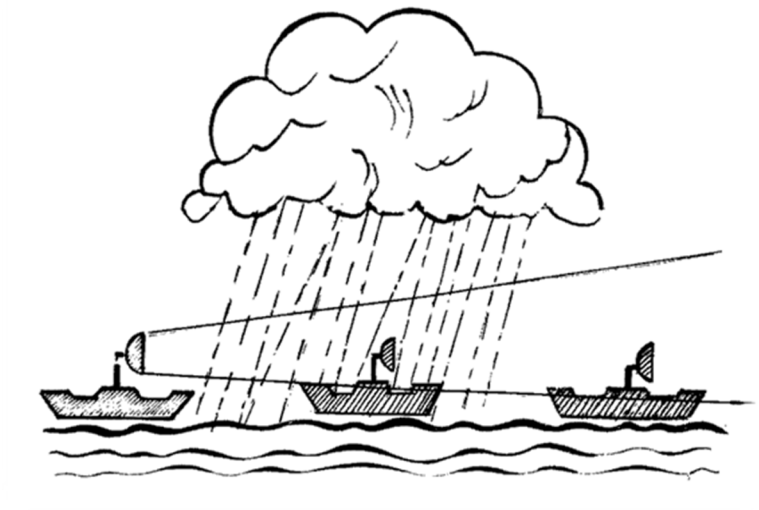


Рис.5.5. Радіолокаційне спостереження навігаційного об'єкта на тлі атмосферного утворення

Під час приймання луна-сигналу частково поляризованої електромагнітної хвилі одночасно від двох об'єктів (складного об'єкта) реєструють одночасно всі чотири параметри Стокса, за значеннями яких встановлюють їхні критеріальні значення. При цьому для навігаційного об'єкта здійснюється поляризаційна селекція його луна-сигналів на тлі луна-сигналів від атмосферного утворення.

Для розв'язання задачі поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційного об'єкта використовуються закони розподілу предикторів $W\left(\overline{S}/HO\right)$ навігаційного об'єкта і $W\left(\overline{S}/AУ\right)$ атмосферного утворення, які в теорії розпізнавання є функціями правдоподібності векторів ознак предикторів $\overline{S}$, складовими яких будуть параметри Стокса навігаційного об'єкта й атмосферного утворення [146]. Ці закони показують імовірність утворення предикторів $\overline{S}$ з даними значеннями параметрів Стокса за умови, що луна-сигнали створені навігаційним об'єктом і атмосферним утворенням. Оскільки ці закони розподілу предиктора $\overline{S}$ перетинаються, то розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта виконується з використанням правила максимуму правдоподібності, що визначається такою нерівністю:

$$\frac{W\left(S_n/HO\right)}{W\left(S_n/AУ\right)}\geq 1. \tag{5.110}$$

Вираз (5.110) для чотирьох параметрів Стокса луна-сигналу частково поляризованої хвилі в розгорнутому вигляді запишеться так:

$$\frac{W\left(S_1/HO\right)}{W\left(S_1/AУ\right)}\geq 1,\quad \frac{W\left(S_2/HO\right)}{W\left(S_2/AУ\right)}\geq 1,\quad \frac{W\left(S_3/HO\right)}{W\left(S_3/AУ\right)}\geq 1,\ \frac{W\left(S_4/HO\right)}{W\left(S_4/AУ\right)}\geq 1. \tag{5.111}$$

Оскільки розподіл відбивної здатності параметрів Стокса можна описати логарифмічно нормальними законами, тоді нерівності (5.111) подаються у вигляді:

$$\begin{aligned}
&\frac{W\left(S_1/HO\right)}{W\left(S_1/AУ\right)}=\frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{HO}}\cdot e^{-\frac{(S_1-m_{HO})^2}{2\sigma_{HO}^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{AУ}}\cdot e^{-\frac{(S_1-m_{AУ})^2}{2\sigma_{AУ}^2}}};\ \frac{W\left(S_2/HO\right)}{W\left(S_2/AУ\right)}=\frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{HO}}\cdot e^{-\frac{(S_2-m_{HO})^2}{2\sigma_{HO}^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{AУ}}\cdot e^{-\frac{(S_2-m_{AУ})^2}{2\sigma_{AУ}^2}}};\\
&\frac{W\left(S_3/HO\right)}{W\left(S_3/AУ\right)}=\frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{HO}}\cdot e^{-\frac{(S_3-m_{HO})^2}{2\sigma_{HO}^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{AУ}}\cdot e^{-\frac{(S_3-m_{AУ})^2}{2\sigma_{AУ}^2}}};\ \frac{W\left(S_4/HO\right)}{W\left(S_4/AУ\right)}=\frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{HO}}\cdot e^{-\frac{(S_4-m_{HO})^2}{2\sigma_{HO}^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{AУ}}\cdot e^{-\frac{(S_4-m_{AУ})^2}{2\sigma_{AУ}^2}}},
\end{aligned} \tag{5.112}$$

де S_1, S_2, S_3, S_4 - виміряні параметри Стокса складного об'єкта спостереження СРПК;

$\sigma_{НО}, \sigma_{АУ}$ - статистичний параметр - середнє квадратичне відхилення для генеральної сукупності ряду спостережень параметрів Стокса навігаційного об'єкта та атмосферного утворення відповідно;

$m_{НО}, m_{АУ}$ - статистичний параметр - математичні очікування параметрів Стокса луна-сигналів навігаційного об'єкта й атмосферного утворення відповідно;

$\sigma^2_{НО}, \sigma^2_{АУ}$ - статистичний параметр - дисперсії параметрів Стокса луна-сигналів навігаційного об'єкта й атмосферного утворення відповідно.

Перетворення правої частини рівнянь (5.112) відповідно до виразу для показової функції $e^{a+b} = e^a - e^b = \frac{e^a}{e^b}$ дає змогу отримати такі залежності для правої частини законів розподілу предиктора навігаційного об'єкта та атмосферного утворення. Перетворимо праву частину рівняння для першого параметра Стокса й отримаємо:

$$\frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{НО}} \cdot e^{-\frac{(S_1 - m_{НО})^2}{2\sigma^2_{НО}}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{АУ}} \cdot e^{-\frac{(S_1 - m_{АУ})^2}{2\sigma^2_{АУ}}}} = \frac{\sigma_{АУ} \cdot e^{-\frac{(S_1 - m_{НО})^2}{2\sigma^2_{НО}}}}{\sigma_{НО} \cdot e^{-\frac{(S_1 - m_{АУ})^2}{2\sigma^2_{АУ}}}} = \frac{\sigma_{АУ}}{\sigma_{НО}} \cdot e^{\frac{\left(\sigma^2_{НО} - \sigma^2_{АУ}\right)}{2\sigma^2_{НО}\sigma^2_{АУ}} S_1^2 + \frac{\left(\sigma^2_{АУ} m_{НО} - \sigma^2_{НО} m_{АУ}\right)}{\sigma^2_{НО}\sigma^2_{АУ}} S_1 + \frac{\left(\sigma^2_{НО} m^2_{АУ} - \sigma^2_{АУ} m^2_{НО}\right)}{2\sigma^2_{НО}\sigma^2_{АУ}}} \geq 1. \quad (5.113)$$

Аналогічно отримаємо для другого, третього і четвертого параметрів Стокса:

$$\frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{НО}} \cdot e^{-\frac{(S_2 - m_{НО})^2}{2\sigma^2_{НО}}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{АУ}} \cdot e^{-\frac{(S_2 - m_{АУ})^2}{2\sigma^2_{АУ}}}} = \frac{\sigma_{АУ} \cdot e^{-\frac{(S_2 - m_{НО})^2}{2\sigma^2_{НО}}}}{\sigma_{НО} \cdot e^{-\frac{(S_2 - m_{АУ})^2}{2\sigma^2_{АУ}}}} = \frac{\sigma_{АУ}}{\sigma_{НО}} \cdot e^{\frac{\left(\sigma^2_{НО} - \sigma^2_{АУ}\right)}{2\sigma^2_{НО}\sigma^2_{АУ}} S_1^2 + \frac{\left(\sigma^2_{АУ} m_{НО} - \sigma^2_{НО} m_{АУ}\right)}{\sigma^2_{НО}\sigma^2_{АУ}} S_1 + \frac{\left(\sigma^2_{НО} m^2_{АУ} - \sigma^2_{АУ} m^2_{НО}\right)}{2\sigma^2_{НО}\sigma^2_{АУ}}} \geq 1; \quad (5.114)$$

$$\frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{HO}}\cdot e^{-\frac{(S_3-m_{HO})^2}{2\sigma_{HO}^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{AУ}}\cdot e^{-\frac{(S_3-m_{AУ})^2}{2\sigma_{AУ}^2}}}=\frac{\sigma_{AУ}\cdot e^{-\frac{(S_3-m_{HO})^2}{2\sigma_{HO}^2}}}{\sigma_{HO}\cdot e^{-\frac{(S_3-m_{AУ})^2}{2\sigma_{AУ}^2}}}=\frac{\sigma_{AУ}}{\sigma_{HO}}\cdot e^{\frac{\left(\sigma_{HO}^2-\sigma_{AУ}^2\right)}{2\sigma_{HO}^2\sigma_{AУ}^2}S_1^2+\frac{\left(\sigma_{AУ}^2m_{HO}-\sigma_{HO}^2m_{AУ}\right)}{\sigma_{HO}^2\sigma_{AУ}^2}S_1+\frac{\left(\sigma_{HO}^2m_{AУ}^2-\sigma_{AУ}^2m_{HO}^2\right)}{2\sigma_{HO}^2\sigma_{AУ}^2}}\geq 1; \quad (5.115)$$

$$\frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{HO}}\cdot e^{-\frac{(S_4-m_{HO})^2}{2\sigma_{HO}^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{AУ}}\cdot e^{-\frac{(S_4-m_{AУ})^2}{2\sigma_{AУ}^2}}}=\frac{\sigma_{AУ}\cdot e^{-\frac{(S_4-m_{HO})^2}{2\sigma_{HO}^2}}}{\sigma_{HO}\cdot e^{-\frac{(S_4-m_{AУ})^2}{2\sigma_{AУ}^2}}}=\frac{\sigma_{AУ}}{\sigma_{HO}}\cdot e^{\frac{\left(\sigma_{HO}^2-\sigma_{AУ}^2\right)}{2\sigma_{HO}^2\sigma_{AУ}^2}S_1^2+\frac{\left(\sigma_{AУ}^2m_{HO}-\sigma_{HO}^2m_{AУ}\right)}{\sigma_{HO}^2\sigma_{AУ}^2}S_1+\frac{\left(\sigma_{HO}^2m_{AУ}^2-\sigma_{AУ}^2m_{HO}^2\right)}{2\sigma_{HO}^2\sigma_{AУ}^2}}\geq 1; \quad (5.116)$$

Уведемо позначення статистичним параметрам ступеня e в рівняннях (5.113) - (5.116) через коефіцієнти l_1 , l_2 , l_3 тобто:

$$l_1=\frac{\left(\sigma_{HO}^2-\sigma_{AУ}^2\right)}{2\sigma_{HO}^2\sigma_{AУ}^2}; \quad l_2=\frac{\left(\sigma_{AУ}^2m_{HO}-\sigma_{HO}^2m_{AУ}\right)}{\sigma_{HO}^2\sigma_{AУ}^2}; \quad l_3=\frac{\left(\sigma_{HO}^2m_{AУ}^2-\sigma_{AУ}^2m_{HO}^2\right)}{2\sigma_{HO}^2\sigma_{AУ}^2}, \quad (5.117)$$

тоді нерівності (5.113) - (5.116) запишуться через коефіцієнти l_1 , l_2 , l_3 у вигляді:

$$\frac{\sigma_{AУ}}{\sigma_{HO}}\cdot e^{l_1S_1^2+l_2S_1+l_3}\geq 1\ ; \quad (5.118)$$

$$\frac{\sigma_{AУ}}{\sigma_{HO}}\cdot e^{l_1S_2^2+l_2S_2+l_3}\geq 1; \quad (5.119)$$

$$\frac{\sigma_{AУ}}{\sigma_{HO}}\cdot e^{l_1S_3^2+l_2S_3+l_3}\geq 1; \quad (5.120)$$

$$\frac{\sigma_{AУ}}{\sigma_{HO}}\cdot e^{l_1S_4^2+l_2S_4+l_3}\geq 1\ . \quad (5.121)$$

Провівши логарифмування за основою *e*, нерівності (5.118) - (5.121) запишуться таким чином:

$$l_1 S_1^2 + l_2 S_1 + l_3 \geq ln\frac{\sigma_{НО}}{\sigma_{АУ}}\ ; \tag{5.122}$$

$$l_1 S_2^2 + l_2 S_2 + l_3 \geq ln\frac{\sigma_{НО}}{\sigma_{АУ}}\ ; \tag{5.123}$$

$$l_1 S_1^2 + l_2 S_1 + l_3 \geq ln\frac{\sigma_{НО}}{\sigma_{АУ}}\ ; \tag{5.124}$$

$$l_1 S_4^2 + l_2 S_4 + l_3 \geq ln\frac{\sigma_{НО}}{\sigma_{АУ}}\ . \tag{5.125}$$

Рішення отриманих нерівностей (5.122) – (5.125) відносно параметрів Стокса S_1, S_2, S_3, S_4 луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта дає змогу отримати їхні критеріальні значення $S_{1кр}, S_{2кр}, S_{3кр}, S_{4кр}$. Тоді за всіх виміряних СРПК параметрів Стокса $S_{1вим}, S_{2вим}, S_{3вим}, S_{4вим}$ їхні значення будуть більшими або дорівнюватимуть їхнім критеріальним значенням, тобто

$$S_{1вим} \geq S_{1кр}, S_{2вим} \geq S_{2кр}, S_{3вим} \geq S_{3кр}, S_{4вим} \geq S_{4кр}$$

і нерівності (5.122) - (5.125) будуть справедливими. Оператор СРПК ухвалює рішення про наявність на індикаторі або дисплеї суднового комп'ютера луна-сигналу тільки навігаційного об'єкта, що перебуває на даній відстані від СРПК.

Якщо умови наведених нерівностей не виконуються, то приймається рішення про наявність на індикаторі СРПК або дисплеї суднового комп'ютера луна-сигналу атмосферного утворення, тобто

$$S_{1вим} < S_{1кр},\ S_{2вим} < S_{2кр},\ S_{3вим} < S_{3кр},\ S_{4вим} < S_{4кр}.$$

Підставою для використання основних понять математичної статистики й теорії ймовірності є випадкові величини луна-сигналів параметрів Стокса в процесі радіолокаційного спостереження СРПК навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних утворень. Використання алгоритму максимуму правдоподібності під час розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів дає змогу зараховувати луна-сигнал до того об'єкта, для якого функція правдоподібності більша.

Поляризаційна селекція навігаційних об'єктів із застосуванням правила максимуму правдоподібності використовує менший обсяг апріорної радіолокаційної інформації і тому застосування цього правила є практично обґрунтованим. Під час дослідження величин параметрів Стокса луна-сигналів для навігаційного об'єкта й атмосферного утворення розподіли їхньої густини ймовірності близькі до нормального, а сукупність випадкових величин параметрів Стокса луна-сигналів навігаційного об'єкта й атмосферного утворення розглядається як випадковий процес складного об'єкта. Значення параметрів Стокса навігаційного об'єкта й атмосферного утворення в дискретних точках простору та часу отримано за певний період часу за результатами радіолокаційного вимірювання СРПК на території Запорізької області з урахуванням інтенсивності випадних опадів і з урахуванням радіолокаційної інформації, отриманої паралельно з метеорадіолокатором МРЛ-5. За отриманими радіолокаційними вимірюваннями СРПК луна-сигналів першого параметра Стокса навігаційного об'єкта й атмосферного утворення для певної інтенсивності випадних опадів (у цьому разі I = 12 мм/год), проведено статистичне опрацювання результатів вимірювання першого параметра Стокса $S_{1НО}$ и $S_{1АУ}$, які представлені в табл.5.11 і табл. 5.12 відповідно.

Статистичне опрацювання результатів радіолокаційних спостережень навігаційного об'єкта й атмосферного утворення проведено з використанням відомих статистичних методів [218-224]. У табл. 5.11 і табл. 5.12. для кожної градації параметрів Стокса $S_{1НО}$ и $S_{1АУ}$ вказана частота f (число випадків).

Таблиця 5.11

Результати радіолокаційних спостережень СРПК луна-сигналу навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні атмосферного утворення і параметри їх статистичної обробки

Ґрадації $S_{1НО}$	f	$P=\frac{f}{N}$	S_c	d	fd	d^2	fd^2
0,00 – 0,49	4	0,040	0,245	- 0,40	- 1,60	0,16	0,64
0,50 – 0,99	9	0,091	0,745	- 0,30	- 2,70	0,09	0,81
1,00 – 1,49	10	0,101	1,245	- 0,20	- 2,00	0,04	0,40
1,50 – 1,99	15	0,152	1,745	- 0,10	- 1,50	0,01	0,15
2,00 – 2,49	21	0,212	2,245	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50 – 2,99	13	0,131	2,745	0,10	1,30	0,01	0,13
3,00 – 4,49	10	0,101	3,245	0,20	2,00	0,04	0,40
3,50 – 3,99	9	0,091	3,745	0,30	2,70	0,09	0,81
4,00 – 4,49	5	0,051	4,245	0,40	2,00	0,16	0,80
4,50 – 4,99	3	0,030	4,745	0,50	1,50	0,25	0,75
$\sum f=N$	**99**	**1,000**			**∑ 1,70**		**∑ 4,90**

Таблица 5.12

Результати радіолокаційних спостережень СРПК луна-сигналу атмосферного утворення і параметри їх статистичної обробки

Градації $S_{1АУ}$	f	$P=\frac{f}{N}$	$\overline{S}_1$	d	fd	d^2	fd^2
0,00 – 0,49	3	0,033	0,245	- 0,30	- 0,90	0,09	0,27
0,50 – 0,99	2	0,022	0,745	- 0,20	- 0,40	0,04	0,08
1,00 – 1,49	19	0,209	1,245	- 0,10	- 1,90	0,01	0,19
1,50 – 1,99	35	0,385	1,745	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00 – 2,49	20	0,220	2,245	0,10	2,00	0,01	0,20
2,50 – 2,99	6	0,066	2,745	0,20	1,20	0,04	0,24
3,00 – 4,49	4	0,044	3,245	0,30	1,20	0,09	0,36
3,50 – 3,99	2	0,023	3,745	0,40	0,80	0,16	0,32
$\sum f=N$	**91**	**1,000**			**∑ 2,00**		**∑ 1,66**

Сума частот $\sum f$ всіх градацій параметрів Стокса дорівнює загальному числу спостережень N. Відношення $P=\frac{f}{N}$ є ймовірністю появи даної градації.

Середнє значення S_1 для кожної градації обчислено за наступною формулою:

$$\overline{S}_1 = A + i\frac{\sum fd}{N} \quad , \tag{5.126}$$

де A – середина градації з найбільшою кількістю даних S_1, тобто для навігаційного об'єкта А = 2,245, а для атмосферного утворення А = 1,745;

i – розмір градації (для нашого випадку i = 5);

$d = \frac{S_c - A}{i}$ - число додатне або від'ємне, що вказує, якою за рахунком є дана градація.

Математичне очікування для навігаційного об'єкта й атмосферного утворення визначається з використанням такої залежності:

$$\overline{S}_{1HO(AУ)} = m_{S_{iHO(AУ)}} = A + i\frac{\sum fd}{N} \quad . \tag{5.127}$$

Середнє квадратичне відхилення визначає ступінь мінливості випадкового першого параметра Стокса для навігаційного об'єкта й атмосферного утворення, що визначається за формулою:

$$\sigma = i \cdot \sqrt{\frac{\sum fd^2}{N} - \left(\frac{\sum fd}{N}\right)^2} \, . \tag{5.128}$$

Дисперсія, як квадрат середнього квадратичного відхилення, визначається за такою формулою:

$$\sigma^2 = \sigma^2 \frac{N}{N-1} \tag{5.129}$$

За результатами табл.5.11 і 5.12 та наведеними формулами було обчислено відповідні статистичні характеристики, тобто:

$$m_{S_{1HO}} = 3,1\,; \quad \sigma_{S_{1HO}} = 1,1\,; \quad \sigma^2_{S_{1HO}} = 1,21\,.$$

$$m_{S_{1AУ}} = 1,85\,; \quad \sigma_{S_{1AУ}} = 0,66\,; \quad \sigma^2_{S_{1AУ}} = 0,44\,.$$

Використовуючи статистичні параметри луна-сигналів навігаційного об'єкта й атмосферного утворення, було обчислено коефіцієнти l_1 , l_2 , l_3 за формулою (5.117), які мають такі значення: l_1 = 0,72; l_2 = - 0,88; l_3 = -0,04. Після їх підстановки в нерівність (5.122) отримаємо:

$$0,72S_1^2 - 0,88S_1 - 0,55 > 0\,. \qquad (5.130)$$

Розв'язуючи нерівність (5.130), отримуємо два критеріальні значення першого параметра Стокса $S_{1кр(1)} > 1,68$ і $S_{1кр(2)} < -0,46$. Критеріальне значення першого параметра Стокса $S_{1кр(2)} < -0,46$ відкидається за фізичним змістом, оскільки ймовірність його появи для радіолокаційного виявлення навігаційного об'єкта СРПК дорівнює нулю, згідно з радіолокаційними спостереженнями складного об'єкта. Тому значення першого параметра Стокса $S_{1кр(1)} = 1,68$ задовольнятиме розв'язанню задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, який знаходиться в зоні атмосферного утворення (випадні опади певної інтенсивності) і при радіолокаційних вимірюваннях луна-сигналів першого параметра Стокса буде відповідати отриманій умові $S_{1кр(1)} \geq 1,68$, тобто вирішене завдання поляризаційної селекції навігаційного об'єкта. який знаходиться у зоні атмосферного утворення (випадні опади інтенсивністю 12 мм/год). При цьому на індикаторі СРПК або на дисплеї комп'ютера буде присутній луна-сигнал тільки навігаційного об'єкта.

Поляризаційна селекція навігаційних об'єктів із застосуванням правила максимуму правдоподібності (5.110) використовує менший обсяг апріорної радіолокаційної інформації і тому застосування цього правила є практично обґрунтованим. Для перевірки виконання умови (5.110) розв'яжемо рівняння (5.112) з використанням отриманих статистичних параметрів.

Для навігаційного об'єкта: $m_{S_{1НО}} = 3,1$; $\sigma_{S_{1НО}} = 1,1$; $\sigma^2_{S_{1НО}} = 1,21$; $S_{1НО} = 2,2$.

$$W\left(S_1 / НО\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{НО}} \cdot e^{-\frac{(S_1 - m_{НО})^2}{2\sigma^2_{НО}}} = \frac{1}{2,5 \cdot 1,1} \cdot e^{-\frac{(2,2-3,1)^2}{2 \cdot 1,2}} = 0,36 \cdot 2,6 = 0,95\,.$$

Для атмосферного утворення: $m_{S_{1АУ}} = 1,85$; $\sigma_{S_{1АУ}} = 0,66$; $\sigma^2_{S_{1АУ}} = 0,44$; $S_{1АУ} = 1,75$.

$$W\left(S_1 / AУ\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{AУ}} \cdot e^{-\frac{\left(S_1 - m_{AУ}\right)^2}{2\sigma_{AУ}^2}} = \frac{1}{2,5 \cdot 0,66} \cdot e^{-\frac{(1,75-1,85)^2}{2 \cdot 0,44}} = 0,61 \cdot 1,1 = 0,67 .$$

Використовуючи отримані результати визначимо виконання правила максимуму правдоподібності (5.110):

$$\frac{W\left(S_1 / HO\right)}{W\left(S_1 / AУ\right)} = \frac{0,95}{0,67} = 1,48 .$$

У результаті розв'язання рівняння (5.112) за використання, як предиктора, першого параметра Стокса, правило максимуму правдоподібності (5.110) виконується.

Ефективність функціонування СРПК визначається ефективністю поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні атмосферного утворення на шляху судна, та оцінюється ймовірністю виконання нерівності $S_{івим} \geq S_{ікр}$ за умови, що луна-сигнал створено навігаційним об'єктом.

Імовірність поляризаційної селекції навігаційного об'єкта $P_{\text{пс}HO}$ визначається такою залежністю:

$$P_{nc(HO)} = \int_{S_{1ікр}}^{\infty} W(S_{1i} / HO) dS_{1i} . \qquad (5.131)$$

Імовірність поляризаційної селекції атмосферного утворення $P_{\text{пс}AУ}$ дорівнюватиме ймовірності виконання нерівності $S_{1i} < S_{1ікр}$ при умові, що луна-сигнал створений атмосферним утворенням и визначається такою залежністю:

$$P_{nc(AУ)} = \int_{-\infty}^{S_{1ікр}} W(S_{1i} / AУ) dS_{1i} . \qquad (5.132)$$

Імовірність прийняти луна-сигнал навігаційного об'єкта за луна-сигнал атмосферного утворення $P_{HO,AУ}$ та луна-сигнал атмосферного утворення за луна-сигнал навігаційного об'єкта $P_{AУ,HO}$, визначаються з умов:

$$P_{НО,АУ} = \int_{-\infty}^{S_{1ікр}} W(S_{1i} / НО) dS_{1i};$$
$$P_{АУ,НО} = \int_{S_{1ікр}}^{\infty} W(S_{1i} / АУ) dS_{1i}, \quad (5.133)$$

чим менші ці помилки, тим ефективніша поляризаційна селекція навігаційних об'єктів.

5.4 Висновки за розділом 5

1 Розроблено методологію поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах атмосферних перешкод, з використанням енергетичної матриці розсіювання складного об'єкта, яка складається з енергетичної матриці розсіювання навігаційного об'єкта та енергетичної матриці розсіювання атмосферного утворення, що дає змогу розв'язати задачу поляризаційної селекції навігаційного об'єкта шляхом віднімання з луна-сигналу складного об'єкта луна-сигналу атмосферного утворення.

2 Синтез алгоритму розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні небезпечного атмосферного утворення, здійснюється розробленим пристроєм, що входить до складу СРПК.

3 Розроблено методологію поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах атмосферних перешкод, з використанням матриці когерентності частково поляризованої хвилі, яка складається з матриці когерентності стабільної складової та матриці когерентності флуктуючої складової луна-сигналів складного об'єкта, а також відповідні процедури, які забезпечують формування набору, опромінювальних складний об'єкт електромагнітних хвиль з потрібними векторами Стокса та оцінювання елементів матриці когерентності луна-сигналу частково поляризованої хвилі синтезовано в розробленому пристрої, що входить до

СРПК і реалізує поляризаційну селекцію луна-сигналів навігаційних об'єктів за траєкторією руху судна.

4 Розроблено методологію поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають в умовах атмосферних перешкод з використанням ступеня поляризації луна-сигналів частково поляризованої хвилі, яка ґрунтується на представленні повністю неполяризованої компоненти луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта як суми двох незалежних повністю поляризованих потоків, що є ступенями поляризації луна-сигналів навігаційного об'єкта й луна-сигналів атмосферного утворення, яку реалізовано в розробленому пристрої, що входить до складу СРПК.

5 Розроблено методологію поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища, яка базується на використанні статистичних поляризаційних дійсних параметрів Стокса луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта радіолокаційного спостереження СРПК, імовірнісними характеристиками яких є їхні закони розподілу, що дають змогу визначити критеріальні значення луна-сигналів навігаційного об'єкта й атмосферного утворення як об'єктів радіолокаційного розпізнавання СРПК.

РОЗДІЛ 6

МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СРПК З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ СЕЛЕКЦІЇ НАВІГАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ, ЩО ПЕРЕБУВАЮТЬ У ЗОНІ НЕБЕЗПЕЧНИХ АТМОСФЕРНИХ УТВОРЕНЬ

6.1 Енергетична структура розсіяного об'єктами електромагнітного поля, що використовується в СРПК під час поляризаційної селекції навігаційних об'єктів

В енергетичну структуру електромагнітного поля, використовуваного в СРПК, входять поляризаційні характеристики електромагнітного поля, що опромінює об'єкти, і характеристики розсіяного об'єктами електромагнітного поля за однопозиційного режиму радіолокаційного спостереження [134, 150].

Енергетична структура відбитого об'єктами радіолокаційного спостереження СРПК електромагнітного поля, що приймається всеполяризованою антеною, в узагальненому вигляді записується через енергетичні параметри Стокса S_1, S_2 , S_3 , S_4 у вигляді:

$$\begin{bmatrix} S_{1від} \\ S_{2від} \\ S_{3від} \\ S_{4від} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{1вип} \\ S_{2вип} \\ S_{3вип} \\ S_{4вип} \end{bmatrix}, \tag{6.1}$$

де $S_{1від}$, $S_{2від}$, $S_{3від}$, $S_{4від}$ - параметри Стокса електромагнітної хвилі, відбитої об'єктами радіолокаційного спостереження СРПК;

$S_{1вип}$, $S_{2вип}$, $S_{3вип}$, $S_{4вип}$ - параметри Стокса електромагнітної хвилі, що опромінює об'єкти радіолокаційного спостереження СРПК;

S_{mn} - оператори розсіювання, аналогічні матриці розсіювання Мюллера, записані у двокомпонентних позначеннях.

Для розглянутого розсіювача залежність від часу елементів матриці S_{mn} жорстка, що відповідає постійному матричному імпульсному відгуку:

$$\begin{bmatrix} S_{1від}(t) \\ S_{2від}(t) \\ S_{3від}(t) \\ S_{4від}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & S_{13}(t) & S_{14}(t) \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & S_{23}(t) & S_{24}(t) \\ S_{31}(t) & S_{32}(t) & S_{33}(t) & S_{34}(t) \\ S_{41}(t) & S_{42}(t) & S_{43}(t) & S_{44}(t) \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} S_{1вип}(t) \\ S_{2вип}(t) \\ S_{3вип}(t) \\ S_{4вип}(t) \end{bmatrix} . \qquad (6.2)$$

Стосовно задачі радіолокаційного спостереження навігаційного об'єкта, за різних умов атмосферного середовища, виокремлено дві частини поля - випромінюване антеною СРПК $S_{вип}\ (r,\ t)$, що опромінює об'єкти радіолокаційного спостереження, та розсіяне $S_{від}\ (r,\ t)$, що приймається антеною СРПК (тут r - радіус-вектор точки спостереження поля, t - поточний час, S - параметри Стоксу хвиль, які випромінюються та приймаються.

Опромінюване об'єкт і відбите ним поле формується на досить великій відстані від об'єкта (розсіювача). Ці дві частини і формують у своїй сукупності повне поле , яке записується таким чином:

$$S_{\Sigma}(r,t) = S_{вип}(r,\ t) + S_{від}(r,\ t) . \qquad (6.3)$$

Як випливає з (6.3), випромінюване поле є тією частиною повного поля, яка реєструвалася б у просторі за відсутності об'єкта радіолокаційного спостереження СРПК. Тому процедура радіолокаційного виділення з прийнятого всеполяризованою антеною СРПК сумарного поля тієї його частини, яка відповідає відбитому полю, і полягає у відніманні поля опромінюваного об'єкта від сумарного поля, спостережуваного СРПК. Оскільки поляризаційний стан електромагнітної хвилі певної поляризації, яку випромінює антена СРПК, відомий, відома і потужність (інтенсивність), то для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферного утворення, потужність поля, яке випромінюють, приймають рівною одиниці, і використовують тільки його поляризаційний стан. Відбита хвиля в (6.3) розглядається, як реакція на появу

відбивача (об'єкта) в полі опромінювальної хвилі, має своїм джерелом струми і заряди поляризації в об'ємі атмосферного утворення або на поверхні навігаційного об'єкта, наведені полем опромінювальної хвилі.

Поляризаційний стан аналізованої хвилі визначається сукупністю дійсних енергетичних параметрів Стокса, що об'єднані у вектор Стокса $S_e(t)$. Перший параметр Стокса $S_1(t)$ дорівнює повній щільності енергії хвилі. Другий параметр Стокса $S_2(t)$ дорівнює різниці енергій у горизонтально-вертикально поляризованих компонентах. Третій параметр Стокса $S_3(t)$ дорівнює різниці енергій лінійно поляризованих компонент під кутами $\beta_1 = 45^o$ і $\beta_2 = 135^o$. Четвертий параметр Стокса $S_4(t)$ дорівнює різниці поляризованих по правому і лівому колу складових електромагнітної хвилі ($\alpha = \pm 45^o$).

Під час знаходження навігаційного об'єкта в зоні атмосферного утворення відбита хвиля від складного об'єкта буде частково поляризована, і для такої хвилі може бути застосовано теорему Стокса, на підставі якої таку хвилю можна розглядати як суму повністю поляризованої і неполяризованої хвилі, яка від неї не залежить. Параметри Стокса дають змогу здійснити розкладання частково поляризованої хвилі на суму двох хвиль: повністю поляризовану і незалежну від неї неполяризовану. Подання цих трьох хвиль параметрами Стокса записується у вигляді:

- співвідношення для частково поляризованої хвилі

$$S_1^2 > S_2^2 + S_3^2 + S_4^2; \tag{6.4}$$

- співвідношення для повністю поляризованої хвилі

$$S_1^2 = S_2^2 + S_3^2 + S_4^2; \tag{6.5}$$

- співвідношення для неполяризованої хвилі записуються двома незалежними складовими:

$$\left.\begin{array}{l} \sqrt{\left(S_2^2 + S_3^2 + S_4^2\right)}, S_2, S_3, S_4 \\ S_1 - \sqrt{\left(S_2^2 + S_3^2 + S_4^2\right)}, 0, 0, 0 \end{array}\right\}. \tag{6.6}$$

У неполяризованій хвилі (6.6) перша складова характеризує повністю поляризовану, а друга складова характеризує повністю неполяризовану хвилю.

Повна інтенсивність хвилі визначається першим параметром Стокса S_1, інтенсивність неполяризованої (*Н*) складової визначається виразом:

$$S_H = S_1 - \sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2} \ . \tag{6.7}$$

Інтенсивність повністю поляризованої (*П*) складової визначається залежністю:

$$S_П = S_1 - S_H = \sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2} \ . \tag{6.8}$$

Неполяризована складова частково поляризованої хвилі з вектором Стокса розкладається на суму двох незалежних потоків S^1 і S^2, параметри Стокса яких задовольняють таким умовам:

$$S_2^1 + S_2^2 = 0\,; \quad S_3^1 + S_3^2 = 0\,; \quad S_4^1 + S_4^2 = 0 \ . \tag{6.9}$$

З урахуванням (6.9) частково поляризована хвиля (*ЧПХ*) представляється сумою трьох повністю поляризованих хвиль (*ППХ*). Енергетичні характеристики *ЧПХ* представляються також матрицею когерентності, пов'язаною лінійною залежністю з параметрами Стокса. Характеристика *ЧПХ* під назвою ступінь поляризації, представлена параметрами Стокса, також використовується для поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферного утворення. Також використовуються енергетична матриця розсіювання і статистичні характеристики луна-сигналів *ЧПХ* складного об'єкта радіолокаційного спостереження СРПК.

6.2 Оцінювання похибки СРПК

У високочастотних елементах антенно-хвильоводної системи СРПК через недотримання технології їхнього виготовлення може виникати крос-поляризаційна компонента, ортогональна основній компоненті під час повороту вектору електричного поля при відбитті від дзеркала антени. Крос-поляризаційна компонента призведе до появи в діаграмі спрямованості антени компонент крос-поляризації. Оскільки ми використовуємо на випромінювання і приймання електромагнітні хвилі

певних поляризацій, то для аналізу поляризаційних похибок випроміненої хвилі може бути використана функціональна схема пристрою, яка наведена на рис. 6.1, а на приймання використовуємо статистичний метод А. Б. Шуп'яцького.

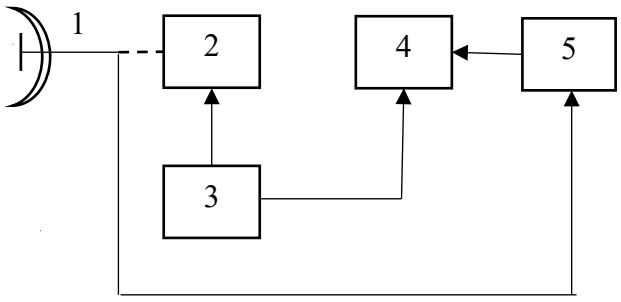


Рис.6.1. Функціональна схема пристрою, що дає змогу характеризувати наявність похибки на виході всеполяризованої антени СРПК під час випромінювання

1 - антена, що приймає електромагнітну хвилю певної поляризації;

2 – електродвигун, який обертає випромінювач приймальної антени з частотою 24 оберти на хвилину;

3 - генератор опорної синусоїдальної напруги;

4 - електронно-променевий індикатор;

5 - приймальний пристрій.

Для наочного представлення відхилення поляризації випромінюваної хвилі під час випромінювання антеною СРПК електромагнітних хвиль кожної з чотирьох поляризацій - лінійної вертикальної, лінійної горизонтальної, лінійної з кутом нахилу вектору хвилі 45^{o} і кругової, послідовність високочастотних імпульсів випромінюваної електромагнітної хвилі певної поляризації, що приймається лінійною антеною пристрою 1 (рис.6.1), модулюється частотою обертання антени 1 електродвигуном 2, а на екран індикатора 4 з амплітудною відміткою виводиться обвідна хвиля, що має різний характер для кожної поляризації випромінюваної хвилі.

Під час роботи цього пристрою генератор опорної синусоїдальної напруги 3 формує синусоїдальну напругу частотою 24 Гц, яка з одного боку є живильною для

електродвигуна обертання 2 лінійно поляризованої приймальної антени 1, з іншого боку - напругою горизонтальної лінійної розгортки електронно-променевого індикатора 4. Лінійно поляризована приймальна антена являє собою параболічне дзеркало діаметром 40 см, у фокусі якого встановлений дипольний опромінювач, що обертається навколо осі діаграми спрямованості антени з частотою 24 Гц, що призводить до модуляції прийнятої послідовності високочастотних імпульсів частотою обертання антени. Промодульована послідовність високочастотних імпульсів надходить на вхід приймального пристрою 5 і після відповідного посилення та перетворення, послідовність імпульсів постійного струму подається на електронно-променевий індикатор 4, на екрані якого утворюються осцилограми, що відповідають певній поляризації випроміненої хвилі всеполяризованою антеною СРПК (рис. 6.2).

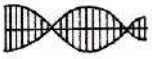
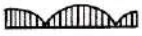
№ п/п	Вигляд поляризації випромін. Хвилі	Вигляд модуляції приймаємого ВЧ-сигналу	Вигляд Модуляції ВЧ-сигналу після детектору	Вигляд епюри на екрані осцилографа або ЕПТ
		а	б	в
1				
2				
3				
4				

Рис.6.2. Види осцилограм прийнятого сигналу, що відповідає чотирьом поляризаціям випромінюваної хвилі всеполяризованою антеною СРПК

Для кожної поляризації електромагнітної хвилі, випромінюваної антеною СРПК і прийнятої антеною 1 (рис.6.1) подано осцилограми модуляції високочастотного сигналу, а також їхні осцилограми на екрані електронно-променевої трубки або на екрані осцилографа в певному масштабі. Відхилення поляризаційних фігур від горизонтальної осі на екрані осцилографа або індикатора,

визначає поляризаційну похибку випромінюваної антеною СРПК при випромінюванні електромагнітної хвилі кожної з чотирьох поляризацій. Проведений аналіз похибок показав, що їх значення не перевищують десятих часток відсотка, з урахуванням похибок вимірювального засобу.

Для оцінки похибок відбитої від об'єктів електромагнітної хвилі використано дійсні енергетичні параметри Стокса. Залежно від вибору оптимальної кількості відбитих імпульсів проводиться їхнє осереднення з вимірюванням параметрів Стокса і різниці фаз між ортогональними компонентами луна-сигналу. Оцінювання похибки проведено для приймання луна-сигналу від навігаційного об'єкта й атмосферного утворення (складний об’єкт). Оцінювання похибки вимірювання луна-сигналів від атмосферного утворення (випадні зливові опади 12мм/год), представлених дійсним енергетичним першим параметром Стокса S_1, проведено з реєстрацією самого параметра Стокса, а також з реєстрацією різниці фаз між ортогональними компонентами його луна-сигналу. Луна-сигнали першого параметра Стокса атмосферного утворення, під час оцінювання похибок його вимірювання з використанням відомого статистичного методу А. Б. Шуп’яцького, пов'язані з флуктуацією їх миттєвої потужності залежно від вибору оптимальної кількості відбитих імпульсів усереднення. Для атмосферного утворення було проведено 30 вимірювань першого параметра Стокса. За результатами одного вимірювання зроблено десять вибірок обсягом $N = 256$ імпульсів. Потім із кожної вибірки зроблено вибірки меншого об'єму з $N = 128$, $N = 64$, $N = 23$, $N = 16$ і $N = 8$ імпульсів. У підсумку за одним виміром було отримано десять пакетів, вкладених один в один вибірок різних обсягів. Усього отримано 290 пакетів вибірок для першого параметра Стокса. Результати проведених розрахунків показали, що на рівні значущості $\alpha = 0{,}05$ можна прийняти статистичну гіпотезу про рівність дисперсій для миттєвих значень першого параметра Стокса луна-сигналів атмосферного утворення, спостережуваного СРПК на шляху судна. З урахуванням характеру флуктуації луна-сигналів першого параметра Стокса можна визначити середнє значення $\overline{\Pi}$, дисперсію σ^2 і середньоквадратичне відхилення σ даного параметра:

$$\overline{\Pi} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \Pi_i \; ; \tag{6.10}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1}\sum \left(\Pi_i - \overline{\Pi}\right)^2 ; \tag{6.11}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \; . \tag{6.12}$$

Похибка вимірювання осередненого першого параметра Стокса визначалася шляхом знаходження довірчого інтервалу для оцінки математичного очікування *m* за вибірковими середніми $\overline{\Pi}$. Внаслідок того, що для розрахунку використовуються вибіркові значення σ, які і є вибірками малого обсягу, тому для знаходження меж довірчого інтервалу було обрано *t* - розподіл Стьюдента з довірчою ймовірністю *P* = 0,95. Довірчий інтервал визначався за такою залежністю:

$$\overline{\Pi} - \frac{\sigma}{\sqrt{N}} t_N ; 0,95 < m < \overline{\Pi} + \frac{\sigma}{\sqrt{N}} t_N ; 0,95 \; , \tag{6.13}$$

де t_N ; 0,95 - значення *t* розподілу Стьюдента для вибірки обсягу *N* і довірчої ймовірності *P* = 0,95.

Довжина довірчого інтервалу *L* визначається з умови:

$$L = 2\frac{\sigma}{\sqrt{N}} t_N ; \; 0,95 \; . \tag{6.14}$$

Для оцінки статистичної похибки *S* виміряного першого параметра Стокса за величину похибки були взяті межі довірчого інтервалу першого параметра Стокса із довірчою ймовірністю *P* = 0,95:

$$S = \pm\frac{\sigma}{\sqrt{N}} t_N ; \quad 0,95 \quad , \tag{6.15}$$

де σ – середньо квадратична похибка вимірювання.

Перший параметр Стокса визначено за усередненими значеннями потужності його луна-сигналів і для оцінки його статистичної похибки використано метод визначення похибки в одній точці.

При цьому визначалися σ_i і S_i . За десятьма вибірками об'єму N_i для кожного виміру в одній точці, а потім середнє значення похибки для n вимірювань .

Результати виконаних розрахунків засвідчили, що величина абсолютної похибки вимірювань для першого параметра Стокса, змінюється від 0,4 дБ за $N = 70$ імпульсів до 0,1 дБ за $N = 100$ імпульсів для зливових опадів, тобто:

$$\overline{S} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} S_i \ . \tag{6.16}$$

Подальше збільшення кількості імпульсів зменшує статистичну похибку для зливових опадів до 0,08 дБ за $N = 320$ імпульсів. Це вказує на те, що статистична похибка вимірювання першого параметра Стокса за $N = 256$ імпульсів є близькою до вимірювання миттєвих значень луна-сигналів, а взятий об'єм вибірки усереднення є оптимальним для визначення луна-сигналів параметрів Стокса атмосферного утворення (зливових опадів).

6.3 Проведення експериментального аналізу використання розроблених в дисертації методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у різних ситуаційних умовах атмосферного середовища

Поляризаційні характеристики радіолокаційних сигналів слугують надійними інформаційними параметрами під час розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів в умовах пасивних завад, створених атмосферними утвореннями. Експериментальні дослідження стану об'єктів радіолокаційного спостереження СРПК проведено в припущенні, що всі компоненти луна-сигналів, які надходять на вхід всеполяризованої антени СРПК, відповідають реальним фізичним

процесам, описуються енергетичними дійсними параметрами Стокса, а їх поляризаційна структура є синонімом векторної структури складових електромагнітного поля. Необхідною умовою наявності в системі радіолокаційних сигналів поляризаційної структури є узгодженість компонент цієї системи за своєю часовою структурою.

Реальні атмосферні середовища, що розглядаються, мають поляризаційні параметри, які відповідають речовій, симетричній і позитивно визначеній матриці Мюллера розміром 4х4. Навігаційні об'єкти радіолокаційного спостереження в загальному вигляді перебувають у зоні атмосферного утворення, і луна-сигнали на вхід всеполяризованої антени СРПК надходять одночасно як від навігаційного об'єкта, так і від атмосферного утворення, маскуючи навігаційний об'єкт на індикаторі або дисплеї суднового комп'ютера.

6.3.1 Визначення поляризаційних елементів матриці Мюллера під час експериментального розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів СРПК

Електромагнітна хвиля на випромінювання і приймання задається чотирма дійсними поляризаційними параметрами Стокса. Послідовне опромінення навігаційного об'єкта, який може перебувати в зоні атмосферного утворення, здійснюється електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій: неполяризованою хвилею, хвилею лінійної вертикальної поляризації, лінійною поляризацією з нахилом електричного вектору 45° та хвилею кругової поляризації правого або лівого напрямку обертання електричного вектору. Послідовне опромінення об'єктів радіолокаційного спостереження всеполяризованою антеною СРПК електромагнітними хвилями наведених поляризацій із вимірюванням параметрів Стокса луна-сигналів електромагнітної хвилі для кожної поляризації випромінюваної хвилі дає змогу визначити всі 16 елементів матриці Мюллера. Отримані елементи матриці Мюллера дали змогу синтезувати методи поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферного утворення на шляху судна.

