

Міністерство освіти і науки України  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
"Харківський авіаційний інститут"

**ПОПОВ АНАТОЛІЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ**

УДК 621.396.96+004.93'1

**РОЗПІЗНАВАННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ  
ЗА УМОВ АПРІОРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ  
ІНВАРІАНТНИХ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ОЗНАК**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Павліков Володимир Володимирович**, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», проректор з наукової роботи.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор **Васюта Костянтин Станіславович**, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, заступник начальника університету з навчальної роботи;

доктор технічних наук, професор **Карташов Володимир Михайлович**, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем;

доктор технічних наук, доцент **Авер'янова Юлія Анатоліївна**, Національний авіаційний університет, професор кафедри аеронавігаційних систем.

Захист відбудеться «11» травня 2021 р. о 14-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.062.07 у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17, радіокорпус, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» (61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17).

Автореферат розісланий « 6 » квітня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 64.062.07



В. В. Лукін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми.

Аерокосмічні бортові радіолокаційні системи завдяки всепогодності, високій оглядовості та оперативності понад 50 років застосовуються для вирішення задач навігації, безпеки польотів, дистанційного картографування земної поверхні, дослідження природних ресурсів, льодової розвідки, моніторингу стану лісових масивів та сільськогосподарських культур, екологічного моніторингу, прогнозування стихійного лиха та інших надзвичайних ситуацій, координації заходів щодо ліквідації наслідків аварій і техногенних катастроф.

Однією з актуальних проблем залишається досі безпека польотів літальних апаратів. Бортові радіолокаційні засоби повинні забезпечити своєчасне попередження про можливість зіткнення з іншим літальним апаратом або з перешкодами (дротами та опорами ліній електропередач, вежами, тощо). За даними Національного бюро з розслідування авіаційних подій та інцидентів з цивільними повітряними суднами України найбільш небезпечними етапами польоту вважаються зліт, посадка та виконання авіаційних робіт на малих висотах.

Однією з найбільш гострих проблем для сучасних бортових радіолокаційних систем є забезпечення пошуково-рятувальних робіт, особливо в безлюдних, малонаселених районах, в горах і на морі. Їх ефективність обмежується не тільки через наявність потужного відбиття від підстильної поверхні, але й суттєвою апріорною невизначеністю щодо радіолокаційних характеристик як об'єкту пошуку, так і підстильної поверхні, на якій він знаходиться. Для виявлення об'єкту пошуково-рятувальних робіт необхідно використовувати методи розпізнавання, які не потребують повної апріорної інформації, для чого необхідне отримання інформативних ознак об'єктів за параметрами відбитих сигналів.

Одним з напрямків розширення інформаційних можливостей бортових радіолокаційних систем є створення багатоканальних за поляризацією радіотехнічних систем. Про актуальність досліджень можливості застосування радіолокаційної поляриметрії в задачах розпізнавання об'єктів свідчить ряд науково-дослідних програм, що проводяться такими організаціями, як Національне агентство з аеронавтики і дослідженню космічного простору США (JPL NASA), Канадське космічне агентство (CSA), Військово-морська лабораторія США (US Navy Lab), Японське космічне агентство (JAXA) Аерокосмічний Центр Німеччини (DLR), аерокосмічне агентство Франції (FARA), космічне агентство Італії (ASI). Тільки за останні 10 років запущений ряд космічних апаратів з радіолокаційними поляриметрами на борту, наприклад, ALOS-2, оснащений чотирьохканальним поляриметром PALSAR-2 (JAXA, 2014 р.), TerraSAR-X і TerraDEM-X (DLR, 2010 р.), COSMO-SkyMed 1-4 (ASI, 2007-2010 рр.) та ін. JPL NASA створено також радіолокаційний поляриметричний комплекс для безпілотного літального апарату (UAVSAR).

Як показує аналіз сучасного стану методів отримання та оброблення поляриметричної інформації з аерокосмічних носіїв, домінуючими є феноменологічні математичні моделі об'єктів радіолокаційного спостереження та методи оброблення сигналів, засновані на некогерентному підході (incoherent concept)

до опису процесів відбиття електромагнітних хвиль, запропонованому у роботах провідних вчених, таких як W. M. Boerner, K. Sarabandi, J. Van Zyl, J. S. Lee, R. Touzi, S. R. Cloude, E. Pottier, Y. Yamaguchi, K. P. Papathanassiou, I. Hajnsek та ін. Поляризаційні ознаки об'єктів радіолокаційного спостереження згідно некогерентного підходу отримуються шляхом усереднення отриманих сигналів (обчислення коваріаційних матриць, матриць когерентності, тощо) з виявленням "домінуючих механізмів розсіювання", що надає можливість отримати інформативні ознаки просторово-розподілених поверхонь різних типів за рахунок пост-обробки отриманих радіолокаційних даних, але не дає можливості оцінити поляризаційні характеристики малорозмірних об'єктів, представлених на поляриметричних зображеннях місцевості, що спостерігається, декількома пікселями.