Матриці Мюллера відбитих від складного об'єкта електромагнітних хвиль для кожної поляризації, що опромінює складний об'єкт електромагнітної хвилі, запишуться у вигляді:

- при опроміненні неполяризованою хвилею:

$$S_{від}^{H} = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & 0 & 0 & 0 \\ S_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \tag{6.17}$$

- при опроміненні електромагнітною хвилею лінійної вертикальної (горизонтальної) поляризації:

$$S_{від}^{ЛВ} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & 0 & 0 \\ S_{41} & S_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix}; \tag{6.18}$$

- при опроміненні електромагнітною хвилею лінійної поляризації з нахилом електричного вектору 45°:

$$S_{від}^{Л45^{o}} = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & S_{13} & 0 \\ S_{21} & 0 & S_{23} & 0 \\ S_{31} & 0 & S_{33} & 0 \\ S_{41} & 0 & S_{43} & 0 \end{bmatrix}; \tag{6.19}$$

- у разі опромінення електромагнітною хвилею кругової поляризації правого або лівого напрямку обертання електричного вектору:

$$S_{від}^{КР} = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & 0 & S_{14} \\ S_{21} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{31} & 0 & 0 & S_{34} \\ S_{41} & 0 & 0 & S_{44} \end{bmatrix}. \tag{6.20}$$

Послідовне опромінення складних об'єктів радіолокаційного спостереження всеполяризованою антеною СРПК електромагнітними хвилями наведених поляризацій із вимірюванням параметрів Стокса луна-сигналів електромагнітної хвилі для кожної поляризації випромінюваної хвилі дає можливість визначити всі 16 елементів матриці Мюллера $S_{11}…S_{44}$, що дало змогу синтезувати методи поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні атмосферного утворення на шляху судна:

$$S_{від} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix}. \qquad (6.21)$$

Приймаючи значення параметрів Стокса, випромінюваних хвиль наведених поляризацій, рівними одиниці, елементи першого стовпця матриці Мюллера (6.17) визначають шляхом вимірювання параметрів Стокса, відбитої від складного об'єкта електромагнітної хвилі:

$$S_{11} = S^{H}_{1від}; \quad S_{21} = S^{H}_{2від}; \quad S_{31} = S^{H}_{3від}; \quad S_{41} = S^{H}_{4від}. \qquad (6.22)$$

Опромінення складного об'єкта електромагнітною хвилею лінійної вертикальної поляризації та вимірювання параметрів Стокса, відбитої від складного об'єкта електромагнітної хвилі, з урахуванням виміряних елементів першого стовпчика матриці Мюллера (6.22) дає змогу визначити елементи другого стовпчика матриці Мюллера (6.18) у такий спосіб:

$$S_{12} = S^{ЛВ}_{1від} - S^{H}_{1від}; \quad S_{22} = S^{ЛВ}_{2від} - S^{H}_{2від}; \quad S_{32} = S^{ЛВ}_{3від} - S^{H}_{3від}; \quad S_{42} = S^{ЛВ}_{4від} - S^{H}_{4від}. \qquad (6.23)$$

Елементи третього стовпчика матриці Мюллера (6.19) відбитої від складного об'єкта електромагнітної хвилі за відомих елементів її першого стовпчика (6.22)

визначають шляхом опромінення складного об'єкта лінійною поляризованою хвилею з нахилом електричного вектору 45°, вимірювання параметрів Стокса луна-сигналів електромагнітної хвилі та віднімання від них елементів першого стовпчика матриці Мюллера (6.22):

$$S_{13} = S_{1від}^{Л45^o} - S_{1від}^{H}; \quad S_{23} = S_{2від}^{Л45^o} - S_{2від}^{H}; \quad S_{33} = S_{3від}^{Л45^o} - S_{3від}^{H}; \quad S_{43} = S_{4від}^{Л45^o} - S_{4від}^{H}. \qquad (6.24)$$

Для визначення четвертого стовпця матриці Мюллера (6.20) складний об'єкт опромінюють електромагнітною хвилею кругової поляризації, вимірюють параметри Стокса луна-сигналу електромагнітної хвилі складного об'єкта, від яких віднімають елементи першого стовпця матриці Мюллера (6.22):

$$S_{14} = S_{1від}^{KP} - S_{1від}^{H}; \quad S_{24} = S_{2від}^{KP} - S_{2від}^{H}; \quad S_{34} = S_{3від}^{KP} - S_{3від}^{H}; \quad S_{44} = S_{4від}^{KP} - S_{4від}^{H}. \qquad (6.25)$$

З урахуванням параметрів Стокса, випромінюваних і відбитих хвиль, матриця Мюллера складного об'єкта запишеться у вигляді:

$$S_{від} = \begin{bmatrix} S_{1від}^{H} & S_{1від}^{ЛВ} - S_{1від}^{H} & S_{1від}^{Л45^o} - S_{1від}^{H} & S_{1від}^{KP} - S_{1від}^{H} \\ S_{2від}^{H} & S_{2від}^{ЛВ} - S_{2від}^{H} & S_{2від}^{Л45^o} - S_{2від}^{H} & S_{2від}^{KP} - S_{2від}^{H} \\ S_{3від}^{H} & S_{3від}^{ЛВ} - S_{3від}^{H} & S_{3від}^{Л45^o} - S_{3від}^{H} & S_{3від}^{KP} - S_{3від}^{H} \\ S_{4від}^{H} & S_{4від}^{ЛВ} - S_{4від}^{H} & S_{4від}^{Л45^o} - S_{4від}^{H} & S_{4від}^{KP} - S_{4від}^{H} \end{bmatrix}. \qquad (6.26)$$

Матриця Мюллера (6.26), елементами якої є параметри Стокса луна-сигналів електромагнітних хвиль під час послідовного опромінення складного об'єкта електромагнітними хвилями наведених поляризацій, дає змогу синтезувати методи поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень за траєкторією руху судна.

6.4 Синтез методів поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційних об'єктів, що забезпечує підвищення ефективності радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів СРПК

Підвищення ефективності функціонування СРПК пов'язане з використанням основного інформативного параметра електромагнітної хвилі, її поляризації. Виконані в роботі наукові дослідження з розроблення методів поляризаційної селекції та радіолокаційної апаратури дали змогу провести експериментальні дослідження, які підтвердили їхню ефективність.

6.4.1 Результати експериментальних досліджень з радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферних утворень, виконаних СРПК з використанням методів поляризаційної селекції.

Експериментальні дослідження були проведені в прибережній зоні Азовського моря Запорізької області СРПК спільно з мережевим радіолокаційним комплексом АМРК, до складу якого входить двохвильовий (λ_1 = 3,2 см, λ_2 = 10 см) відкалібрований метеорологічний радіолокатор п'ятого покоління МРЛ-5 та автоматизована система обробки луна-сигналів метеооб'єктів "МЕТЕОКОМІРКА" в період з червня до вересня 2019 року і в травні - липні 2020 року. Подання метеоданих на екрані ЕОМ АМРК (Рис.6.3, 6.4) здійснювалося у вигляді кольорових карт метеоявищ у дальній і ближній зонах.



Рис.6.3. Антенний пристрій МРЛ-5



Рис.6.4. Індикатори МРЛ-5

Види кольорових карт метеорологічних явищ представлені на рис.6.5 - рис.6.7.

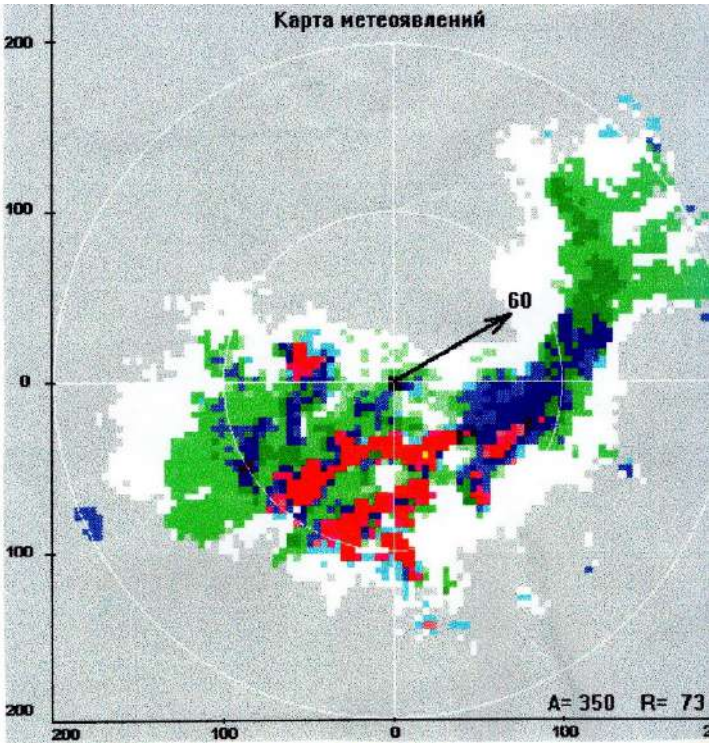


Рис.6.5. Кольорова карта метеорологічних явищ.

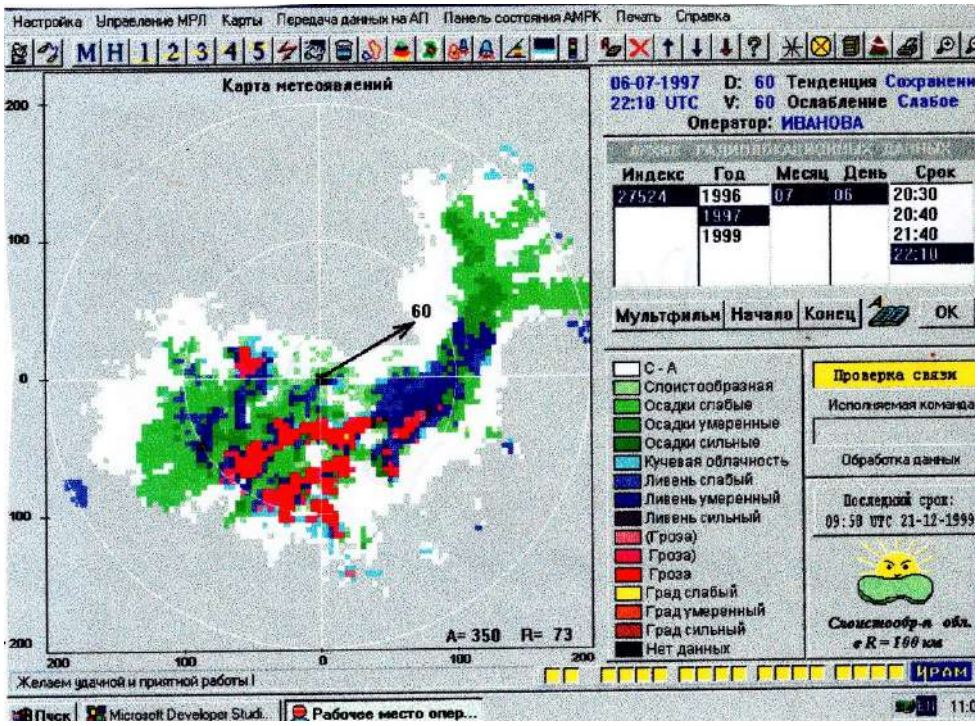


Рис.6.6. Кольорова карта метеорологічних явищ з шкалою їх видів.

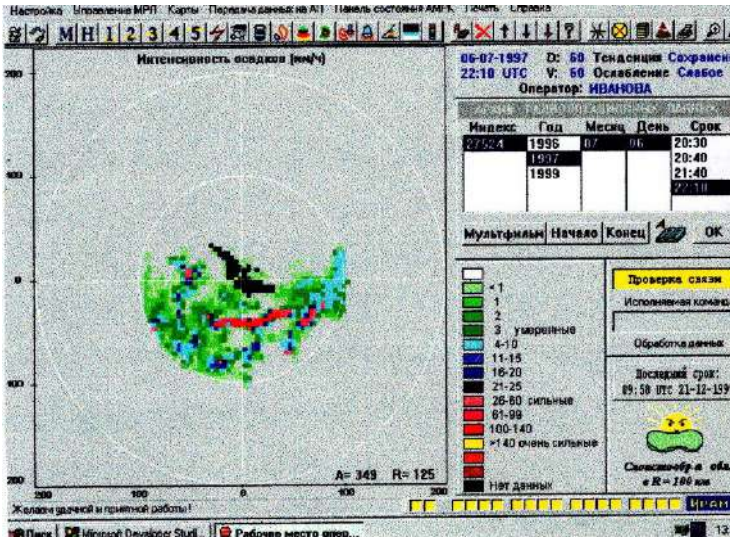


Рис.6.7. Кольорова карта метеорологічних явищ зі шкалою їхньої інтенсивності

Кольорова карта метеоявищ (Рис.6.5) являє собою коло, вписане у квадрат із відповідною атрибутикою та змістом. Орієнтація кольорової карти за сторонами світу відповідає орієнтації географічних карт, при цьому:

- напрямок на Північ (Пн) від центру карти (кола) відповідає азимуту (А) 0^o (360^o);

- напрямок на Схід (С) - А = 90^o;

- напрямок на Південь (Пд) - А = 180^o;

- напрямок на Захід (З) - А = 270^o.

Центр карти відповідає місцю встановлення МРЛ. Зовнішнє коло відповідає віддаленню від центру 200 км. Максимальне віддалення метеооб'єктів від МРЛ 200 км, які відображаються на колірній карті по дискретних квадратах площею 4х4 км, різними кольорами відповідно до колірної шкали. Шкала метеооб'єктів містить такі позначення:

- С-А - шарувата хмарність без опадів;

- шаруватоподібна хмарність (шарувато-дощова) опади з якої випадають слабкої інтенсивності $I_{сл}$, помірної інтенсивності $I_{пом}$ і сильної інтенсивності $I_с$;

- купчаста хмарність - конвективна хмарність без опадів. Зливові опади випадають із купчасто-дощових хмар слабкої інтенсивності $I_{сл}$, помірної інтенсивності $I_{пом}$ і сильної інтенсивності $I_с$. Інтенсивності зливових опадів, що випадають, за радіолокаційною оцінкою становлять:

- влітку $I_{сл} \geq 0{,}5$ мм/год; $I_{пом} \geq 3{,}0$ мм/год; $I_с \geq 25{,}1$ мм/год;

- взимку $I_{сл} \geq 0{,}02$ мм/год; $I_{пом} \geq 0{,}11$ мм/год; $I_с \geq 1{,}1$ мм/год.

- град слабкої інтенсивності, град помірної інтенсивності, град сильної інтенсивності.

На кольорові карти проставляються опади таких видів:

- рідкі (водянисті) - дощ або злива (дощ зі снігом, сніг із дощем, мокрий сніг, зокрема й зливові);

- тверді - сніг або зливовий сніг, а також град.

На Європейській території радіолокаційна оцінка інтенсивності випадних опадів, ведеться за градаціями, представленими в табл. 6.1, а за градаціями на території США у табл. 6.2.

Таблиця 6.1

Градації інтенсивності випадних опадів за даними

МРЛ на Європейській території

Номер градації	Оцінка інтенсивності	Інтенсивність, *I, мм/год*	Радіолокаційна відбиваність, *Z, дBZ*
1	слабкі	0.05 – 2,90	18 – 29
2	помірні	3,00 – 25,00	30 – 45
3	сильні	25,10 – 60,00	45 – 50
4	дуже сильні	60,00 – 150,00	Більше 51

Таблиця 6.2

Градації інтенсивності випадних опадів за даними

МРЛ на території США, с урахуванням типів хмар

Номер градації	Оцінка інтенсивності	Інтенсивність, випадних опадів *I, мм/год*	
		з шаруватоподібних хмар	з конвективних хмар
1	слабкі	< 2,5	< 5,0
2	помірні	2,5 – 5,0	5,0 – 27,5
3	сильні	12,5 – 25,0	27,5 – 55,0
4	дуже сильні	25,0 – 50,0	55,0 - 112,5
5	інтенсивні	50,0 - 125,0	112,5 – 177,5
6	екстремальні	> 125,0	> 177,5

Найбільше значення інтенсивності випадних опадів мають їхні осередки з тривалістю існування на шляху судна до трьох годин і максимальним значенням площі, яку вони займають, до 800 кв. км.

З певною похибкою на суднах за супутниковою інформацією можна отримати відомості про характеристики осередків випадних опадів у різних районах земної кулі, де проходять траси морських суден. Їх аналіз показав, що, незважаючи на загальні закономірності, параметри опадів, що випадають, мають значний розкид для різних регіонів земної кулі. Це необхідно враховувати під час радіолокаційних спостережень навігаційних об'єктів на шляху судна, яке перебуває в зоні випадних опадів для даного регіону. Однак загальним є те, що в усіх регіонах значення інтенсивностей опадів, що випадають, I_{max} і $I_{ср}$ в їхніх осередках зростають зі збільшенням площі та часу існування осередків. З метою підвищення точності радіолокаційного методу вимірювання інтенсивності опадів, що випадають

(стандартно прийнято залежність відношення $Z - I$, $Z = 200\ I^{1,6}$), використано співвідношення $Z = 180\ I^{1,87}$ для рідких опадів і $Z = 1500\ I^{1,6}$ для твердих опадів. Під час розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів в СРПК використано співвідношення $S_{1від} = I$ (мм/год), де $S_{1від}$ - перший параметр Стокса луна-сигналу частково поляризованої електромагнітної хвилі складного об'єкта.

Під час аналізу випадних опадів за допомогою АМРК у регіоні експериментальних досліджень використано їхню кількісну оцінку за кожною інтенсивністю і карти з кольоровою шкалою (рис. 6.8 і 6.9).

На рис.6.8 представлені атмосферні утворення в дальній зоні R_{max} = 200 км і на рис.6.9 у ближній зоні R = 50 км. Під час руху судна в зоні випадних опадів операторів суднового радіолокаційного комплексу цікавить ближня зона з погляду забезпечення безпеки руху судна в зоні небезпечних атмосферних утворень, коли керування судном за цим маршрутом здійснюється за допомогою супутникових і радіолокаційних даних. Ефективність радіолокаційної видимості зустрічних суден за траєкторією руху судна в ближній зоні забезпечується тільки поляризаційною селекцією навігаційних об'єктів, яка дає змогу відокремити луна-сигнал навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень на шляху судна, з луна-сигналу складного об'єкта.

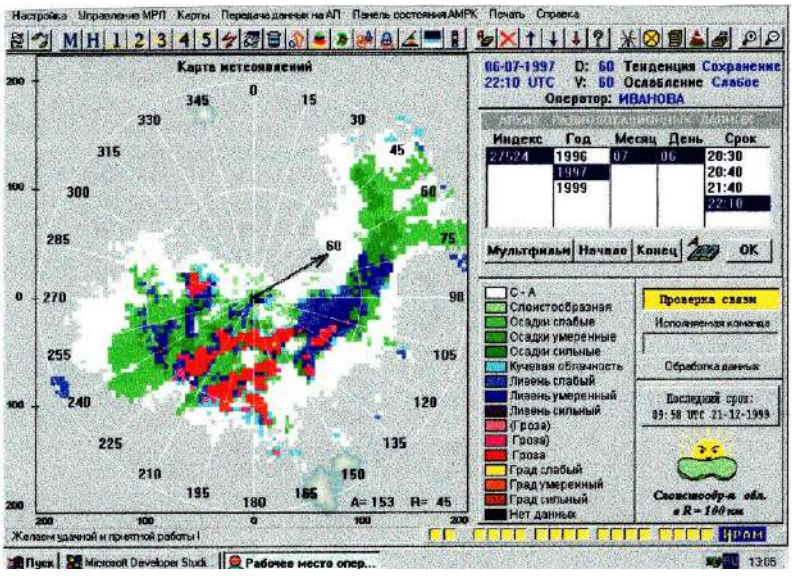


Рис.6.8. Горизонтальний розріз луна-сигналу атмосферного утворення на індикаторі МРЛ-5 (масштаб дальність - азимут)

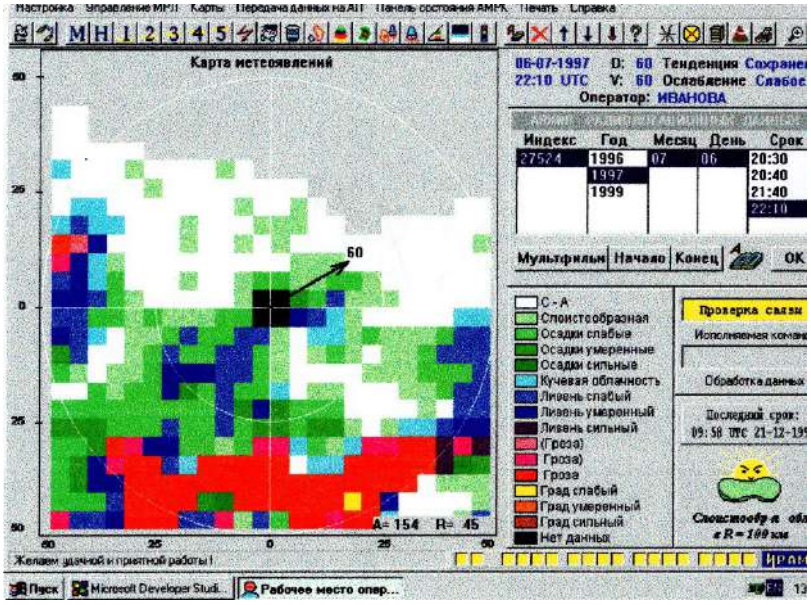


Рис.6.9. Вертикальний розріз луна-сигналу атмосферного утворення на індикаторі МРЛ-5 (масштаб дальність - висота).

Умови радіолокаційного спостереження МРЛ-5 атмосферних утворень характеризують ступінь ослаблення луна-сигналу залежно від наявності рідких або змішаних опадів у радіусі радіолокаційних спостережень та врахування цього ослаблення під час використання відомого основного рівняння радіолокації хмар і опадів:

$$\frac{\overline{P}_{пр}}{P_{ш}} = П_{м}\frac{Z}{R^2}, \qquad (6.27)$$

де $\overline{P}_{пр}$ - потужність луна-сигналу атмосферного утворення, дБ;

$P_{ш}$ - потужність власних імпульсів МРЛ, дБ;

$П_{м}$ - метеорологічний потенціал МРЛ, дБ;

Z - радіолокаційна відбивна здатність атмосферних утворень, дБZ;

R - відстань до атмосферного утворення, км.

Радіолокаційне виявлення навігаційного об'єкта, що перебуває на певній відстані R від антени суднової СРК, здійснюється за допомогою рівняння радіолокації (6.27), що визначає залежність потужності прийнятого луна-сигналу $\overline{P}_{пр}$ від потужності передавача P_t, площі σ, що відбиває навігаційного об'єкта, коефіцієнта посилення антени G, довжини хвилі λ і записується у вигляді:

$$\overline{P}_{пр} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}, \tag{6.28}$$

де $\overline{P}_{пр}$ і P_t - потужності прийнятого і випромінюваного сигналів, відповідно, Вт;

G - коефіцієнта посилення антени;

λ - довжина хвилі, см;

σ - площа навігаційного об'єкта, що відбиває, м^2;

R – відстань від антени до об'єкта, км.

Рівняння радіолокації (6.28) є оптимальним за відсутності атмосферних утворень у зоні знаходження навігаційного об'єкта. За наявності атмосферних утворень у зоні знаходження навігаційного об'єкта, рівняння (6.28) не дає змоги виділити луна-сигнал навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта і виявити навігаційний об'єкт.

Для радіолокаційного спостереження навігаційного об'єкта СРПК під час його знаходження в зоні атмосферних утворень необхідно використовувати енергетичні поляризаційні параметри електромагнітної хвилі на випромінювання та на приймання, що характеризують луна-сигнал складного об'єкта, за допомогою яких розв'язується завдання поляризаційної селекції луна-сигналу навігаційного об'єкта. Перший енергетичний поляризаційний параметр Стокса відбитої електромагнітної хвилі від складного об’єкта запишеться у вигляді:

$$S_{1від} = E_{x\Sigma}^2 + E_{y\Sigma}^2, \tag{6.29}$$

де $S_{1від}$ - перший енергетичний поляризаційний параметр Стокса;

$E_{x\Sigma}^2, E_{y\Sigma}^2$ - ортогональні компоненти відбитої електромагнітної хвилі від складного об'єкта на виході всеполяризованої антени, при цьому:

$$E_{x\Sigma}^2 = E_{xc+\phi}^2 = E_{xc}^2 + E_{x\phi}^2; \qquad E_{y\Sigma}^2 = E_{yc+\phi}^2 = E_{yc}^2 + E_{y\phi}^2,$$

де c – стабільний сигнал, ϕ - сигнал, що флуктуює (атмосферне утворення, у якому знаходиться навігаційний об’єкт).

СРПК дає змогу за допомогою першого параметра Стокса (6.29) здійснювати радіолокаційне спостереження небезпечних атмосферних утворень із вимірюванням інтенсивності I випадних опадів, використовуючи таке співвідношення:

$$S_{1від} = \frac{c \cdot I}{R^2}, \tag{6.30}$$

де I - інтенсивності випадних опадів, мм/год;

с - коефіцієнт, який враховує залежність відбитої потужності від відстані до атмосферного утворення;

R - відстань до атмосферного утворення, км.

В експериментальних дослідженнях проводилося одночасне радіолокаційне спостереження атмосферних утворень з вимірюванням інтенсивності опадів, що випадають, мережевим автоматизованим радіолокаційним метеорологічним комплексом (АМРК "МЕТЕОКОМІРКА") і судновим радіолокаційним поляризаційним експериментальним комплексом (СРПК).

Радіолокаційні спостереження небезпечних видів атмосферних утворень (опади певної інтенсивності, що випадають), які впливають на безпеку судноводіння, проводилися за вимірюванням їхніх луна-сигналів, поданих на екранах електронно-променевих індикаторів та дисплеїв комп'ютерів (в АМРК - *dBZ* та в СРПК потужності першого параметра Стокса) у кольоровому зображенні, де інтенсивність кожного виду опадів, що випадають, відповідає певному кольору. Інформацію про небезпечні види опадів, що випадають, отриману за допомогою експериментального СРПК, порівнювали з інформацією АМРК "МЕТЕОКОМІРКА".

6.4.2 Основні вимоги до оптимізації порівняльного аналізу радіолокаційного представлення луна-сигналів атмосферних утворень при експериментальних дослідженнях ефективності розроблених методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів.

Поляризація радіолокаційних сигналів у судновій активній радіолокації визначається як поляризаційним станом складного об'єкта на шляху судна, що опромінює електромагнітною хвилею, так і його відбивною здатністю. Луна-сигнал складного об'єкта буде частково поляризованим, що складається з луна-сигналу навігаційного об'єкта та луна-сигналу атмосферного утворення зі своїми поляризаціями, що відрізняються від поляризацій хвиль, які опромінюють складний об'єкт. Кожен з об'єктів радіолокаційного спостереження має певну геометричну структуру та електрофізичні параметри, які створюють фізичну основу використання поляризаційної селекції для виділення луна-сигналів навігаційного об'єкта з луна-сигналів складного об'єкта.

Поляризаційна селекція луна-сигналів навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень на шляху судна, розглядається у два етапи. Перший етап поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційного об'єкта здійснюється шляхом відповідного вибору поляризації електромагнітної хвилі, що опромінює складний об'єкт, а на другому етапі вирішальне значення мають параметри антени та приймального пристрою, а також схеми поляризаційної селекції, що містять оброблення луна-сигналів складного об'єкта із виділенням луна-сигналів навігаційного об'єкта та подачею їх на індикатор СРПК та дисплей комп'ютера, за якими здійснюють радіолокаційне спостереження та вимірювання координат навігаційного об'єкта, що знаходиться в зоні небезпечних атмосферних утворень.

Використання енергетичних параметрів Стокса під час розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, дає змогу включити поляризаційні ефекти, зокрема й повну (сумарну) потужність луна-сигналів, до співвідношення, що описує процес радіолокаційного спостереження СРПК навігаційних об'єктів, які перебувають у складних умовах атмосферного середовища на шляху судна. Під час

здійснення поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційних об'єктів аналізується поляризаційна структура луна-сигналу складного об'єкта, включно з луна-сигналами складного об'єкта неполяризованою хвилею. Поляризаційне поле під час аналізу методів поляризаційної селекції розуміють як поле, властивості якого не змінюються в інтервалі радіолокаційного спостереження (аналізу).

Судноплавні радіолокаційні комплекси до теперішнього часу використовують як інформативний параметр електромагнітної хвилі потужність однієї поляризованої компоненти луна-сигналу спостережуваного об'єкта (зазвичай лінійної вертикальної або лінійної горизонтальної компоненти), а в деяких типах суднових РЛС використовують також доплерівську частоту, логарифмічні підсилювачі проміжної частоти, ТАРП (тимчасове автоматичне керування підсиленням) , зміщення робочої точки детектора. Однак, захист суднових СРК від впливу небезпечних атмосферних утворень, що використовує різні методи, зокрема й поляризаційні, до теперішнього часу повністю не вирішено. На індикаторах суднової СРК з яскравою позначкою або дисплеї комп'ютера засвічені значні області луна-сигналів атмосферних утворень різної інтенсивності, у межах яких луна-сигнали навігаційних об'єктів стають не помітними.

Основними вимогами до апаратури поляризаційної селекції навігаційних об'єктів є:

- збереження або збільшення дальності дії СРПК, що дорівнює дальності його дії суднових СРК, які використовуються на сьогодні, що випускаються серійно;

- забезпечення якості роботи СРПК, що характеризується величиною залишкового луна-сигналу від небезпечних атмосферних утворень по траєкторії руху судна;

- забезпечення радіолокаційної видимості навігаційних об'єктів на тлі заважаючих луна-сигналів небезпечних атмосферних утворень.

Атмосферні утворення належать до об'ємно розподілених об'єктів, що відбивають, які складаються з величезної кількості безладно розташованих водяних частинок рідкого або твердого стану, які перебувають у радіолокаційному відбивальному об'ємі, а луна-сигнали від них у приймальних системах суднових СРК

перевантажують підсилювачі проміжної частоти або відеопідсилювачі, що призводить до неможливості радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів. Реалізувати повною мірою енергетичні та інформаційні можливості суднових СРК можливо тільки в режимі поляризаційної селекції, під час якої повинен використовуватися судновий радіолокаційний поляризаційний комплекс, який реалізує розроблені в дисертації поляризаційні методи виділення зі складного луна-сигналу, луна-сигналу навігаційного об'єкта з подачею його на електронно-променевий індикатор і дисплей комп'ютера СРПК. Випадні опади, як атмосферні утворення, в спеціальній літературі, класифіковані за їх інтенсивністю і відповідно для кожної інтенсивності визначено величину потужності радіолокаційного луна-сигналу з урахуванням мікроструктури частинок і їх радіолокаційних характеристик, з припущеннями їх сферичності, одноразовості та некогерентності розсіювання ними потужності опромінюючої хвилі. При цьому радіолокаційна відбивна здатність (*ZdBZ*) радіолокаційного об'єму частинок, що розсіюють, визначається їхніми розмірами, а також концентрацією, і не враховується складність радіолокаційної структури опадів, які випадають, адже радіолокаційний об'єм, який відображає, на даній відстані від суднової СРК складається з частинок дощів, що випадають одночасно і мають різну інтенсивності, формують для кожної інтенсивності певну величину луна-сигналу (Рис.6.10, табл.6.3) і радіолокаційний об'єм дощу кожної інтенсивності займає певну площу.

По трасі руху судна поляризаційну селекцію луна-сигналу навігаційного об'єкта необхідно проводити в ближній (50 км) і дальній понад 50 км зонах опадів, що одночасно випадають, різної інтенсивності. Однак на дисплеї комп'ютера суднової СРК визначити інтенсивність опадів різного типу, що випадають, практично неможливо (Рис.6.11*а,б*).

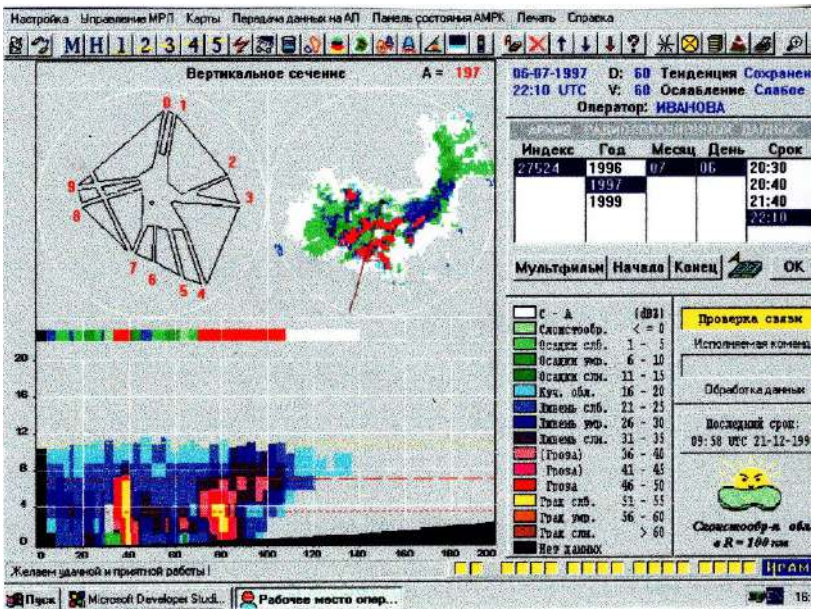


Рис.6.10. Відбиваючий радіолокаційний об'єм випадних дощів різної інтенсивності, представлений певним кольором і величиною їхніх луна-сигналів.

Таблиця 6.3

Кількісна оцінка опадів за кожною інтенсивністю і за величиною луна-сигналу

Оцінка інтенсивності опадів	Інтенсивність, мм/год	*ZdBZ*
Шароподібна хмарність		
слабкі	≥ 0,5	1 – 5
помірні	≥ 3,0	6 – 10
сильні	≥ 25,1	11 - 15
Купчаста хмарність		
злива слабка	< 5,0	21 - 25
злива помірна	≥ 27,5	26 - 30
злива сильна	≥ 60,0	31 - 35
град слабкий	< 2,0	51 - 55
град помірний	2,0-5,0	56 - 60
град сильний	>5,0	< 60



а)



б)

Рис.6.11. Луна-сигнали об'єктів на екранах дисплеїв суднових СРК:

а – випадні опади відсутні;

б - видно зони випадних опадів.

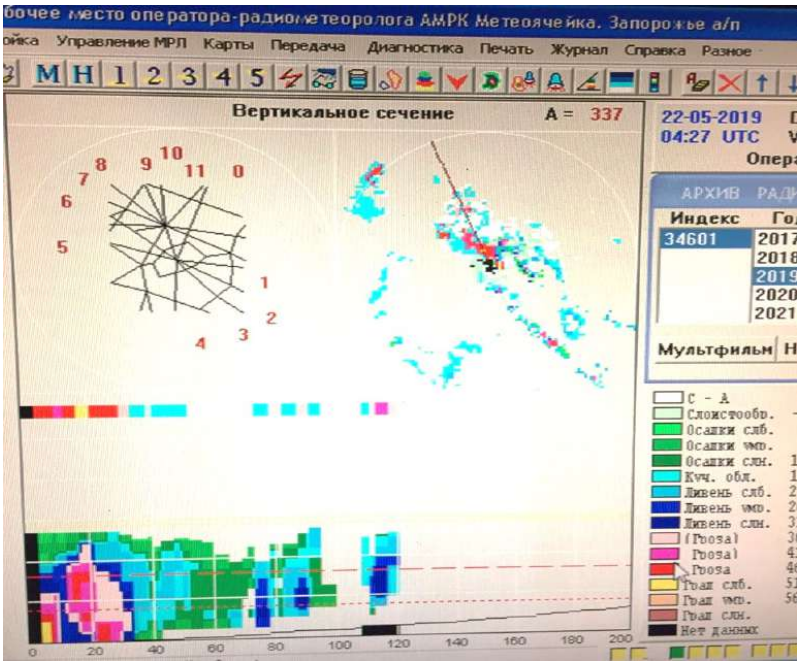
У той же час луна-сигнал опадів, що випадають, на кольоровому дисплеї комп'ютера АМРК дає змогу у визначеному масштабі та у визначеному кольорі виділити кожну зону випадних опадів та встановити їхню інтенсивність з урахуванням величини луна-сигналу, а кольорова інформація на дисплеї СРПК про інтенсивність опадів, що випадають, порівнюється з кольоровою інформацією,

отриманою на дисплеї комп'ютера АМРК, у горизонтальній та вертикальній площинах (Рис.6.12 *а,б*).

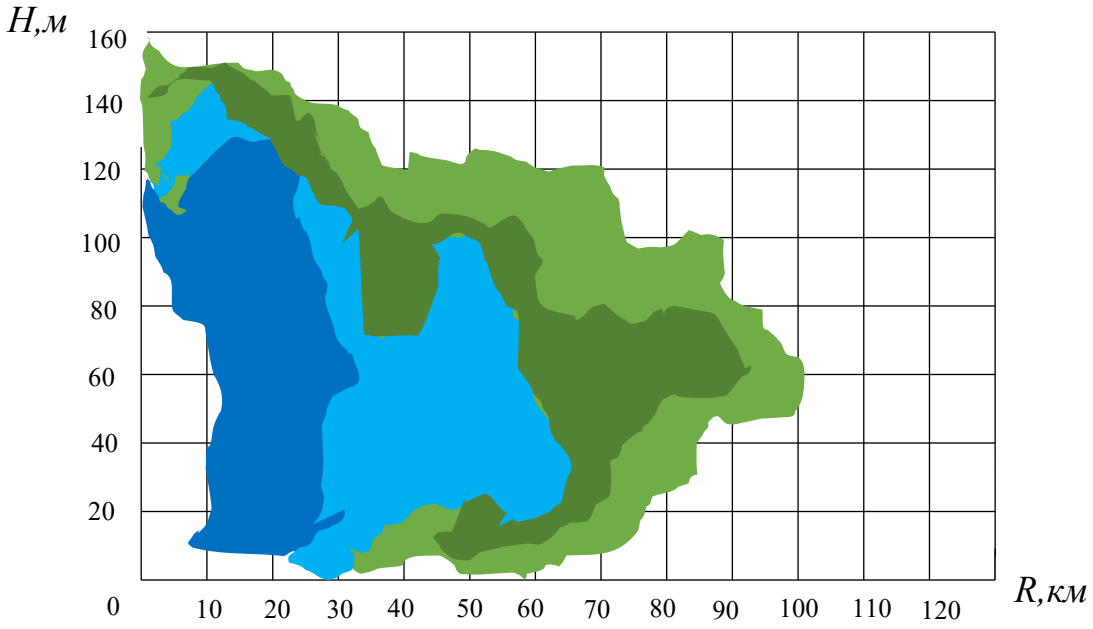
Експериментальна перевірка розроблених методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні опадів, які випадають під час зливи, може бути ефективно виконана шляхом одночасної індикації на кольоровій карті АМРК луна-сигналу атмосферних утворень та на кольоровому дисплеї експериментального макета СРПК з подальшим використанням у ньому методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, з урахуванням їх одночасного дистанційного спостереження двома радіолокаційними комплексами АМРК і СРПК.

6.4.3 Експериментальне підтвердження підвищення функціональних можливостей суднових радіолокаційних комплексів методами поляризаційної селекції навігаційних об'єктів.

З наявних нині радіолокаційних методів виявлення об'єктів на тлі атмосферних завад найінтермодальнішими методами, що підвищують ефективність функціонування суднових радіолокаційних засобів у реальних умовах атмосферного середовища, є радіолокаційні методи поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, які ґрунтуються на виділенні луна-сигналів навігаційного об'єкта з луна-сигналів складного об'єкта. Експериментальне дослідження ефективності радіолокаційного виявлення складного об'єкта і розпізнавання в ньому навігаційного об'єкта було проведено дистанційними методами поляризаційної селекції за допомогою експериментального макета СРПК, що реалізує ці методи. У кожному методі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів використовується один і той самий алгоритм порівняльного оцінювання радіолокаційних характеристик атмосферних утворень, отриманих мережевим АМРК і експериментальним СРПК.



а)



б)

Рис.6.12. Луна-сигнал опадів, що випадають, на кольоровому дисплеї комп'ютера АМРК у горизонтальній (азимутальній) і вертикальній (дальність-висота) площинах (*а*) і на кольоровому дисплеї комп'ютера СРПК у вертикальній площині (*б*).

На підставі отриманих результатів порівняльної оцінки використовувався поляризаційний алгоритм реалізації радіолокаційних методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні небезпечних атмосферних утворень. В експериментальному макеті СРПК поляризаційна система луна-сигналів, в окремих випадках, пов'язана з поданням про тезаурус, що відповідає інформації про структуру луна-сигналу навігаційного об'єкта та накопиченій на цей час радіолокаційній інформації про небезпечні атмосферні утворення, що можуть зустрічатися по трасі руху судна. Усі функції поляризаційної селекції навігаційних об'єктів у СРПК параметризовано енергетичними параметрами Стокса, що легко вимірюються і несуть максимум інформації про складний об'єкт, у якому перебуває навігаційний об'єкт, та є потенційними джерелами радіолокаційної інформації про об'єкт, який розсіює. Експериментальне підтвердження ефективності розроблених радіолокаційних методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебували в зоні випадних опадів було проведено в травні-серпні 2019 року і в травні-липні 2020 року.

Розглядався складний об'єкт радіолокаційного спостереження, яким є випадні опади різного виду та інтенсивності, з навігаційним об'єктом, який перебуває в них. На ***першому етапі*** експериментальних досліджень отримання радіолокаційної інформації про навігаційний об'єкт враховували тільки радіолокаційні дані атмосферних утворень (їхній вид та інтенсивність), отримані у вертикальному радіолокаційному розрізі луна-сигналу складного об'єкта, як з АМРК, так і з СРПК (Додаток А, рис.А.1 – рис.А.26). Аналіз отриманих радіолокаційних знімків на дисплеях комп'ютерів опадів, що випадають, показав, що в луна-сигналах атмосферних утворень присутні одночасно як облогові опади з шарувато-дощових хмар, так і зливові опади з купчасто-дощових хмар, супроводжувані грозовими явищами. Причому багато опадів мають осередкову структуру, деякі пов'язані з проходженням теплих і холодних атмосферних фронтів. Аналіз отриманих радіолокаційних знімків також показав, що на дисплеї комп'ютера МРЛ-5 через випадні опади за їх зоною відсутні луна-сигнали навігаційних об'єктів. Це пов'язано з тим, що випромінена потужність поглинається зоною випадних опадів різної

інтенсивності. Тому для успішного радіолокаційного виявлення навігаційних об'єктів, що знаходяться у зоні або за зоною випадних опадів, необхідно використовувати СРПК, який реалізує методи поляризаційної селекції, що дозволяють виділити луна-сигнал навігаційного об'єкта з луна-сигналу складного об'єкта (Додаток Б, рис.Б.1*б* – рис. Б.9*б*).

Порівняльна оцінка луна-сигналів випадних опадів на дисплеї АМРК і дисплеї СРПК показала, що СРПК виявляє ті ж випадні опади, що й АМРК (Додаток А, рис.А.1 – рис.А.26). Це дає змогу розглядати методи поляризаційної селекції навігаційних об'єктів під час їх знаходження в зоні випадних опадів різної інтенсивності тільки з використанням СРПК за траєкторією руху судна. На рис. 6.13 представлено азимути руху зон опадів, які розглянуто і проаналізовано на дисплеях комп'ютерів АМРК і СРПК.

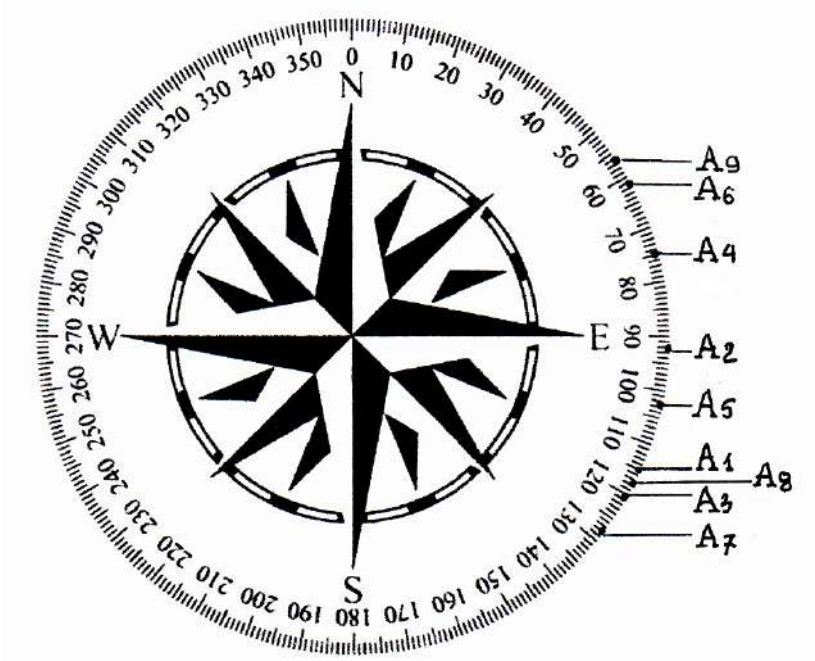


Рис. 6.13. Азимути руху зон опадів, що спостерігаються радіолокаційними комплексами.

Аналіз отриманих кольорових карт (додаток А, рис.А.1 – рис. А.26) на дисплеї комп'ютера СРПК луна-сигналу атмосферних утворень для кожного азимута позначеного на рис. 6.13 показав, що виявити в них наявність або відсутність луна-сигналу навігаційного об'єкта не є можливим без використання систем радіолокаційної поляризаційної селекції їхніх луна-сигналів. Зони випадних опадів за наявності в них навігаційних об'єктів будуть небезпечними за траєкторією руху судна.

Тому ***другий етап*** експериментальних досліджень складних об'єктів був заснований на відеоданих кольорових карт у вертикальному перерізі луна-сигналів випадних опадів радіолокаційного спостереження СРПК. Для радіолокаційного аналізу було використано кольорові відеокарти випадних опадів за певними напрямками азимутів. У зв'язку з тим, що відстань до Азовського моря від місця встановлення СРПК, де в окремих випадках випадали в прибережній зоні опади, використання методів поляризаційної селекції безпосередньо для виявлення навігаційних об'єктів в випадних опадах не було можливим через недостатню потужність зондувальних сигналів на такій відстані.

Експериментальні дослідження другого етапу було проведено для підтвердження ефективності наступних радіолокаційних методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів для виділення луна-сигналів об'єктів, що перебувають у зоні випадних опадів на дисплеї СРПК:

- використання енергетичної матриці розсіювання в напрямках $A_1 = 116^o$ і $A_2 = 093^o$;

- використання матриці когерентності в напрямках $A_3 = 120^o$, $A_4 = 075^o$;

- використання ступеня поляризації в напрямках $A_5 = 102^o$, $A_6 = 061^o$, $A_7 = 129^o$;

- використання статистичних властивостей поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі в напрямках $A_8 = 118^o$ і $A_9 = 057^o$.

Кожен із наведених методів поляризаційної селекції об'єктів (див. Розділ 5) використовували для радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів, які перебувають у зонах випадних опадів за визначеними азимутами (Рис.6.13).

6.4.3.1 Результати експериментального використання *енергетичної матриці розсіювання* луна-сигналів складного об'єкта під час поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні випадних опадів.

Результати експериментального використання енергетичної матриці розсіювання луна-сигналів складного об'єкта під час поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні випадних опадів представлених у вертикальній площині луна-сигналів складного об'єкта на рис.Б.1*а* і рис.Б.1*б*, (Додаток Б) з азимутом радіолокаційного спостереження $A_1 = 116^o$, а також для азимута $A_2 = 093^o$ на рис. Б.2*а* і рис.Б.2*б* (Додаток Б), отримані з використанням оптимального алгоритму.

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^o 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.

6.4.3.2 Результати експериментального використання *матриці когерентності* для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні опадів максимальної інтенсивності

Результати експериментального використання матриці когерентності для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні опадів максимальної інтенсивності в напрямках радіолокаційного спостереження СРПК з азимутами $A_3 = 120^o$ и $A_4 = 075^o$, представлені у вертикальній площині луна-сигналів складного об'єкта на рис.Б.3*а* і рис.Б.3*б*, (Додаток Б) з азимутом радіолокаційного спостереження $A_3 = 120^o$, а також для азимуту $A_4 = 075^o$ на рис.Б.4*а* і рис.Б.4*б* (Додаток Б), отримані з використанням оптимального алгоритму.

Оптимальний алгоритм для реалізації радіолокаційного методу поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні атмосферного утворення, з використанням *матриці когерентності*, у загальному випадку, наказує:

- складний об'єкт радіолокаційного спостереження послідовно опромінити за допомогою всеполяризованої антени СРПК неполяризованою хвилею, хвилею лінійної вертикальної поляризації, лінійною хвилею з орієнтацією електричного вектору 45^o і хвилею кругової поляризації;

- виміряти параметри Стокса луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта під час його опромінення неполяризованою хвилею й утворити з них перший стовпець елементів двох матриць когерентності складного об'єкта;

- виміряти параметри Стокса луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта під час його опромінення електромагнітною хвилею лінійної вертикальної поляризації та утворити з них другий стовпець елементів двох матриць когерентності складного об'єкта;

- виміряти параметри Стокса луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта під час його опромінення електромагнітною хвилею лінійної поляризації з орієнтацією електричного вектору 45^{o} та утворити з них третій стовпець елементів двох матриць когерентності складного об'єкта;

- виміряти параметри Стокса луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта під час його опромінення хвилею кругової поляризації правого напрямку обертання електричного вектору й утворити з них четвертий стовпець елементів двох матриць когерентності складного об'єкта;

- сформувати з отриманих елементів (що складаються з виміряних параметрів Стокса) дві матриці когерентності для двох енергетичних потоків луна-сигналів частково поляризованої хвилі;

- отримати з елементів двох *матриць когерентності* сумарні параметри Стокса, з яких сформувати два повністю поляризованих енергетичних потоки луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта, один з яких під час радіолокаційного спостереження СРПК складного об'єкта формує на екрані дисплея комп'ютера СРПК луна-сигнал навігаційного об'єкта, а другий, за потреби, формує луна-сигнал атмосферного утворення (випадні опади певної інтенсивності).