Таким чином, наявне протиріччя між ступенем розвитку технічних засобів бортових радіолокаційних систем (висока роздільна здатність, поляризаційна багатоканальність, обчислювальна потужність бортових процесорів), необхідністю забезпечення виявлення та розпізнавання малорозмірних об'єктів для вирішення задач пошуково-рятувальних робіт, безпеки польотів та ін. у реальному масштабі часу за умов суттєвої апріорної невизначеності, та недостатньою пристосованістю існуючих математичних моделей опису поляризаційних характеристик об'єктів, методів виділення їх інформативних ознак та прийняття рішень для розпізнавання малорозмірних об'єктів у реальному масштабі часу за умов апріорної невизначеності щодо характеристик об'єктів та підстильних поверхонь.

Це протиріччя породжує **актуальну науково-прикладну проблему**: розпізнавання у реальному масштабі часу малорозмірних радіолокаційних об'єктів в умовах апріорної невизначеності їх характеристик за поляризаційними параметрами відбитих сигналів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота над дисертацією проводилася на кафедрі аерокосмічних радіоелектронних систем та кафедрі радіоелектронних та біометричних комп'ютеризованих засобів і технологій Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» у 1993 - 2020 рр. згідно з планами науководслідних робіт Міністерства освіти і науки України за держбюджетними темами: «Розробка методу і апаратури адаптивної поляризаційної селекції пасивних навігаційних орієнтирів в умовах заважаючих віддзеркалень від земної, морської поверхонь і гідрометеорів в 3-х сантиметровому діапазоні хвиль» (1993-1995, №ДР 0196U004394) за завданням 06.06.03/004-93 комплексного проекту 05.06.01/001К-95 державної науково-технічної програми «Розвиток аеронавігаційного обслуговування України», «Розробка методів і програмно-алгоритмічного забезпечення дистанційного зондування навколишнього середовища на основі багатоканальних поляриметричних комплексів ІЧ і мікрохвильового діапазонів» (1996-1999, №ДР 0198U001611), «Теоретичні засади синтезу інтегрованих функціональних систем безпілотних літальних апаратів» (2000-2002, №ДР 0100U003433), «Створення методології системного проектування

засобів аерокосмічних радіоелектронних комплексів» (2003-2005, №ДР 0103U005069), «Створення методології проектування інтегрованих комп'ютеризованих радіотехнічних систем дистанційного зондування для авіаційної і космічної техніки» (2006-2008, №ДР 0106U001069), «Моделі, методи та засоби отримання і оптимальної обробки просторово-часової інформації в радіотехнічних та оптичних аерокосмічних комплексах» (2009-2010, №ДР 0109U002010), «Розробка інтелектуальних безпілотних літаючих платформ та їх програмно-математичного забезпечення для оперативного моніторингу надзвичайних ситуацій» (2015-2016, №ДР 0115U000998), НТР за держзамовленням «Розроблення мобільного комплексу дистанційного зондування для виявлення безпілотних літальних апаратів» (2019-2020, №ДР 0119U001987), де автор був відповідальним виконавцем, а також «Методи та інструментарій ефективного поділу сигналів невідомої форми в радіотехнічних системах» (2010, №ДР 0103U0022264 виконувалася НАКУ «ХАІ» спільно з Інститутом радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України), «Розробка макета програмного модуля космічного моніторингу морської поверхні за даними оптичних засобів» (2002, №ДР 0102U001933, виконаної ДНВЦ «ПРИРОДА» на замовлення ДП НДПІ «Союз»), «Дослідження та розробка активно-пасивних методів моніторингу навколишнього середовища» (2011, №ДР 0107U001080, виконувалася Інститутом радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України), «Розроблення методу автоматичної класифікації типів забруднень морських акваторій за їх формою на багатоканальних космічних знімках» (2011, №ДР 0110U004550, виконувалася Інститутом телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України), «Розробка експериментального зразка безпілотного літального апарата малопомітного для сучасних засобів виявлення» (2019-2020, №ДР 0119U100954), де автор був виконавцем НДР.