6.4.3.3 Результати експериментального використання *ступеня поляризації* луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта під час поляризаційної селекції навігаційних об'єктів

Результати експериментального використання ступеня поляризації луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта під час поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні випадних опадів певної інтенсивності в напрямках радіолокаційного спостереження СРПК A_5=102^{o}, A_6 = 061^{o}, A_7=129^{o} і представлених у вертикальній площині на рис.Б.5*а,б*; Б.6*а,б*; Б.7*а,б*

(Додаток Б) відповідно, отримано з використанням оптимального алгоритму, що приписує:

- послідовно опромінити складний об'єкт електромагнітними хвилями чотирьох поляризацій: лінійної вертикальної, лінійної горизонтальної, лінійної з кутом нахилу електричного вектору 45^{o} і кругової;

- виміряти параметри Стокса луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта після його опромінення електромагнітною хвилею кожної поляризації;

- з урахуванням подання луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта для кожної поляризації опромінюваної хвилі як суми двох незалежних повністю поляризованих потоків, поляризація першого з яких збігається з поляризацією поляризованої складової у частково поляризованій хвилі, а поляризація другого потоку їй ортогональна, утворити інтенсивності двох потоків із виміряних параметрів Стокса луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об'єкта;

- з нормованих інтенсивностей повністю поляризованих потоків луна-сигналів частково поляризованої хвилі сформувати її ступені поляризації, за якими і проведено селекцію луна-сигналів навігаційних об'єктів і атмосферних утворень під час їх опромінення електромагнітними хвилями певних поляризацій.

6.4.3.4 Результати використання *статистичних властивостей поляризаційних параметрів* луна-сигналів частково поляризованої хвилі для експериментального розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні випадних опадів певної інтенсивності.

Результати використання *статистичних властивостей поляризаційних параметрів* луна-сигналів частково поляризованої хвилі для експериментального розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні випадних опадів певної інтенсивності, у напрямках A_8=118^{o}, A_9=057^{o} представлених у вертикальній площині на рис.Б.8*а,б* і рис.Б.9*а,б*, отримано з використанням оптимального алгоритму, що наказує:

- опромінити складний об'єкт радіолокаційного спостереження СРПК електромагнітною хвилею лінійної вертикальної поляризації;

- виміряти значення складової вектору ознак виявлення, якою є перший параметр Стокса (табл.6.4);

- порівняти виміряне значення першого параметра Стокса складного об'єкта для A_8=118°: $S_{1вим}$ = 5.2 з його критеріальним значенням $S_{1кр}$ = 1.6, узятим з архіву комп'ютера СРПК для даної максимальної інтенсивності випадних опадів I = 15 мм/год, а для A_9=057° : $S_{1вим}$ = 3.2 з його критеріальним значенням $S_{1кр}$ = 1.9, для даної максимальної інтенсивності випадних опадів I = 27,5 мм/год;

- ухвалити рішення, що за значення луна-сигналу першого параметра Стокса складного об'єкта більшого за критеріальне значення в зоні радіолокаційного спостереження на дисплеї комп'ютера СРПК луна-сигнал відповідає тільки навігаційним об'єктам.

Таблиця 6.4

Параметри луна-сигналів частково поляризованої хвилі,
що вимірюються СРПК

Колір	Тип опадів	I, мм/год	$дBZ$	Колір	S_{1CO}	S_{1HO}	S_{1AV}
	Шарувата хмарність						
	опади слабкі	≥ 0,5	1 - 5	Світло-зелений	0,2 – 1,5	0,49 - 0,99	0,49 - 0,99
	опади помірні	≥ 3,0	6 - 10	зелений	1,5 – 3,0	1,0 – 1,5	1,0 – 1,5
	опади сильні	≥ 25,1	11 - 15	Темно-зелений	3,0 – 3,9	1,5 – 2,4	1,5 – 2,4
	Купчаста хмарність						
	злива слабка	< 5,0	21 - 25	блакитний	3,9 – 4,9	3,0 – 4,0	3,0 – 4,0
	злива помірна	≥ 27,5	26 - 30	синій	4,9 – 8,9	4,0 – 5,5	4,0 – 5,5
	злива сильна	≥ 60,0	31 - 35	темно-синій	8,9 – 9,6	5,5 – 6,0	5,5 – 6,0
	град помірний	< 2,0	51 - 55	жовтий	9,6 – 10,0	6,0 – 6,9	6,0 – 6,9
	град слабкий	2,0 – 5,0	55 - 60	помаранчевий	10,0 – 11,2	6,9 – 11,2	6,9 – 11,2
	град сильний	> 5,0	> 60	коричневий	11,2 – 14,0	11,2 – 14,0	11,2 – 14,0
Примітка. Колірна шкала інтенсивності випадних опадів відповідає повній потужності луна-сигналу об'єктів, що спостерігаються							

6.5 Висновки за розділом 6

1 Енергетична структура електромагнітних хвиль певних поляризацій, що опромінюють складний об'єкт, і розсіяних складним об'єктом частково поляризованих хвиль, представлена вектором параметром Стокса, дала змогу розв'язати прикладні задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища, судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом.

2 Оптимізація порівняльного аналізу радіолокаційного представлення луна-сигналів атмосферного утворення СРПК і АМРК під час проведення експериментальних досліджень шляхом одночасної індикації луна-сигналів атмосферних утворень на кольорових картах дало змогу підвищити ефективність використання розроблених методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів СРПК.

3 Синтез оптимальних алгоритмів радіолокаційного розпізнавання навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища, дозволив для розроблених методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів під час проведення експериментальних досліджень використовувати для кожного методу поляризаційної селекції свій оптимальний алгоритм.

4 Використання в експериментальних дослідженнях електромагнітних хвиль чотирьох фіксованих поляризацій на випромінювання всеполяризованою антеною СРПК і на прийом луна-сигналів складних об'єктів дає змогу не тільки збільшити енергетичний потенціал СРПК з перебудовою поляризації його антени на випромінювання, а також і можливості методів поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційних об'єктів за траєкторією руху судна в складних умовах атмосферного середовища.

5 Умови повного приймання луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта з вимірюванням першого параметра Стокса або всіх чотирьох параметрів Стокса дають змогу реалізувати для кожного методу поляризаційну

селекцію навігаційного об'єкта, що перебуває в складних умовах атмосферного середовища за траєкторією руху судна.

6 Луна-сигнал частково поляризованої електромагнітної хвилі, що приймається всеполяризованою антеною СРПК, складається з луна-сигналу навігаційного об'єкта та луна-сигналу атмосферного утворення. За допомогою СРПК в експериментальних дослідженнях отримано середні за часом значення поляризаційних параметрів Стокса, які порівнювали з їхнім критеріальним значенням $S_{1кр} > 1{,}68$, обчисленим за їхніми статистичними параметрами для інтенсивності випадних зливових опадів I = 14 мм/год. Імовірність поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні зливових опадів інтенсивністю I = 14 мм/год, становила 99 %.

7 Використання правила максимуму правдоподібності в процесі радіолокаційного розпізнавання в луна-сигналі складного об'єкта луна-сигналу навігаційного об'єкта після вимірювання значення першого параметра Стокса для атмосферного утворення і навігаційного об'єкта визначено закони розподілу першого параметра Стокса для атмосферного утворення і навігаційного об'єкта.

8 Для розглянутої інтенсивності випадних опадів закон розподілу відбивної здатності навігаційного об'єкта $W(S_1/НО) = 0{,}95$, а закон розподілу відбивної здатності атмосферного утворення (зливові опади інтенсивністю I = 14 мм/год) $W(S_1/АО) = 0{,}64$. Згідно з використовуваним правилом максимуму правдоподібності, відношення цих законів $W(S_1/НО)/W(S_1/АО) = 1{,}48$, тобто більше одиниці. При цьому ймовірність правильного розпізнавання СРПК луна-сигналу навігаційного об'єкта, що перебуває в зоні атмосферного утворення, відповідно до розглянутого правила дорівнює ймовірності виконання нерівності $S_{1вим} > S_{1кр}$, тобто 2,4 >1,48 (див. Розділ 5).

ВИСНОВКИ

Дослідження, виконані в дисертації, спрямовані на розв'язання науково-прикладної проблеми - підвищення ефективності функціонування суднових СРК, яка на момент початку досліджень визначалася на рівні використання як основного інформативного параметра амплітуди, а в деяких суднових СРК і доплерівської частоти електромагнітної хвилі під час розв'язання задач радіолокаційної селекції навігаційних об'єктів, які перебувають в умовах атмосферних перешкод за траєкторією руху судна.

Отримані результати дисертаційного дослідження засвідчили, що найінформативнішим параметром електромагнітної хвилі суднових СРК є її поляризація, яка дає змогу одержати енергетичний виграш і забезпечити поляризаційну селекцію навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень, із високою ймовірністю виділення луна-сигналу частково поляризованої хвилі з луна-сигналу складного об'єкта по траєкторії руху судна.

Головним науковим результатом виконаної дисертаційної роботи і доведеним до можливості практичної реалізації її результатів є розробка методології поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні небезпечних атмосферних утворень, методів вимірювання енергетичних поляризаційних параметрів луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта при використанні матриць розсіювання у поляризаційних моделях складних об'єктів, технологій та способів побудови суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу, що реалізує поляризаційну селекцію навігаційних об'єктів, що знаходяться у складних умовах атмосферного середовища за траєкторією руху судна та забезпечують підвищення енергетичного рівня суднової СРК та безпеку судноводіння.

Основні наукові та практичні результати, отримані в дисертації:

1 При моделюванні відбиваючих властивостей складного об’єкту для вирішення завдання поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційних

об'єктів використано середні за часом енергетичні характеристики частково поляризованих хвиль, що представлені системою дійсних енергетичних поляризаційних параметрів Стокса на виході двоканального лінійного приймача СРПК.

2 Розв'язано завдання поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться у складних умовах атмосферного середовища, з використанням повністю поляризованих електромагнітних хвиль чотирьох поляризацій та однієї неполяризованої хвилі на випромінювання та аналіз луна-сигналів частково поляризованої хвилі складного об'єкта, прийнятою всеполяризованою антеною СРПК, представлених параметрами Стокса з наступним розподілом на два повністю поляризовані потоки, поляризація першого потоку співпадає з поляризацією повністю поляризованої складової в частково поляризованій хвилі, а поляризація другого потоку їй ортогональна.

3 Енергетичні характеристики луна-сигналів частково поляризованих електромагнітних хвиль складних об'єктів базуються на часових, просторових і поляризаційних параметрах, які об'єднані в енергетичну матрицю, матрицю когерентності та ступінь поляризації, та дають змогу здійснювати радіолокаційне розпізнавання й спостереження навігаційних об'єктів на фоні атмосферних перешкод по трасі руху судна.

4 Розроблений експериментальний макет СРПК послідовно випромінює електромагнітні хвилі лінійних, кругових поляризацій та неполяризовану хвилю, приймає всеполяризованою антеною луна-сигнали частково поляризованої хвилі складного об'єкта та розмежовує їх першою ланкою поляризаційного хвилеводного розділювача на дві ортогональні лінійні компоненти, що послідовно надходять на шість гібридних з'єднань, що утворюють шестикомпонентний розділювач, вихідні плечі якого через комутатор послідовно підключені на вхід двоканального лінійного приймача, що дозволяє на його виходах сформувати систему енергетичних параметрів Стокса.

5 Розроблений експериментальний макет СРПК використовує поляризаційний аналіз луна-сигналів частково поляризованих електромагнітних хвиль складних об'єктів під час поляризаційної селекції навігаційних об'єктів без їхніх амплітудних і фазових характеристик, що ґрунтується на параметричних методах математичного опису та способах їхньої практичної реалізації.

6 Розроблено ймовірнісно-статистичний метод імовірнісної поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні складних атмосферних утворень, з використанням сукупності поляризаційних ознак, що характеризують луна-сигнали частково поляризованої хвилі складного об'єкта, а їхніми імовірнісними характеристиками є закони розподілу поляризаційних параметрів Стокса, що утворюють предиктор. Для розв'язання задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів використано правило максимуму правдоподібності, відповідно до якого луна-сигнал у складному об'єкті належить до навігаційного об'єкта, для якого функція правдоподібності має більше значення.

7 Атмосферні умови за траєкторією руху судна, що характеризуються небезпечними явищами погоди (опади великої інтенсивності), які істотно впливають на ефективність функціонування суднових СРК. Цей вплив проявляється у вигляді ослаблення енергії луна-сигналів навігаційних об'єктів, що перебувають у їхній зоні, зменшення дальності їхнього виявлення, відсутності їхньої радіолокаційної видимості та створенню хибних відлуння-сигналів на індикаторі й дисплеї суднового комп'ютера. На вхід антен суднових РЛС надходять луна-сигнали від опадів, що випадають, еліптичної поляризації і селекція відлуння-сигналів навігаційних об'єктів виходить незначною. Тому необхідно розглядати використання судновими СРК всеполяризованої антени, що здійснює приймання луна-сигналів будь-якої поляризації з їхнім поділом на дві ортогональні компоненти, які дають змогу виокремити в СРПК луна-сигнал із навігаційного об'єкта зі складного луна-сигналу на виході всеполяризованої антени.

8 Повне приймання енергії луна-сигналу навігаційного об'єкта або луна-сигналу складного об'єкта дає змогу отримати енергетичні дійсні параметри Стокса на виході двоканального лінійного приймача без фазових вимірів, на яких ґрунтуються методи поляризаційної селекції луна-сигналів навігаційних об'єктів СРПК за будь-яких атмосферних умов їхнього радіолокаційного спостереження, водночас результат взаємодії електромагнітної хвилі, яку випромінює всеполяризована антена СРПК, зі складним об'єктом розглядають шляхом множення вектору Стокса випромінюваної хвилі на матрицю Мюллера, всі елементи якої - дійсні числа, а її формалізм ґрунтується на представленні стану поляризації електромагнітної хвилі вектором Стокса, а стан складного об'єкта матрицею Мюллера. При цьому після взаємодії електромагнітної хвилі зі складним об'єктом отримують вектор Стокса хвилі, що виходить, і в підсумку утворюється інформаційний канал.

9 Представлена в СРПК полярна система сигналів є математичною конструкцією, що відображає здатність перетворення, передавання, одержання й оброблення радіолокаційної інформації про спостережувану СРПК ситуацію за траєкторією руху судна, в тому числі і під час перебування в зоні небезпечного атмосферного утворення навігаційного об'єкта. Синтаксичний підхід до дослідження процесів отримання радіолокаційної інформації СРПК спрямований на її структурний аналіз і знімає невизначеності під час надходження повідомлення про навігаційний об'єкт, який перебуває в умовах складного атмосферного середовища, з урахуванням просторово-часової та поляризаційної структур луна-сигналів.

10 Використання методів поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у зоні небезпечних атмосферних утворень, у розробленому експериментальному макеті суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу під час одержання радіолокаційної інформації про небезпечні атмосферні утворення, в яких перебували навігаційні об'єкти, а також її порівняльного аналізу з радіолокаційною інформацією про небезпечні атмосферні утворення, одержаною мережевим автоматизованим

метеорологічним радіолокаційним комплексом, який має нормовані метрологічні характеристики, підтвердило високу ефективність функціонування СРПК під час розв'язання задачі як поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебували в зоні опадів різної інтенсивності, так і під час одержання радіолокаційної інформації про випадні опади.

11 Представлені в дисертації теоретично обґрунтовані та експериментально підтверджені наукові результати мають суттєву практичну значущість і підтверджують можливість підвищення ефективності функціонування суднових СРК методами поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що перебувають у складних умовах атмосферного середовища, за траєкторією руху судна та технологією побудови СРПК. Методологія, методи, технології та способи підвищення ефективності функціонування суднових СРК з використанням поляризаційних характеристик радіолокаційного каналу впроваджені в оперативну роботу гідрометцентру Чорного та Азовського морів, Запорізького обласного центру гідрометеорології, Державного Підприємства «Морський торгівельний порт «Черноморськ», а також експериментальне підтвердження наукових результатів проведено на судні т/х «DAISY» і використано у ДП «В. Шіпс Україна».

Розроблені у дисертаційному дослідженні методологія, поляризаційні методи, технології та алгоритми керування поляризаційною селекцією навігаційних об’єктів при їх радіолокаційному виділенні з луна-сигналу частково поляризованої хвилі складного об’єкту спрямовані на поліпшення функціональних можливостей суднових СРК та пріоритетності їх основних функцій – безпека перевезень і роботи екіпажу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Stokes G. "On the Composition and Resolution of Streams of Polarized Light from Different Sources" in "Transactions of the Cambridge Philosophical Society" 1852, Vol. 9, pp. 399–416.

2. William H. McMaster. Polarization and the Stokes Parameters (англ.) // Am. J. Phys. : journal. - 1954. - Vol. 22. - P. 351. — doi:10.1119/1.1933744.

3. William H. McMaster. Matrix representation of polarization (англ.) // Rev. Mod. Phys. : journal. - 1961. - Vol. 8. - P. 33. — doi:10.1103/RevModPhys.33.8.

4. Marathay A. Extension of the Commutation Relations in the Theory of Partial Polarization // Journal of the Optical Society of America (JOSA), 1966 . Vol. 56 . № 5, pp. 619-623.

5. Антюфєєв В. І. Матричні радіометричні кореляційно - екстремальні системи навігації літальних апаратів /В. І. Антюфєєв, В. М. Биков, О. М. Грічанюк, Д. Д. Іванченко, М. М. Колчигін, В. О. Краюшкін, О. М. Сотніков. – Х. : Вид-во ТОВ «Щедра садиба плюс», 2014. – 372 с. ISBN 978-617-7188-XX-X .

6. Кошевий В. М. Просторове оброблення сигналів у судновій антенній решітці мінімальною кількістю керованих елементів / В. М. Кошевий, А. А. Шершнева // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА. - Вип.25. - Одеса: «ВидавІнформ», 2015. С. 113-120.

7. Путятин В. Г. Влияние осадков на разрешающую способность судовой радиолокационной станции по угловым координатам / В. Г. Путятин, Д. В. Корбан, А. И. Князь // Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2017. Т.19. №4. С. 26-34.

8. Путятин В. Г. Влияние атмосферных условий на радиолокационное наблюдение навигационных объектов / В. Г. Путятин, Д. В. Корбан, А. И. Князь // Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2018. Т.20. №1. С. 40-51.

9. Залевский А. П. Оценка эффективности пространственно-временной и время-пространственной фильтрации сигналов в когерентно-импульсных РЛС / А. П. Залевский, Д. М. Пиза, И. С. Пресняк, А. С. Сиренко // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. №2. С.39-44.

10. Піза Д. М. Патент на корисну модель № 78120 Україна. МПК(2013.01) G01S 7/36. Спосіб захисту когерентно-імпульсних радіолокаційних станцій від комбінованих завад // Д. М. Піза, А. С. Сіренко; заявник та патентовласник Запорізький національний технічний університет; заяв. 20.08.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. №5.

11. Корбан Д. В. До проблеми зменшення перешкод від атмосферних опадів при радіолокаційному спостереженні об'єктів судновою РЛС / Д. В. Корбан, В. Х. Корбан, В. Ю. Ревенко // Суднові енергетичні установки: Зб. наук. праць / НУ «ОМА». Вип.40. Одеса: «ВидавІнформ», 2020. С. 79-87.

12. Корбан Д. В. Аналіз функціональних зв'язків навігаційного об'єкту і зовнішнього середовища при функціонуванні суднової радіолокаційної станції (РЛС)/ Д.В. Корбан // Суднові енергетичні установки: Зб. Наук. праць/ НУ «ОМА». – Вип.43. – Одеса: «ВидавІнформ», 2021. С.172-195.

13. Lekhovytskiy D.I. Quasioptimal algorithms for batch coherent signals interperiod processing against background clutter/ D. I. Lekhovytskiy, D. S. Rachkov, A. V. Semeniaka, D. V. Atamanskiy, V. P. Riabukha // International Radar Symposium IRS-2014: int. conf., 16–18 June 2014, Gdansk, Poland: proc. Gdansk, 2014. Pp. 25-30.

14. Корбан Д. В. Використання радіолокаційної інформації у метеорологічних радіолокаторах для вирішення задачі поляризаційної селекції навігаційних об'єктів на морських суднах // Матеріали Міжнародної наук. інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 92) » / Збірник тез доповідей: випуск 92 (м. Тернопіль, Україна-м. Ополе, Польща, 8-9 жовтня 2024 р.). Тернопіль. 2024. С.70-72.

15. Корбан Д. В. Влияние атмосферы на измерение дальности навигационных объектов судовой РЛС / Д. В. Корбан. Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып.35. Одесса: ОНМА, 2015. С.128-136.

16. Климченко В. Й., Тютюнник В. О., Дончак Д. А., Тах'ян К. А. Аналіз причин невідповідності формулярних і реальних значень параметрів зон виявлення цілей оглядовими РЛС контролю повітряного простору // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2021, № 1(42) ISSN 2223-456X. С.89-97 DOI: 10.30748/nitps.2021.42.11.

17. Odedina, M. O. & Afullo, T. J. (2010) Determination of rain attenuation from electromagnetic scattering by spherical raindrops: Theory and experiment Radio Science 45(1), Pp. 1-15, DOI: 10.1029/2009RS004192.

18. Nechitaylo S. V., Orlenko V. M., Sukharevsky O. I., Vasilets V. A. Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects. Boca Raton, USA: SRC Press Taylor & Francis Group, 2014. - 334 p.

19. Петрушенко Н. Н. Влияние среды распространения радиоволн на приморском направлении при измерении угловых координат радиолокационных целей / В. Д. Карлов, Н. Н. Петрушенко, В. В. Челпанов, К. П. Квиткин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2010, №3(25). С. 51-53.

20. Петрушенко М. М. Про вплив механізму розповсюдження радіохвиль на локацію цілей в тропосферному радіохвилеводі над морем / В.Д. Карлов, О.В. Бєсова, М. М. Олещук, М. М. Петрушенко // Новітні технології - для захисту повітряного простору: зб. тез доповідей Десятої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 9-10 квітня 2014 р. 2014. С. 254.

21. Алешин Г. В. Оптимальный выбор параметров радиолокационных сигналов по условному критерию максимума экономической эффективности / Г. В. Алешин, А. В. Коломийцев // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2015. №6. С. 3-7.

22. Корбан Д. В. Шляхи вдосконалення суднових радіолокаційних станцій / Д. В. Корбан // Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 76)». Збірник тез доповідей: випуск 76 (м. Тернопіль, Україна Переворськ, Польща, 3-4 квітня 2023 р.). Тернопіль, 2023. С.68-69.

23. Морозов А. В. РЛС в судовождении / А. В. Морозов. Одеса: ВПП «Друкарський дім», 2013. 464 с.

24. Корбан Д. В. Повышение эффективности дистанционного радиолокационного наблюдения объектов / Д.В. Корбан, А.Н. Волков, Л.М. Дегтярьова // «Цифрові технології» ОНАЗ ім. О. С. Попова, Одеса, № 24, 2018. С.118-127.

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

26. Корбан Д. В. К анализу поляризационных свойств навигационных объектов при их радиолокационном наблюдении на фоне атмосферных образований / Д. В. Корбан // Матеріали X Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф.: «Тенденції і перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації» (16-17 січня 2016 р.): Зб. наук. праць. Переяслав-Хмельницький, 2016.Вип.10. С.572-574.

27. Спосіб підвищення ефективності виявлення та супроводження надводних об'єктів судновою навігаційною радіолокаційною станцією на тлі атмосферних утворень різного типу та ступеня інтенсивності: Пат. 151471 Україна: МПК: G01S13/00 G01S13/66 № a2020 07148; заявл. 09.11.2020; опубл. 03.08.2022, Бюл. №31.

28. Корбан Д. В. Радіолокаційне вимірювання характеристик розсіяння об'єкту при наявності природного фону / Д.В. Корбан // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. К.: ДУІТ, 2023. Випуск 1(37). С. 122-134 https://doi.org/ 10.33298/2226-8553.2023.1.37.

29. Корбан Д. В. Рассеивающая способность объектов наблюдения автоматизированными радиолокационными системами / Д. В. Корбан, В. Х. Корбан, Л. Н.Дегтярева // Матеріали 72-ої наук-техн. конф. професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів, 13-15 грудня 2017 р. Одеса: ОНАЗ, 2017. С. 12-15.

30. Lekhovytskiy D. I. Estimation of the Energy Spectrums of Reflections in Pulse Doppler Weather Radars. Part 1. Modifications of the Spectral Estimation Algorithms / D. I. Lekhovytskiy, D. V. Atamanskiy, D. S. Rachkov, A. V. Semeniaka // Radioelectronics and Communications Systems. 2015. Vol. 58, № 12. Pp. 523–550.

31. Lekhovytskiy D. I. Estimation of the energy spectrums of reflections in pulse Doppler weather radars. Part 2. Extreme performance / D. I. Lekhovytskiy, D. V. Atamanskiy, D. S. Rachkov, A. V. Semeniaka // Radioelectronics and Communications Systems. 2016. Vol. 59, No. 9. Pp. 379–396.

32. Rachkov D. S. Estimation of continuous energy spectra of random echoes in coherent

pulse radar / D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka, D. I. Lekhovytskiy, D. V. Atamanskiy // International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT-2013: int. conf., 16–20 September 2013: proc. Odessa, Ukraine, 2013. P. 319–322.

33. Радиолокационные признаки распознавания при многопозиционной локации: монография / Е. Казаков, В. Бзот, А. Казаков, В. Павлов. Х.: АСЕ СПДФО Сторожук А. П., 2005. 188 с.

34. Корбан Д. В. Идентификация гидрометеорологических фонов по их поляризационным свойствам при решении задач селекции эхо-сигналов навигационных объектов / Д. В. Корбан, Л. Н. Дегтярева и др. // Матеріали 73-ої науково-технічної конф. професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (12-14 грудня 2018 р.), м. Одеса, Україна, ОНАЗ, 2018. С.19-22.

35. Корбан Д. В. Поляризаційна структура сигналів в інформаційному каналі суднових РЕК / Д. В. Корбан, А. В. Подорван, Т. Н. Буяджи // Матеріали наук.-техн. конф. «Транспортні технології(Морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» 14-15.11.2019. Одеса: НУОМА, 2019. С.128-129.

36. Корбан Д. В. Ефективність пригнічення відбиттів від атмосферних утворень судновою РЛС з лінійною поляризацією / Д. В. Корбан, О. Ю. Морозов // Матеріали наук.-техн. конф. «Транспортні технології(Морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» 14-15.11.2019. Одеса: НУ ОМА, 2019. С.136.

37. Корбан Д. В. Использование неполяризованной волны для радиолокационной селекции навигационных объектов при наличии атмосферного фона / Д. В. Корбан // Матеріали XII Міжнародної наук. -практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2020» 27–29 травня 2020 р. Херсон, Україна. С. 68-70.

38. Корбан Д. В. Радіолокаційне виявлення луна-сигналів навігаційного об'єкта судновою РЛС при наявності атмосферних перешкод / Д. В. Корбан // Матеріали міжнародної наукової інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні,

економічні та технічні аспекти становлення (випуск 51)» / Збірник тез доповідей: випуск 51 (м. Тернопіль, 16 вересня 2020 р.). Тернопіль, 2020. С. 40-41.

39. Hong E. Terrestrial link rain attenuation measurements at 84 GHz /E. Hong, S. Lane, D. Murrell, N. Tarasenko, C. Christodoulou // 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). IEEE, 2017. PP. 1-2. https://doi.org/10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878267.

40. Veselovska G. Modeling of scattering of electromagnetic waves by snow crystals / G. Veselovska, G. Khlopov // 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF). IEEE, 2017. Pp. 351-354. https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126646.

41. Grabner M. Analysis of propagation of electromagnetic waves in atmospheric hydrometeors on lowelevation paths / M. Grabner, P. Pechac, P. Valtr // Radioengineering. 2018. Vol. 27, №1. Pp. 29-33. https://doi.org/10.13164/re.2018.0029 .

42. Norouzian F. Rain attenuation at millimeter wave and low-THz frequencies / F. Norouzian, E. Marchetti, M. Gashinova, E. Hoare, C. Constantinou, P. Gardner, M. Cherniakov // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 68, №1. Pp. 421-431. https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2938735.

43. Hannescn R., Loffler-Mang M. Improvement of quantitative rain measurements with a C-band Doppler radar through consideration of orographically induced partial beam screening. - COST 75, 1999. Pp. 511-519.

44. Ryzkov A . The effect of nonuniform beat filling on the quality of radar polarimetric data. Proc. Fourth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2006). Barcelona, 18-22 Sept., 2006. Pp. 1-4.

45. Ryzkov A ., Hydak D ., Scott J. A new polarim etricscheme for attenuation correction at C-band. ERAD 2006. Pp. 29-32.

46. Ryzkov A.,Zrnic D. The impact of depolarization on polarimetric signatures in snow. ERAD 2006. Pp. 33-36.

47. Hydak D., Rodriguez P., Lee G.W., Ryzhkov A., Fabry F., Donaldson N. Winter precipitation studies with a dual polarized C-band radar. ERAD 2006. Pp. 9-12.

48. H. Chen, W. Wang, L. Liu. Modeling and polarization selection of complex marine targets using partially polarized echo signals. IET Radar, Sonar & Navigation. London: IET, 2022. Vol. 16, No. 3. P. 450–462. DOI: 10.1049/rsn2.12195.

49. Голіков В. А. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології / В. А. Голіков, О. А. Онищенко // Судові енергетичні установки: науково-технічний збірник - 2017. № 37. Одеса: НУ ОМА. С. 13-27.

50 Мальцев С. Е. Система інформаційного забезпечення швартування танкера VLCC до моно буя // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА», Вип. 29. Одеса: «ВидавІнформ», 2019. С.134 –141. DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.134-141.

51. Кошевой В. М. Использование сверхширокополосной техники для задач морской радиолокации / В. М. Кошевой, А. А. Шевченко // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА», Вип. 27. Одеса: «ВидавІнформ», 2018. С.78 –87.
DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.78-87.

52. Цымбал М. Н. Расчет рейсового грузового плана контейнеровоза /М. Н. Цымбал // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА», Вип. 30. Одеса: «ВидавІнформ», 2020. С.144-151. DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.144-151.

53. Ворохобин И. И., Алексишин В. Г., Фусар И. Ю. Универсальный способ стохастического описания случайных погрешностей навигационных измерений // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА», Вип. 27. Одеса: «ВидавІнформ», 2018. С.42 – 47. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.42-47.

54. Алексишин А. В., Бурмака А. И. Выбор курса уклонения судна с учетом закона распределения векториальной погрешности// Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА», Вип. 27. Одеса: «ВидавІнформ», 2018. С.10 –15.
DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.10-15

55.Divjak M. Radar measurement of precipitation in non-optimal conditions. COST 75, 1999. Pp. 150-158.

56. Smith A.H., Kitchen M. A review of quality Control and quality assessment of radar rainfal. Measurements carried out by the UK Meteorological Office. COST 75, 1999. Pp. 68-81.

57. Beguin D., Plante J. L. Ground clutter suppression methods. COST 75, 1999. Pp. 569-580.

58. Hagen M., Hacker S., Meischner P. Estimation of rainfall rate from measurements of polarimetric radar parameters by the C-band multiparameter radar POLDIRAD. COST 75, 1999. Pp. 710-716.

59. Настанова з експлуатації АМРК " МЕТЕООЯЧЕЙКА", ИТАВ. 416311.001 НЕ.

60. Корбан Д. В. Влияние турбулентной тропосферы на разрешающую способность антенны судового радиолокатора по угловым координатам // Судовождение: Сб. научн. трудов / НУ «ОМА», Вып.26. Одесса: «ИздатИнформ», 2016. С.104-109.

61. Корбан Д. В. Использование поляризации электромагнитной волны при радиолокационном распознавании объектов / Д. В. Корбан, В. Х. Корбан, Л. М. Дегтярьова // Наукові праці ОНАЗ, ім. О.С. Попова. 2017. №1. С.75-82.

62. Путятин В. Г. Радиофизическая модель отражающего объема тропосферы / В. Г. Путятин, Д. В. Корбан, С. И. Заичко и др. // Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2017. Т.19. №3. С.42-52.

63. Корбан Д. В. Принцип взаимности применительно к поляризационным свойствам антенны судового радиолокационного поляриметра / Д. В. Корбан // Матеріали наук.-методичної конференції: «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві» (19-20 листопада 2015р.), Одеса, 2015. С.151.

64. Корбан Д. В. Шестикомпонентний поляризаційний роздільник всеполяризованої антени з керуванням поляризації електромагнітної хвилі на випромінювання / Д. В. Корбан // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА», Вип. 33. Одеса: Е 89 «ВидавІнформ», 2022. С. 79-90. DOI: 10.31653/2306-5761.33.2022.67-78

65. Корбан Д. В. Радиолокационный поляриметрический комплекс в экологическом мониторинге / Д. В. Корбан, Л. Н. Дегтярева, В. Х. Корбан // Матеріали IX Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф.: «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в

умовах глобалізації» (3-4 грудня 2015р.): Зб.наук. праць. Переяслав-Хмельницький, 2015. Вип.9. С.17-18.

66. Спосіб підвищення ефективності виявлення та супроводження надводних цілей навігаційною радіолокаційною станцією незалежно від стану морської поверхні: Пат. 119985 Україна: МПК(2017.01), 13/00, 13/66 (2006.01), 7/12 (2006.01) № u2016 10623; заявл. 21.10.2016; опубл. 25.10.2017, Бюл. №20.

67. Розроблення адаптивних систем захисту радіолокаторів різного призначення від завад: звіт про наук.-техн. роботу / ХНУРЕ; кер. Д. І. Леховицький. Харків, 2015. 276 с.

68. Koshevyy V. M. Synthesis of Waveform-Filter Pairs Under Additional Constraints With Group-Complementary Properties / V. M. Koshevyy // IEEE International Radar Conference RadarCon-2015: int. conf., 10–15 May 2015, Arlington, USA: proc. Arlington, 2015. Pp. 616–621.

69. Barton David K. Radar Equations for Modern Radar. Boston, London: Artech House, 2013. 428 p.

70. Daki O., Nguen Van Huu, Pavlikov V., Sobkolov A., Tymoschuk O. Imaging by aerospace radar systems with active aperture synthesis, Telecommunications and Radio Engineering, 2019. Vol. 78, N. 14. Pp. 1233-1247.
DOI: https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i14.20

71. Кузнєцов О. Л. Розрізнення за шляховою дальністю РЛС з синтезованою антеною решіткою в умовах впливу неоднорідностей атмосфери / О. Л. Кузнєцов, О. В. Коломійцев і ін. // Збірник наукових праць ХНУПС. 2017, №2(51). С. 130-133.

72. Пиза Д. М. П32 Проектирование радиолокационных систем [Електронний ресурс]: монография / Д. М. Пиза, Д. С. Семенов, Т. И. Бугрова; под. общей ред. Д. М. Пизы. Електрон. дані. Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. ISBN 978-617-529-158-0

73. Горобцов А. П. Сопоставление судовых радаров, работающих в S-, X-, K-диапазонах / А. П. Горобцов, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Вестник Гос. университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2018. № 5(51). С. 1087-1093. DOI: https://doi.org/10.21821/2309-5180-2018-10-5-1087-1093

74. Воробей В. И. Судовые навигационные радиолокационные станции /

В. И. Воробей, В. В. Доронин, Р. А. Роднянский. К.: КГАВТ, 2005. 76 с.

75. Корбан Д. В. Структура побудови сучасного суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу // Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 91) » / Збірник тез доповідей: випуск 91 (м. Тернопіль, Україна-м. Ополе, Польща, 10-11 вересня 2024 р.). Тернопіль. 2024. С.121-123.

76. 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.

77. Lee J. S., Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics toapplications. CRC Press. 2009.

78. Cloude S., Polarisation: applications in remote sensing. Oxford University Press. 2009.

79. Демиденко П. П. Судовые радиолокационные и радионавигационные системы / П. П. Демиденко. Одесса: «Феникс», 2009. 372 с.

80. Вагущенко В. В. Судовые навигационные информационные системы / В. В. Вагущенко. Одесса: «Феникс», 2004. 302 с.

81. Трофименко І. В. Визначення перспективних напрямків розвитку навігаційного забезпечення судноводіння з використанням радіолокаційних систем // Новітні технології, 2017. №. 2. С. 29-42.

82. Бень А. П. Особливості побудови сучасних високоточних інтелектуальних систем управління рухом морських суден / А. П. Бень, І. В. Паламарчук // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. - ХДМА, № 1 (14), 2016. С. 4-10.

83. Principles of Modern Radar. Radar applications / Ed. by J. A. Scheer, W. L. Melvin. Edison, NJ: Scitech publishing, 2013. 816 p.

84. Principles of Modern Radar. Advanced techniques / Ed. by W. L. Melvin, J. A. Scheer. Edison, NJ: Scitech publishing, 2012. 600 p.

85.Dzvonkovskaya A. WERA HF Ocean radar performance during severe storm Xaver / A. Dzvonkovskaya, T. Helzel // International Radar Symposium IRS-2015: int. conf., 24-26 June 2015, Dresden, Germany: proc. Dresden, 2015. Pp. 846-851.

86. Koshevyy V. M. Synthesis of Composite Biphasic Signals for continuous Wave Radar / V. M. Koshevyy, I. V. Koshevyy, D. O. Dolzhenko // Information, Communication and Environment / Ed. by A. Weintrit, T. Neumann. Ch. 1.5: CRC Press, 2015.

87. Koshevyy V. M. Spatial Processing Based on Ship's Antenna Array 195 with minimum quantity of Controlling Elements / V. M. Koshevyy, A. A. Shershnova // Судовождение, 2015. № 25. С.113-120.

88. Richard Klemm. Novel Radar Technicues and Applications. Volume 1: Real Aperture Array Radar, Imaging. 2018. 924 p.

89. William L. Melvin. Principles of Modern Radar. / James A. Scheer. - SciTech Publishing. 2014. 797 p.

90. Nagel D. Detection of rain areas with airborne radar / D. Nagel // 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. Pp. 1-7. https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008094.

91. Averyanova Y. Segregating deformation of scattering r ain-drops using several receive antennas with different polarization angles / Y. Averyanova, A. Rudikova, F. Yanovsky // 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. Pp. 1-6. https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008260.

92.Bole A. G. Radar and ARPA Manual: Radar, AIS and Target Tracking for Marine Radar Users (3rd edition) / A.G. Bole, Alan D. Wall, Andy Norris. Oxford, United Kingdom: Elsevier Science & Technology, 2014. 552 p.

93. Cavalli R. Operational experience with the new generation of Swiss radars. COST 75, 1999, Pp. 159-164.

94. Богом'я В. І. Математична модель функціональних систем суднового обладнання / О. І. Стадник, О. О. Коваль, В. І. Богом'я // Системи обробки інформації. Х.: Харківський університет повітряних сил імені Івана Кожедуба, 2015. Вип. 1(126). С.102-105.

95. Богом'я В. І. Навігаційне забезпечення управління рухом суден / В. І. Богомья, В. С. Давидов, В. В. Доронін, Д. П. Пашков, І. В. Тихонов - К.: ДВВП «Компас». 2012. 336 с.

96. Шапран Ю. Є., Трофименко І. В. Метод статистичного оцінювання та

прогнозування параметра потоку відмов агрегатів системи автоматичного керування суднових комплексів за даними експлуатаційних спостережень / Ю. Є. Шапран, І. В. Трофименко // Стандартизація, сертифікація, якість. Х.: ДП «УкрНДНЦ», 2017. Вип. 1 (104). С.52-56.

97.Мусорин А. А. Анализ методов прогнозирования для определения технических параметров судового оборудования / А. А. Мусорин, Ю. Э. Шапран, І. В. Трофименко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy, 2017. №2. С.115-119.

98. Тимощук О. М. Функція невизначеності двоантенних радіометрічних комплексів / О. М. Тимощук, Ю. Э. Шапран, І. В. Трофименко // Стандартизація, сертифікація, якість. Х.: ДП «УкрНДНЦ», 2017. Вип. 2 (105). С.79-84.

99. Мусорин О. О., Шапран Ю. Є., Трофименко І. В. Особливості аналітичного забезпечення експлуатації суден у сучасних умовах / О. О. Мусорин, Ю. Є. Шапран., І. В. Трофименко // Наукові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку. 2017. №1(45). С.117-121.

100. Радіолокація: Програмний комплекс розрахунку діаграми зворотного розсіювання: навч. посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / В. А. Головін, Т. В. Романенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 84 с.

101. Korablev A.Y. Criteria for evaluation of methods to distinguish targets and geophysical objects on the basis for various polarization parameters. IRCTR-S-011-03, Delft, Netherlands, 2003, Pp. 9-11.

102. Коновець В. І. Шляхи підвищення проінформованості про морську обстановку за рахунок інтеграції корабельних навігаційних РЛС в систему висвітлення надводної обстановки / В. І. Коновець, Н. Б. Смиринська // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2020. № 4(66). С. 71-78. https://doi.org/10.30748/zhups.2020.66.10.

103. Аппаратно-программный комплекс для испытаний загоризонтных радиолокационных станций с использованием метода автоматического пассивного обзора воздушного пространства / С. А. Сорокин, С. С. Свердлов, Ю. С. Кучеров, В. А. Собчук // Вопросы радиоэлектроники, 2018. № 5. С. 17-23.

https://doi.org/10.21778/2218-5453-2018-5-17-23.

104. Савицкий Е. В. Модуль имитации целевой и помеховой обстановки для испытаний радиолокационных станций / Е. В. Савицкий // Сборник материалов 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов “Радиотехника и электроника”. Минск, 23-27 апреля 2018 г. С. 103.

105. Імітатор повітряно-завадової обстановки з використанням системи “Віраж-РД” для оглядових аналогових радіолокаційних станцій / О. А. Малишев, М. Р. Арасланов, С. В. І інш. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2020. № 4(41). С. 112-124. https://doi.org/10.30748/nitps.2020.41.14.

106. Имитатор сигналов для индикатора кругового обзора "Пикет" / И. В. Цевух, А. Н. Шейк-Сейкин, А. В. Садченко и др. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2017. № 3. С. 19-23. https://doi:10.15222/TKEA2017.3.19.

107. Гризо А. А. Удосконалення вторинної обробки радіолокаційної інформації в РЛС 19Ж6 / А. А. Гризо, І. М. Невмержицький, В. В. Монастирний // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2017. № 1(26). С. 78-81. https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.16.

108. Зниження точності вимірювання частоти пачки радіоімпульсів внаслідок впливу умов її поширення і відбиття / В. Д. Карлов, О. Л. Кузнєцов, А. М. Артеменко, А. Д. Карлов // Системи управління, навігації та зв'язку, 2019. - № 4(56). С. 130-134. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.4.130.

109. Камалтинов Г. Г. Тенденції розвитку радіолокаційних засобів контролю повітряного простору / Г. Г. Камалтинов, О. М. Колеснік // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 2020. № 2(64). С. 89-95. https://doi.org/10.30748/zhups.2020.64.13.

110. Климченко В. И. Структура приемо - передающего тракта защищенного от пассивных помех радиолокатора с низкостабильными генераторными приборами / В. И. Климченко, А. В. Очкуренко // Системи управління, навігації та зв'язку. К.: ЦНДІ НУ, 2008. № 1(5). С. 59-64.

111. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВіЦ, 2000. 428 с.

112. Коритцев І. В. Обробка сигналів при пеленгації та визначенні дальності до середньорозмірних БПЛА в радіолокаційному діапазоні / І. В. Коритцев, С. А. Шейко, В. М. Карташов та ін. // Радіотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2020. Вип. 2020. С. 125-134.

113. Борзов А.Б. Цифровое моделирование систем ближней радиолокации от сложных радиолокационных схем / А. Б. Борзов, А. В. Соколов, В. Б. Сучков // Радиотехника. №4 С. 22-48.

114. Moroz A. Improvement of Mishchenko`s T-matrix code for absorbing particles// Applied Opries. 2005. Vol. 44. Pp. 3604-3609.

115. Wan CC, Ma LX The influence of host medium absorption on polarized radiation transport in dispersed media // Application Opt. Sep 10, 2019; 58(26): 7157-7164. DOI: 10.1364/AO.58.007157

116. Mishchenko M., Dlugacz J. M Multiple scattering of polarized light by particles in an absorbing medium // Application Option . June 20, 2019; 58(18): 4871-4877. https://doi.org/10.1364/ao.58.004871

117. Mishchenko M., Yurkin M., Cairns B. Scattering of a damped inhomogeneous plane wave on a particle in a weakly absorbing medium // OSA Contin. Aug 15, 2019; 2(8): 2362-2368. DOI:10.1364/OSAC.2.002362

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

119. Корбан Д. В. Использование матрицы когерентности частично поляризованной волны для повышения эффективности радиолокационного наблюдения объектов / Д. В. Корбан, А. Н. Волков, Л. М. Дегтярьова // «Цифрові технології» ОНАЗ ім. О. С. Попова, Одеса, № 23, 2018. С.131-142.

120. Korban D. Implementing the coherence matrix of the partially polarized wave to enhance efficiency of radar observation of the objects / D Korban, O Volkov, P Kostenko, L Degtyareva // Marine intellectual technologies № 3 part 1, 2020. p.187-196.

121. Мальцев В. В. Подход к моделированию радиолокационных сигналов,

отраженных от объектов сложной пространственной конфигурации / В. В. Мальцев, И. В. Сисигин, К. О. Колесников // Радиопромышленность, 2018. № 1. С. 42-49.

122. Атаманюк В. В. Моделювання полів розсіювання розподілених радіолокаційних об'єктів і сцен / В. В. Атаманюк // Науковий вісник НЛТУ України. 2015. Вип.25.8. С.299-306. DOI: https://doi.org/10.15421/40250852

123. Разработка математической модели системы пространственно-временной обработки сигналов на фоне шумовых излучений и мешающих отражений и исследовательской программы для оценки их эффективности в РЛС с АФАР: отчет о науч.-иссл. работе / ХНУРЭ; рук. Д. И. Леховицкий. Харьков, 2015. 404 с.

124. Lekhovytskiy D. I. Statistical analysis of «superresolving» methods for direction-of-arrival estimation of noise radiation sources under finite size of training sample / D.I. Lekhovytskiy, Y. S. Shifrin // Signal Processing. Special Issue, 2013. Vol. 93, №12. Pp. 3382-3399.

125. Rachkov D. S. Lattice implementation of «superresolving» methods for meteorological objects spectra estimation / D. S. Rachkov, D. I. Lekhovytskiy, A. V. Semeniaka, B. M. Vovshin, U. U. Laurukevich // International Radar Symposium IRS-2014: int. conf., 16–18 June 2014, Gdansk, Poland: proc. Gdansk, 2014. Pp. 35-38.

126. Rachkov D. S. Estimation of meteorological objects energy spectra in pulse Doppler weather radar / D. S. Rachkov, D. I. Lekhovytskiy, A.V. Semeniaka [et al.] // International Radar Symposium IRS-2013: int. conf., 18-21 June 2013, Dresden, Germany: proc. Dresden, 2013. Vol. 2. Pp. 811-817.

127. Rachkov D. S. Lattice – filter - based ground clutter canceller for pulse Doppler weather radar / D. S. Rachkov, D. I. Lekhovytskiy, A. V. Semeniaka, V. P. Riabukha, D.V. Atamanskiy // International Radar Symposium IRS-2014: int. conf., 16-18 June 2014, Gdansk, Poland: proc. Gdansk, 2014. P. 215.

128. Lekhovytskiy D. I. Combining target detection against the background of jamming signals and jamming signal DOA estimation / D. I. Lekhovytskiy, D. V. Atamanskiy, V. P. Riabukha, D. S. Rachkov, A. V. Semeniaka // International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT-2015: X int. conf., 21-24 Apr. 2015, Kharkiv, Ukraine: proc. Kharkiv, 2015. Pp. 1-5.

129. Zalevsky G. S. Method of Radar Detection and Identification of Metal and Dielectric Objects with Resonant Sizes Located in Dielectric Medium / G. S. Zalevsky, A. V. Muzychenko, O. I Sukharevsky // Radioelectronics and Communications Systems, 2012. Vol. 55. № 9. Pp. 393-404.

130. Watts, S. A. New method for modeling coherent maritime interference. In Proceedings of the 2011 IEEE RadarCon (RADAR) Conference, Kansas City, Missouri, USA, May 23-27, 2011; IEEE: Piscataway, New Jersey, USA, 2011. C. 52-57.

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

132. Корбан Д. В. Виявлення і розпізнавання поляризаційних сигналів навігаційних об'єктів при наявності нормальних частково поляризованих перешкод / Д. В. Корбан // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку морської галузі, підвищення ефективності та безпеки судноплавства» 23 квітня 2021. Маріуполь: АМІ НУ «ОМА», 2021. С.28-37.

133. Корбан Д. В. Радіолокаційні методи поляризаційної селекції морських об’єктів: Монографія Одеса: НУ «ОМА», 2024. 155 с

134. Korban, D. Radarbased detection and recognition methodology of autonomous surface vehicles in challenging marine environment / D. Korban, O. Melnyk, O. Onishchenko, et al. // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2024, 122, 111-127. ISSN: 0209-3324. DOI: https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.122.7.

135. Barton David K. Radar system analysis and modeling. Boston, London: Artech House, 2005. 545 p.

136. Kulemin .G. P. Millimeter - Wave Radar Targets and Clutter. - Boston, London: Artech House, 2003. 410p.

137. Дикуль О. Д. Распознавание целей по результатам радиолокационных измерений в сложной помеховой обстановке / О. Д. Дикуль, А. А. Лучин, Е. Ю. Труфанов и др. // Радиотехника, 2005. №11. С.34-39.

138. Обнаружение аэродинамических целей в условиях шумовых и пассивных

помех с широким доплеровским спектром / В. Д. Карлов, И. Г. Леонов, А. Е. Присяжный, О. Я. Луковский // Системи обробки інформації, 2006. № 9(58). С. 34-36.

139. Корбан Д. В. Поляризаційний метод радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів / Д. В. Корбан // Матеріали міжнародної наук. інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 56)» / Збірник тез доповідей: випуск 56 (м. Тернопіль, 11 березня 2021 р.). Тернопіль, 2021. С.73-75.

140. Корбан Д. В. Методи та засоби дистанційного виявлення та розпізнавання навігаційних об'єктів на траєкторії руху судна у складних умовах атмосферного середовища / Д. В. Корбан // Матеріали міжнародної наук. інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 57)» / Збірник тез доповідей: випуск 57 (м. Тернопіль, 13 квітня 2021 р.). Тернопіль, 2021. С.65-66.

141. Корбан Д. В. Обґрунтування поляризаційного методу радіолокаційного вимірювання характеристик розсіювання морського об'єкта / Д. В. Корбан // Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 66)» / Зб. тез доповідей: випуск 66 (м. Тернопіль, 6-7 квітня 2022 р.). Тернопіль, 2022. С.73-75.

142. Корбан Д. В. Моделювання електромагнітного поля поляризаційної структури складного об’єкту // Матеріали XVI Міжнародної наук.-практич. конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2025» 28-30 травня 2025 р. м.Одеса. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2025. С.159-162.

143. Влияние неоднородностей рельефа позиции радиолокационной станции на эффективность подавления внешней помехи при локации надводных целей / В. Д. Карлов, Н. Н. Минервин, Н. Н. Петрушенко, Е. В. Лукашук // Системи управління навігації та зв’язку, 2008. № 4(8). С. 34-36.

144. К вопросу о измерении доплеровской частоты сигнала отраженного от цели лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем / В. Д. Карлов, А. П. Кондратенко, А. К. Шейгас, Ю. Б. Ситник // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2014. № 1(14). С. 115-117.

145. Корбан В. Х. Поляризаційна селекція хмар і опадів / В. Х. Корбан. Одеса: «Евен», 2004. С.248.

146. Радиометеорология. М. : Военное издательство, 1984. 208 с.

147. Корбан Д. В. Шляхи удосконалення суднових радіолокаційних систем / Д. В. Корбан, Л. Н. Дегтярева // Матеріали 75-ої наук-техн. конф. професорсько-виклад. складу, науковців, аспірантів та студентів (11-15 грудня 2020 р.), м. Одеса, Україна, ОНАЗ, 2020. С.14-17.

148. Корбан Д. В. Сучасний розвиток суднових радіолокаційних систем / Д. В. Корбан // Матеріали міжнародної наук. інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 55)» / Збірник тез доповідей: випуск 55 (м. Тернопіль, 9 лютого 2021 р.). Тернопіль, 2021. С.81-83.

149. Korban D. V. Polarization selection of navigation objects located in the zone of atmospheric formations / D. V. Korban // Судноводіння / Shipping & Navigation ISSN 2306-5761 | 2618-0073 32-2021 Н У«ОМА» 56 UDC 551.508.85 (551.576 +551.577) DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021. С.56-70.

150. Корбан Д. В. Радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів у складних умовах атмосферного середовища з використанням поляризаційної селекції луна-сигналів / Д. В. Корбан, І. О. Бурмака. // Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. К.: ДУІТ, 2024. Випуск 1(39). С. 35-48 https://doi.org/ 10.33298/2226-8553.2024.1.39.04.

151. Korban D. (2023) Polarization method of navigation object selection in ship radar systems. // Scientific Journal of the Maritime University of Szczecin, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie 746 (148). 17-22.

152. Климченко В. И. Структура приемо-передающего тракта защищенного от пассивных помех радиолокатора с низкостабильными генераторными приборами / В. И. Климченко, А. В. Очкуренко // Системи управління, навігації та зв'язку. К.: ЦНДІ НУ, 2008. № 1(5). С. 59-64.

153. Akinshin N. S., Varenitsa Yu. I. and Khomyakov K. A. Sovmestnaya otsenka koordinatnykh i polyarizatsionnykh parametrov radiolokatsionnykh obektov [Joint

estimation of coordinate and polarization parameters of radar objects]. Izv. TulGU. Ser. Tekhnicheskiye nauki, 2016. Vol. 2. Pp. 3-14.

154. Сухаревский О. И. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами : монография / О. И. Сухаревский и др.; под ред. О. И. Сухаревского. Харьков: ХУ ВС, 2009. 468 с.

155. Nechitaylo S. V., Orlenko V. M., Sukharevsky O. I., Vasilets V. A. Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects. Boca Raton, USA: SRC Press Taylor & Francis Group, 2014. 334 p.

156. Бень А. П. принципи побудови систем підтримки прийняття рішень судноводія / А. П. Бень // Сучасні інформаційні та іноваційні технології на транспорті VINTT-2010): матеріали другої наук.-практ. Конф. (Херсон, 25-27 травня 2010 р.). Херсон. ХДМА. Т.1. С.8-11.

157. 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. P. 78-87.

158. 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, 2019. Vol.22, №02. Pp. 86-95.

159. Beyer S., Fleuth U, Mâhner K., Schleiermacher C. Aims and advantages: a new generation of distributed radar acquisition and control systems (DIRAC). COST 75, 1999. Pp. 221-228.

160. 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.

161. 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.

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

163. Бєлавін О. В. Світові тенденції розвитку радіолокаційних засобів контролю повітряного простору / О. В. Бєлавін, В. Й. Климченко, Г. Г. Камалтинов, О. С. Маляренко // Наука і оборона, 2015. № 1. С. 48-54.

164. Корбан Д. В. Підвищення інформаційної ефективності суднових радіолокаційних комплексів / Д. В. Корбан // Матеріали міжнародної наукової інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 50)» / Збірник тез доповідей: випуск 50 (м. Тернопіль, 8 липня 2020 р.). Тернопіль, 2020. С.58-59.

165. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 139439 Україна. Докторська дисертація «Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів» / Д. В. Корбан ; заявник та правовласник Д. В. Корбан. - реєстр. 15.09.2025.

166. Xining Yu An Implementation of Real - Time Phased Array Radar Fundamental Functions on DSP-Focused, High Performance Embedded Computing Platform. 2016. Aerospace, Volume 3, Issue 3.

167. Wörhoff L., Beyer S., Mähner K. The Distributed Radar Data Acquisition and Control System (DIRAC) - A new Generation of Multi-Controller Networks Running an Open Radar Control Software. *30th International Conference on Radar Meteorology*. 2001. Pp. 242–245.

168. Модель дискретного радиолокационного канала с рассеиванием по времени и частоте / И. Г. Леонов, А. Н. Коржов, Р. Н. Животовский, А. А. Радюков // Сб. научн. тр. ЦНИИ ВВТ ВС Украины, вип. 1(52). К., 2014. С. 189-195.

169. Ponsford A. M. Radars for Maritime Domain Awareness / A. M. Ponsford // Conference “Military Radar Summit, Arling- ton (VA)”. Virginia, February 2015. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3961.7687 .

170. Корбан Д. В. Розпізнавання навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні випадних опадів, судновими РЛС з використанням ступеня поляризації відбитої хвилі /Д. В. Корбан // Матеріали Першої Міжнародної наук.-практич. конф.

«Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2022)» 7 грудня 2022 року Херсон: Херсонська державна морська академія, 2022. С.90-93.

171. Корбан Д. В. Поляризаційні вимірювання луна-сигналів частково поляризованих хвиль складних об'єктів судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом / Д. В. Корбан // Судноводіння | Shipping & Navigation ISSN 2306-5761 | 2618-0073 36-2024 НУ «ОМА» 56 UDC 551.508.85 (551.576 +551.577) DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024. С.77-85.

172. Методи безпечної обробки інформації у багатопозиційних системах радіолокації монографія / І. Пархомей, В. Козловский, С. Гнатюк, М. Рябий; Національний авіаційний університет., Київ: Центр учбової літератури, 2018. 230 с.

173. Чесановський І. І. Підвищення завадостійкості обробки сигналів в некогерентних радіолокаційних системах / І. І. Чесановський, А. В. Іванов, І. В. Гурман // Вісник НТУУ КПІ. Радіотехніка, радіоапаратобудування: збірник наукових праць,2013.№ 54. С.68–74. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7174.

174. Омельяненко М. Ю. Хохановская, Ю. А. Широкополосный p-i-n диодный переключатель 8-миллиметрового диапазона с малыми потерями для радиометра Дайка / Ю. А. Хохановская, М. Ю. Омельяненко // Вісник НТУУ КПІ. Радіотехніка, радіоапаратобудування: збірник наукових праць, 2019. Вип. 76. С. 58-62. https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.76.58-62

175. Корбан В. Х. Многофункциональный метеорологический радар / Д. В. Корбан, Л. М. Дегтярьова, В. Х. Корбан // Цифрові технології ОНАЗ, ім. О.С. Попова, 2016. №20. С.118-127.

176. Корбан Д. В. К возможности использования аффинного базиса в радиолокационных метеорологических поляриметрах / Д. В. Корбан, В. Х. Корбан, Л. М. Дегтярьова // «Цифрові технології» ОНАЗ ім. О. С. Попова, Одеса, № 21, 2017. С. 129-137.

177. Korban D. Parametric polarization radio - location method of improvement of radio-location observation of navigational objects against the background of natural hindrances / D Korban, O Volkov, P Kostenko // SEA - CONF 2018 4th INTERNATIONAL CONFERENCE. May 17th - 19th, 2018 Constanta. P. 91-99.

178. Корбан Д. В. Влияние атмосферных образований на точность измерения

угловых координат навигационных объектов / Д. В. Корбан // Матеріали науково-техн. конф.: «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека» 16.11.2017 - 17.11.2017. Одеса, НУОМА, 2017. С. 16-17.

179. Корбан Д. В. Использование судовой РЛС при проведении спасательных работ на море / Д. В. Корбан, Р. А. Иванов // Матеріали науково- техн. конф.: «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (16-17 листопада 2017). Одеса: НУОМА, 2017. С.151.

180. Korban, D., Melnyk, O., Kurdiuk, S., Onishchenko, O., Ocheretna, V., Shcherbina, O., Kotenko, O. (2024). Method of polarization selection of navigation objects in adverse weather conditions using statistical properties of radio signals, «System Research and Information Technologies, 2025(1), pp. 73-88.

181. Корбан Д. В. Вплив відбиттів від атмосферних утворень та водної поверхні на роботу суднової РЛС / Д. В. Корбан, Ю. В. Шевченко // Матеріали наук.-техн. конф. «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» 17.11.2020. Одеса: НУ ОМА, 2020. С.128-134.

182. Корбан Д. В. Поляризаційна селекція навігаційних об'єктів судновими РЛС / Д. В. Корбан // Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-21» 22-27 травня 2021р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2021. С. 122-124.

183. Корбан Д. В. Радіолокаційна відбиваність несферичних гідрометеорних частинок при повному прийомі / Д. В. Корбан // Матеріали міжнародної наук. інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 59)» / Збірник тез доповідей: випуск 59 (м. Тернопіль, 8 червня 2021 р.). Тернопіль, 2021. С. 100-101.

184. Корбан Д. В. Виявлення і відмінність поляризованих сигналів навігаційних об'єктів при наявності нормальних частково поляризованих перешкод / Д. В. Корбан // Матеріали Першої Міжнародної наук.-практич. конф. «Проблеми сталого розвитку

морської галузі PSDMI-2021» 3-5 листопада 2021р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2021. С. 189-192.

185. Korban D. Improving the efficiency of ship radar systems functioning / D. Korban // Materials International Conference on Science and Technology «Navigation, Shipping and Technology» NST November 18th November 19th 2021 Odessa, Ukraine: National University “OMA”, 2021. Pp. 77-80.

186. Корбан Д. В. Оптимізація рівнів електромагнітних випромінювань під час роботи суднової РЛС /Д. В. Корбан // Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 65) » / Збірник тез доповідей: випуск 65 (м.Тернопіль, 8-9лютого 2022 р.). Тернопіль, 2022. С. 66 –67.

187. Корбан Д. В. Селекція радіолокаційних сигналів навігаційних об'єктів, що знаходяться у зоні атмосферних утворень / Д. В. Корбан // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 24.03.2022 – 25.03.2022. Одеса: НУ "ОМА", 2022. С. 25-28.

188. Корбан Д. В. Проблема підвищення ефективності навігації у складних умовах атмосферного середовища при використанні суднових радіолокаційних комплексів / Д. В. Корбан //Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 67) » / Збірник тез доповідей: випуск 67 (м. Тернопіль, 11-12 травня 2022 р.).Тернопіль, 2022. С. 122-123.

189. Корбан Д. В. Поляризаційна модель складного об'єкта, що спостерігається судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом / Д. В. Корбан // Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 68)» / Зб. тез доповідей: випуск 68 (м. Тернопіль, 7-8 червня 2022 р.). Тернопіль, 2022. С. 83-85.

190. Корбан Д. В. Стратегія формування системи радіолокаційних сигналів, які базуються на їх поляризаційних параметрах / Д. В. Корбан // Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції«Інформаційне суспільство:

технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск71)» / Зб. тез доповідей: вип. 71 (м. Тернопіль, 18-19 жовтня 2022 р.). Тернопіль, 2022. С. 100-102.

191. Корбан Д. В. Ефективність використання кругової поляризації при радіолокаційному спостереженні навігаційних об'єктів /Д. В. Корбан, В.М. Абрамова // Матеріали наук.-техн. конф. судноводіння, морські перевезення та технології «NAVIGATION, SHIPPING AND TECHNOLOGY» NST-2022 з нагоди 50-ти річчя Морського Інституту Великобританії 17-18 листопада 2022 р., С. 103-105.

192. Корбан Д. В. Модель основного інформаційного потоку в судновому радіолокаційному поляризаційному комплексі / Д. В. Корбан // Матеріали XV Міжнародної науково-практична конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2023» 24–25 травня 2023 р. м.Херсон. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2023. С. 225-228.

193. Корбан Д. В., Бурмака І. О. Виявлення плавзасобів і людей у морській воді під час аварії судна з використанням неполяризованої хвилі // Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 86) » / Збірник тез доповідей: випуск 86 (м. Тернопіль, Україна Переворськ, Польща, 12-13 березня 2024 р.). Тернопіль, 2024. С. 102-105.

194. Корбан Д. В. Вплив морської поверхні на радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом //Матеріали XVI Міжнародної наук.-практич. конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2024» 29-31 травня 2024 р. м. Одеса. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2024. С. 225-228.

195. Корбан Д. В. Сучасні концепції підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів // Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 88) » / Збірник тез доповідей: випуск 88 (м. Тернопіль, Україна-Переворськ, Польща, 14-15 травня 2024 р.). Тернопіль. 2024. С. 150-152.

196. Korban D. The model of the main information flow in radar observation of objectsin difficult atmospheric conditions / D. Korban // The First International Symposium «Special Ships and Intelligent Systems 2023» on December 16-18, 2023 in Sanya, China.

197. Корбан Д. В. Матриця розповсюдження небезпечних атмосферних утворень / Д. В. Корбан, Я.К. Куценко // Матеріали наук.-техн. конф. судноводіння, морські перевезення та технології «NAVIGATION, SHIPPING AND TECHNOLOGY» NST-2022 з нагоди 50-ти річчя Морського Інституту Великобрітанії 17-18 листопада 2022 р., С. 110-112.

198. Поляризационная селекция в радиолокационном канале // Труды II Межведомственного совещания по вопросам поляризационной структуры радиосигналов, ТИРЭТ, 1971.

199. Обод І. І. Інформаційна модель систем спостереження повітряного простору / І. І. Обод, О. О. Стрельницький, В. А. Андрусевич. Х.: ХНУРЕ, 2015. 270 с.

200. Обод І. І. Інформаційна модель систем спостереження повітряного простору / І. І. Обод, О. П. Черних, В. В. Заволодько, О. Ю. Ткаченко // Системи обробки інформації, 2016. Вип. 5 (142). С. 35-37.

201. Сарычев В. А. Методы получения некогерентной информации о целях бортовыми РЛС / В. А. Сарычев, С. А. Грошев, А. А. Семенов // Зарубежная радиоэлектроника, 1991. №1.

202. Астанин Л. Ю. Методы и средства высокоинформативных радиолокационных измерений / Л. Ю. Астанин // Зарубежная радиоэлектроника, 1991. №1.

203. Черняк В. С. Обнаружение сигналов в многопозиционных радиолокационных системах // Радиотехника, 1993. №5.

204. Ким Ю. В. Сравнение стохастического и гарантированного подхода к оцениванию состояния динамических систем / Ю. В. Ким, А. И. Овсеевич, Ю. Н. Решетняк. // Известия АН Технический кибернет, 1992. №2

205. Корбан Д. В. Информационная технология синтеза поляризационного состояния электромагнитной волны при радиолокационном наблюдении навигационных объектов /Д. В. Корбан // Матеріали X наук.-практ. конф.: «Сучасні інформаційні та

інноваційні технології на транспорті» (MINTT-2018) (29-31 травня 2018 р.), Херсон, 2018. С. 121-123.

206. Корбан Д. В. Методології поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться у зоні атмосферних перешкод /Д. В. Корбан // Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 74) » / Зб. тез доповідей: випуск 74 (м. Тернопіль, Україна м. Переворськ, Польща 6-7 лютого 2023 р.). Тернопіль, 2023. С. 170-171.

207. Корбан Д.В. Визначення поляризаційних коефіцієнтів матриці Мюллера під час розв'язання задачі поляризаційної селекції об'єктів у морській радіолокації / Д.В. Корбан // Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 75) » / Зб. тез доповідей: випуск 75 (м. Тернопіль, Україна м. Переворськ, Польща 6-7 березня 2023 р.). Тернопіль, 2023. С. 107-108.

208. Корбан Д. В. Оптимальний статистичний синтез алгоритмів виявлення і розпізнавання сигналів навігаційного об’єкта при наявності частково поляризованої перешкоди від атмосферного утворення / Д. В. Корбан // Матеріали Міжнародної наук. інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 83) » / Збірник тез доповідей: випуск 83 (м. Тернопіль, Україна-Переворськ, Польща, 7-8 грудня 2023 р.). Тернопіль, 2023. С. 169-171.

209. Крылов Е. Перспективы развития радиолокационных станций вооружённых сил иностранных государств / Е. Крылов // Зарубежное военное обозрение, 2018. № 2. С. 37-40.

210. Yildirim Egemen. Development of an L Band Cylindrical Phased Array / Yildirim Egemen Ercil Erdinc // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham, MA, USA, 2013. Pp. 746-751.

211. Ryabov, K. (2019), “Bahatofunktsional′na radiolokatsiyna stantsiya AN / TPS-80” Ground/Air Task-Oriented Radar [Электронный ресурс] / К. Рябов. 2019. Режим доступу: http://integral-russia.ru/2019/06/24/mnogofunktsionalnaya-radiolokatsionnaya-stantsiya-an-tps-80-ground-air-task-oriented-radar/.

212. Тютюнник В. О. Перспективи впровадження кільцевих антенних решіток в РЛС виявленния повітряних та надводних цілей / В. О. Тютюнник, Г. Г. Камалтинов // Тези доповідей VII Міжнародній наук.-практ. конф. “Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки”. К.: ЦНДІ ОВТ, 2019. С. 329.

213. Vulpiani G., Marzano F. S., Chandrasekar V., Berne A ., Uijlenhoet R. Raindrop Size distribution estimation from S-band polarimetric radar using a regularized neural network. ERAD, 2006. Pp. 175-178.

214. Rico-Ramirez M. A., Cluckie I. D. Assessment o f polarimetric rain rate algorithms at C-band frequencies. ERAD, 2006. Pp. 221-224.

215. Spek, A., Unal, C., Dufournet, Y., Russchenberg, H., Moisseev D., Chandraekar, V. Retrieval of microphysical properties of snow using dual polarization spectral analysis: model and data analysis. ERAD, 2006. Pp. 264-267.

216. Baldini L., Gorguccil E., Chandrasekar V. Hydrometeor classification methodology for C-band polarimetric radars. ERAD, 2004. Pp. 62-65.

217. Корбан Д. В. Використання матриці когерентності при радіолокаційному спостереженні об'єктів / Д. В. Корбан // Матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 61) » / Збірник тез доповідей: випуск 61 (м. Тернопіль, 15 вересня 2021 р.). Тернопіль, 2021. С. 55-57.

218. Бабак В. П. Статистична обробка даних: Монографія / В. П. Бабак, А. Я. Білецький, П. О. Приставка, О. П. Приставка - К.: МІВВЦ, 2001. 388 с.

219. Прокопенко І. Г. Статистична обробка сигналів: навч. посіб. / І. Г. Прокопенко. К.: НАУ, 2011. 220 с.

220. Карташов М. В. Імовірність, процеси, статистика: посіб. / М. В. Карташов. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008. 494 с.

221. Васильєв В. М. Теорія ймовірностей в радіотехніці: підручник / В. М. Васильєв, С. Я. Жук. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 362 с.

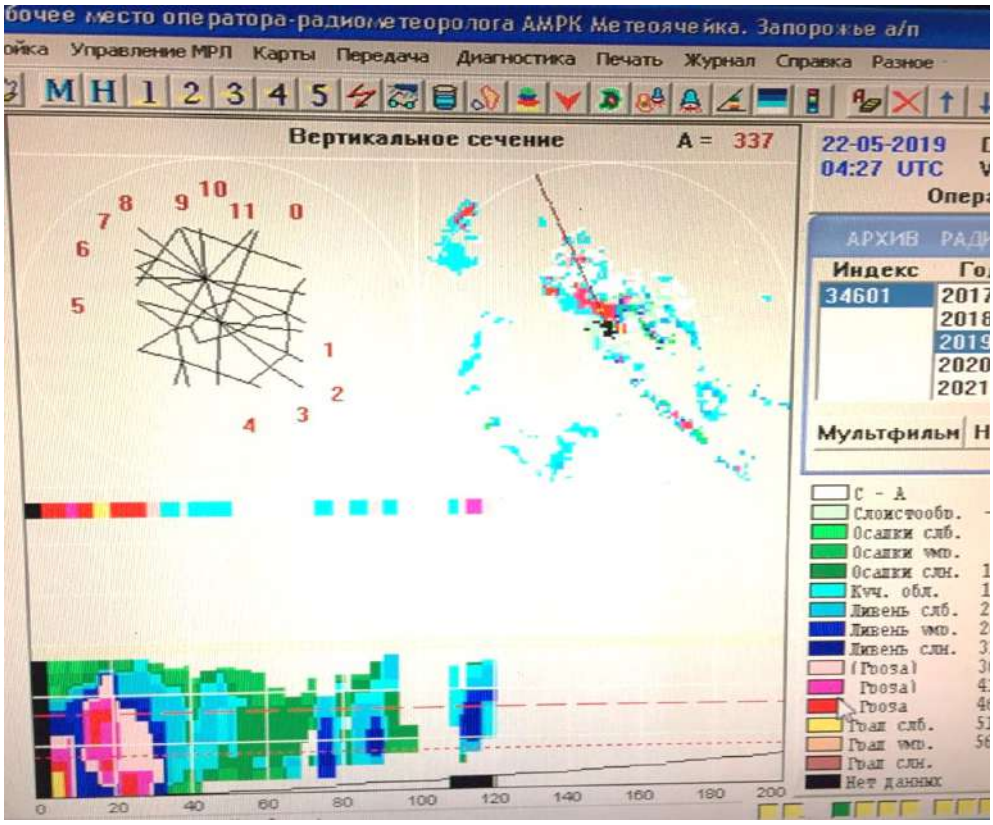
222. Довідник з математичної статистики з прикладами обчислень у MatLab: навч.-практ. посіб. Ч. 2 / О. О. Єгоршин, Л. М. Малярець, Б. В. Сінкевич. Харків: Вид. ХНЕУ, 2009. 508 с.

223. Мармоза А. Т. Теорія статистики. 2-ге вид. та доп. Київ «Центр учбової літератури», 2013. 592с.

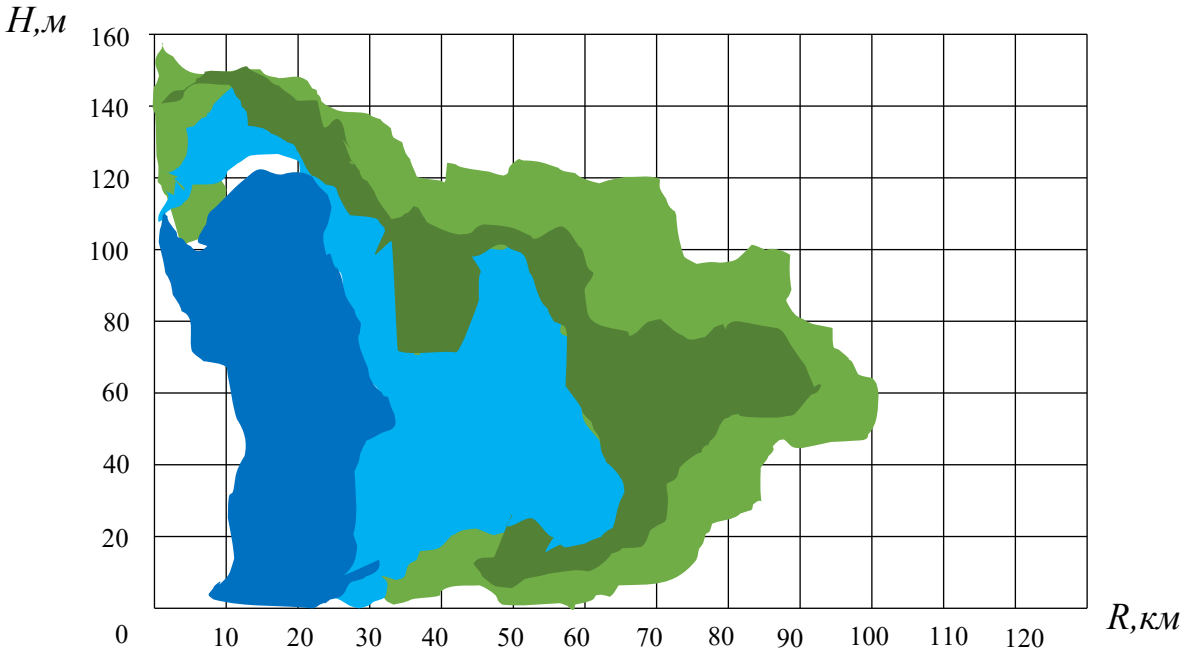
224. Корбан Д. В. Розроблення методології поляризаційної селекції навігаційних об’єктів, що перебувають в умовах атмосферних перешкод, з використанням ступеня поляризації електромагнітної хвилі // Матеріали Міжнародної наук. інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 81) » / Збірник тез доповідей: випуск 81 (м. Тернопіль, Україна-м. Ополе, Польща, 11-12 жовтня 2023 р.). Тернопіль. 2024. С. 89-90.

Додаток А

РЕЗУЛЬТАТИ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ АТМОСФЕРНИХ ЯВИЩ, ПРЕДСТАВЛЕНИХ НА ДИСПЛЕЇ АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» І НА ДИСПЛЕЇ СРПК

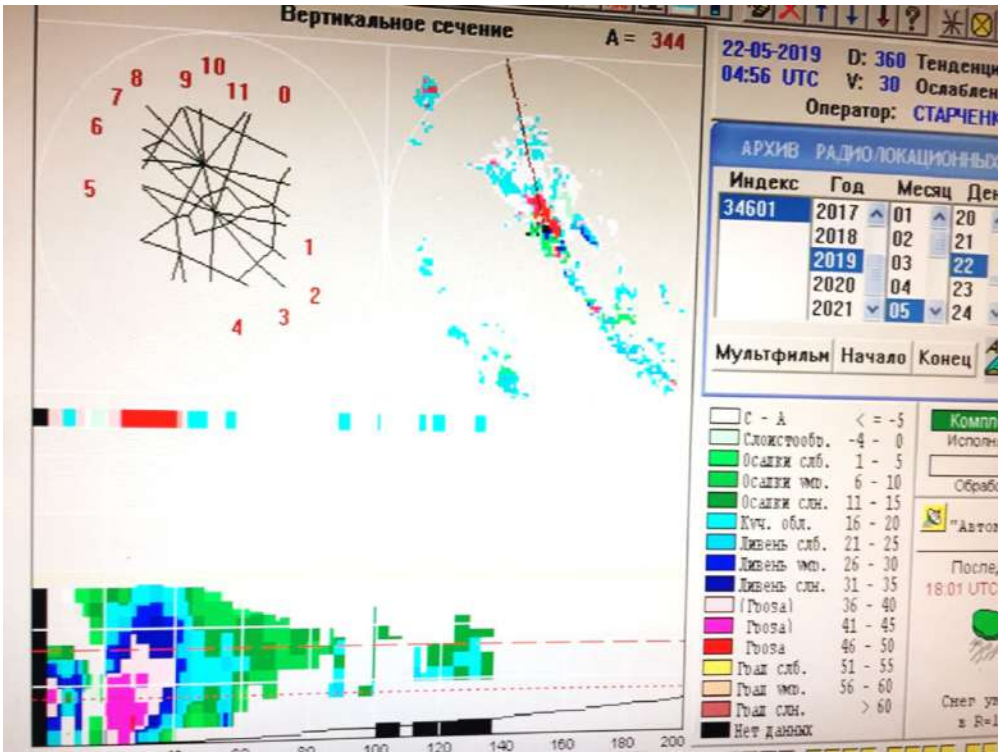


а)

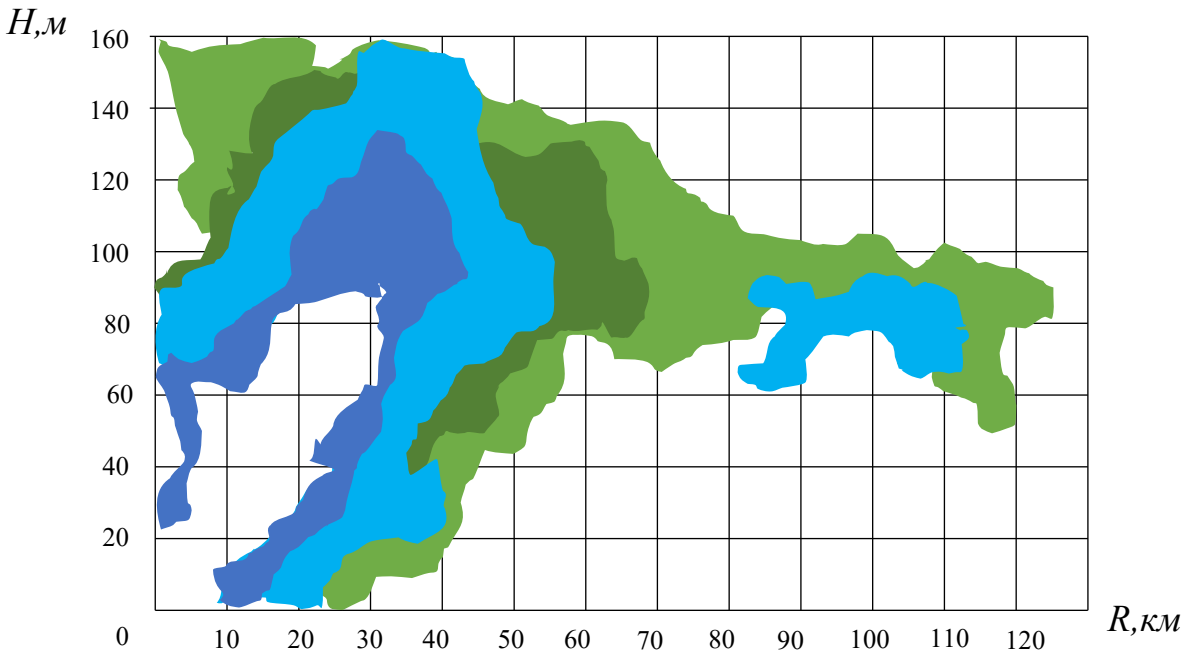


б)

Рис.А.1 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 337°

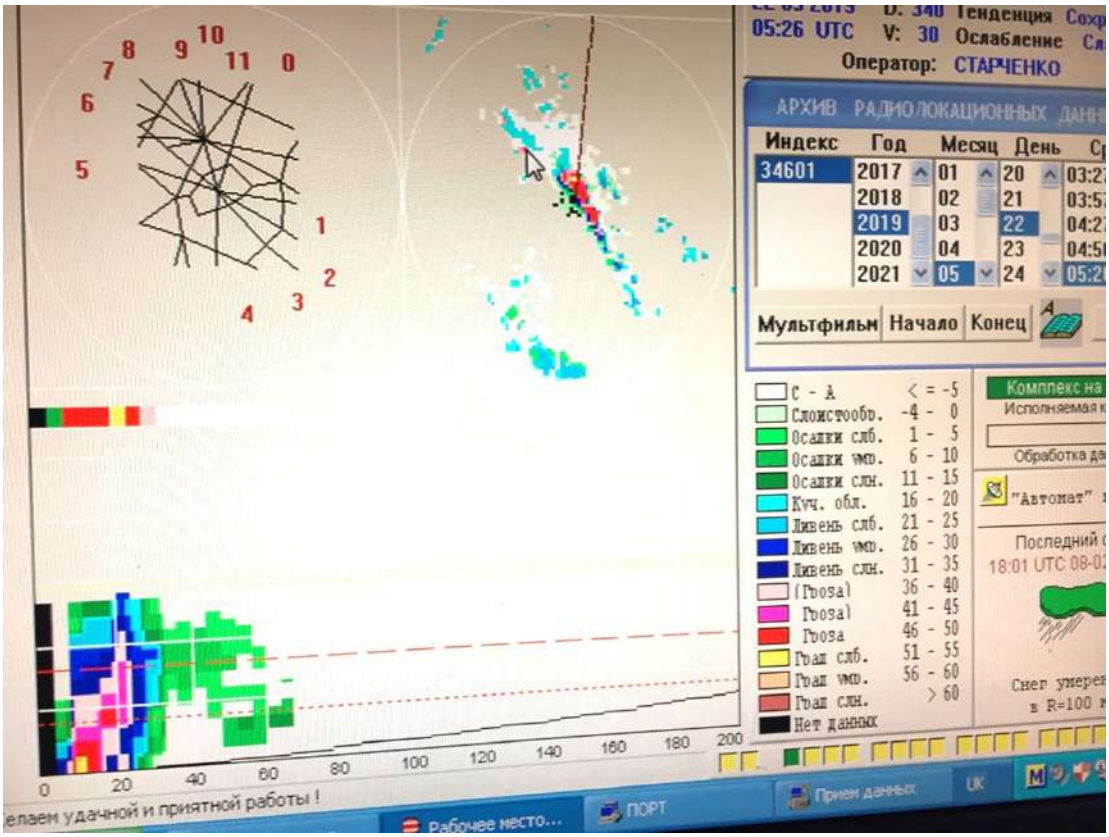


а)

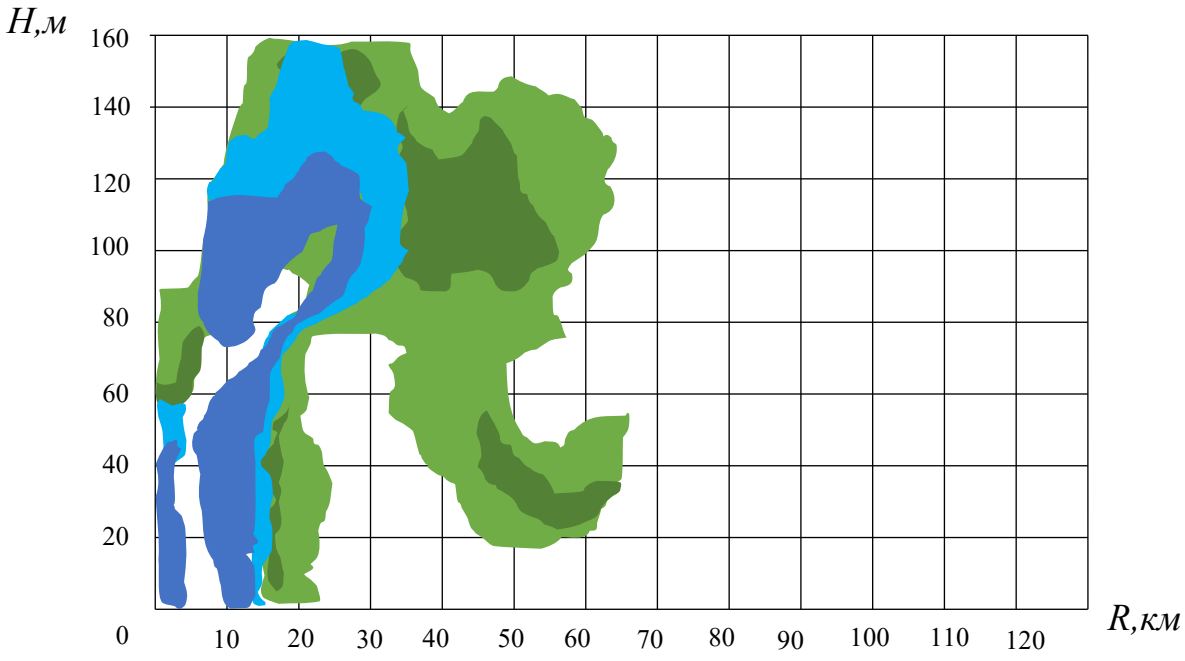


б)

Рис.А.2 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 344°

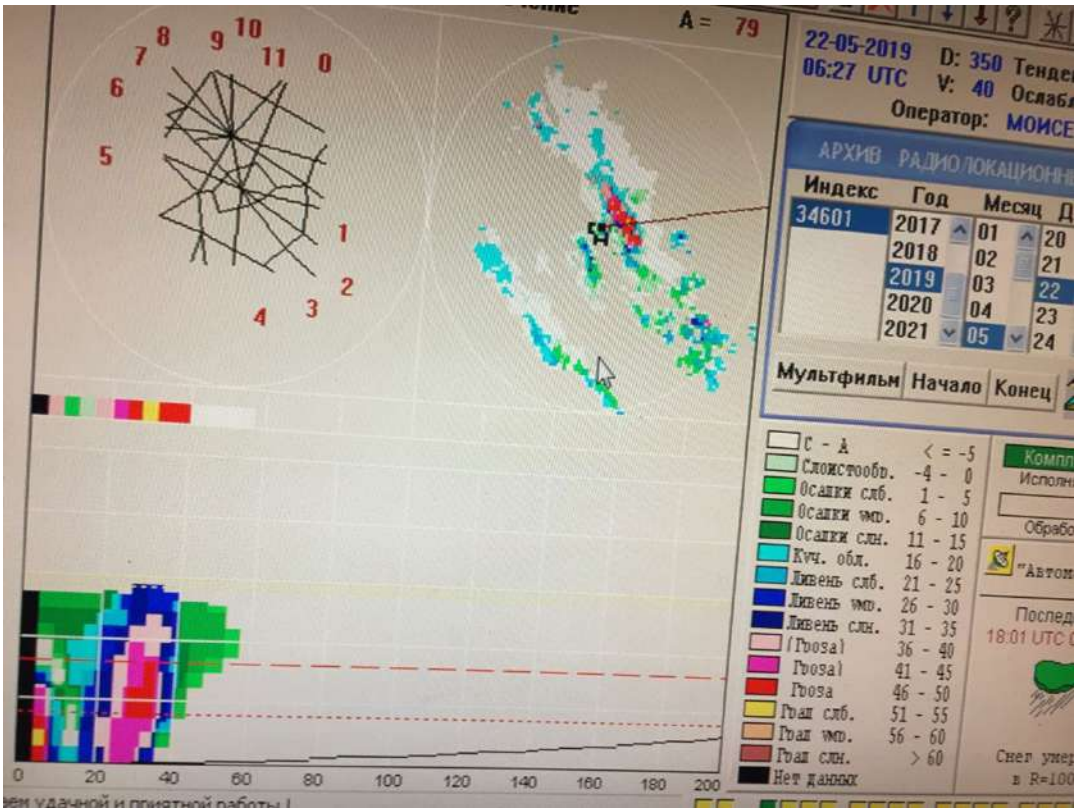


а)

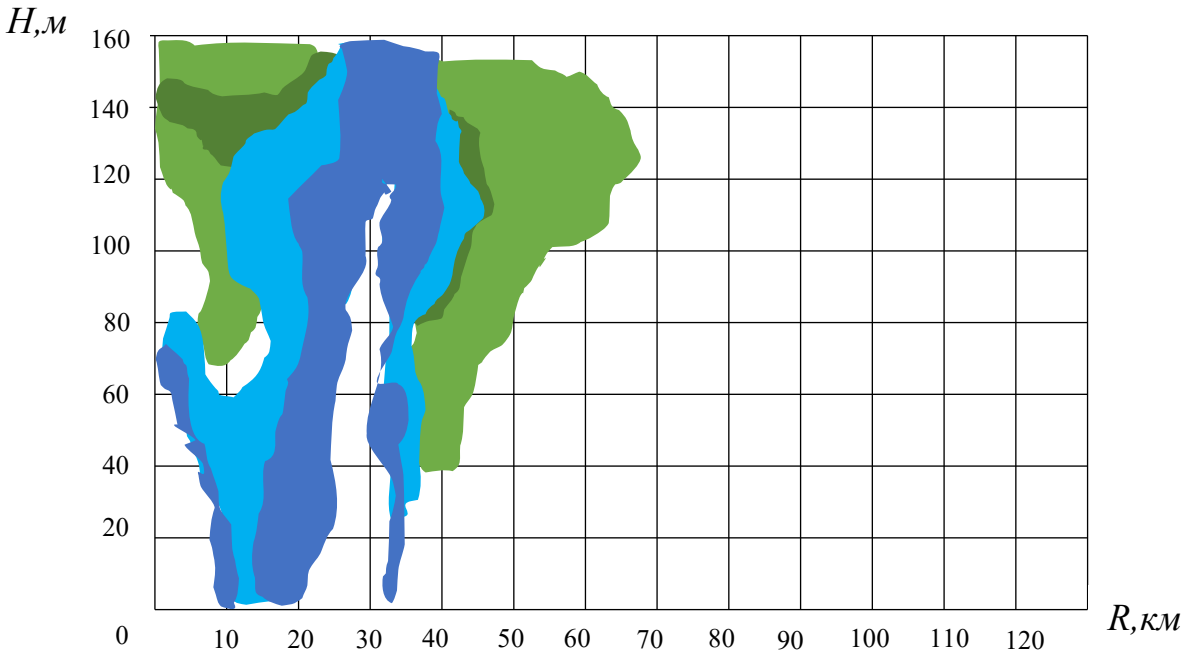


б)

Рис.А.3 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 008°

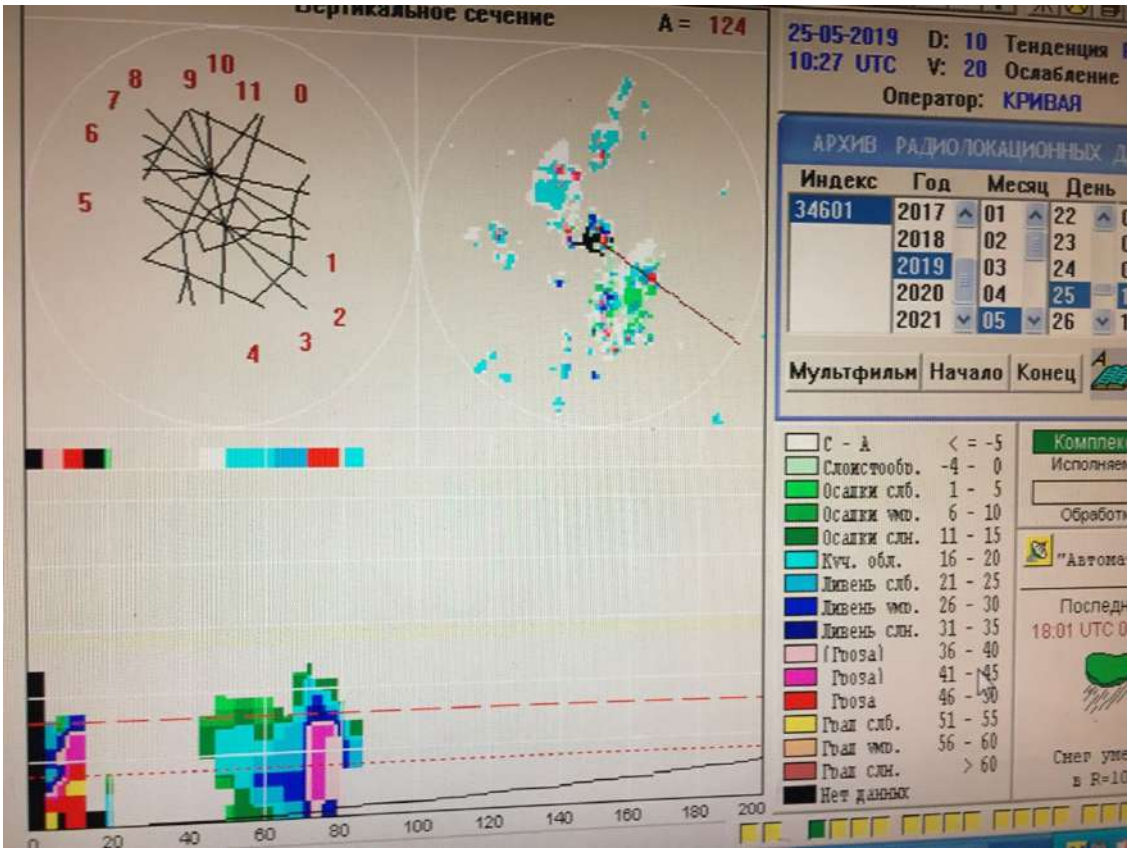


а)