#### **Мета й завдання дослідження.**

**Метою роботи** є підвищення якості розпізнавання малорозмірних радіолокаційних об'єктів із заданими електрофізичними властивостями на фоні завад від підстильної поверхні у реальному масштабі часу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання** дослідження:

- експериментально дослідити поляризаційні характеристики різних класів радіолокаційних об'єктів;
- розробити узагальнену поляриметричну модель радіолокаційного об'єкта;
- розробити метод отримання інваріантних поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів;
- виконати порівняльний аналіз інформативності та завадостійкості визначених поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів, що досліджуються;
- розробити негаусівські статистичні моделі флуктуацій поляризаційних характеристик радіолокаційних об'єктів та метод оцінки їх параметрів за експериментальними даними;
- розробити метод аналізу інформативності поляризаційних характерис-

тик радіолокаційних об'єктів в задачах розпізнавання з урахуванням негаусівського характеру законів розподілу ознак;

- виявити інформативні сукупності поляризаційних ознак, що дозволяють розпізнавати класи об'єктів за їх електрофізичними властивостями;

- розробити метод розпізнавання малорозмірних радіолокаційних об'єктів із заданими властивостями за їх поляризаційними ознаками в умовах апріорної невизначеності щодо кількості класів об'єктів та їх параметрів, придатний до застосування у реальному масштабі часу;

- розробити метод автоматичної класифікації радіолокаційних об'єктів в умовах апріорної невизначеності;

- виконати експериментальну перевірку моделей, методів та алгоритмів.

**Об'єкт дослідження** – процес отримання інформативних ознак радіолокаційних об'єктів для їх розпізнавання за поляризаційними характеристиками.

**Предмет дослідження** – методи розпізнавання малорозмірних об'єктів у реальному масштабі часу на фоні підстильної поверхні за умов апріорної невизначеності їх характеристик з використанням інваріантних векторних поляризаційних ознак.

**Методи дослідження.** Основу дисертаційних досліджень становлять розрахунково-теоретичні методи та методи інформаційно-статистичного аналізу експериментальних даних, а саме:

- методи теорії поляриметричних сигналів стосовно радіолокаційних систем;

- методи теорії ймовірності та математичної статистики для побудови описів класів об'єктів;

- методи статистичного моделювання для проведення імітаційних експериментів;

- методи теорії інформації для виявлення інформативних ознак об'єктів розпізнавання;

- методи статистичної теорії прийняття рішень для побудови класифікатора радіолокаційних об'єктів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в побудові математичних та статистичних моделей радіолокаційних об'єктів, методів виділення інваріантних поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів та розпізнавання малорозмірних об'єктів у реальному масштабі часу за умов апріорної невизначеності.

**Вперше:**

- запропоновано математичну операторну модель радіолокаційного об'єкту, яка за рахунок використання математичного апарату подвійного комплексного простору та інваріантної декомпозиції поляризаційної матриці розсіювання на відміну від існуючих математичних матричних моделей надає роздільний опис перетворень амплітуди, фази та поляризації сигналу зондування при його відбитті радіолокаційним об'єктом незалежно від поляризаційних параметрів сигналу зондування, що надало можливість виявлення нових інформативних поляризаційних ознак для розпізнавання об'єктів радіолокаційного спостере-

ження;

– запропоновано інваріантні поляризаційні ознаки радіолокаційного об'єкту - параметри передатних функцій об'єкту за поляризацією (еліптичністю, орієнтацією та поляризаційним фазовим зсувом) сигналу, які при фіксованому ракурсі спостереження залежать тільки від геометричних та електрофізичних характеристик об'єкту та частоти сигналу зондування, і на відміну від відомих інваріантних поляризаційних ознак є математично взаємозалежними, що надало можливість підвищення імовірності розпізнавання малорозмірних об'єктів на тлі підстильної поверхні;

– розроблено метод оцінки параметрів математичної операторної моделі - параметрів передатних функцій об'єкту за амплітудою, фазою та поляризацією сигналу, який дозволяє знаходити оцінки поляризаційних передатних функцій за результатами вимірів поляризаційної матриці радіолокаційного об'єкту, що дозволило експериментально оцінити закони розподілу нових поляризаційних ознак реальних малорозмірних об'єктів радіолокаційного спостереження та підстильних поверхонь;

– проведено порівняльний аналіз інформативності запропонованих нових поляризаційних ознак малорозмірних радіолокаційних об'єктів з найбільш поширеними поляризаційними ознаками, запропонованих різними науковими школами, у порівняних умовах на ґрунті багатовимірних статистичних моделей, побудованих за експериментальними даними, що дозволило отримати достатньо інформативні з точки зору теорії інформаційної достатності векторні поляризаційні ознаки для розпізнавання малорозмірних об'єктів заданої форми або матеріалу, зокрема металевих, на фоні типових підстильних поверхонь (рослинність, гірський масив, морська поверхня).

#### **Набули подальшого розвитку:**

– теорія багатовимірних негаусівських випадкових процесів: на ґрунті відомих багатовимірних розподілів ймовірностей Джонсона розроблено метод оцінки параметрів статистичної моделі негаусівського багатовимірного стаціонарного процесу з урахуванням кореляційних зв'язків його компонент та послідовностей відліків за експериментальними даними, що дозволило отримати чисельні значення параметрів багатовимірних статистичних моделей сукупності поляризаційних ознак реальних малорозмірних наземних та надводних об'єктів та підстильних поверхонь (рослинності, гірських масивів, морської поверхні);

– теорія інформативності параметрів сигналів та інформаційної достатності: розроблено метод оцінки ступеню розрізнення множини класів об'єктів за векторною ознакою з негаусівським законом розподілу ймовірностей, який, на відміну від традиційної імовірності правильного розрізнення не залежить від методу прийняття рішень та придатний для аналізу інформативності ознак з негаусівськими законами розподілу навіть у випадках повного маскування одного з класів об'єктів іншими, що дозволяє виявляти ознаки, які групують об'єкти у класи за їх електрофізичними та геометричними властивостями, та виявляти сукупності ознак, що забезпечують поляризаційний контраст малорозмірних об'єктів на тлі підстильної поверхні, достатній для їх розпізнавання;

– теорія прийняття рішень за умов апріорної невизначеності: розроблено метод поляризаційно-імовірнісної фільтрації, який на відміну від відомих методів не потребує апріорної інформації щодо законів розподілу ознак підстильної поверхні, що забезпечує розпізнавання об'єктів з заданими геометричними та електрофізичними властивостями за поляризаційними ознаками на тлі підстильної поверхні за умов апріорної невизначеності щодо її поляризаційних характеристик;

– теорія автоматичної класифікації об'єктів дистанційного зондування: розроблено метод автоматичної класифікації об'єктів радіолокаційного спостереження за їх поляризаційними ознаками з використанням критерію мінімально-достатньої кількості інформації при апріорно невідомій кількості класів об'єктів, який на відміну від існуючих, може використовуватися у реальному часі безпосередньо у процесі польоту літального апарата та дозволяє ідентифікувати об'єкти за їх поляризаційними ознаками, що надає можливість автоматично у процесі польоту виявляти зміну типу підстильної поверхні та корегувати склад сукупності поляризаційних ознак, які використовуються для розпізнавання малорозмірних об'єктів на фоні підстильної поверхні.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що отримані нові методи прийняття рішень за умов апріорної невизначеності можуть бути використані під час модернізації існуючих і створенні перспективних радіолокаційних систем попередження зіткнення з перешкодами, зокрема, з дротами та опорами ліній електропередач, вежами і деревами, тощо, для безпеки польотів вертольотів, які використовуються у Збройних Силах України і Державній службі України з надзвичайних ситуацій; розроблений метод виділення інформативних поляризаційних ознак малорозмірних радіолокаційних об'єктів дозволяє обґрунтувати структуру поляриметричного радару для виявлення перешкод у передній напівсфері вертольотів і літаків при польотах на малих та гранично малих висотах.

Запропоновані математичні моделі і методи можуть бути використані під час розроблення нових бортових радіолокаційних систем для інформаційно-технічного забезпечення пошуково-рятувальних робіт, моніторингу стану доквілля, зон надзвичайних ситуацій та катастроф, як природного, так і техногенного характеру, в інтересах Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Методи автоматичної класифікації об'єктів радіолокаційного спостереження можуть бути використані для обробки даних дистанційного спостереження з супутників та безпілотних літальних апаратів, як у радіодіапазоні, так і у оптичному, інфрачервоному та інших діапазонах довжин електромагнітних хвиль.