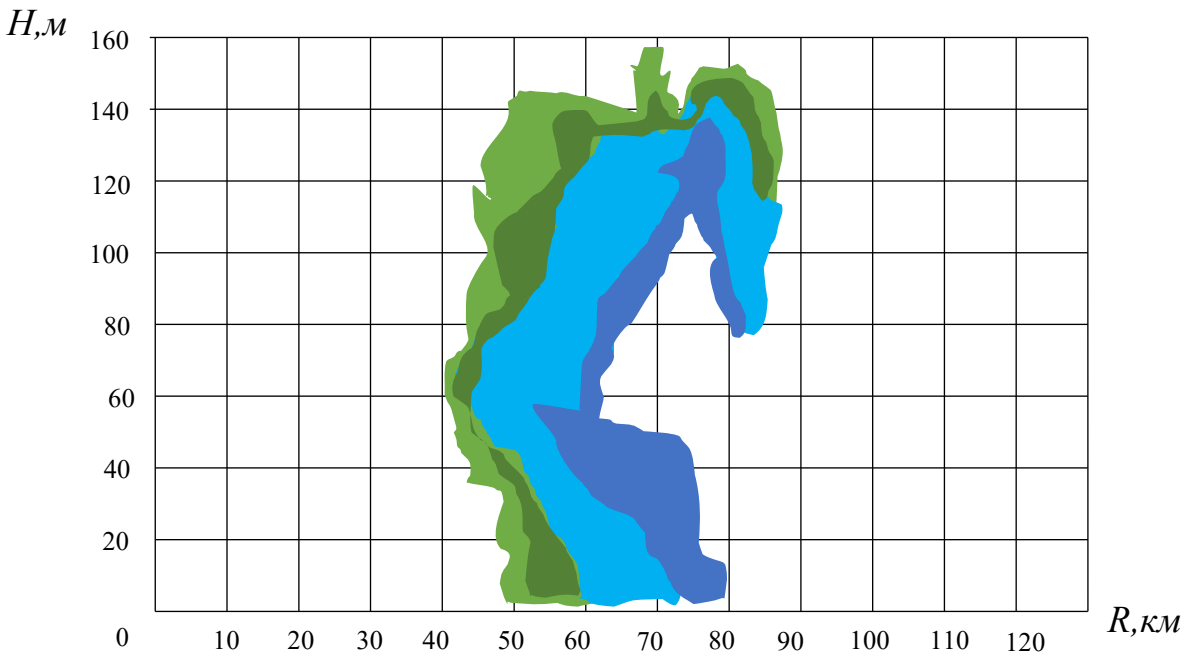


б)

Рис.А.4 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 079°

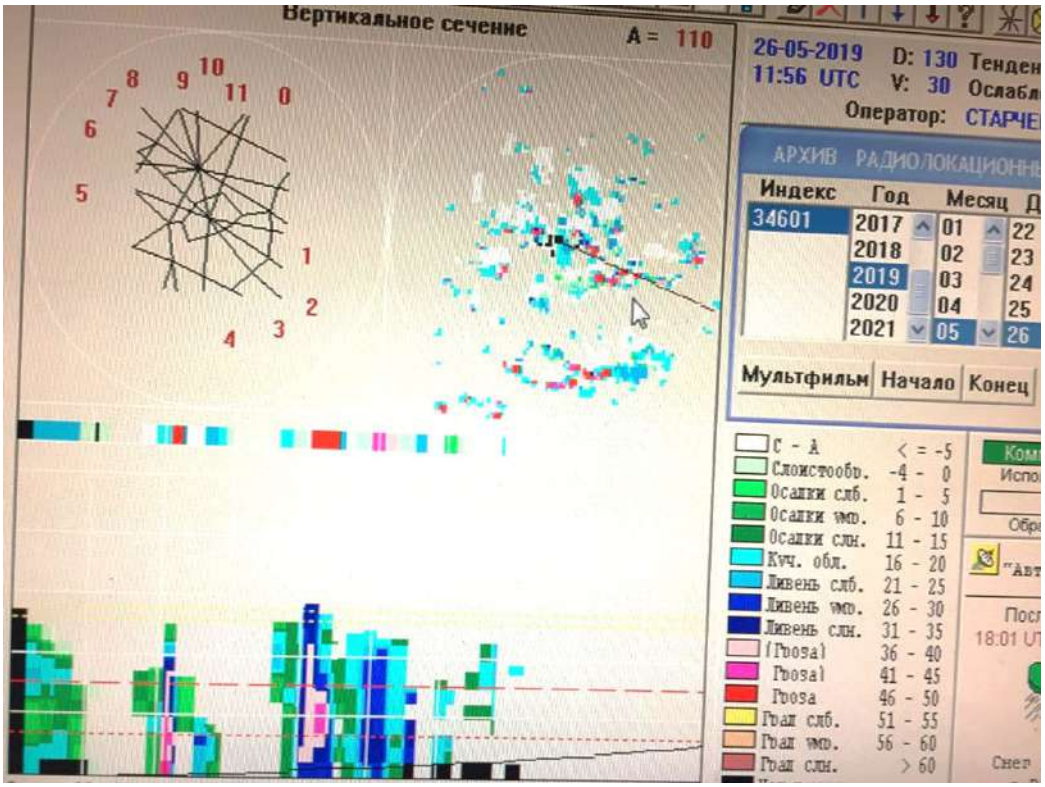


а)

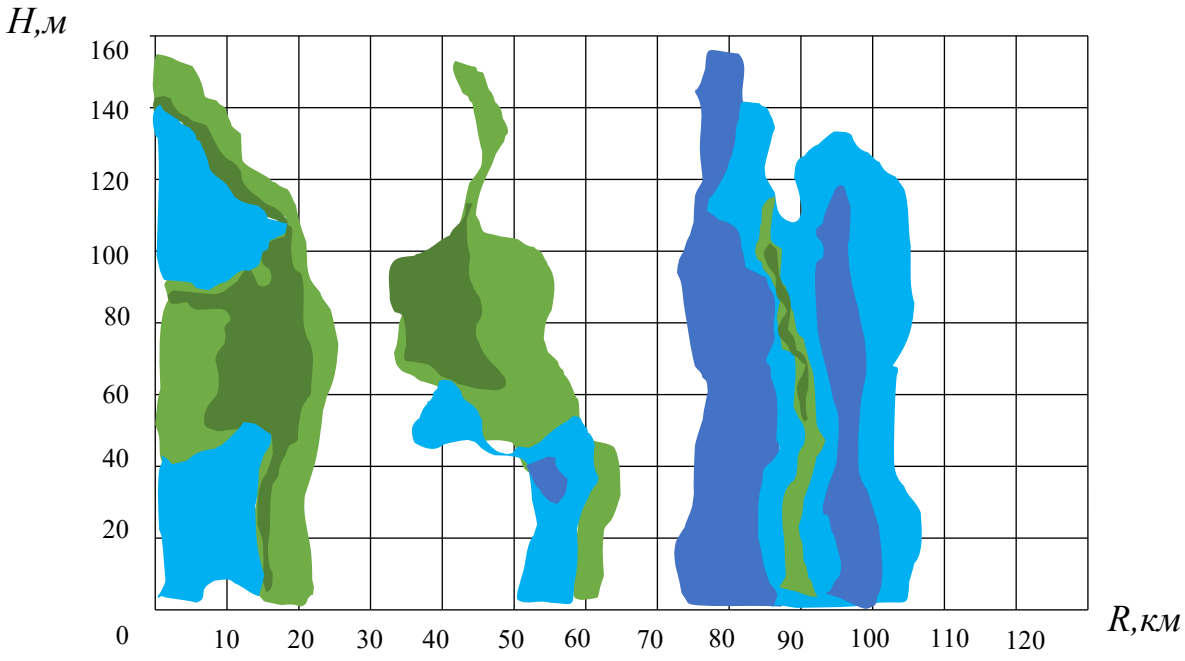


б)

Рис.А.5 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 124°

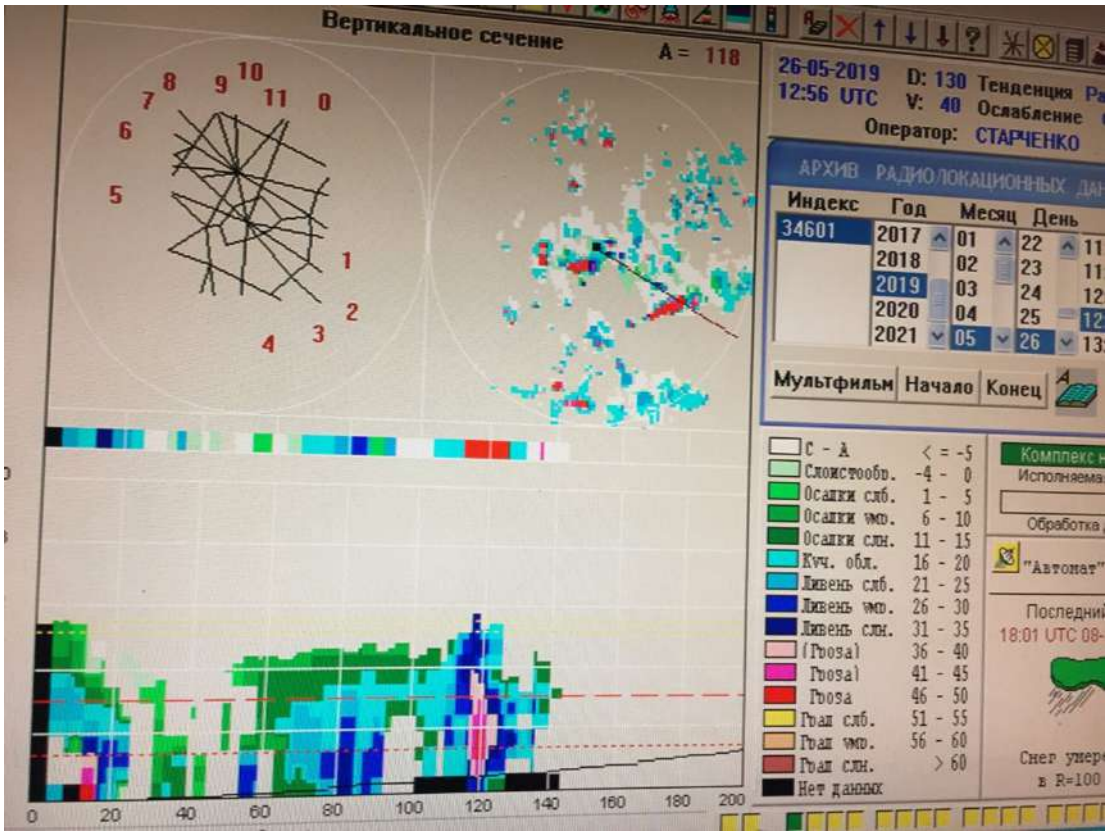


а)

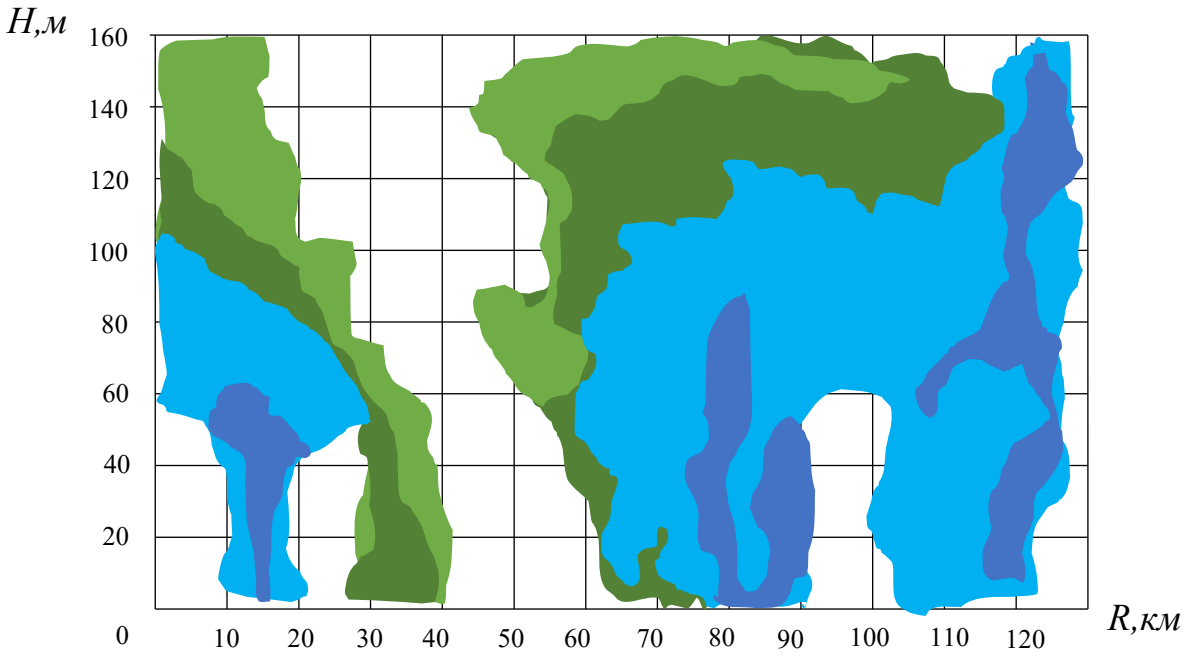


б)

Рис.А.6 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 110°

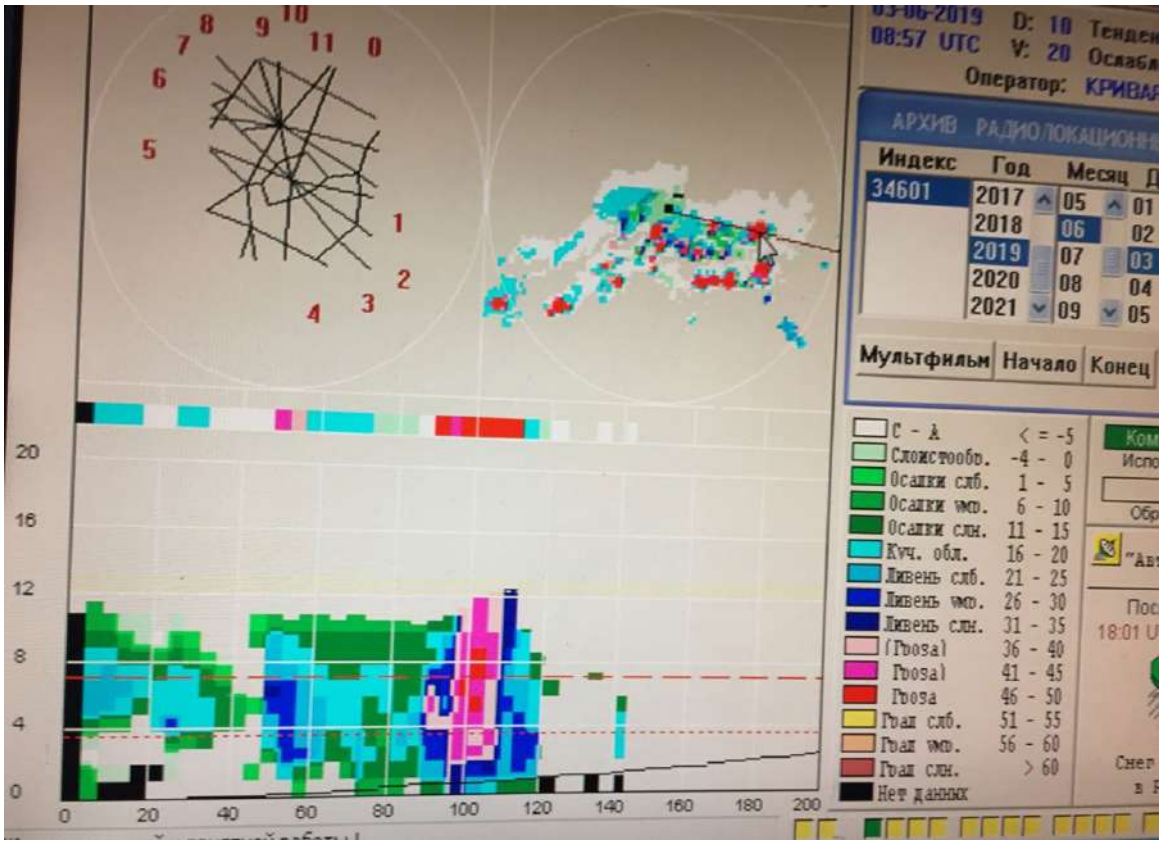


а)

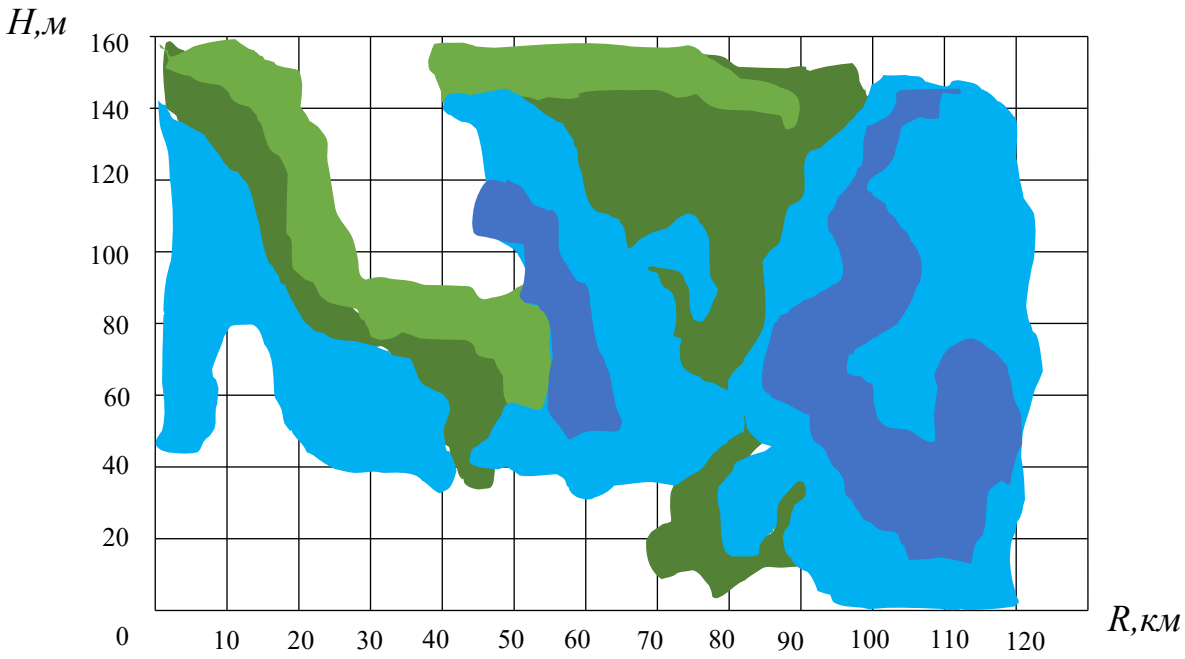


б)

Рис.А.7 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 118°

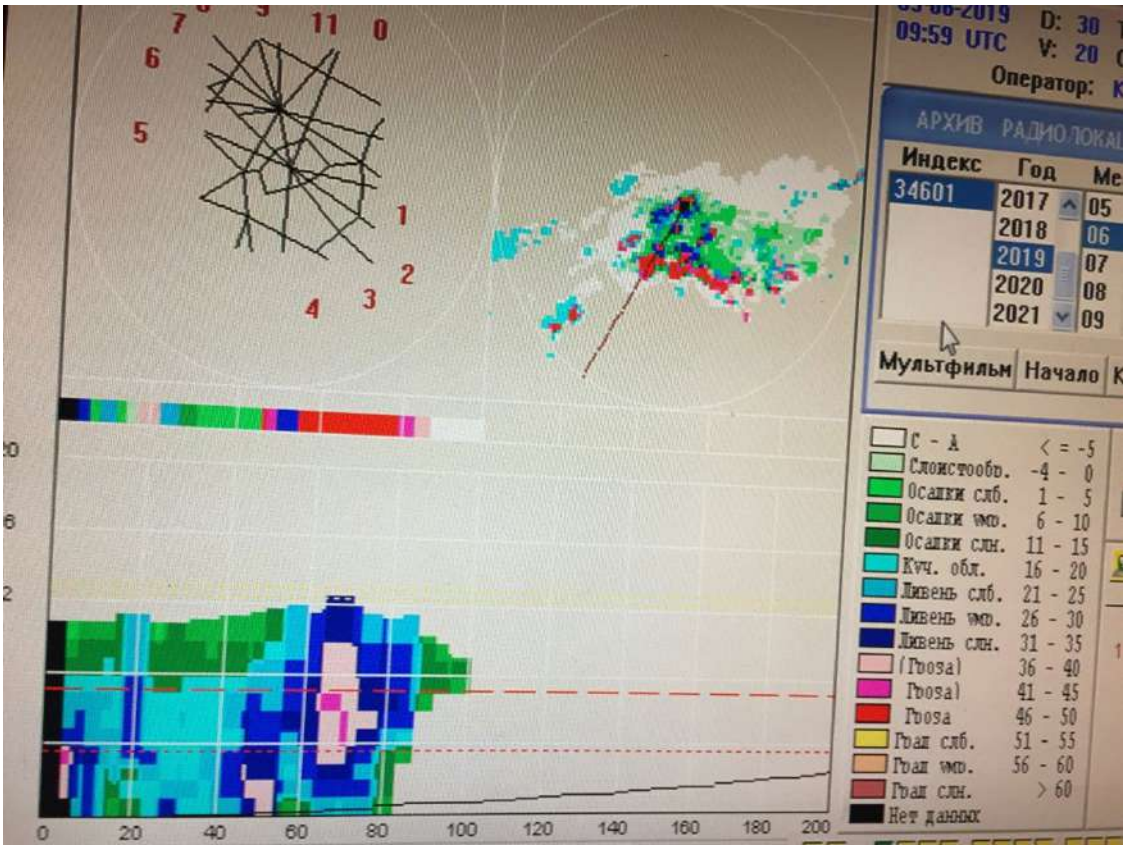


а)

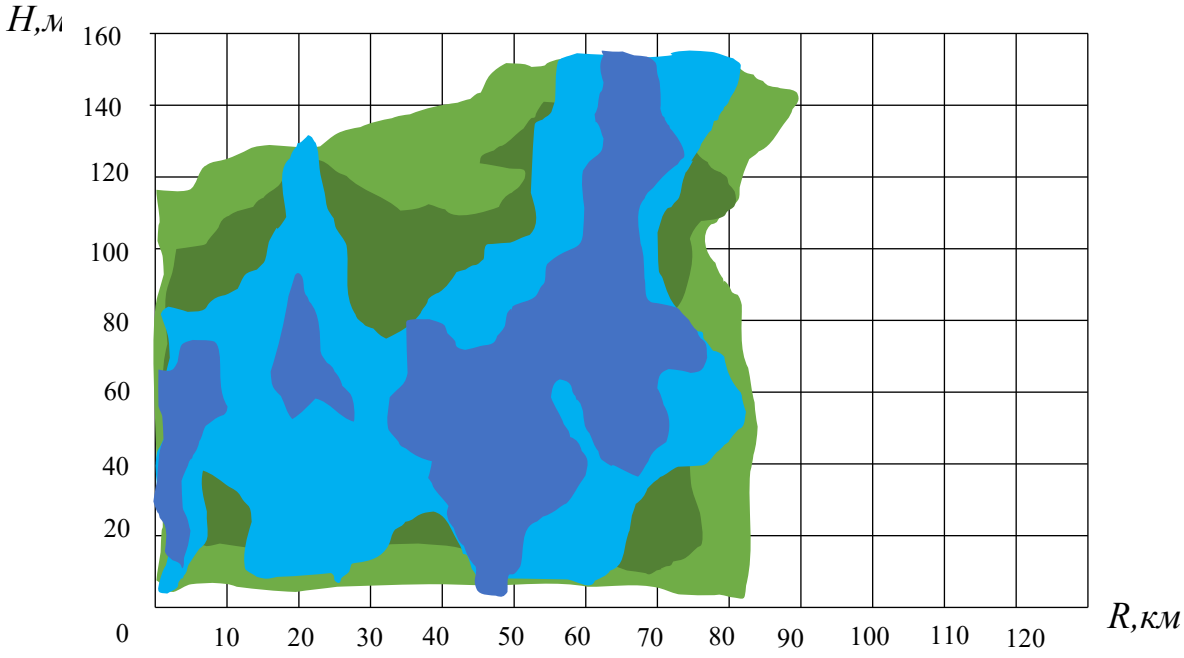


б)

Рис.А.8 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 106°

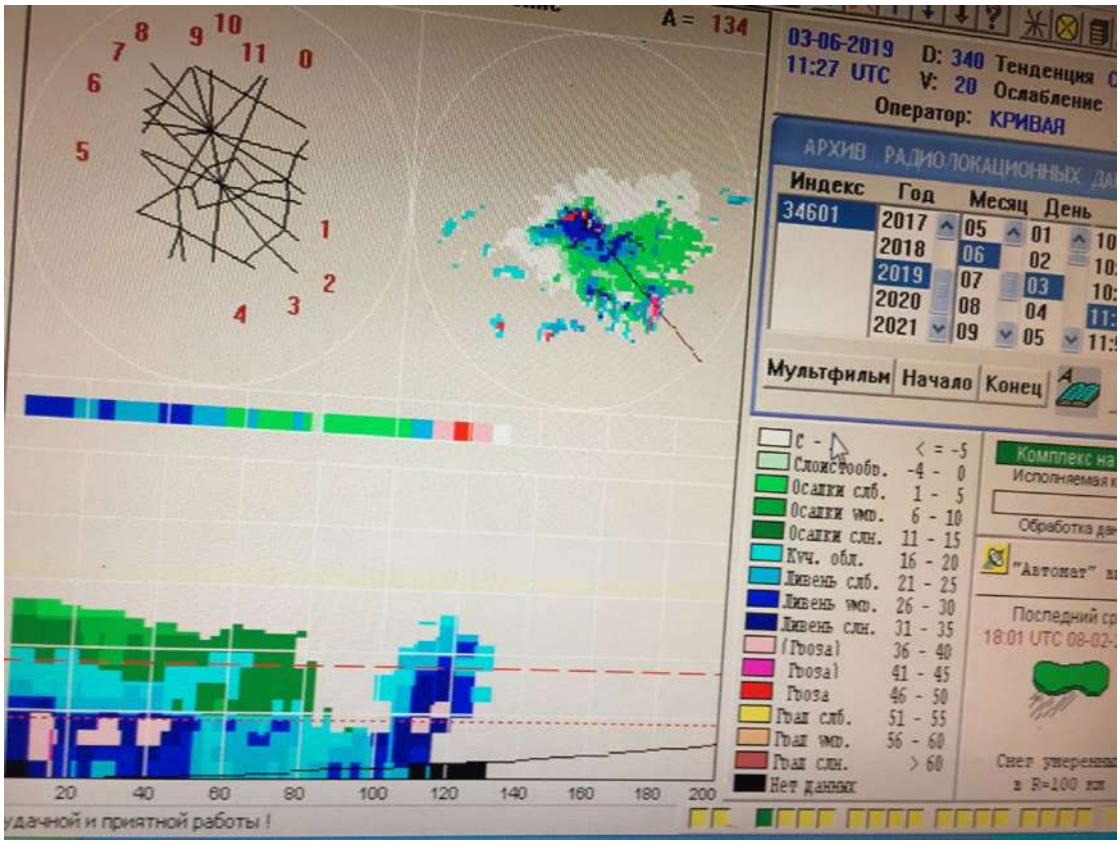


а)

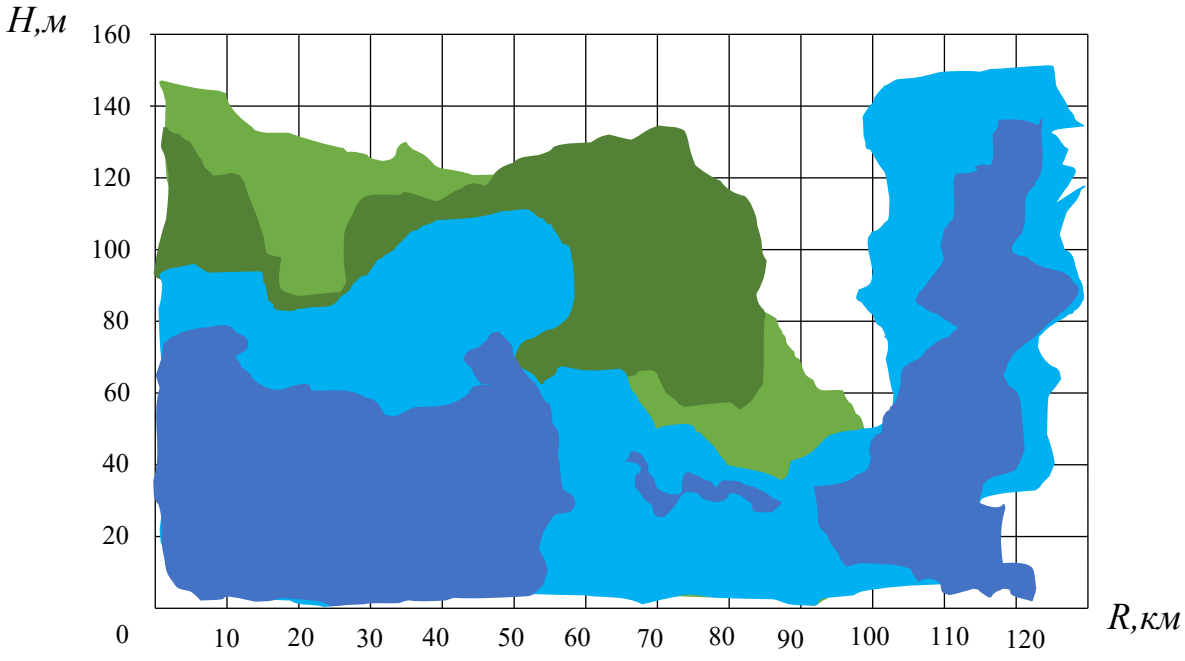


б)

Рис.А.9 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 210°

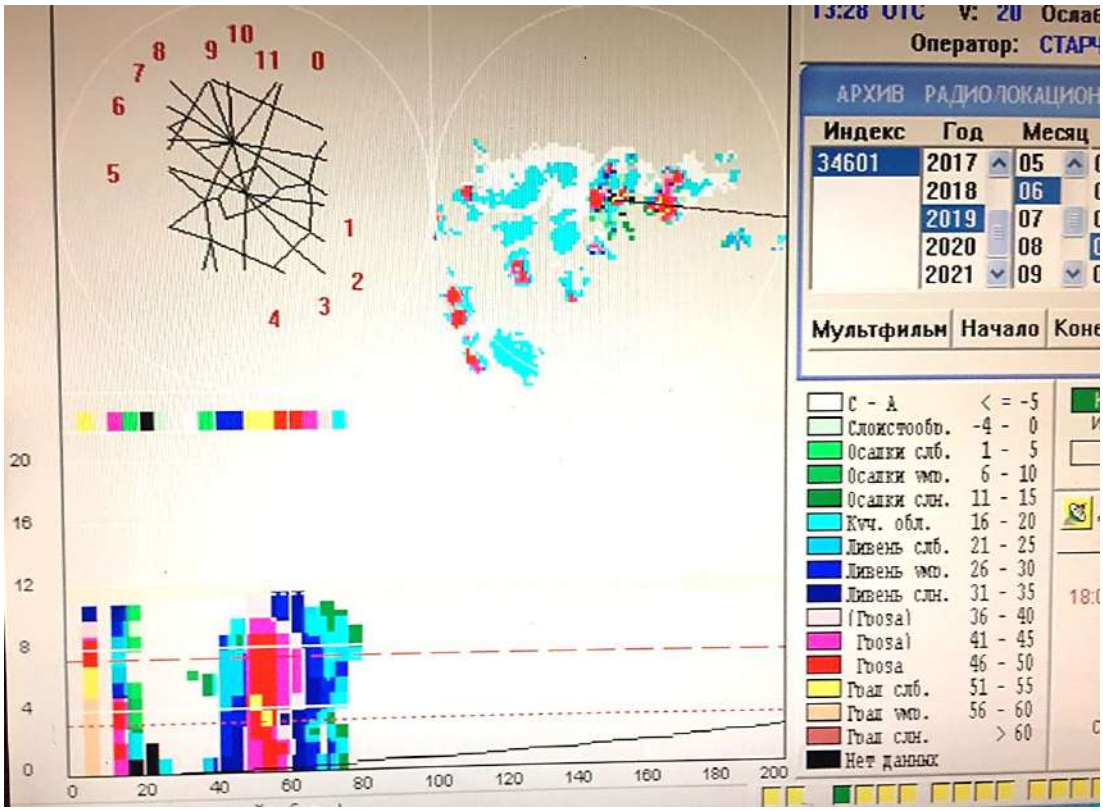


а)

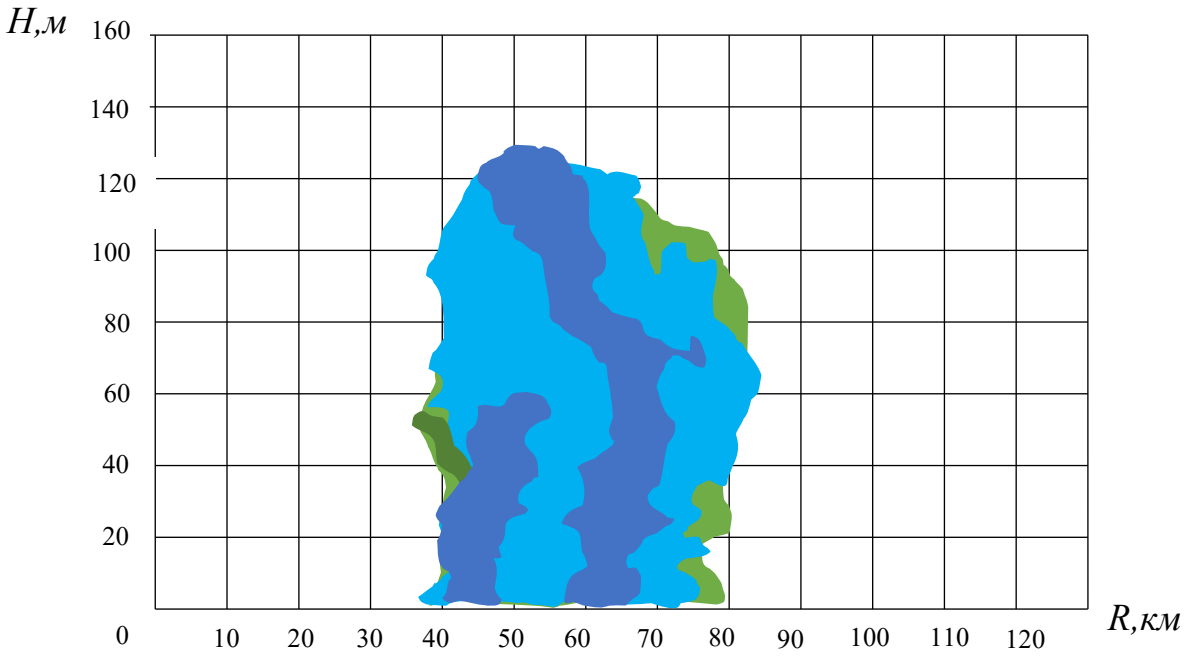


б)

Рис.А.10 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 134°

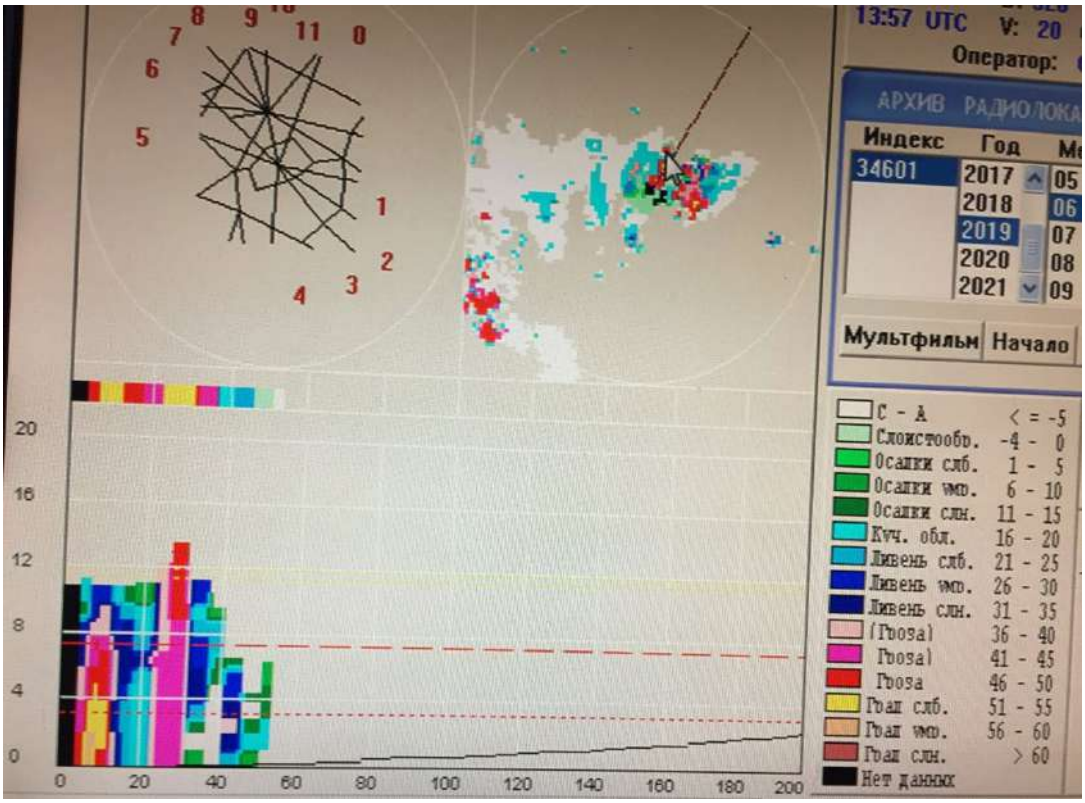


а)

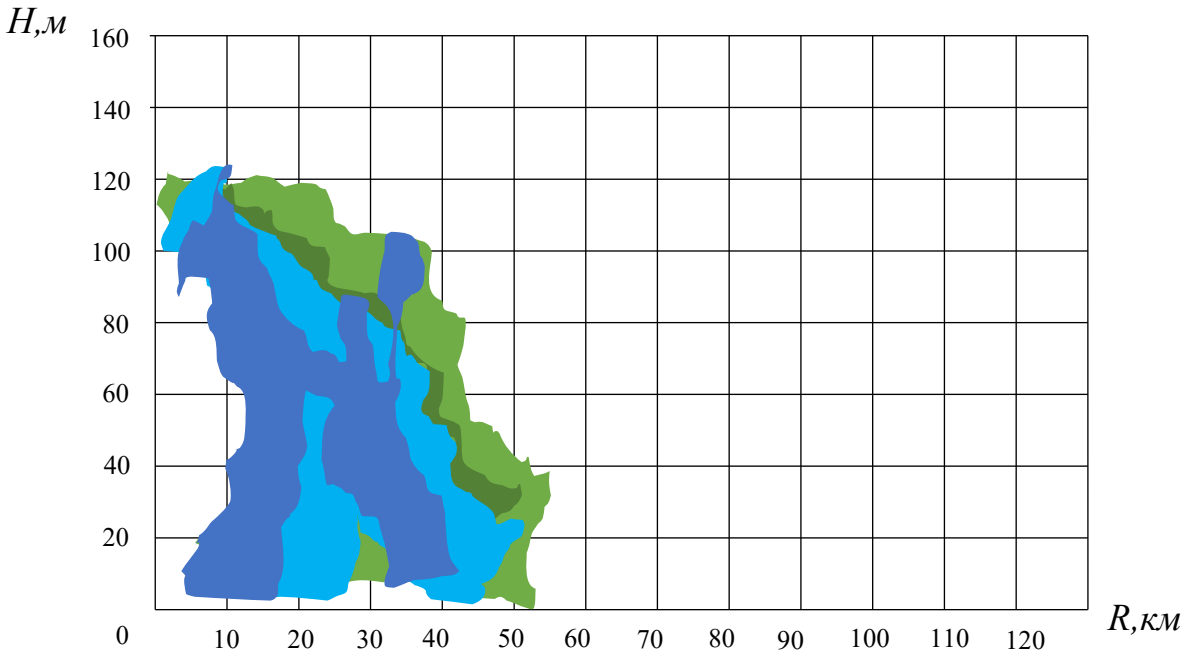


б)

Рис.А.11 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 108°

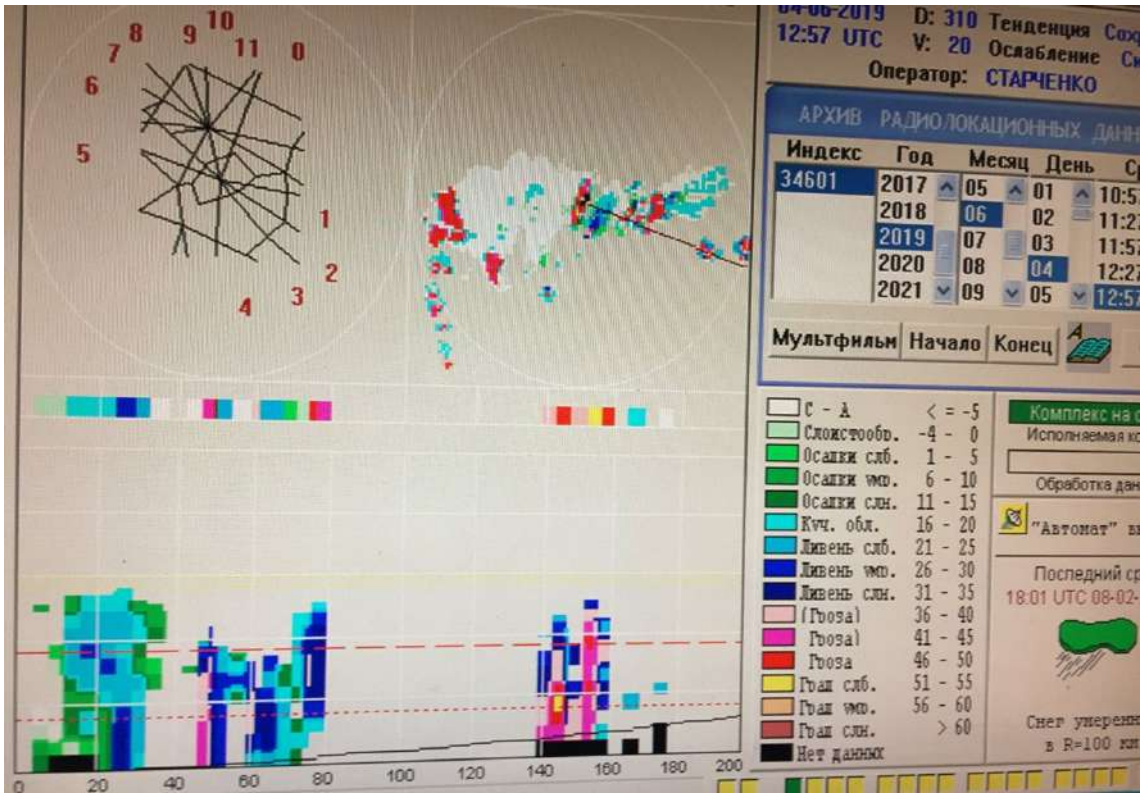


а)

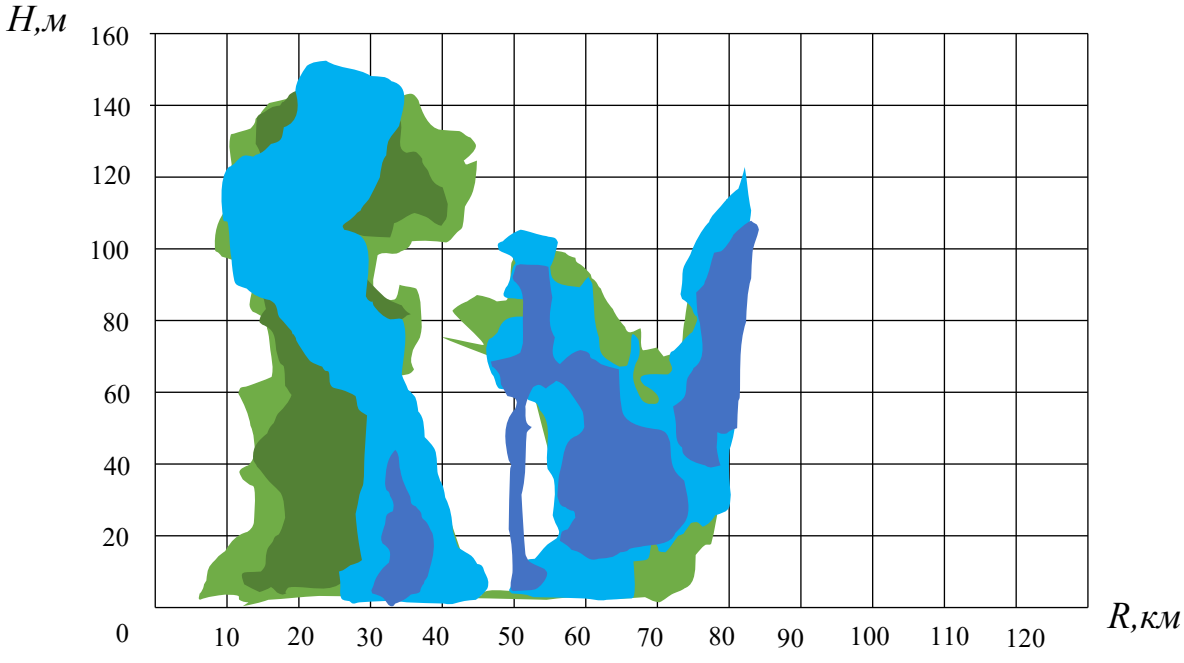


б)

Рис.А.12 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 047°

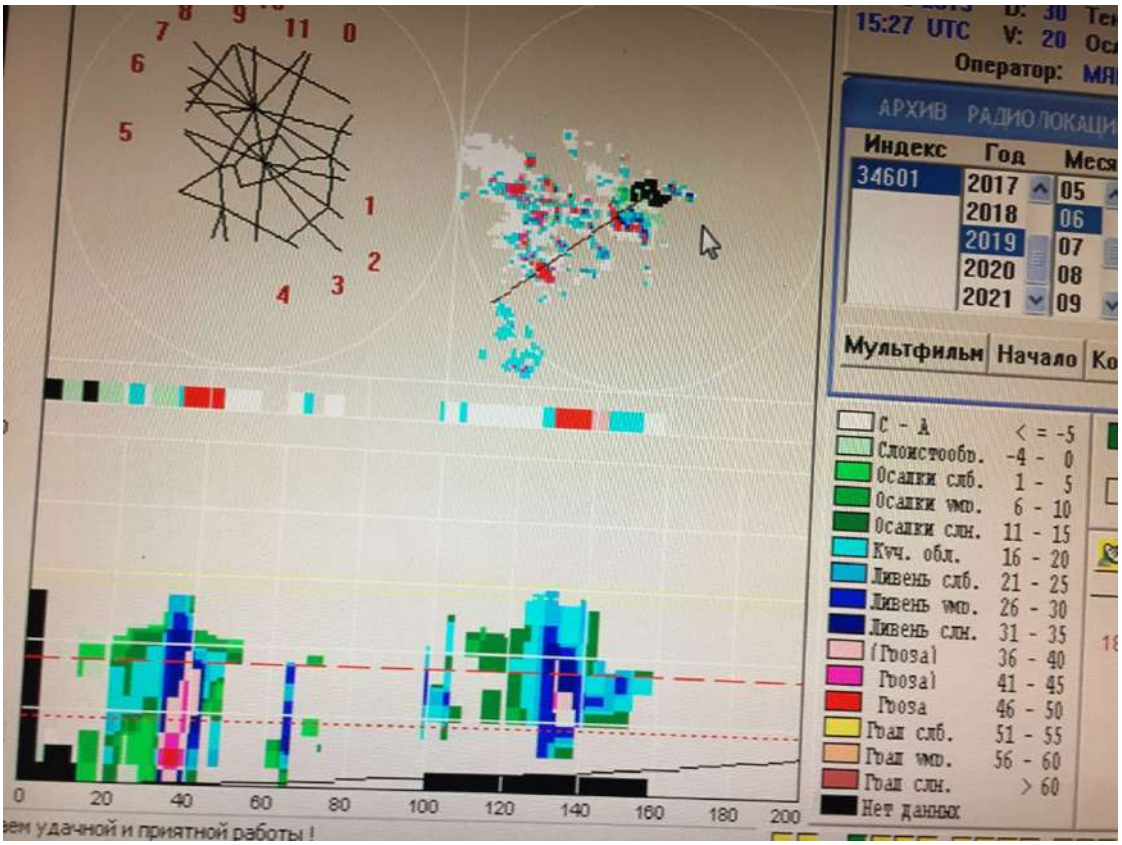


а)

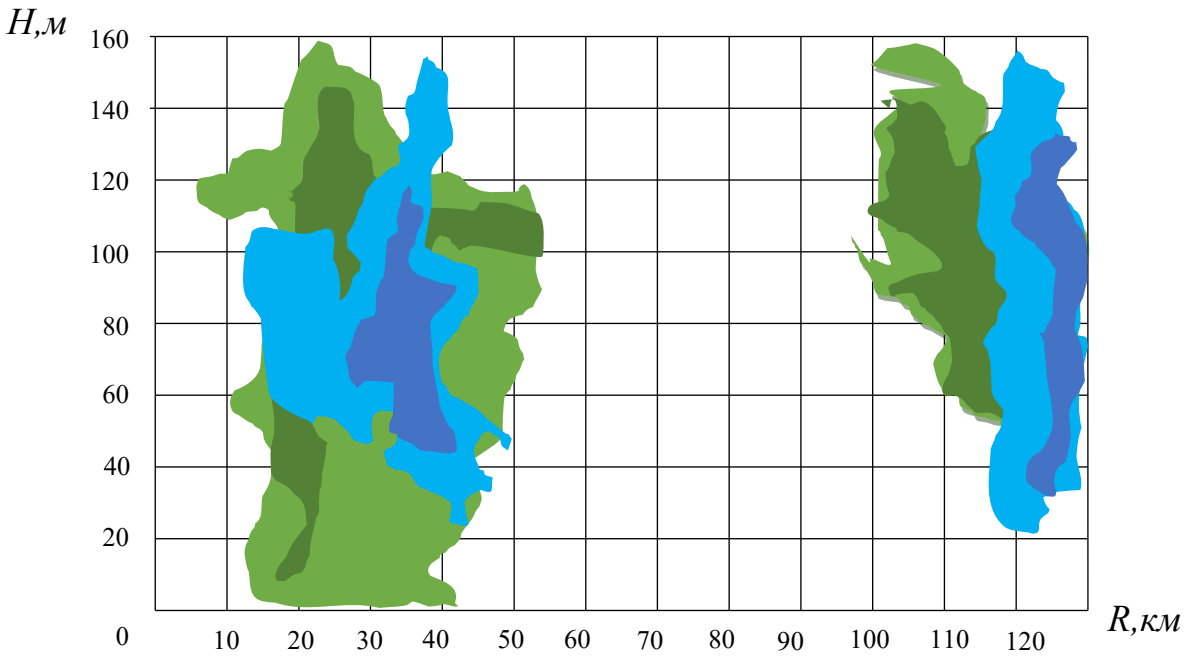


б)

Рис.А.13 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 111°

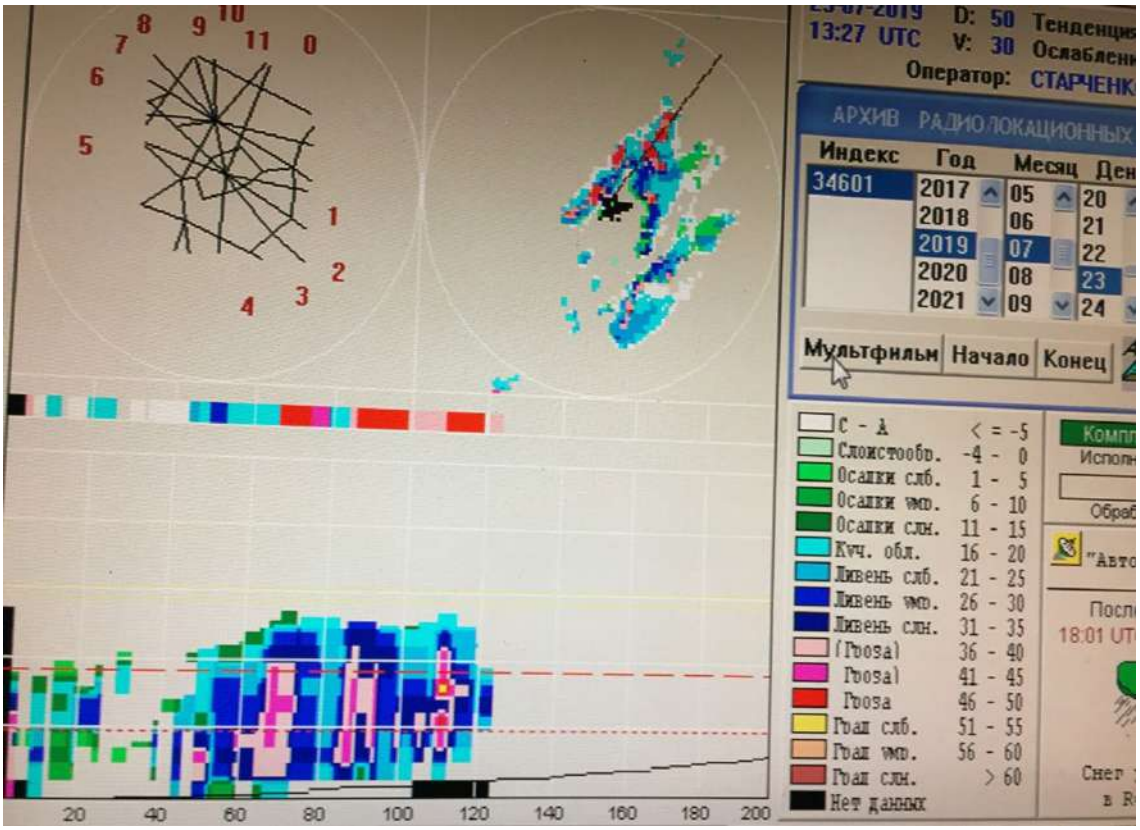


а)

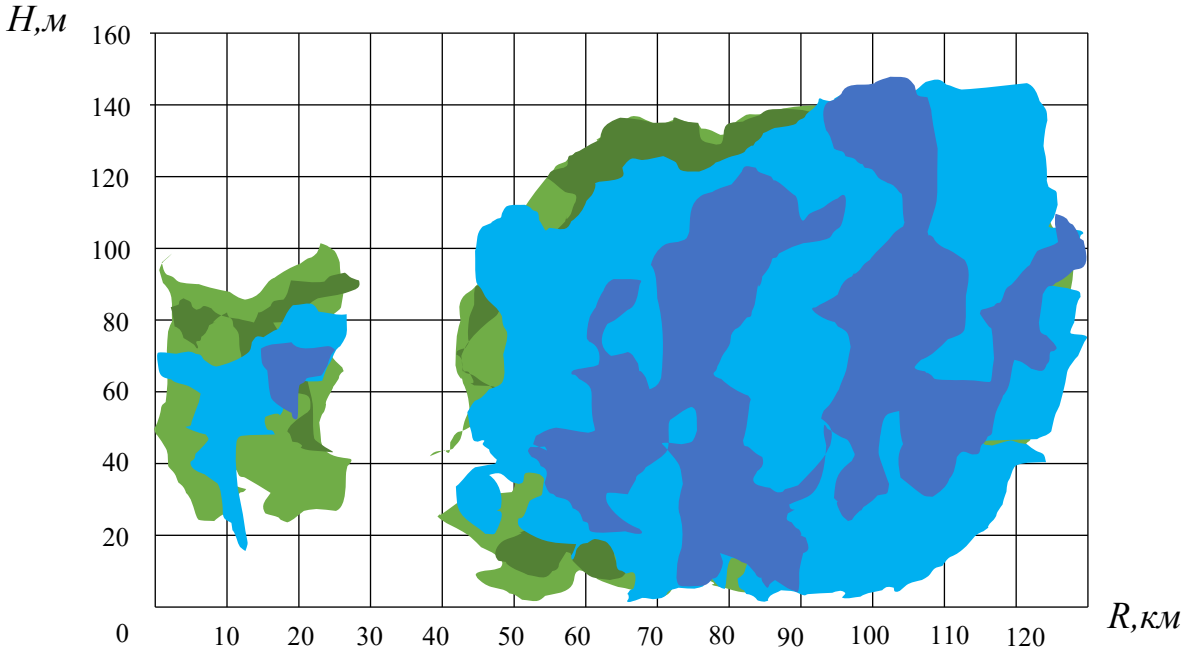


б)

Рис.А.14 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 228°

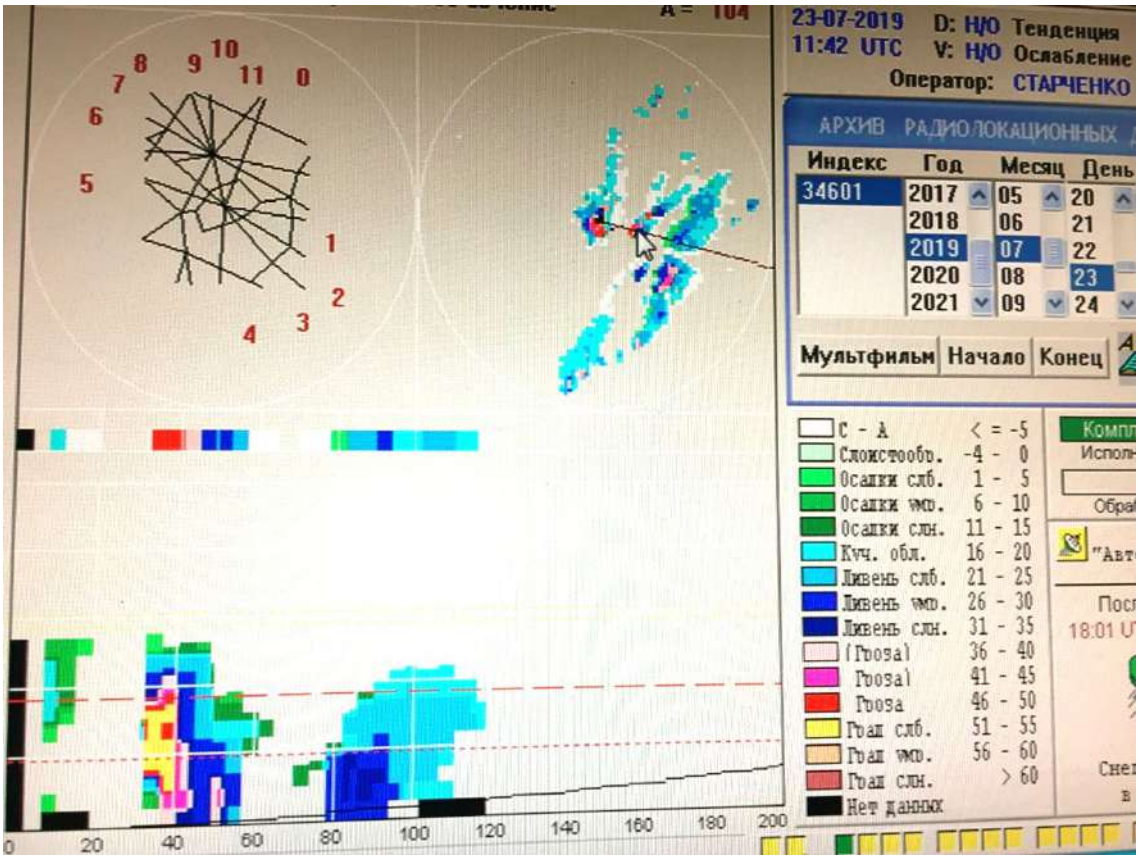


а)

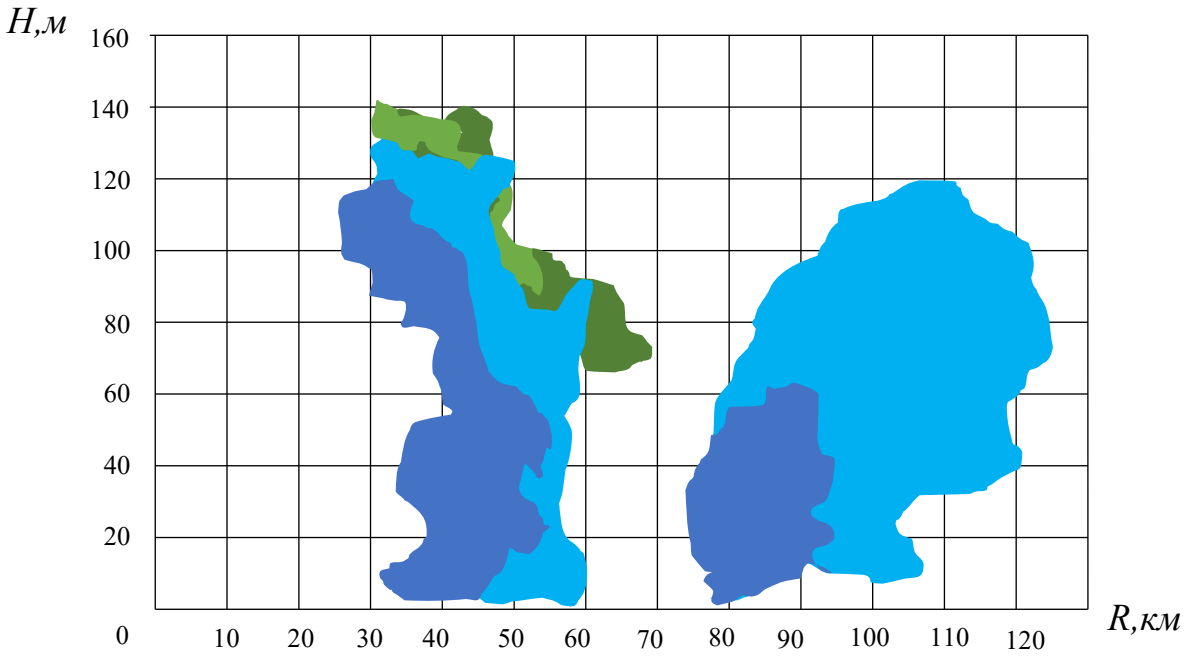


б)

Рис.А.15 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 051°

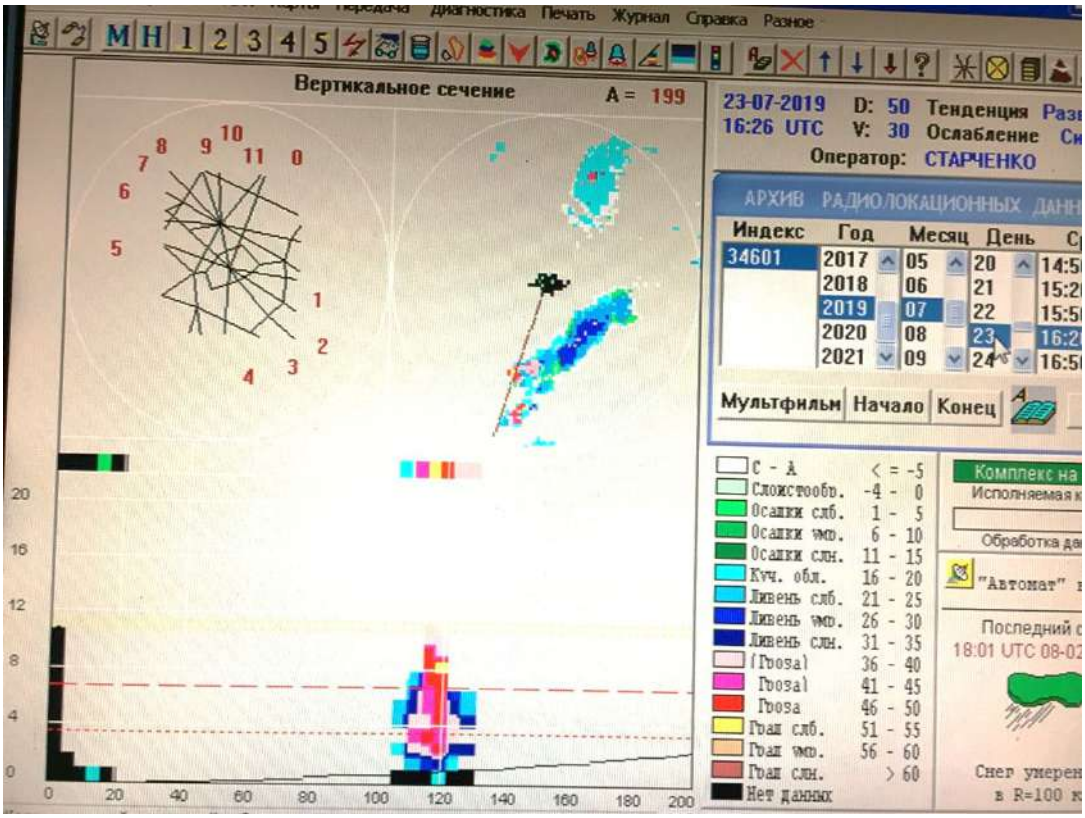


а)

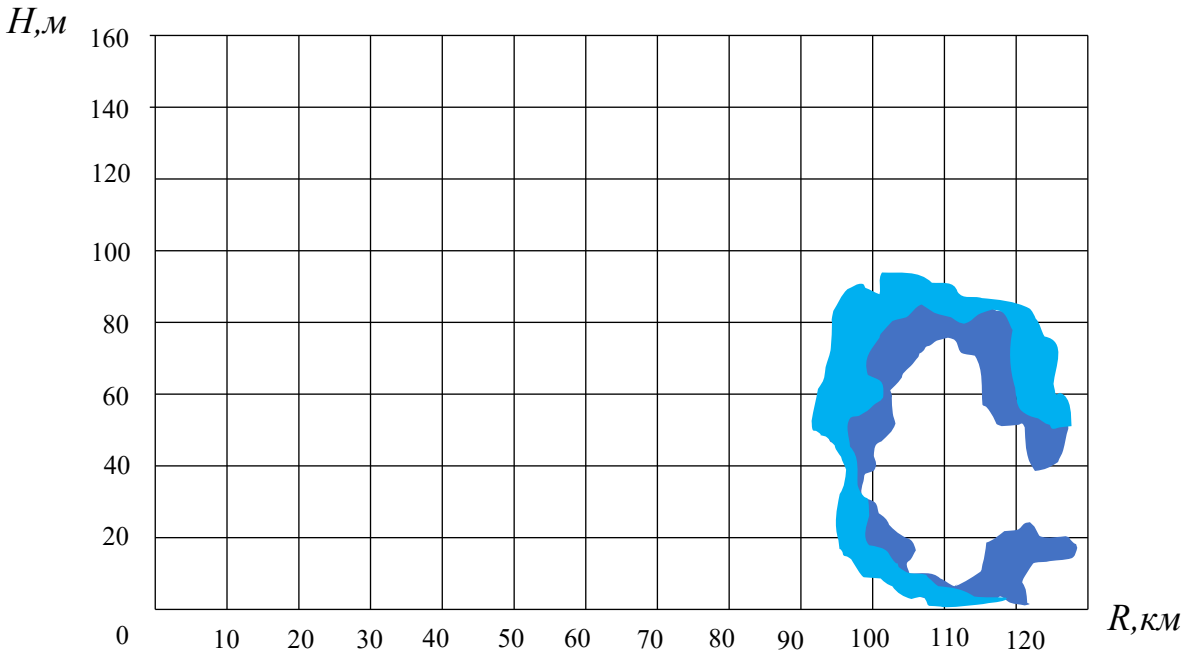


б)

Рис.А.16 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 104°

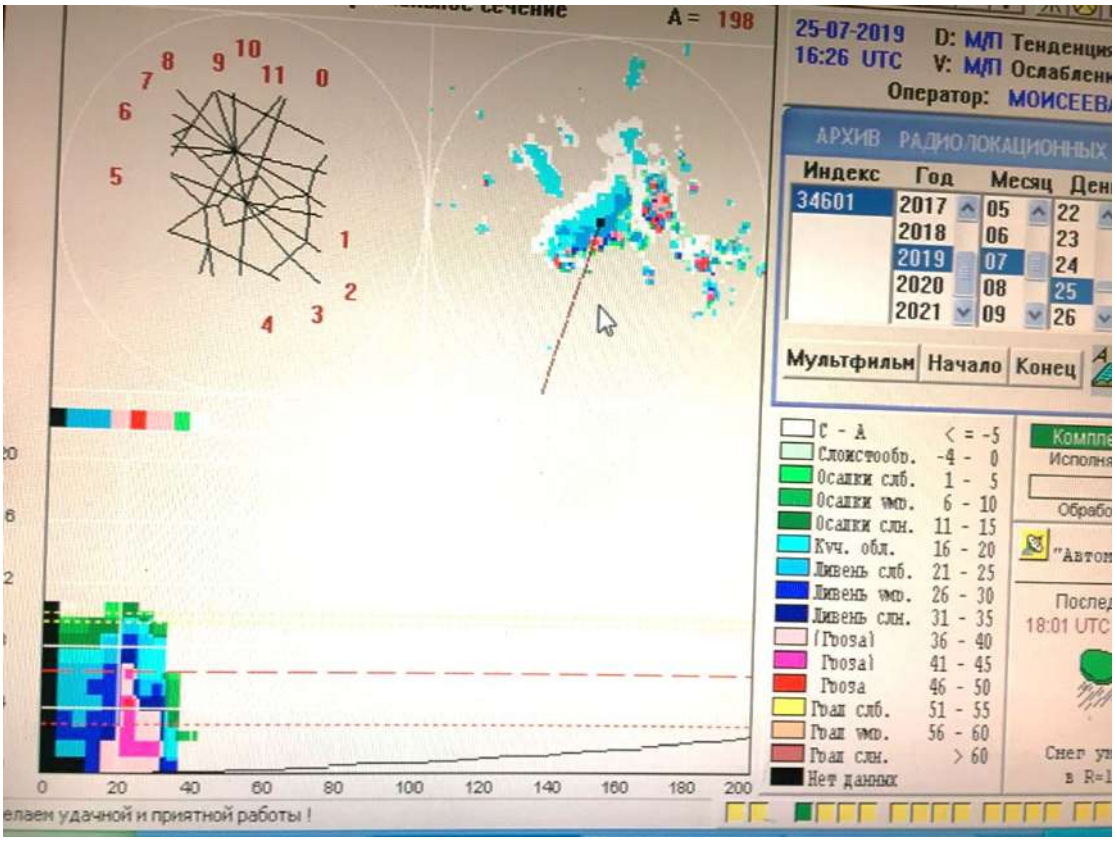


а)

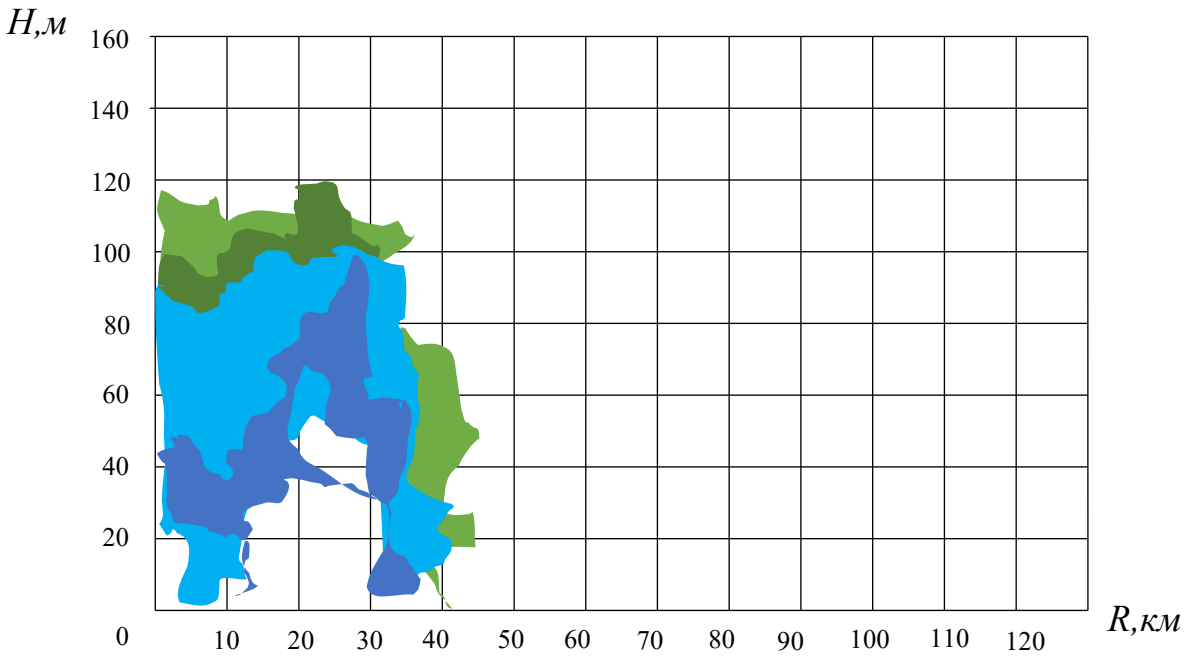


б)

Рис.А.17 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 199°

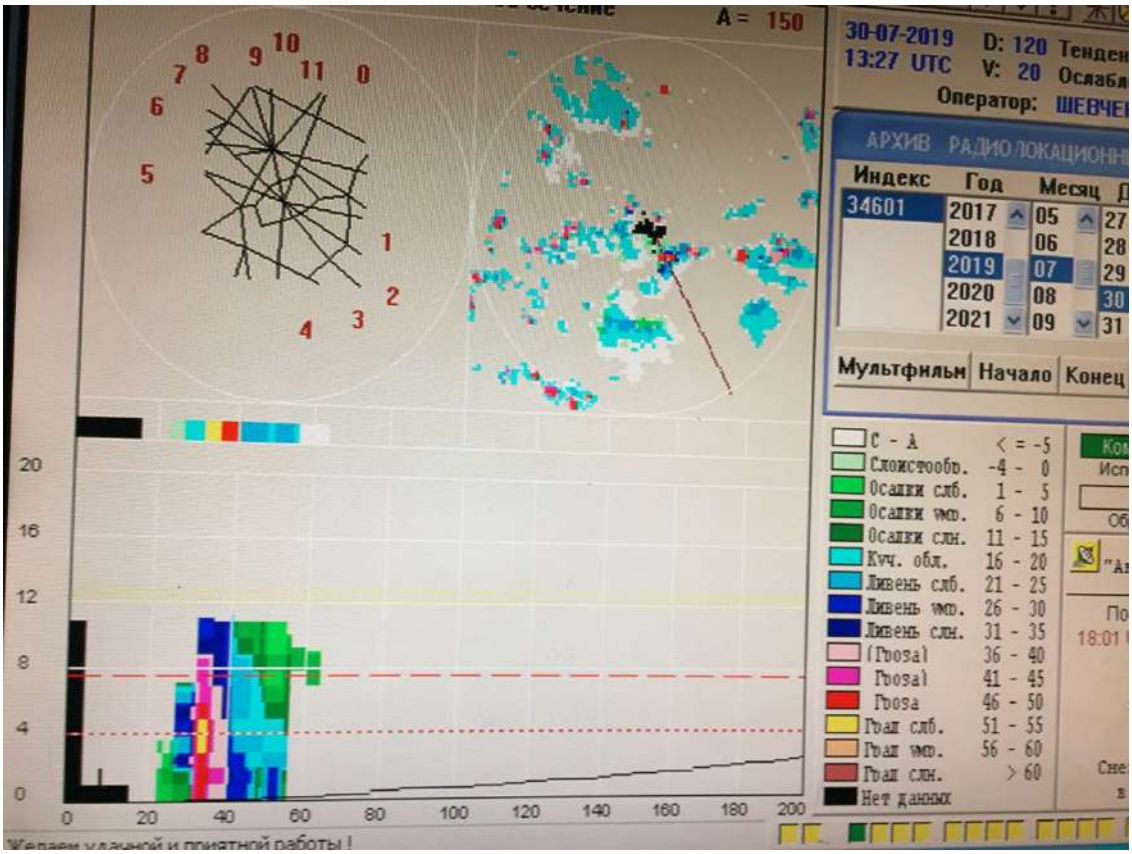


а)

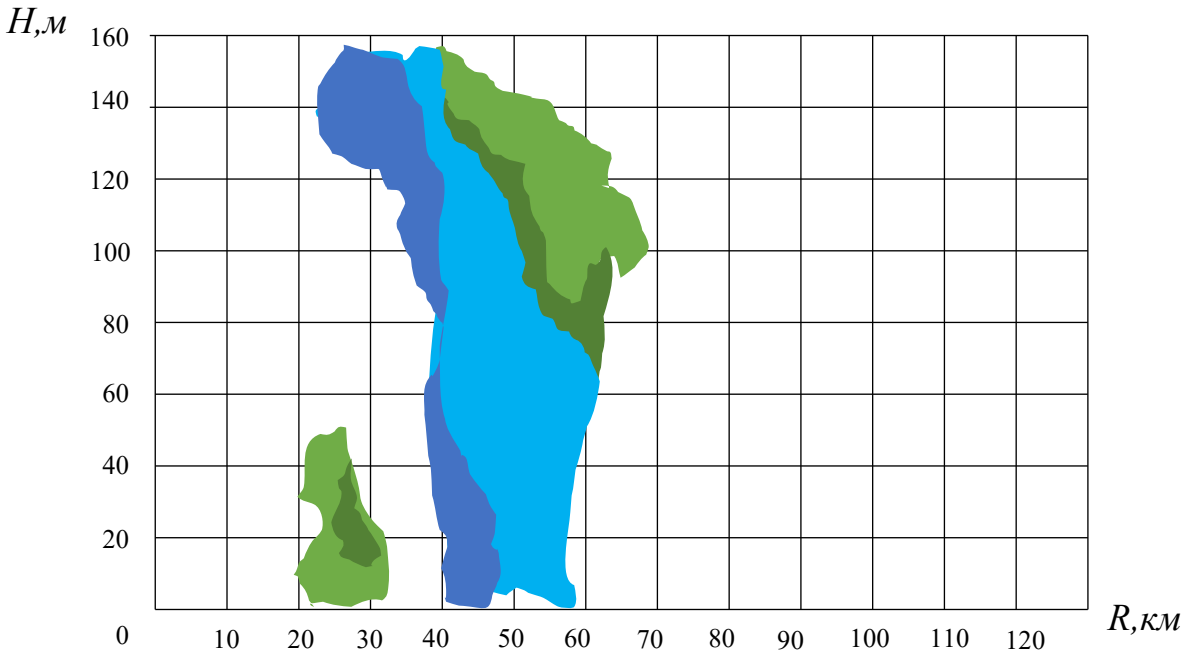


б)

Рис.А.18 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 198°

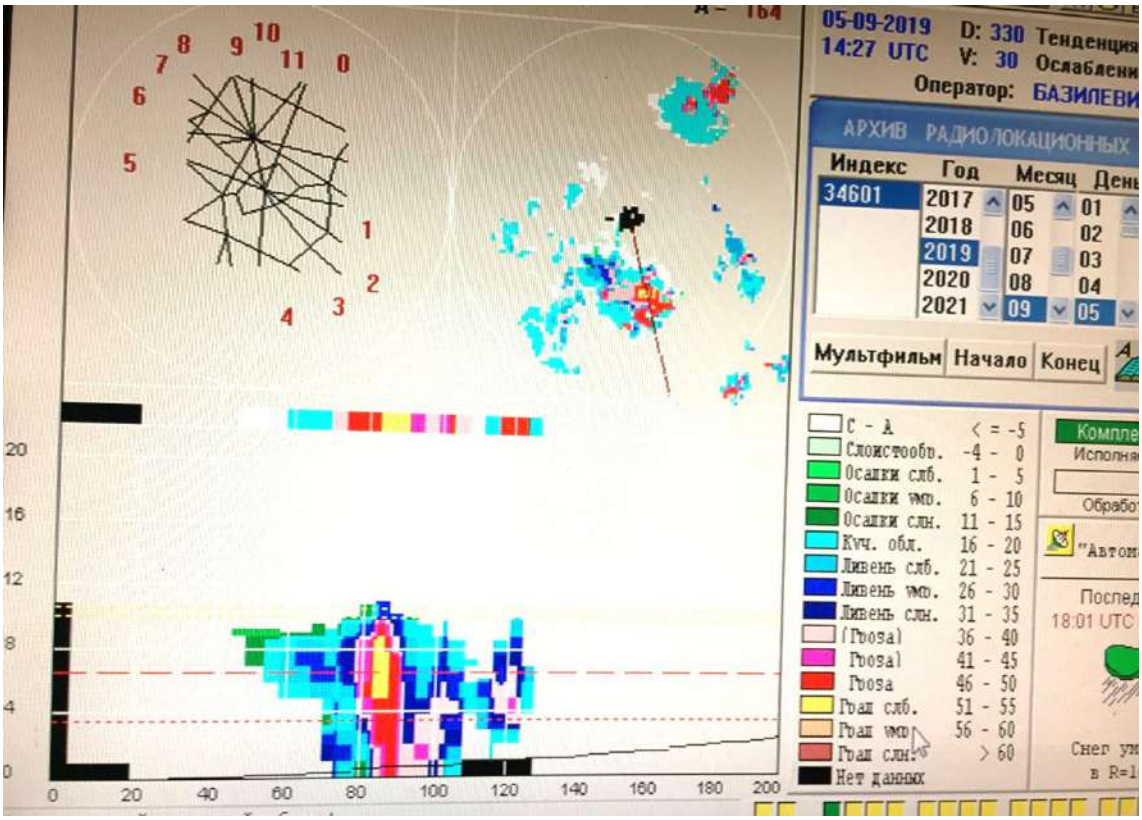


а)

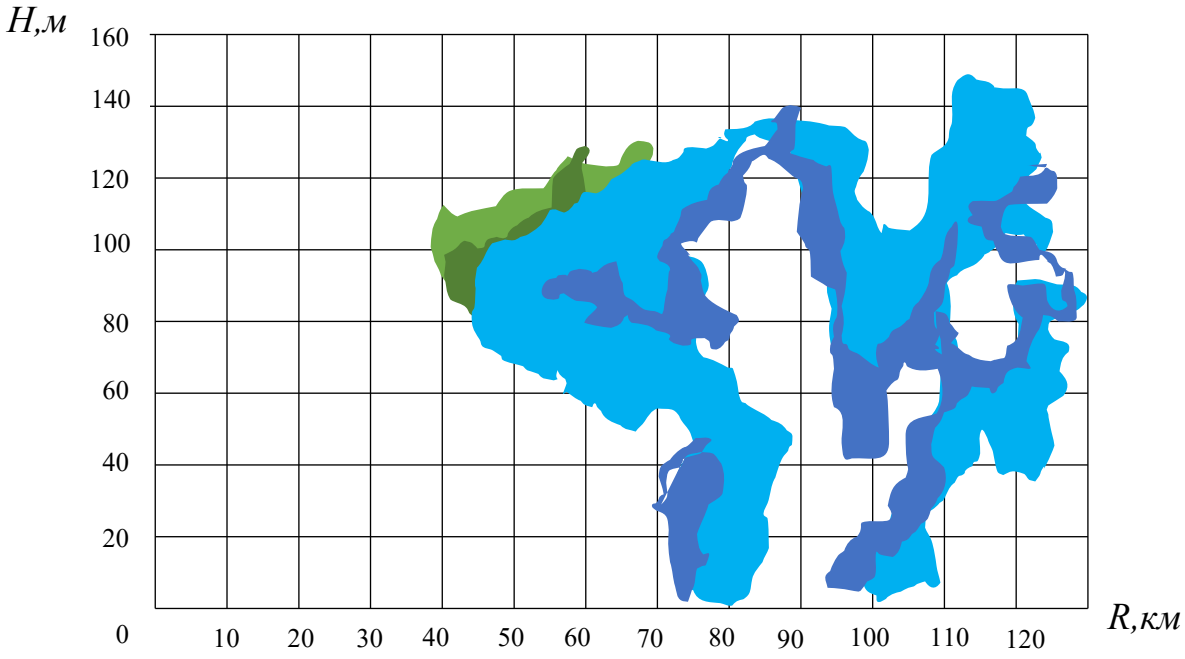


б)

Рис.А.19 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 150°

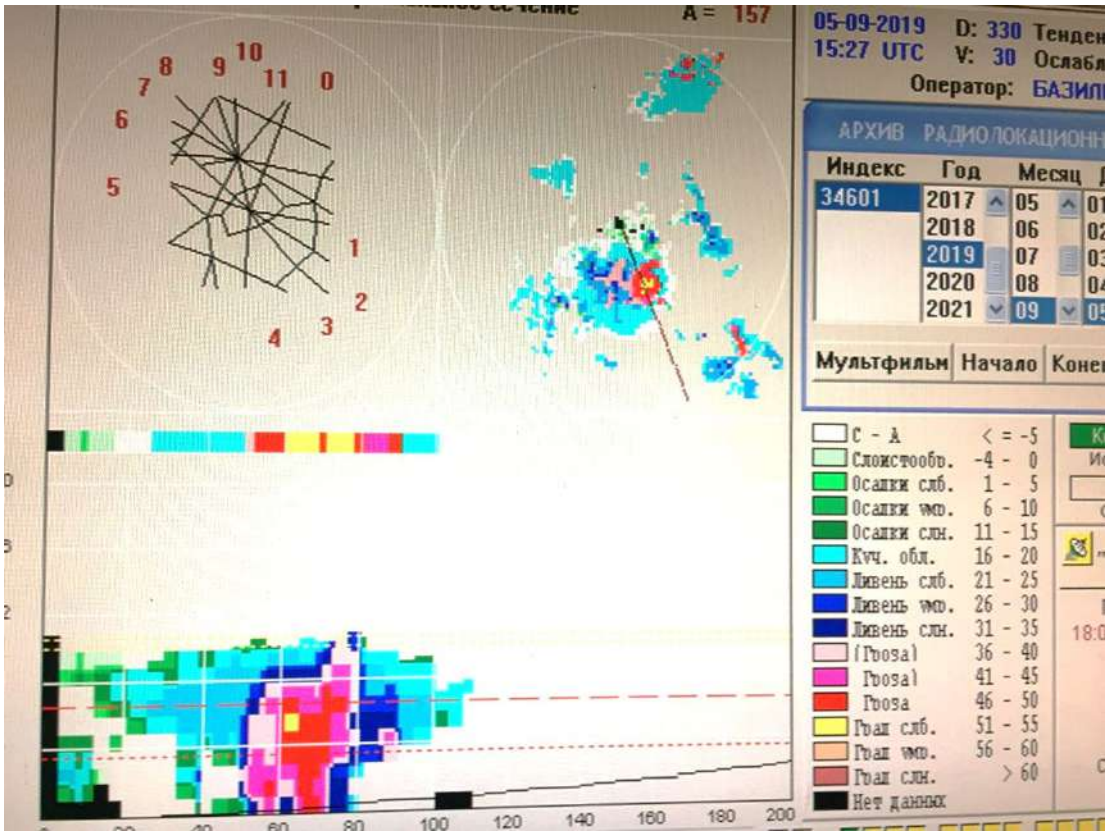


а)

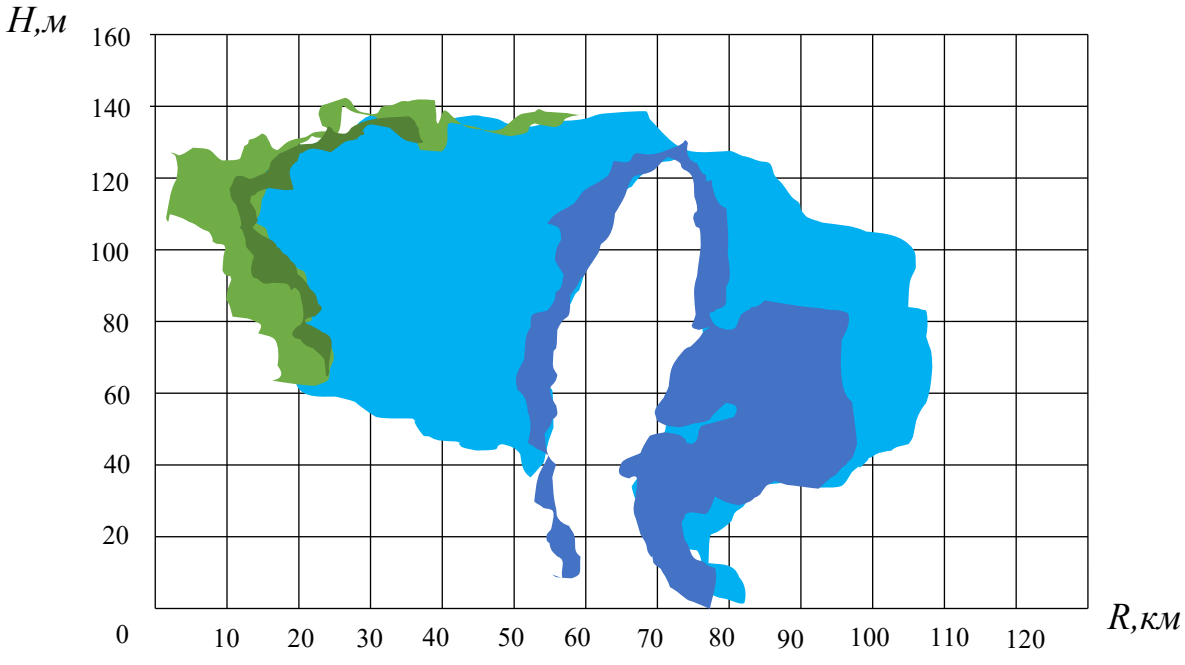


б)

Рис.А.20 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 164°

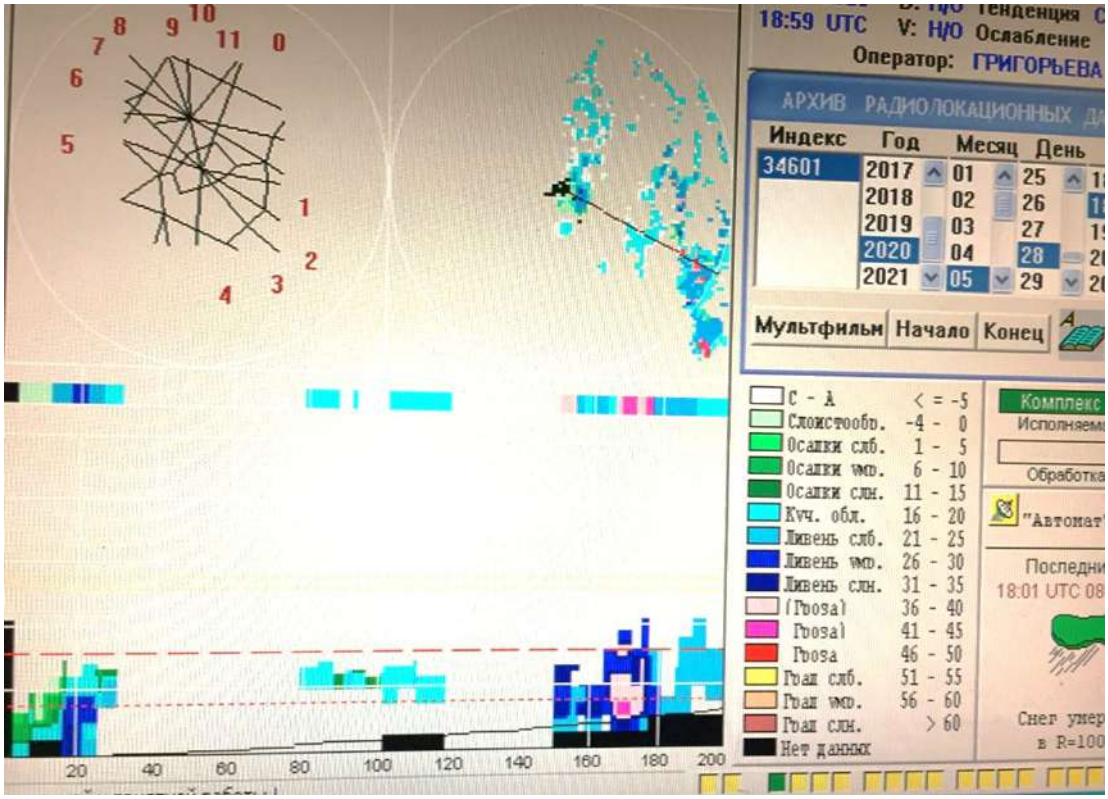


а)

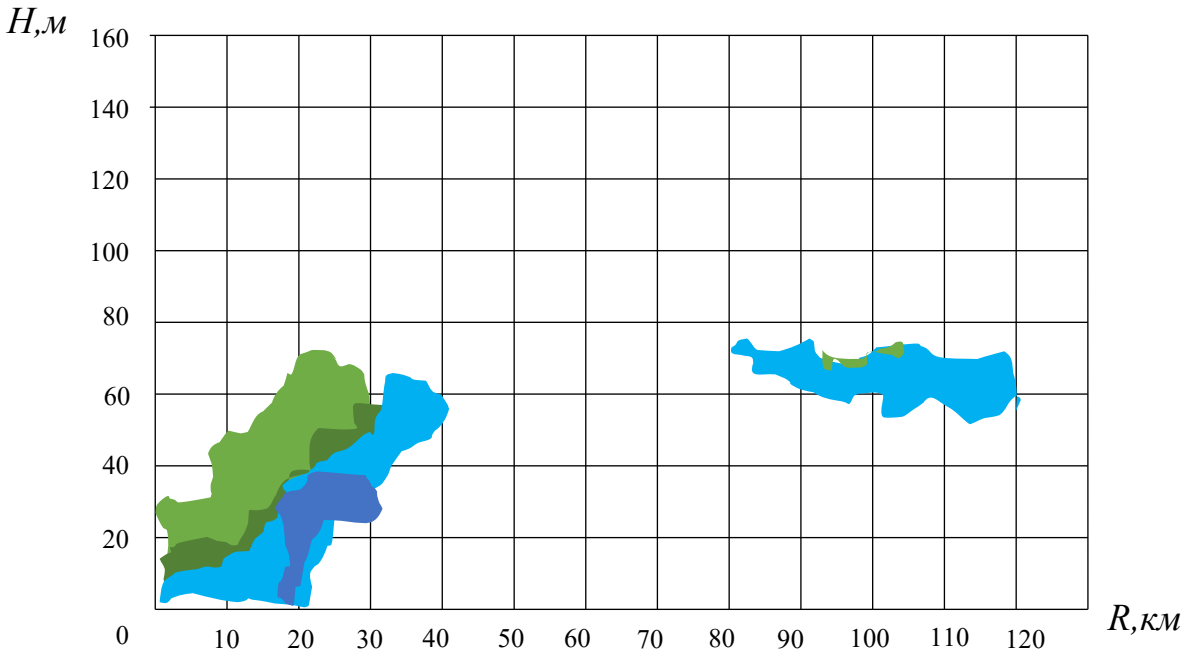


б)

Рис.А.21 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 157°

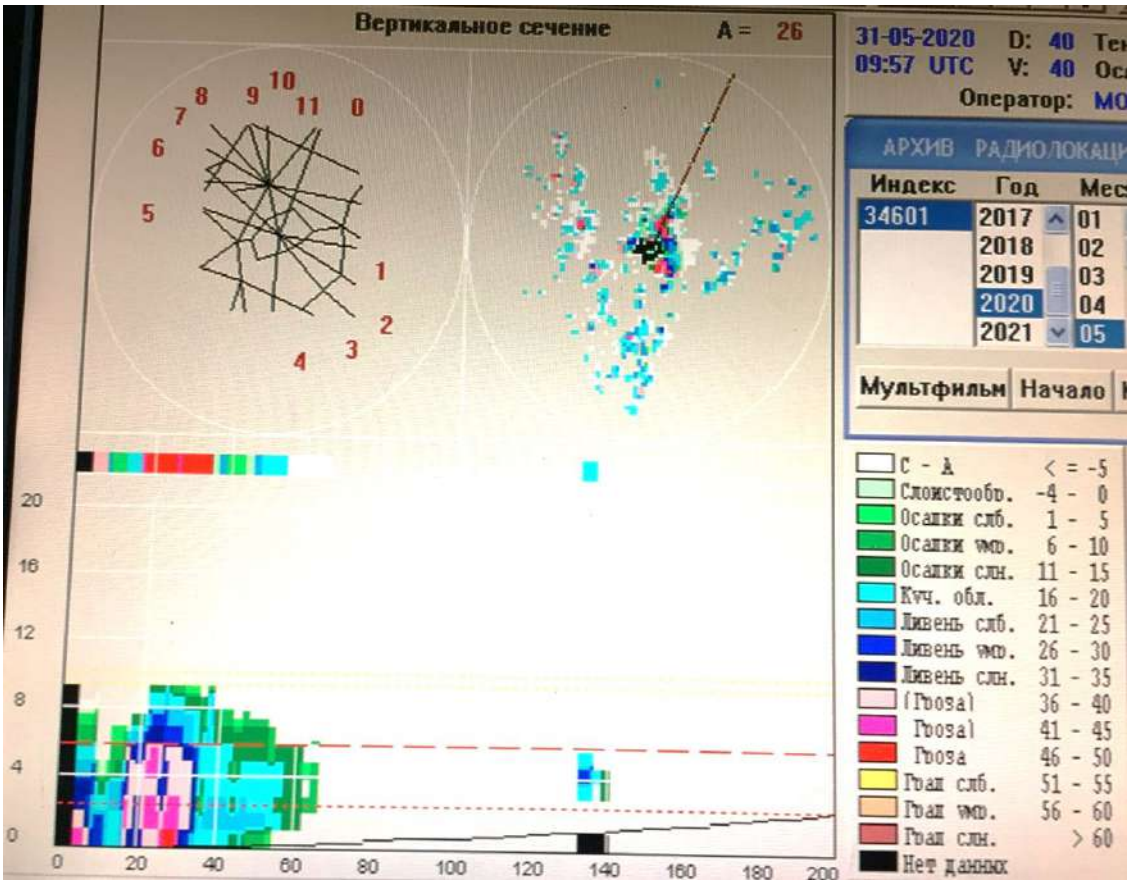


а)

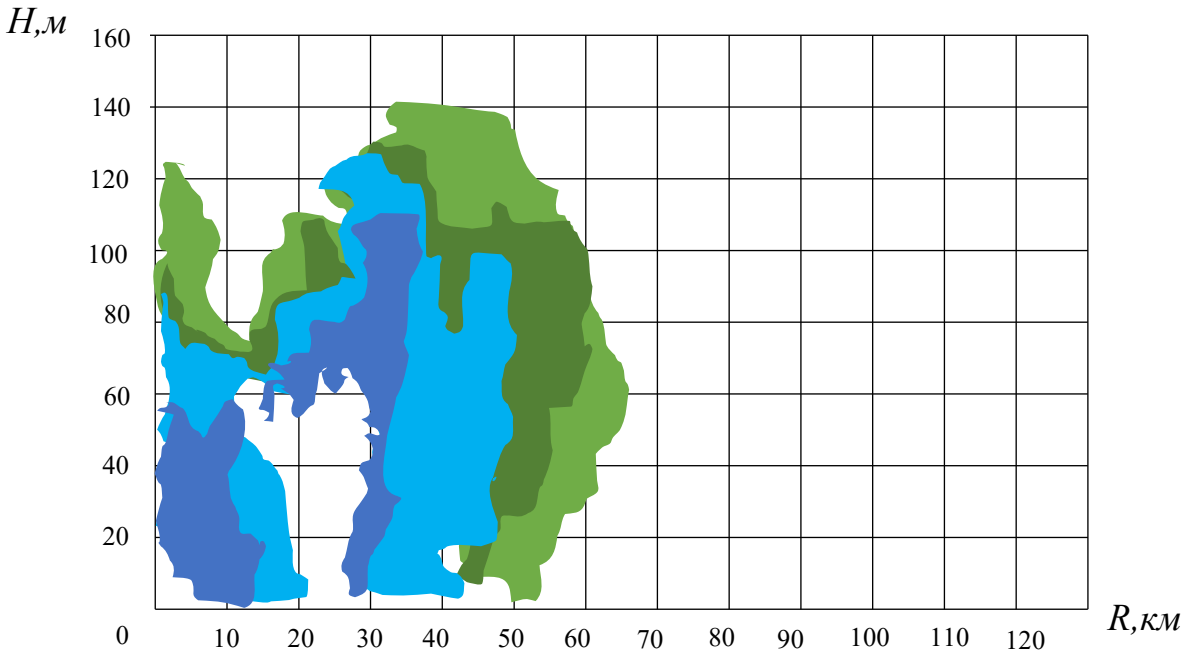


б)

Рис.А.22 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 121°

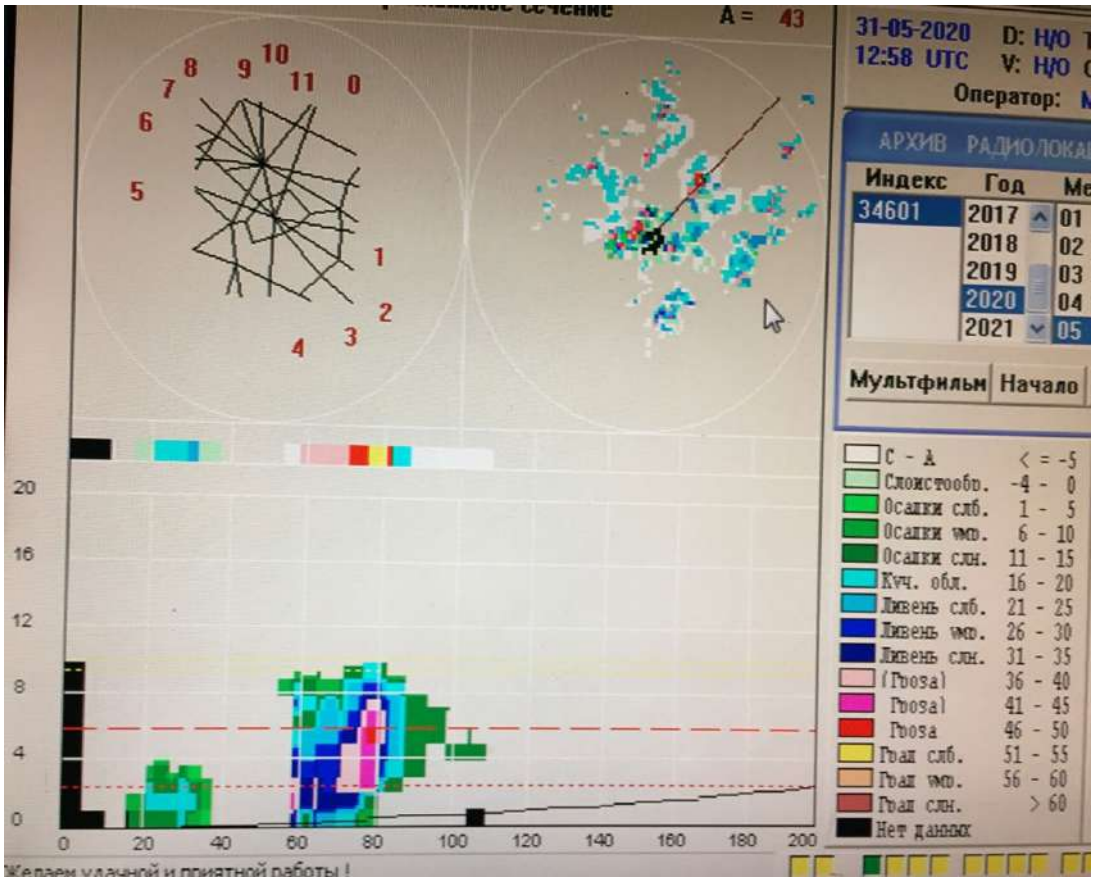


а)

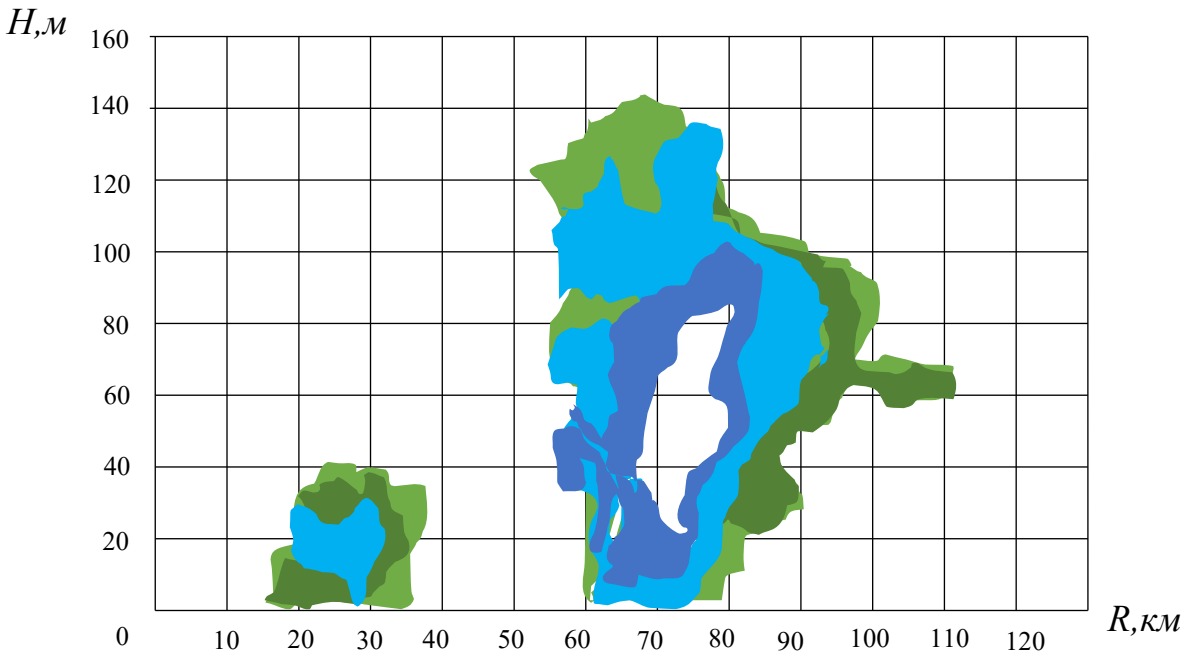


б)

Рис.А.23 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 026°

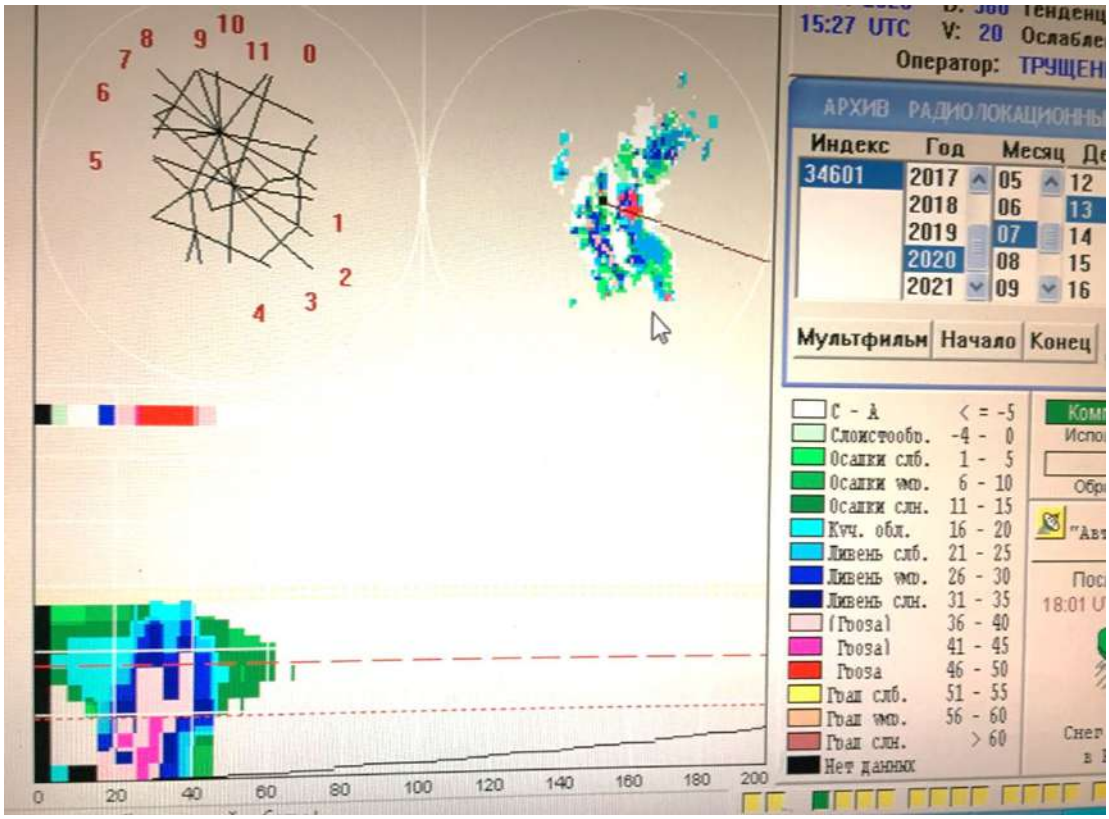


а)

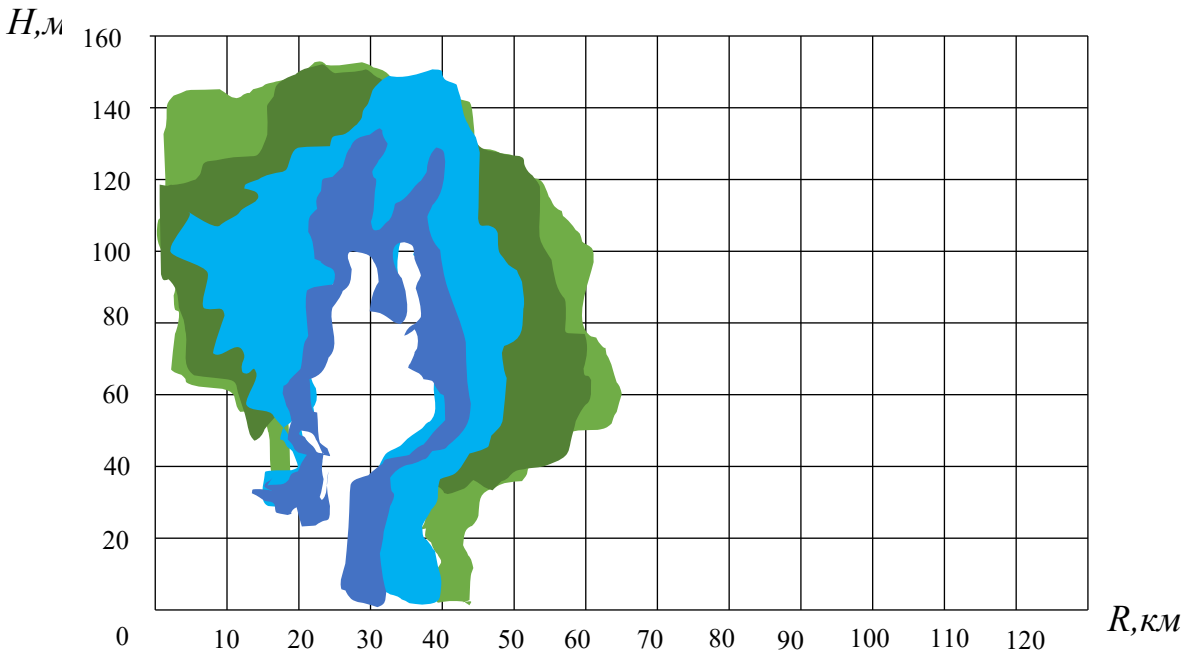


б)

Рис.А.24 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОЯКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 043°

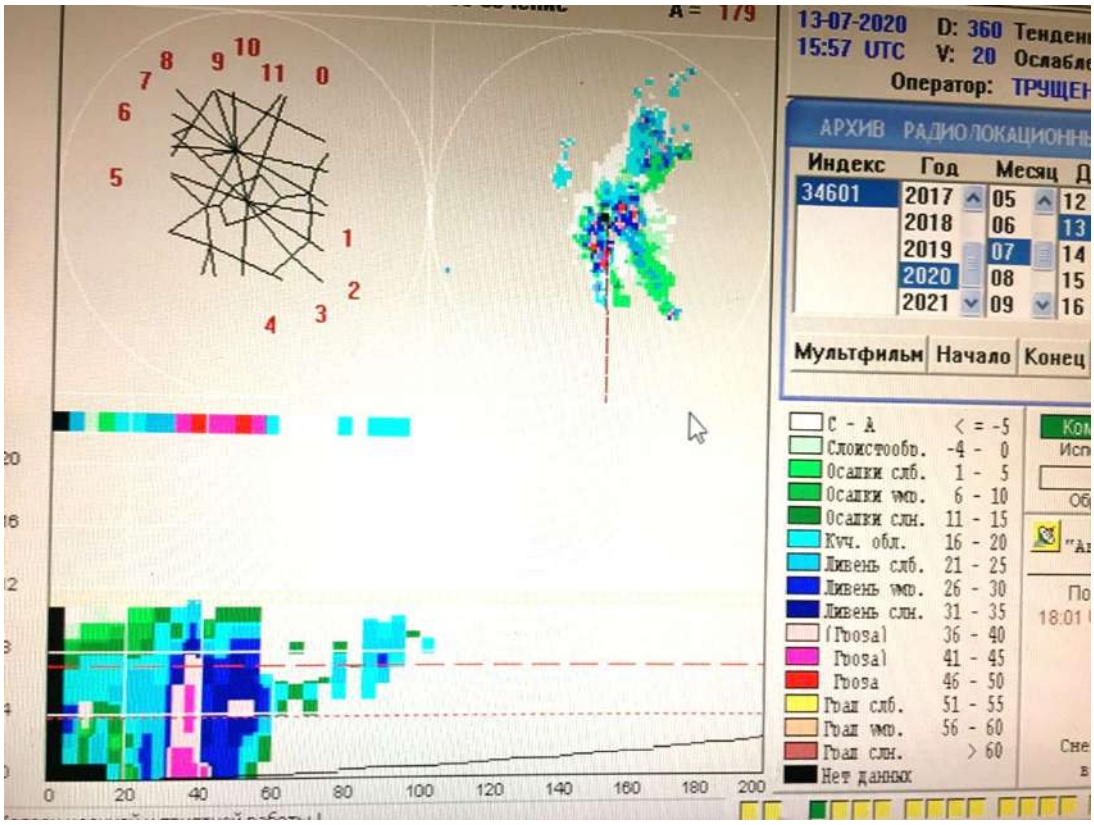


а)

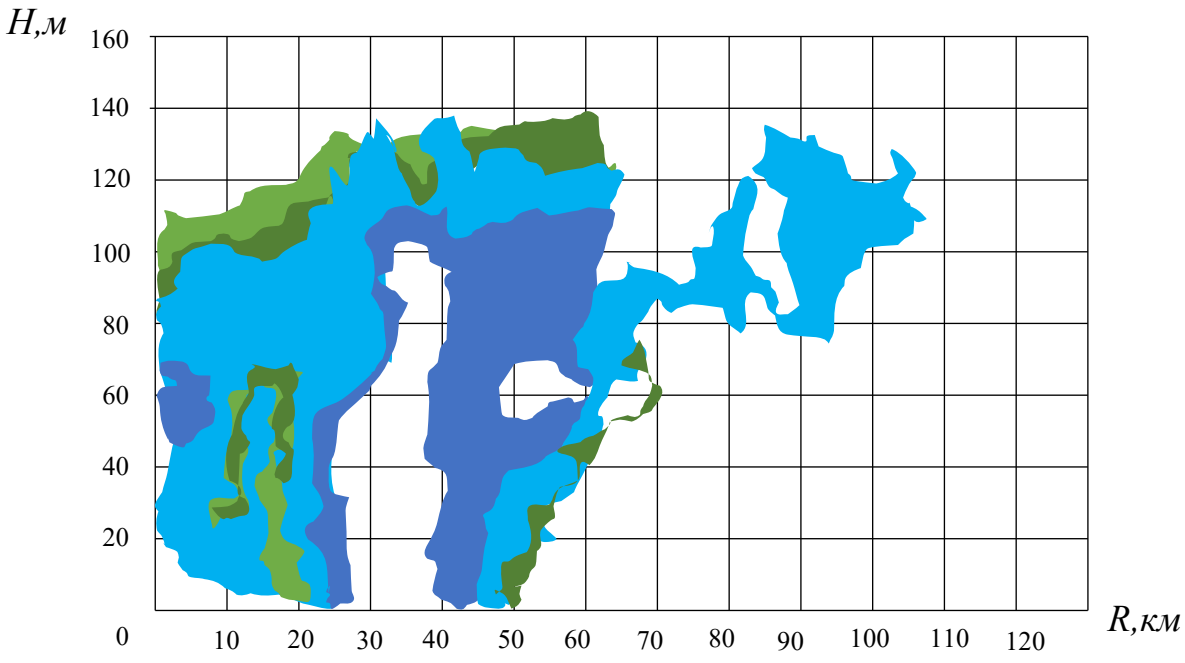


б)

Рис.А.25 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 114°



а)

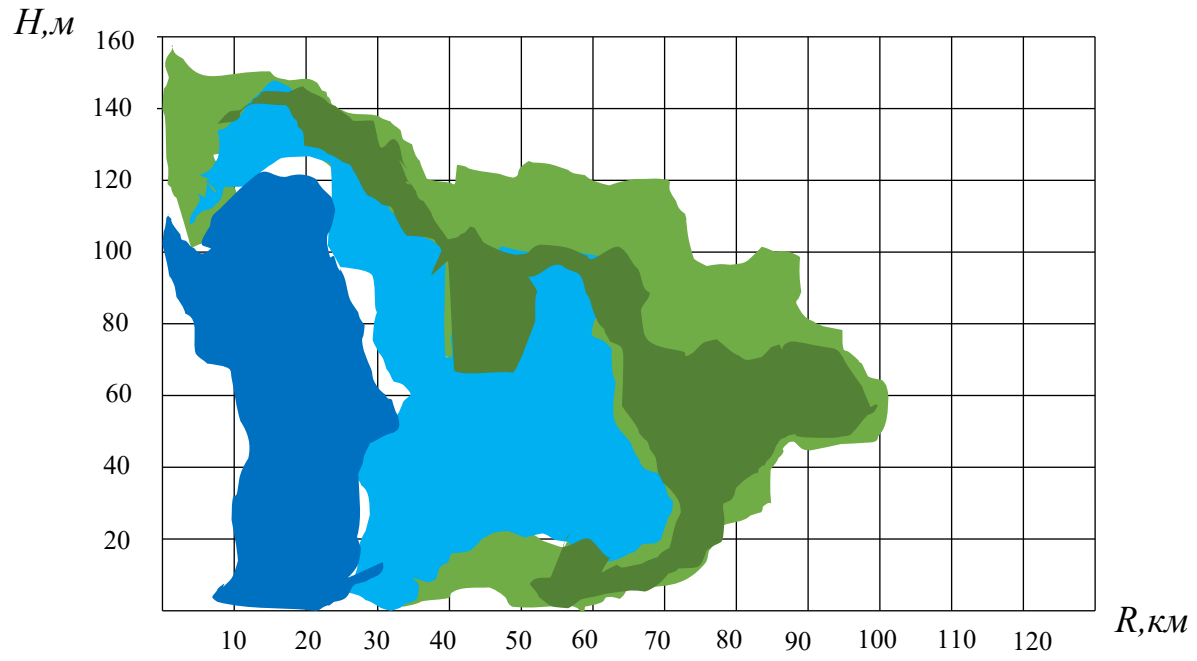


б)

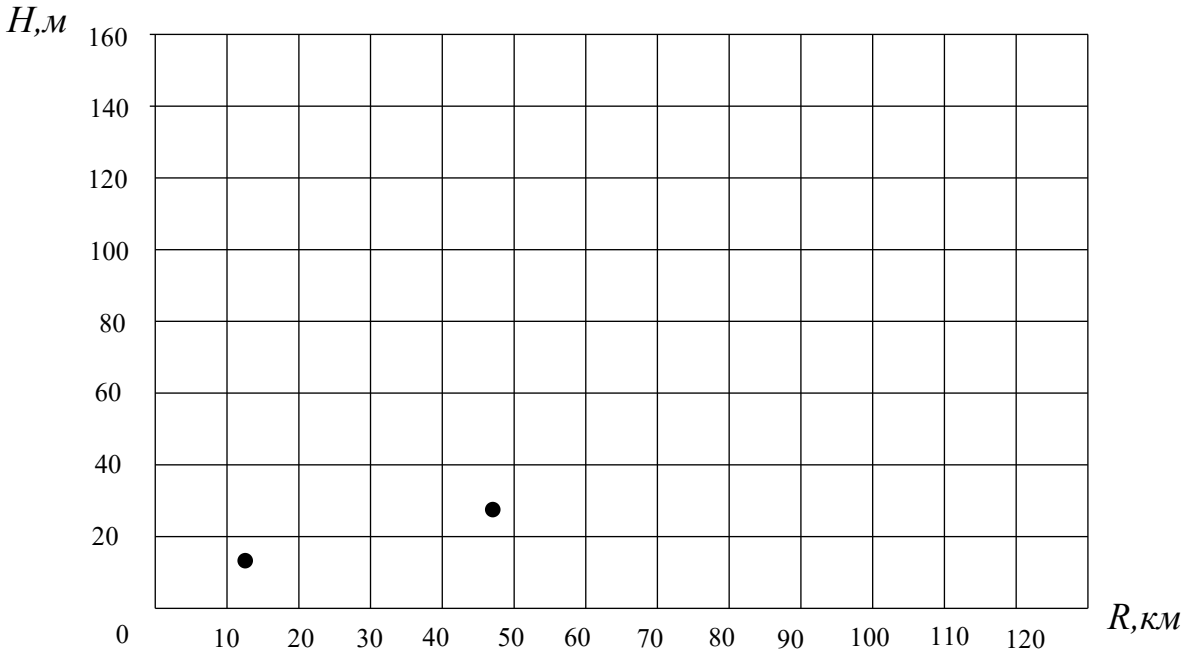
Рис.А.26 – Результати радіолокаційного спостереження атмосферних явищ, представлених на дисплеї АМРК «МЕТЕОКОМІРКА» (а) і на дисплеї СРПК (б) у напрямі азимута 179°

Додаток Б

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЯВЛЕННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ, ЯКІ ПЕРЕБУВАЮТЬ У ЗОНІ ВИПАДНИХ ОПАДІВ НА ДИСПЛЕЇ СРПК

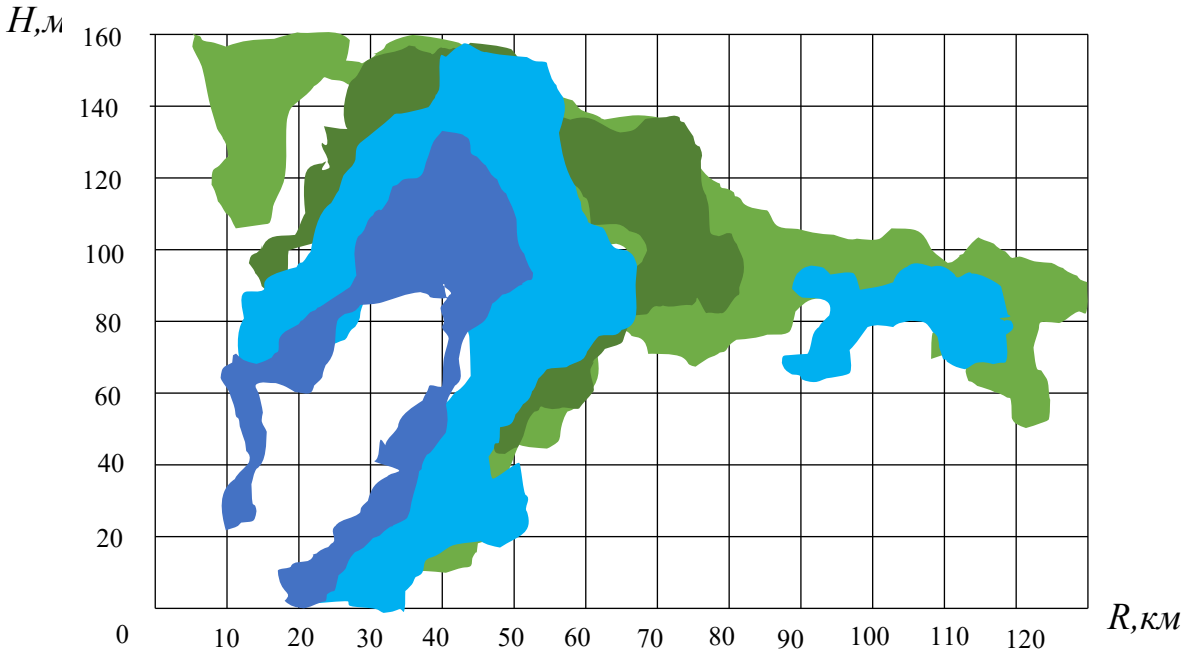


а)

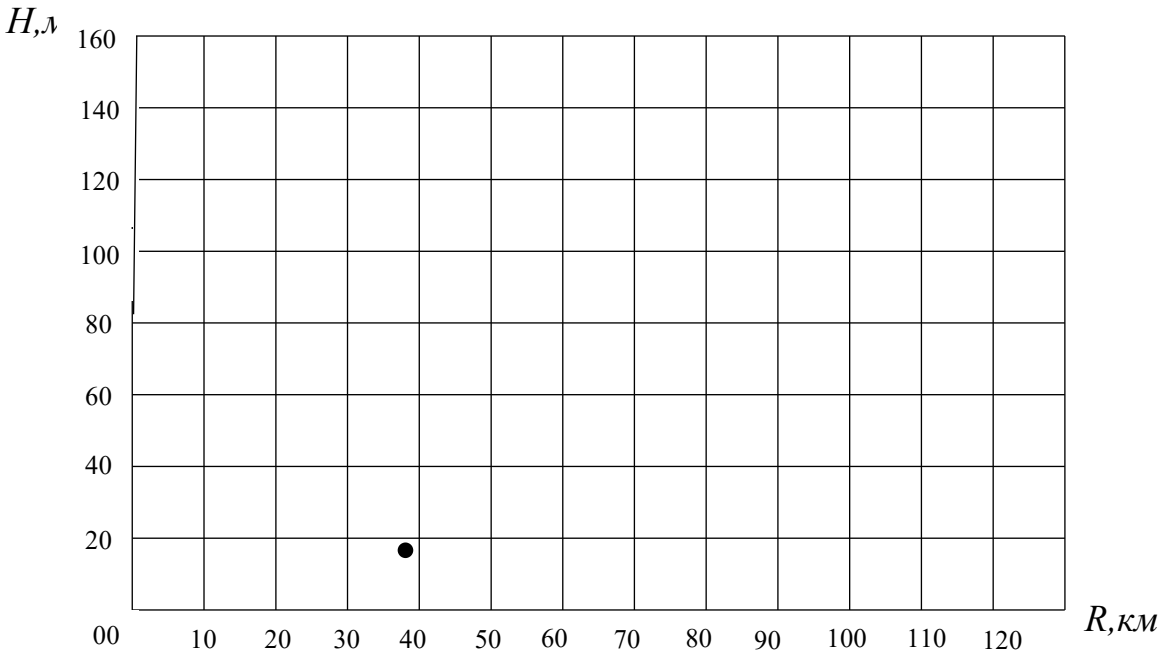


(*б*)

Рис.Б.1 - Результати експериментального виявлення навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів (*а*) у напрямі азимута $A_1 = 116^o$ з використанням енергетичної матриці розсіювання (*б*) на дисплеї СРПК

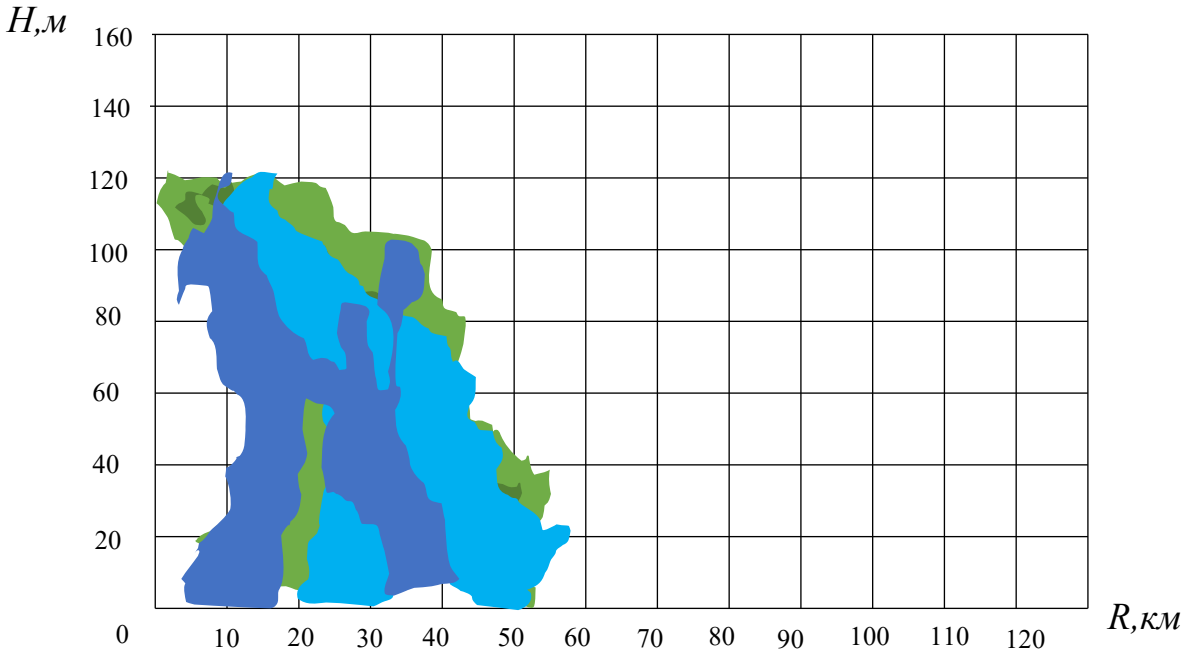


а)

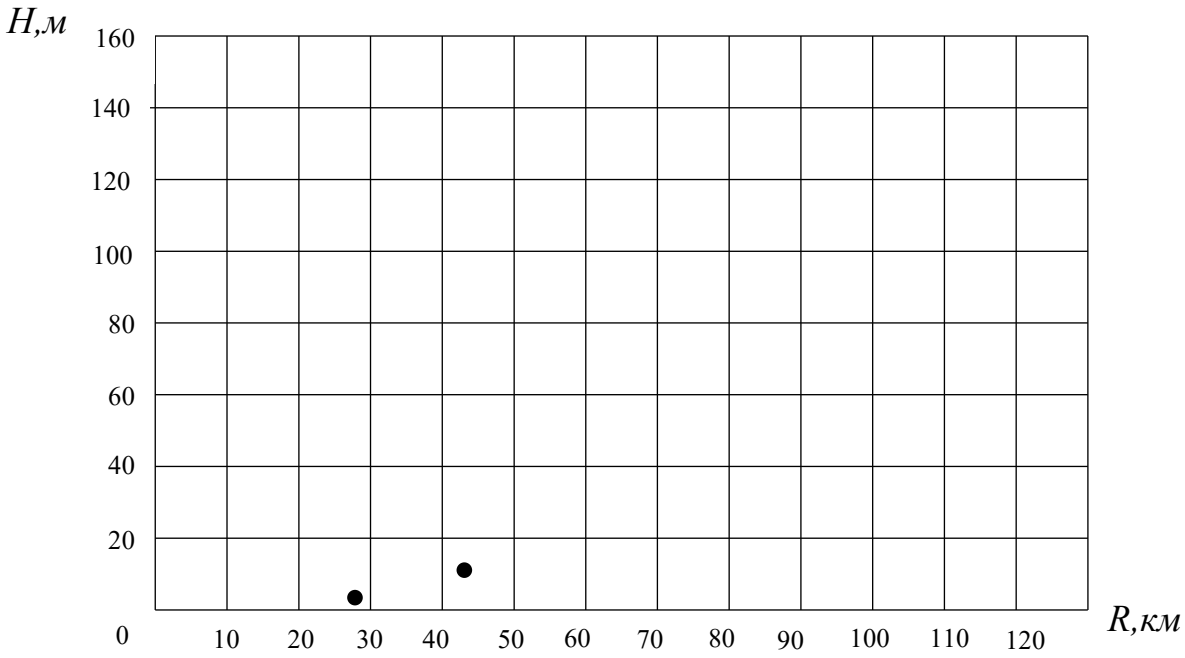


б)

Рис.Б.2 - Результати експериментального виявлення навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів (*а*) у напрямі азимута $A_2 = 093^o$ з використанням енергетичної матриці розсіювання (*б*) на дисплеї СРПК

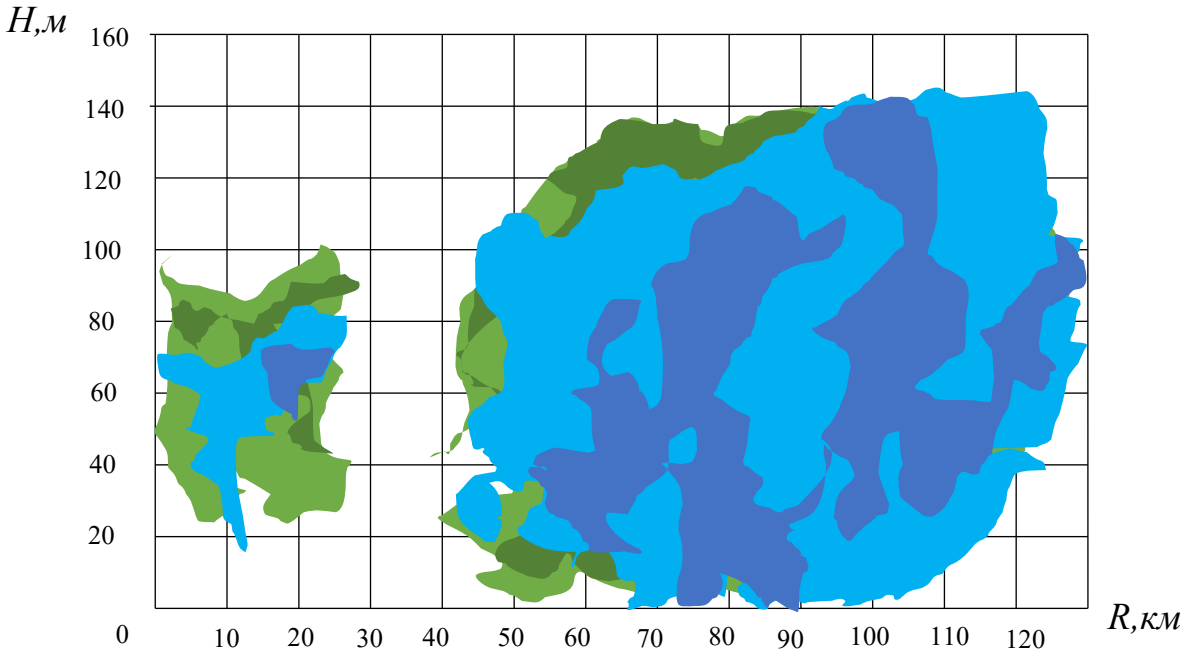


а)

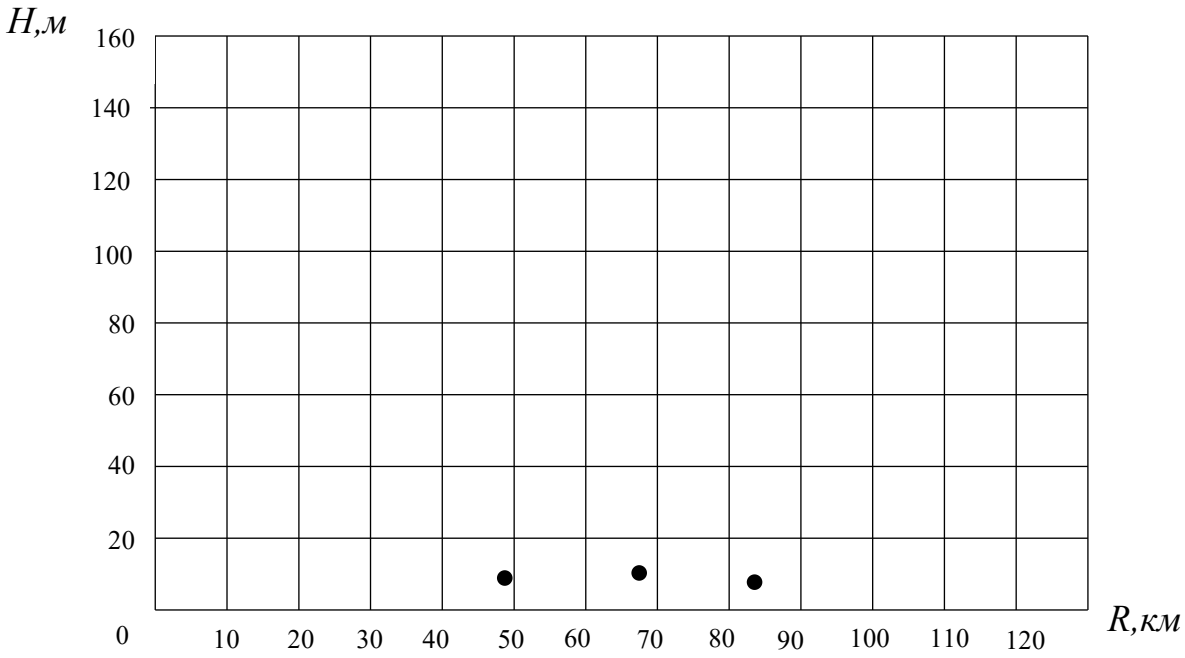


б)

Рис.Б.3 - Результати експериментального виявлення навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів (*а*) у напрямі азимута $A_3 = 120^o$ з використанням матриці когерентності (*б*) на дисплеї СРПК

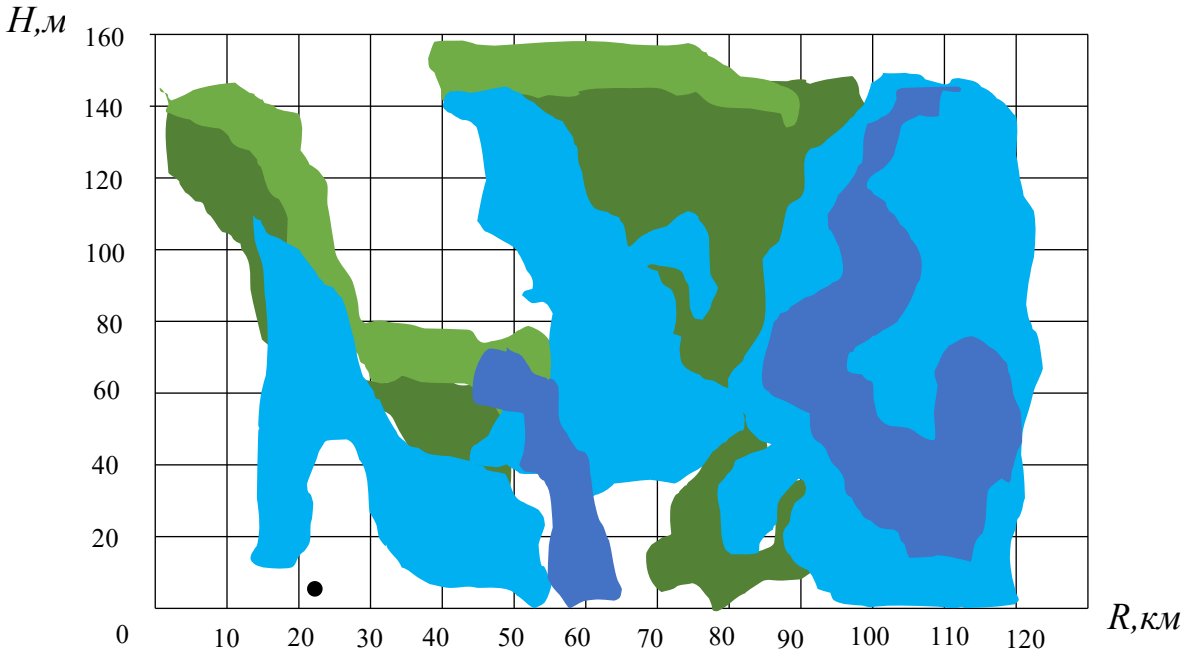


а)

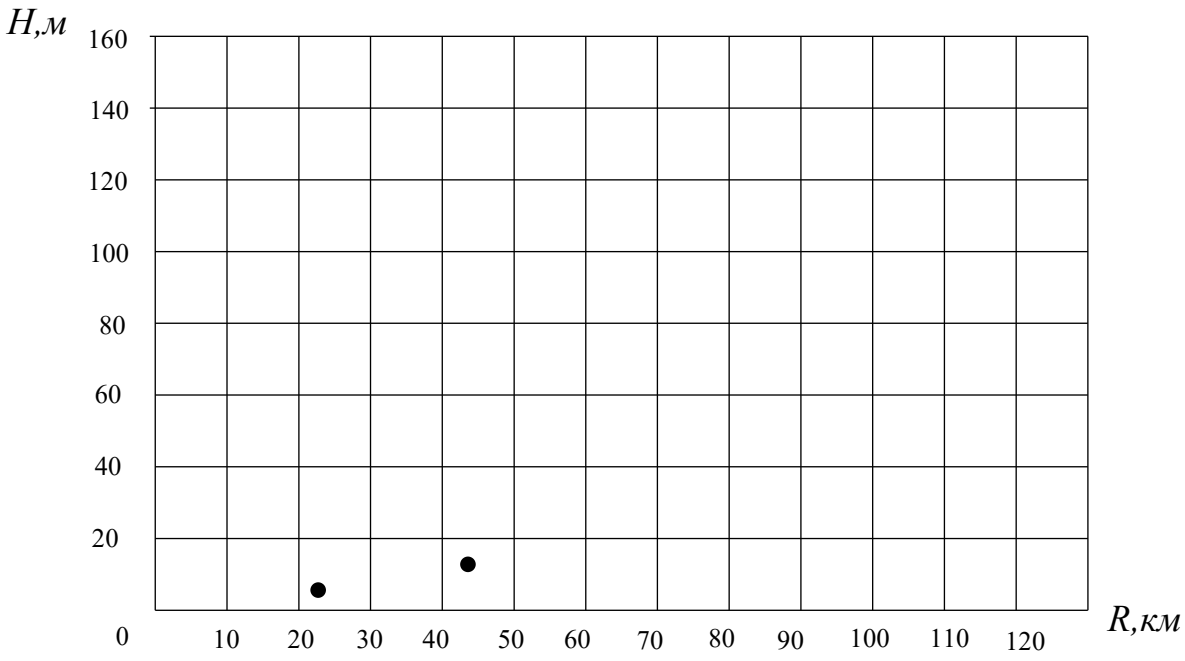


б)

Рис.Б.4 - Результати експериментального виявлення навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів (*а*) у напрямі азимута $A_4 = 075^o$ з використанням матриці когерентності (*б*) на дисплеї СРПК

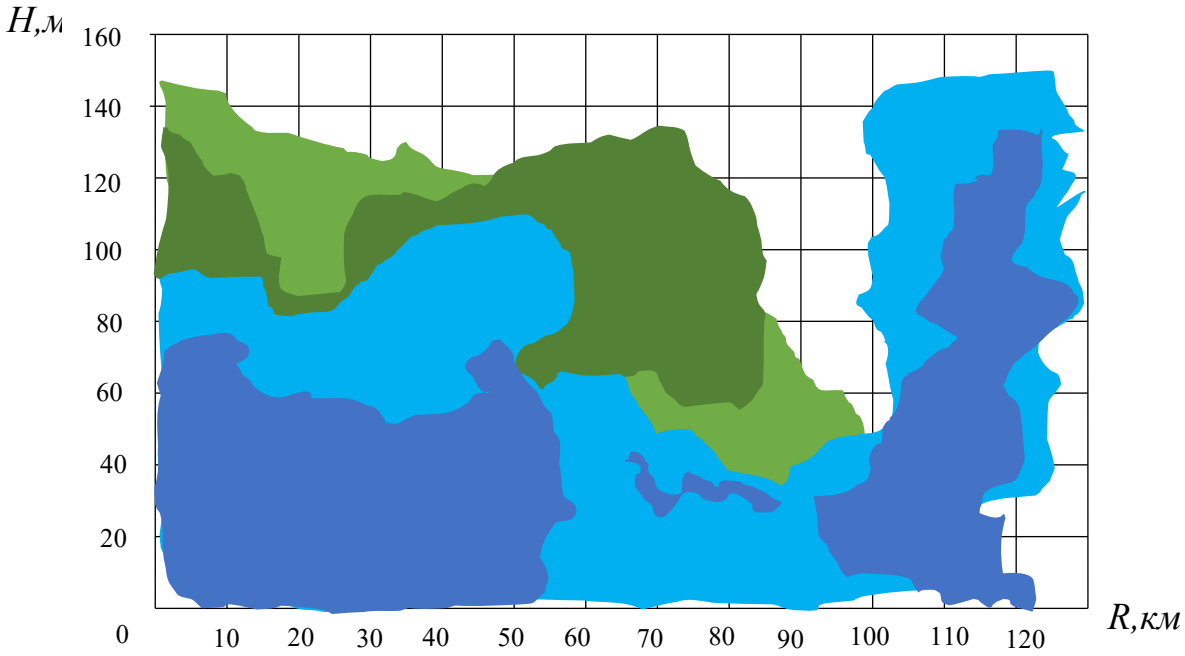


а)

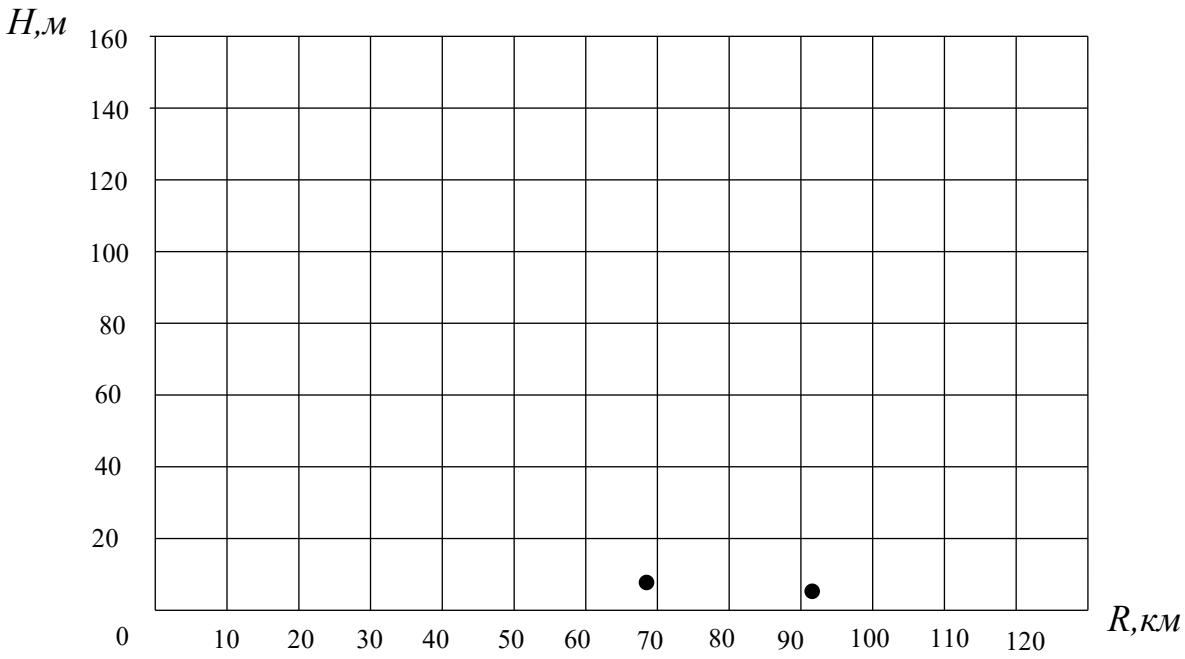


б)

Рис.Б.5 - Результати експериментального виявлення навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів (*а*) у напрямі азимута $A_5 = 102^o$ з використанням ступеня поляризації (*б*) на дисплеї СРПК

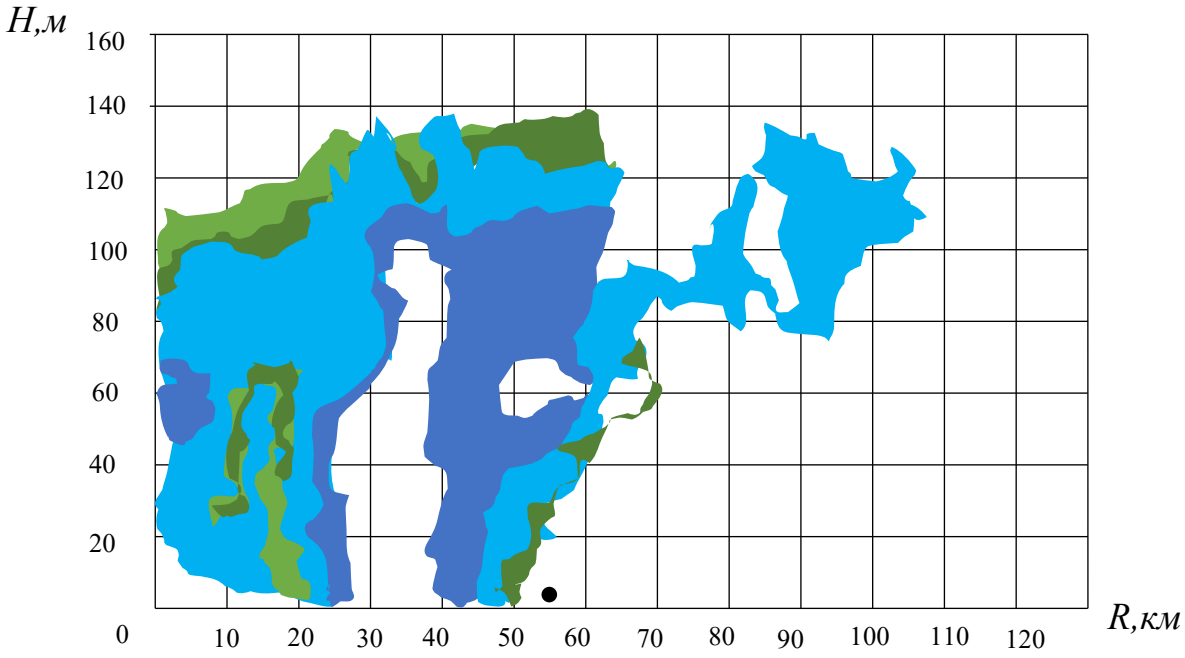


а)

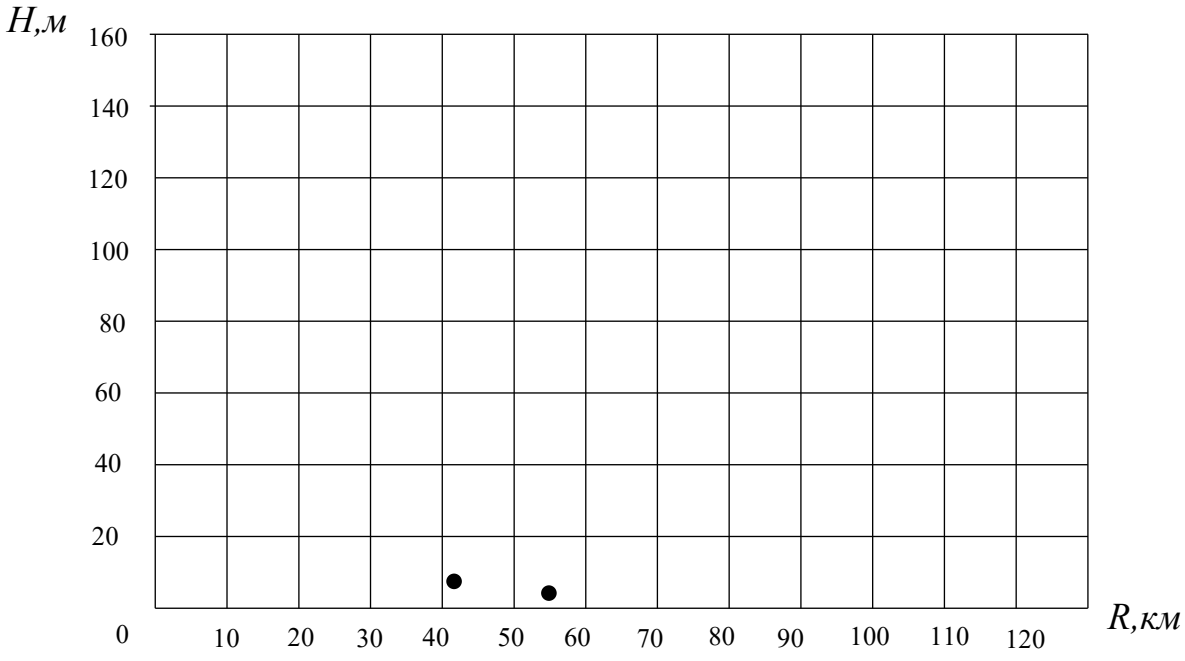


б)

Рис.Б.6 - Результати експериментального виявлення навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів (*а*) у напрямі азимута $A_6 = 061^o$ з використанням ступеня поляризації (*б*) на дисплеї СРПК

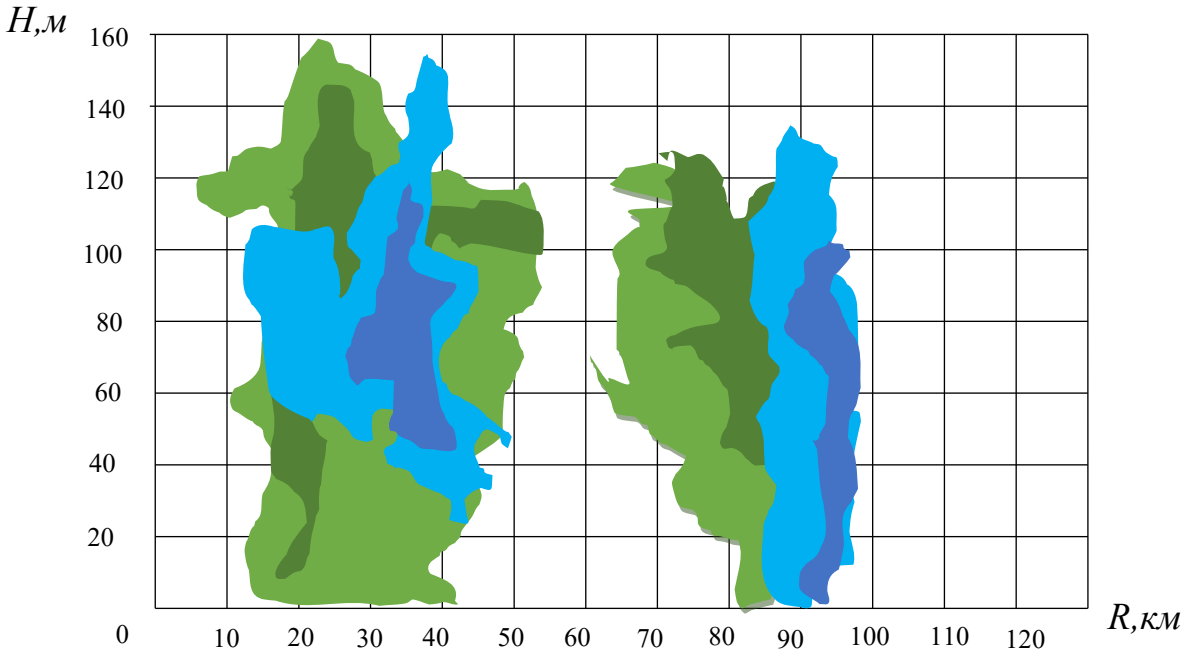


а)

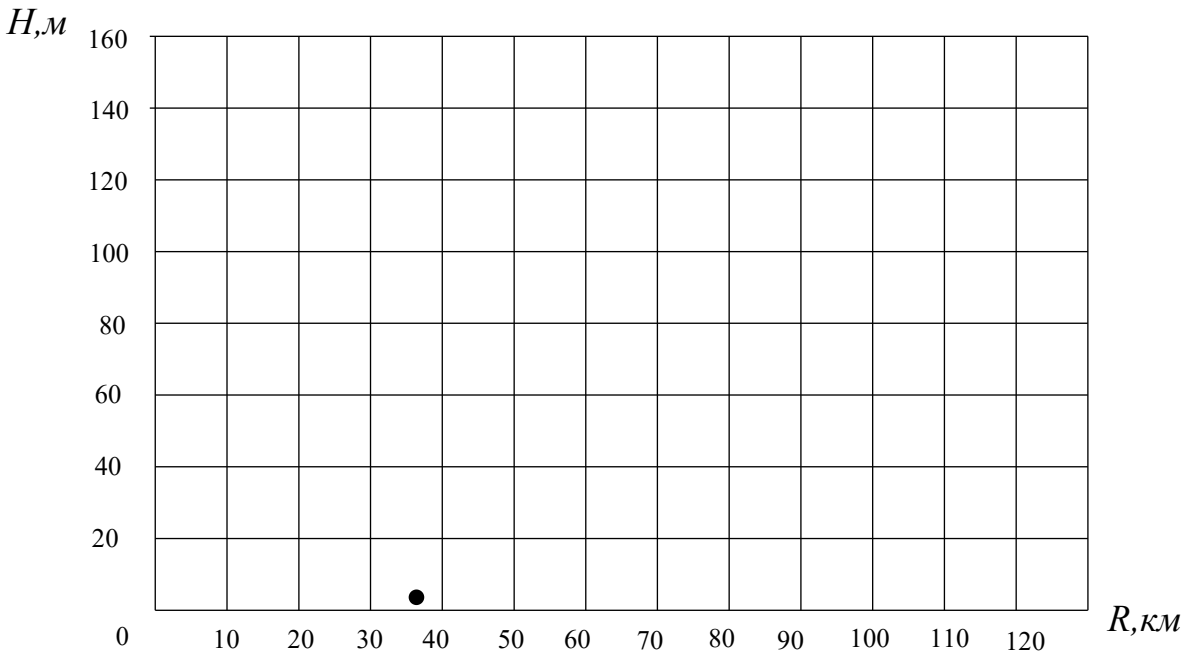


б)

Рис.Б.7 - Результати експериментального виявлення навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів (*а*) у напрямі азимута $A_7 = 129^o$ з використанням ступеня поляризації (*б*) на дисплеї СРПК

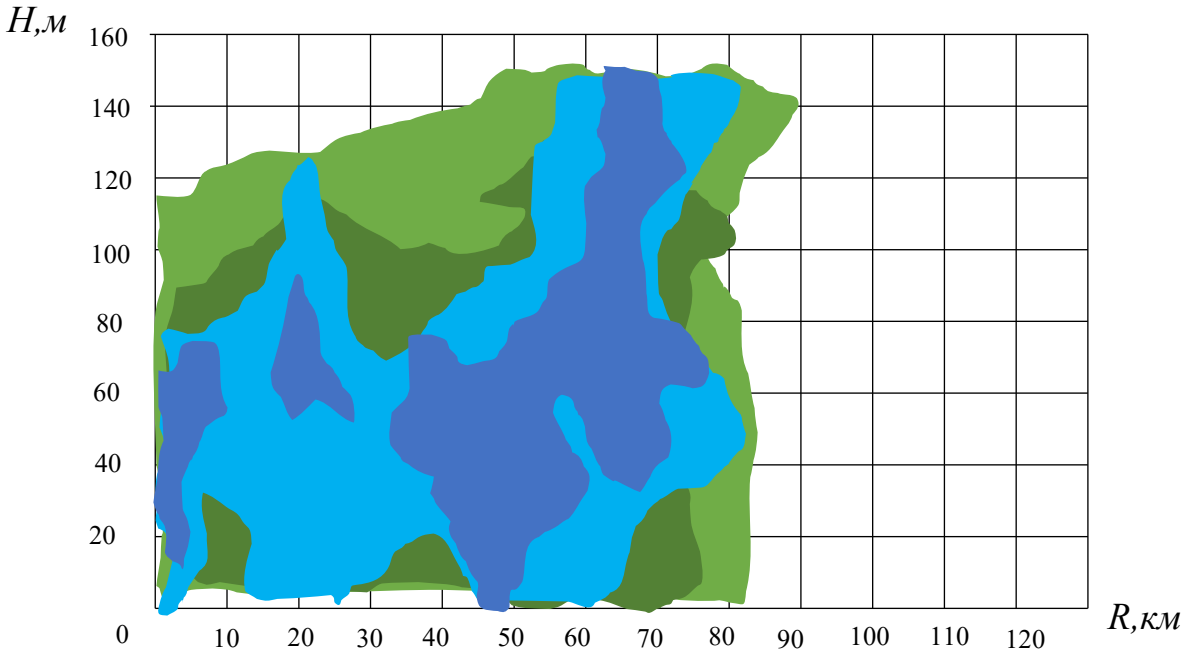


а)

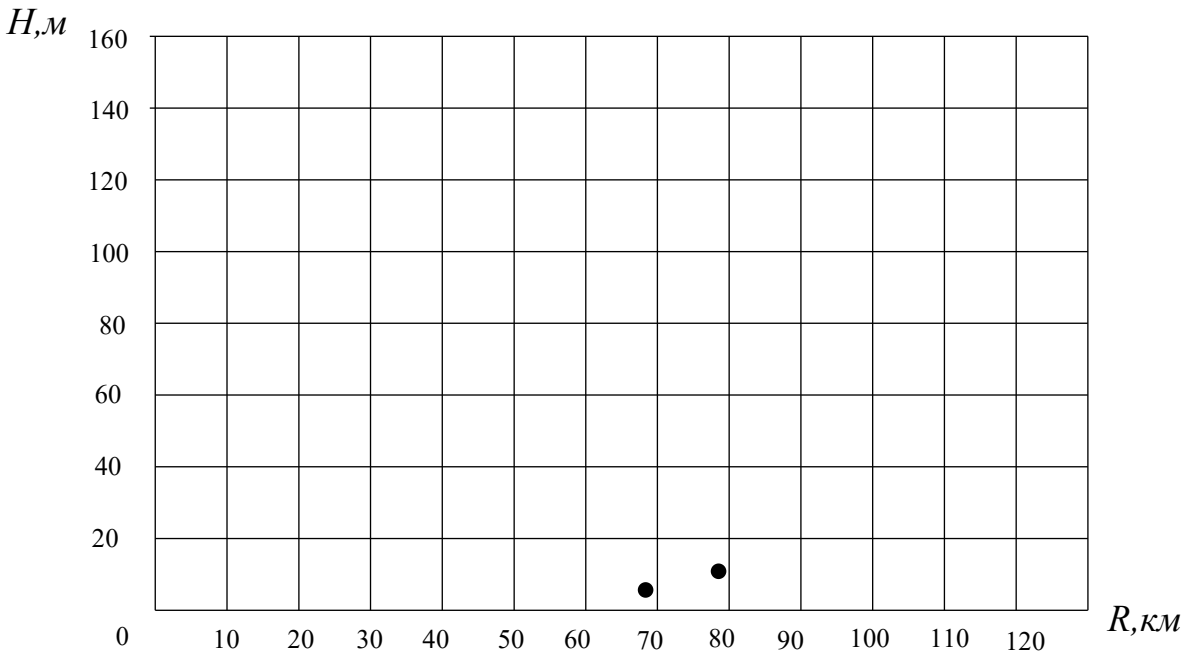


б)

Рис.Б.8 - Результати експериментального виявлення навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів (*а*) у напрямі азимута $A_8 = 118^o$ з використанням статистичних властивостей поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі (*б*) на дисплеї СРПК



а)



б)

Рис.Б.9 - Результати експериментального виявлення навігаційних об'єктів, які перебувають у зоні випадних опадів (*а*) у напрямі азимута $A_9 = 057^o$ з використанням статистичних властивостей поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі (*б*) на дисплеї СРПК

Додаток В

Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження

ДП «В.Шіпс (Україна)»
ЄДРПОУ 22516081
Україна, 65114
Одеса-114
Проспект Небесної Сотні, 37/2

Тел.: (048) 7 340 340
Факс: (048) 7 340 341
E-mail: odessaoutlook@vships.com
Web: www.vships.com.ua

АКТ

Про впровадження результатів дисертаційної роботи Корбана Дмитра Вікторовича "Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів", а саме:

- технологія, що забезпечує ефективність дистанційного радіолокаційного виявлення навігаційних об'єктів, які перебувають у небезпечних умовах атмосферного середовища за трасою руху судна, поляризаційною селекцією, яка дає змогу виділити луна-сигнал навігаційного об'єкта з сумарного луна-сигналу, який складається з луна-сигналу навігаційного об'єкта та луна-сигналу атмосферного утворення (зливові опади великої інтенсивності, тривалості та площі), і спостерігати навігаційний об'єкт на індикаторі суднової РЛС і дисплеї комп'ютера.

Розроблену автором технологію радіолокаційної видимості навігаційних об'єктів у будь-яких складних умовах атмосферного середовища можна використовувати як за трасою руху судна, так і під час його заходження в порти і виходу з портів.

Представлену автором технологію рекомендовано для застосування в процесі підготовки командного складу до плавання на суднах компанії, оскільки вона підвищує безпеку судноводіння в складних умовах атмосферного середовища і дає змогу завчасно ухвалити обгрунтоване й відповідальне рішення щодо керування судном.

Результати з розроблення поляризаційних методів і радіолокаційної апаратури, виконані в дисертаційному дослідженні, можуть бути запропоновані компанією розробникам суднових РЛС і зацікавленим суднобудівним компаніям до використання в суднових РЛС.

Генеральний директор компанії "V-Ships Ukraine"
капітан далекого плавання, к.т.н., професор, академік І.В. Сафін

28.11.2023

ЗАТВЕРДЖУЮ
Начальник Запорізького ЦГМ
_____Інна ЧЕРНИК

«20» січня 2022р.

АКТ
про впровадження результатів докторської дисертаційної роботи
«Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів»
Корбана Дмитра Вікторовича

«20» січня 2022р. м.Запоріжжя

Комісія у складі:
голова комісії: Сорокіна Т.П. – заступник начальника Запорізького ЦГМ;
члени комісії: Лазарок І.І. – начальник авіаційної метеорологічної станції цивільної (АМСЦ) Запоріжжя;
Шаман Т.В. – завідувач сектору радіолокаційних метеорологічних спостережень та інформації АМСЦ Запоріжжя
склали даний акт про те, що в оперативну роботу Запорізького обласного центру з гідрометеорології впроваджено результати дисертаційного дослідження Корбана Д.В. «Радіолокаційні методи поляризаційної селекції навігаційних об'єктів, що знаходяться на території Азовського моря в складних умовах атмосферного середовища (випадні зливові опади великої інтенсивності)», які дають змогу МРЛ виділити луна-сигнали об'єктів, що спостерігаються, з луна-сигналів зливових опадів на індикаторі кругового огляду, що підвищує безпеку судноводіння.

Голова комісії Тетяна СОРОКІНА

Члени комісії Інна ЛАЗАРОК

Тетяна ШАМАН

МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
ДП "МОРСЬКИЙ ТОРГОВЕЛЬНИЙ ПОРТ "ЧОРНОМОРСЬК"
вул. Праці, 6, м. Чорноморськ,
Одеська область, Україна, 68001
тел./факс: (048) 738 92 00
e-mail: port@imtp.ua
http://seaport.com.ua
код ЄДРПОУ 01125672

MINISTRY OF INFRASTRUCTURE OF UKRAINE
SE "COMMERCIAL SEA PORT "CHORNOMORSK"
6, Pratsi str., Chornomorsk, 68001
Odesa region, Ukraine
tel/fax: (048) 738 92 00
e-mail: port@imtp.ua
http://seaport.com.ua

1608

23.06.2021 № 393/02.3-10

на №_____від_____

Розроблена в дисертації «Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів» методологія поділу енергетичних параметрів монохроматичного і флуктаційного електромагнітних полів луна-сигналів частково поляризаційної хвилі складного об'єкта, що складається з навігаційного об'єкта (судна) і атмосферного утворення (випадаючи зливові опади на шляху судна) використана фахівцями Державного Підприємства «Морський торговельний порт «Чорноморськ» при радіолокаційному спостереженні морських суден, що заходять в порт при наявності випадаючих зливових опадів, що екранують луна-сигнал судна на індикаторі портового радіолокаційного комплексу, що дозволило виділити луна-сигнал морського судна і спостерігати його на радіолокаційному індикаторі і дисплеї комп'ютера.

Дана методологія дисертаційної роботи Корбана Д.В. дозволяє підвищити безпеку заходу морських суден в порт та буде впроваджена в оперативну роботу порту.

З повагою
В.о. директора порту В.А.Михайлов

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IS CERTIFIED IN COMPLIANCE WITH ДСТУ ISO 9001-2015 by Shipping Register of Ukraine
ISO 9001 SIC UA.02.009

Державна служба України з надзвичайних ситуацій

ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР ЧОРНОГО ТА АЗОВСЬКОГО МОРІВ (ГМЦ ЧАМ)

Французький бульвар, 89, м. Одеса, 65062, тел./факс (0482) 63-16-10

E-mail: pgdgmccham@meteo.gov.ua Код ЄДРПОУ 20992067

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Начальник Гідрометцентру
Чорного та Азовського морів
Ситов В.М.

«04» червня 2021 р.

АКТ

про впровадження результатів докторської дисертаційної роботи
Корбана Дмитра Вікторовича
«Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів»

Комісія у складі:
голови комісії: заступника начальника Гідрометцентру
Чорного та Азовського морів Неверовського І.П.
членів комісії: начальника відділу аерологічних спостережень Лаврентьєвої В.М.
начальника відділу метеорології Тарановської Є.І.
склали даний акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Корбана Д.В. в науково-дослідницьку та оперативну роботу Гідрометцентру
Чорного та Азовського морів по гідрометеорологічному та радіометеорологічному забезпеченню Одеського та Чорноморського торгових портів при заході та виході суден з їх акваторій в умовах обмеженої видимості у складних метеорологічних умовах, а саме:

- технологія підвищення відеоспостереження суден в складних умовах атмосферного середовища наземними радіолокаційними засобами з використанням кореляційної матриці, яка дозволяє здійснювати розподіл луна-сигналів на дисплеї комп'ютера судна і атмосферної перешкоди;
- методика і алгоритм розрахунку коефіцієнтів кореляційної матриці, які відповідають луна-сигналу судна і атмосферної перешкоди;
- методика виділення на радіолокаційній мапі метеоявищ луна-сигналів суден, що входять і виходять з порту та луна-сигналів атмосферних утворень.

Надані автором технологія і методики дозволяють за даними луна-сигналів радіолокаційної мапи спостерігати на екрані суднової РЛС луна-сигнал зустрічного судна, який дозволяє прийняти судноводію обгрунтоване і відповідальне рішення щодо виконання маневру при заході в порт та виході з нього.

Голова комісії Неверовський І.П.

Члени комісії Лаврентьєва В.М.
Тарановська Є.І.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Начальник Гідрометцентру
Чорного та Азовського морів
Ситов В.М.
«18» січня 2022 р.

АКТ

про впровадження результатів докторської дисертаційної роботи
Корбана Дмитра Вікторовича
«Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів»

Комісія у складі:

голови комісії: заступника начальника Гідрометцентру
Чорного та Азовського морів Неверовського І.П.
членів комісії: начальника відділу аерологічних спостережень Толкач Н.М.
начальника відділу морських прогнозів Щеголева М.А.

склали даний акт про впровадження в науково-дослідницьку та оперативну роботу Гідрометцентру Чорного та Азовського морів результатів дисертаційної роботи Корбана Д.В. щодо радіолокаційної технології та радіолокаційного поляризаційного комплексу з поляризаційною селекцією луна-сигналів навігаційних об'єктів та атмосферних утворень, що підвищило гідрометеорологічне забезпечення Одеського, Іллічівського та Ізмаїльського торгових портів і безаварійне судноплавство по їх акваторіям, незалежно від погодних умов.

Голова комісії Неверовський І.П.

Члени комісії Толкач Н.М.

Щеголева М.А.

АРГО
СУДНОПЛАВНА КОМПАНІЯ

ARGO
SHIPPING COMPANY

код ЄДРПОУ 31319944

вул. Воронцовська, 2 м. Херсон, 73000, Україна | 2, Vorontsovskaya str., Kherson, 73000, Ukraine
тел : (+380 552) 26-26-45; (+38) 095 493 43 66 : phn
факс : (+380 552) 46-01-12 : fax
e-mail : info@skargo.com.ua : e-mail

АКТ

про впровадження результатів докторської дисертаційної роботи Корбана Дмитра Вікторовича «Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів» в науково-дослідницьку та оперативну роботу судноплавної компанії «АРГО»:

- технологія використання матриці когерентності луна-сигналу частково поляризованої хвилі для радіолокаційного забезпечення безпеки судноводіння у складних умовах атмосферного середовища (сильні тумани, зливові опади великої інтенсивності, що зв'язані з циклонічними утвореннями);
- використання неполяризованої хвилі при радіолокаційному виділенні луна-сигналу навігаційного об'єкту, що знаходиться у зоні атмосферного утворення;
- використання хвилі лінійної поляризації для отримання радіолокаційної інформації щодо внутрішньої структури зливових опадів, що випадають на шляху судна;
- методика та алгоритм розрахунків зміни параметрів луна-сигналів, які надходять на вхід приймальної антени суднового радіолокаційного комплексу від навігаційних та атмосферних об'єктів, що використовуються при розходженні суден у складних умовах атмосферного середовища рекомендовані для використанні при навчанні офіцерів компанії.

В процесі підготовки командного складу до плавання на суднах компанії використано методика радіолокаційного розпізнавання навігаційних та атмосферних об'єктів, що розроблена Корбаном Д.В. в процесі підготовки докторської дисертації. Ця методика дозволяє судноводію у складних умовах атмосферного середовища виділити на дисплеї суднового комп'ютера та індикаторах суднового радіолокаційного комплексу луна-сигнал навігаційного об'єкту при наявності луна-сигналів атмосферних утворень та прийняти обгрунтоване та відповідальне рішення на виконання маневру для забезпечення безпеки плавання.

Капітан т/х «DAISY» Марченко В.І.

05.08.2021

mlv "DAISY"

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Перший проректор
НУ «Одеська морська академія»
Олександр ШЕМЯКІН

«15» 04 2024 р.

АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи Корбана Дмитра Вікторовича на тему: «Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів» у навчальному процесі академії для підвищення безпеки судноводіння.

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу академії Микола ПАРХОМЕНКО та завідуючий кафедрою управління судном д. т. н., професор Ігор БУРМАКА склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Корбана Д.В. впроваджені у навчальному процесі кафедри управління судном, у курсі з дисципліни «Управління процесами під час аварій, пошук та рятування на морі», для курсантів магістратури 2 року навчання.

Начальник навчального відділу
НУ «Одеська морська академія» Микола ПАРХОМЕНКО

Зав. кафедрою управління судном
д.т.н., професор Ігор БУРМАКА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор з науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Одеська морська академія»
д.т.н., професор

_____Вадим ЗАХАРЧЕНКО

«__» 05 20 24

АКТ

впровадження результатів докторської дисертаційної роботи
Дмитра КОРБАНА на тему: «Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів»

Ми, що нижче підписалися, начальник науково-дослідної частини університету, к.т.н., с.н.с., професор Віктор САВЧУК, директор навчально - наукового інституту навігації, д.т.н., професор Ігор ВОРОХОБІН, завідуючий кафедри управління судном, д.т.н., професор Ігор БУРМАКА склали цей акт у тому, що розділ 4 дисертаційної роботи Дмитра КОРБАНА «Розробка стратегії формування системи радіолокаційних сигналів, що базуються на їх поляризаційних параметрах» увійшов складовою частиною в звіт науково-дослідної роботи № ДР 0123U101463 НДР «Удосконалення методів управління та експлуатації суден».

Начальник науково-дослідної частини
НУ «ОМА»,
к.т.н., с.н.с., професор — Віктор САВЧУК

Директор навчально наукового
інституту навігації НУ «ОМА»,
д.т.н., професор — Ігор ВОРОХОБІН

Завідуючий кафедри управління судном,
НУ «ОМА», д.т.н., професор — Ігор БУРМАКА

ДОДАТОК Г

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ АВТОРА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України (що входять до переліку наукових фахових видань України, які рекомендовані МОН України для публікації результатів дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук):

1. **Корбан Д. В.** Влияние атмосферы на измерение дальности навигационных объектов судовой РЛС / Д. В. Корбан. // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып.35. Одесса: ОНМА, 2015. С.128-136

2. Корбан В. Х. Многофункциональный метеорологический радар / В. Х. Корбан, **Д. В.Корбан**, Л. М.Дегтярьова // Цифрові технології ОНАЗ, ім. О.С. Попова, 2016. №20. С.118-127.

3. **Корбан Д. В.** Влияние турбулентной тропосферы на разрешающую способность антенны судового радиолокатора по угловым координатам // Судовождение: Сб. научн. трудов / НУ «ОМА», Вып.26. Одесса: «ИздатИнформ», 2016. С.104-109.

4. Корбан В. Х. Использование поляризации электромагнитной волны при радиолокационном распознавании объектов / В. Х. Корбан, **Д. В. Корбан**, Л. М. Дегтярьова // Наукові праці ОНАЗ, ім. О.С. Попова, 2017. №1. С.75-82.

5. Путятин В. Г. Радиофизическая модель отражающего объема тропосферы / В. Г. Путятин, **Д. В. Корбан**, С. И.Заичко и др. // Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2017. Т.19. №3. С.42-52.

6. Путятин В. Г. Радиолокационное распознавание навигационных объектов на пути судна по поляризационным параметрам электромагнитной волны / В. Г. Путятин, **Д. В. Корбан**, С. И.Заичко и др.// Математичні машини і системи, 2017. №4. С.120-128.

7. Путятин В. Г. Влияние осадков на разрешающую способность судовой радиолокационной станции по угловым координатам / В. Г. Путятин, **Д. В. Корбан**, А. И. Князь // Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2017. Т.19. №4. С. 26-34.

8. Корбан В. Х. К возможности использования аффинного базиса в радиолокационных метеорологических поляриметрах / В. Х. Корбан, **Д. В. Корбан**, Л. М. Дегтярьова // «Цифрові технології» ОНАЗ ім. О. С. Попова, Одеса, № 21, 2017. С.129-137.

9. Путятин В. Г. Влияние атмосферных условий на радиолокационное наблюдение навигационных объектов / В. Г. Путятин, **Д. В. Корбан**, А. И.Князь // Реєстрація, зберігання і обробка даних, 2018. Т.20. №1. С. 40 – 51.

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

11. **Korban D. V.** Implementing the coherence matrix of the partially polarized wave to enhance efficiency of radar observation of the objects / D. V. Korban, O. M. Volkov, V. Ch. Korban, L. M. Degtjarjeva // Цифрові технології ОНАЗ ім. О. С. Попова. Одеса, 2018. № 23. С. 131–142.

12. **Korban D. V.** Improving the efficiency of remote radar observation of the objects / D. V. Korban, O. M. Volkov, V. Ch. Korban, L. M. Degtjarjeva // Цифрові технології ОНАЗ ім. О. С. Попова. Одеса, 2018. № 24. С. 118–127.

13. **Корбан Д. В.** Кінцевомірні розподіли при радіолокаційному спостереженні навігаційних об'єктів / Д. В. Корбан, І. О. Бурмака // Судноводіння: зб. наук. праць / НУ «ОМА». Одеса: ВидавІнформ, 2019. Вип. 29. С. 106–115. https://doi.org/10.31653/2306-5761.29.219.106-115

14. Корбан В. Х. До проблеми зменшення перешкод від атмосферних опадів при радіолокаційному спостереженні об'єктів судновою РЛС / В. Х. Корбан, **Д. В. Корбан**, В. Ю. Ревенко // Суднові енергетичні установки: Зб. наук. праць/ НУ «ОМА». – Вип.40. Одеса: «ВидавІнформ», 2020. С.79-87.

15. **Корбан Д. В.** Аналіз функціональних зв'язків навігаційного об'єкту і зовнішнього середовища при функціонуванні суднової радіолокаційної станції (РЛС) / Д. В. Корбан // Суднові енергетичні установки: Зб. наук. праць/ НУ «ОМА». – Вип.43. – Одеса: «ВидавІнформ», 2021. С.172-195.

16. **Korban D. V.** Polarization selection of navigation objects located in the zone of atmospheric formations / D. V. Korban // Судноводіння / Shipping & Navigation. 2021. No. 32. С. 56–70. https://doi.org/10.31653/2306-5761.32.2021

17. **Корбан Д. В.** Шестиканальний поляризаційний роздільник всеполяризованої антени з керуванням поляризації електромагнітної хвилі на випромінювання / Д.В. Корбан // Судноводіння: Зб. наук. праць / НУ «ОМА», Одеса: ВидавІнформ, 2022. Вип.33. С. 79 - 90. https://doi.org/10.31653/2306-5761.33.2022.67-78

18. **Корбан Д. В.** Радіолокаційне вимірювання характеристик розсіяння об'єкту при наявності природного фону / Д.В. Корбан // Водний транспорт. Зб. наукових праць ДУІТ. Київ: ДУІТ, 2023. Вип. 1(37). С. 122-134. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37 .

19. **Корбан Д. В.** Радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів у складних умовах атмосферного середовища з використанням поляризаційної селекції луна-сигналі / Д. В. Корбан, І. О. Бурмака. // Водний транспорт: зб. наук. праць ДУІТ. Київ: ДУІТ, 2024. Вип. 1(39).С. 35-48. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.04

20. **Корбан Д. В.** Радіолокаційні методи поляризаційної селекції морських об’єктів: монографія / Д. В. Корбан. Одеса: НУ «ОМА», 2024. 155 с. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25651473.v1

21. **Корбан Д. В.** Поляризаційні вимірювання луна-сигналів частково поляризованих хвиль складних об'єктів судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом / Д. В. Корбан // Судноводіння / Shipping & Navigation. 2024. No. 36. С. 77–85. https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.77-85

22. Галамутько О. Підвищення точності визначення навігаційних параметрів радіолокаційною системою судна при виконанні лоцманської проводки / О. Галамутько, **Д. В. Корбан** // Судноводіння / Shipping & Navigation. 2025. No. 38. С. 93–103. https://doi.org/10.31653/2306-5761.38.2025.93-103

23. **Корбан Д. В.** Відбивна здатність складного об'єкту, який знаходиться у зоні функціонування суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу / Д. В. Корбан // Судноводіння / Shipping & Navigation. 2025. No. 38. С. 116–127. https://doi.org/10.31653/2306-5761.38.2025.116-127

Статті в іноземних виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus and Web of Science:

24. Polarization-based target detection approach to enhance small surface object identification ensuring navigation safety / M. Stetsenko, O. Melnyk, I. Vorokhobin, **D. Korban**, O. Onishchenko та ін. System Research and Information Technologies. 2024. № 2. С. 35–51. https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2024.2.03

25. **Korban D.** Polarization method of navigation object selection in ship radar systems. Scientific Journal of the Maritime University of Szczecin. 2023. Vol. 76 (148). P. 17–22. https://doi.org/10.17402/581

26. Radar - based detection and recognition methodology of autonomous surface vehicles in challenging marine environment / **D. Korban**, O. Melnyk, O. Onishchenko, S. Kurdiuk, V. Shevchenko, T. Obniavko. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2024. Vol. 122. P. 111–127. https://doi.org / 10.20858/sjsutst.2024.122.7 .

27. Method of polarization selection of navigation objects in adverse weather conditions using statistical properties of radio signals / **D. Korban,** O. Melnyk, S. Kurdiuk, O. Onishchenko, V. Ocheretna, O. Shcherbina, O. Kotenko. System Research and Information Technologies. 2025. № 1. С. 73–88. https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2025.2.03.

28. **Korban, D.** Increasing the functionality of the ship's radar systems. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin. 2024. Vol. 79 (151).P. 22–29. https://doi.org/10.17402/612

Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності

29. Спосіб підвищення ефективності виявлення та супроводження надводних цілей навігаційною радіолокаційною станцією незалежно від стану морської поверхні: Пат. 119985 Україна: МПК G01S 13/00, G01S 13/66, G01S 7/12 / В. В. Голіков, М. С. Стеценко, О. Г. Губський, **Д. В. Корбан**; заявл. 21.10.2016; опубл. 25.10.2017, Бюл. № 20.

30. Спосіб підвищення ефективності виявлення та супроводження надводних об'єктів судновою навігаційною радіолокаційною станцією на тлі атмосферних утворень різного типу та ступеня інтенсивності: пат. 151471 Україна: МПК: G01S 13/00 G01S 13/66 / М. С. Стеценко, **Д. В. Корбан**; заявл. 09.11.2020; опубл. 03.08.2022, Бюл. №31.

31. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 139439 Україна. Докторська дисертація «Підвищення ефективності функціонування суднових радіолокаційних комплексів» / Д. В. Корбан ; заявник та правовласник **Д. В. Корбан**. - реєстр. 15.09.2025.

Статті у збірниках за матеріалами конференцій

32. **Корбан Д. В.** Принцип взаимности применительно к поляризационным свойствам антенны судового радиолокационного поляриметра / Д. В. Корбан // Матеріали наук.-методичної конференції: «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві» (19-20 листопада 2015р.), Одеса, 2015. С.151.

33. **Корбан Д. В.** Влияние атмосферных образований на точность измерения угловых координат навигационных объектов / Д. В. Корбан // Матеріали науково-техн. конф.: «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека» 16 -17 листопада 2016. Одеса, НУ «ОМА», 2017. С.16-17.

34. **Корбан Д. В.** Использование судовой РЛС при проведении спасательных работ на море / Д. В. Корбан, Р. А. Иванов // Матеріали науково- техн. конф.: «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (16-17 листопада 2017). Одеса: НУ ОМА, 2018. С.159-162.

35. **Корбан Д. В.** Информационная технология синтеза поляризационного состояния электромагнитной волны при радиолокационном наблюдении навигационных объектов /Д. В. Корбан // Матеріали X наук.-практичної конф.: «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (MINTT-2018) (29-31 травня 2018 р.), Херсон, 2018. С.121-123.

36. **Korban D.** Parametric polarization radio-location method of improvement of radiolocation observation of navigational objects against the background of natural hindrances / D Korban, O Volkov, P Kostenko // SEA - CONF 2018 4th INTERNATIONAL CONFERENCE. May 17th – 19th, 2018 Constanta. P.91-99.

37. **Корбан Д.В.** Поляризаційна структура сигналів в інформаційному каналі суднових РЕК / Д. В. Корбан, А. В. Подорван, Т. Н. Буяджи // Матеріали наук.-техн. конф. «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» 14-15.11.2019. Одеса: НУ ОМА, 2019. С.128-129.

38. **Корбан Д. В.** Ефективність пригнічення відбиттів від атмосферних утворень судновою РЛС з лінійною поляризацією / Д.В. Корбан, О.Ю. Морозов // Матеріали наук.-техн. конф. «Транспортні технології (Морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» 14-15.11.2019. Одеса: НУ ОМА, 2019. С.136.

39. **Корбан Д. В.** Использование неполяризованной волны для радиолокационной селекции навигационных объектов при наличии атмосферного фона / Д. В. Корбан // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2020): матеріали XII Міжнар. наук. – практ. конф. (Херсон , 27 – 29 травня 2020 р.). Херсон, 2020. С. 68-70.

40. **Корбан Д. В.** Радіолокаційне виявлення луна-сигналів навігаційного об'єкта судновою РЛС при наявності атмосферниих перешкод / Д. В. Корбан // Матеріали міжнародної наукової інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 51)» / Збірник тез доповідей: випуск 51 (м. Тернопіль, 16 вересня 2020 р.). Тернопіль, 2020. С.40-41.

41. **Корбан Д. В**. Вплив відбиттів від атмосферних утворень та водної поверхні на роботу суднової РЛС / Д. В. Корбан, Ю. В. Шевченко // Матеріали наук.-техн. конф. «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплав-ство, перевезення, автоматизація» 17.11.2020. Одеса: НУ ОМА, 2020. С.97-101.

42. **Корбан Д. В.** Виявлення і розпізнавання поляризаційних сигналів навігаційних об'єктів при наявності нормальних частково поляризованих перешкод / Д. В. Корбан // Сучасні тенденції розвитку морської галузі, підвищення ефективності та безпеки судноплавства: матеріали Міжнар. наук. конф. (Маріуполь, 23 квітня 2021р.). Маріуполь: АМІ НУ «ОМА», 2021. С.28-37.

43. **Корбан Д. В.** Поляризаційна селекція навігаційних об'єктів судновими РЛС / Д. В. Корбан // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-21): матеріали XIII Міжнар. наук. - практ. конф. (Херсон, 22-27 травня 2021 р.) Херсон: ХДМА, 2021. С.122-124.

44. **Корбан Д. В.** Виявлення і відмінність поляризованих сигналів навігаційних об'єктів при наявності нормальних частково поляризованих перешкод / Д. В. Корбан // Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021): матеріали Першої Міжнар. наук. - практ. конф. (Херсон, 3-5 листопада 2021 р.) Херсон: ХДМА, 2021. С.189-192.

45. **Korban D.** Improving the efficiency of ship radar systems functioning / D. Korban // Navigation, Shipping and Technology (NST): Materials International Conference on Science and Technology November 18th November (Odessa, 18 – 19 Nov. 2021) Odessa, NUOMA, 2021. P.77-80.

46. **Корбан Д. В.** Розпізнавання навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні випадних опадів, судновими РЛС з використанням ступеня поляризації відбитої хвилі / Д. В. Корбан // Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2022): матеріали Першої Міжнар. наук.-практич. конф.(Херсон, 7 грудня 2022 р.). Херсон: ХДМА, 2022. С.90-93.

47. **Корбан Д. В**. Селекція радіолокаційних сигналів навігаційних об'єктів, що знаходяться у зоні атмосферних утворень / Д. В. Корбан // «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт: матеріали наук.-техн. конф. (Одеса, 24-25 березня 2022 р.). Одеса: НУ "ОМА", 2022. С.25-28.

48. **Корбан Д. В.** Поляризаційна модель складного об'єкта, що спостерігається судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом / Д. В. Корбан // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: зб. тез доповідей Міжнародної наукової інтернет-конф. (Тернопіль, 7 - 8 червня 2022 р.). Тернопіль, 2022. вип. 68. С. 83-85.

49. **Корбан Д. В.** Ефективність використання кругової поляризації при радіолокаційному спостереженні навігаційних об'єктів /Д. В. Корбан, В.М. Абрамова // Navigation, Shipping and Technology (NST-2022): матеріали наук.-техн. конф. (Одеса, 17-18 листопада 2022 р.). Одеса: НУ «ОМА», 2022. С.103-105.

50.**Корбан Д. В.** Матриця розповсюдження небезпечних атмосферних утворень / Д. В. Корбан, Я. К. Куценко // Navigation, Shipping and Technology (NST-2022): матеріали наук.-техн. конф. (Одеса, 17-18 листопада 2022 р.). Одеса: НУ «ОМА», 2022. С.110-112.

51. **Корбан Д. В.** Модель основного інформаційного потоку в судновому радіолокаційном поляризаційному комплексі / Д. В. Корбан // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023): матеріали XV Міжнародної наук.-практич. конф. (Херсон, 24–25 травня 2023 р.). Херсон: ХДМА, 2023. С.225-228.

52. **Корбан Д. В.** Оптимальний статистичний синтез алгоритмів виявлення і розпізнавання сигналів навігаційного об’єкта при наявності частково поляризованої перешкоди від атмосферного утворення / Д.В. Корбан // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: зб. тез доповідей Міжнародної наукової інтернет-конф. (Тернопіль, 7-8 грудня 2023 р.). Тернопіль, 2023. Вип.83. С. 169-171.

53. **Korban D**. The model of the main information flow in radar observation of objectsin difficult atmospheric conditions / D. Korban // The First International Symposium "Special Ships and Intelligent Systems 2023" (Sanya, 16-18 December, 2023). Sanya, 2023.

54. Корбан Д. В. Вплив морської поверхні на радіолокаційне спостереження навігаційнихоб'єктів судновим радіолокаційним поляризаційним комплексом // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2024):

матеріали XVI Міжнародної наук.-практич. конф. (Одеса, 29–31 травня 2024 р.). Херсон: ХДМА, 2024. С.156-159.

55. **Корбан Д. В.** Структура побудови сучасного суднового радіолокаційного поляризаційного комплексу // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: зб. тез доповідей Міжнародної наукової інтернет-конф. (Тернопіль, 10-11 вересня 2024 р.). Тернопіль. 2024. Вип.91С.121-123.

56. **Корбан Д. В.** Моделювання електромагнітного поля поляризаційної структури складного об’єкту // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2025): матеріали XVI Міжнародної наук.-практич. конф. (Одеса, 28–30 травня 2025 р.). Херсон: ХДМА, 2025. С.159-162.

57. **Korban D. V.** Solving the problem of polarization selection of echo signals from a navigation object in the presence of sea-surface waves / D. V. Korban // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2026): матеріали XVII Міжнар. наук.-практ. конф. (Херсон, 26–28 трав. 2026 р.). Херсон: ХДМА, 2026. С. 193–195.