Результати досліджень упроваджено: у Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, де операторна математична модель перетворення поляризаційних характеристик сигналів радіолокаційним об'єктом та метод оцінки інваріантних передатних поляризаційних характеристик за експериментальними даними використовувалися при радіофізичних дослідженнях



морської поверхні, що дозволило виявити нове радіофізичне явище поляризаційної модуляції радіолокаційних сигналів, відбитих морськими хвилями, та встановити зв'язок цієї модуляції з параметрами хвиль на водній поверхні; у ДП НДП "Союз", де запропоновані методи обробки зображень в умовах апріорної невизначеності та імовірнісної фільтрації, реалізовані у програмі картографування "плямистості" морських акваторій "Improc", дозволили виділяти аномальні явища на морській поверхні; у Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, де метод обробки зображень в умовах апріорної невизначеності та метод імовірнісної фільтрації, реалізовані у програмі обробки багатоканальних цифрових космічних знімків, дозволили реалізувати класифікацію ділянок моря за екологічними критеріями.

**Особистий внесок здобувача.** Усі одноосібні публікації за темою дослідження [7] – [12] виконано автором самостійно. У роботах, написаних у співавторстві, автору належать такі наукові результати: [1], [2] – метод автоматичної класифікації (кластеризації) даних та зображень за умов апріорної невизначеності; [3] – результати експериментальних досліджень просторово-часових поляризаційних характеристик підстильної (земної, морської) поверхні та малорозмірних об'єктів; [4] – критерій інформативності поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів, метод розпізнавання об'єктів при неповних апріорних даних та методика його застосування для розпізнавання малорозмірних об'єктів за їх поляризаційними ознаками; [5] – результати розпізнавання малорозмірних об'єктів у натурних умовах; [6] – алгоритм оброблення багатоканальних космічних знімків та їх кластеризації для ідентифікації техногенних забруднень Чорного та Азовського морів, реалізований у вигляді програмного модуля Improc; [13], [14] – метод оцінки параметрів багатовимірних негаусівських статистичних моделей за експериментальними даними; [15] – критерій розрізнюваності об'єктів розпізнавання за їх корельованими ознаками; [16] – обґрунтовано розгляд флукуацій поляризації відбитого об'єктом сигналу як поляризаційної модуляції відбитого сигналу, що склало фізичну основу для побудови математичної операторної моделі об'єкта дистанційного зондування; [17] – метод оцінки параметрів операторної моделі рухомого радіолокаційного об'єкту; [18] – результати експериментальної перевірки методу оцінки параметрів операторної моделі радіолокаційного об'єкту; [19] – метод автоматичної класифікації (кластеризації) об'єктів у реальному масштабі часу в умовах повної апріорної невизначеності за критерієм мінімально-достатньої кількості інформації; [20], [21] – результати експериментальних досліджень інваріантних поляризаційних ознак підстильної морської поверхні; [22] – результати експериментальних досліджень інваріантних поляризаційних ознак гірських масивів та розпізнавання малорозмірних металевих об'єктів на їх фоні; [23], [24] – результати експериментальних досліджень алгоритму розпізнавання радіолокаційних об'єктів за поляризаційними ознаками; [25], [26] – метод багатовимірної імовірнісної фільтрації на ґрунті негаусівських законів розподілу для розпізнавання та супроводу об'єкту дистанційного спостереження у реальному часі; [27] – методика поляризаційної калібровки поляриметричної радіолокаційної станції.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на наукових семінарах кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем та кафедри радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», також наведені в дисертації наукові результати доповідалися й обговорювалися на таких конференціях: SPIE Conference of Automatic Target Recognition IX (1999, Orlando, Florida, USA); IEEE Guanajuato Mexico Section 2nd International Workshop on Random Fields Modelling and Processing in Inhomogeneous Media (2002, Guanajuato, Mexico); SPIE Conference Of Earth Observing Systems (2003, 2004, San Diego, USA); SPIE Conference of Mathematical Methods in Pattern and Image Analysis (2005, San Diego, USA); International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (2012, Kharkiv, Ukraine); 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), (2016, Kharkiv, Ukraine); IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), Kiev, 2018; International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2018; IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019; IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Kharkiv, Ukraine, 2020.

**Публікації.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладено у 42 наукових працях, серед них 26 статей (1 стаття у закордонному виданні, проіндексованому у базах даних Web of Science Core Collection і Scopus, 4 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, 21 стаття у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України), в розділі колективної монографії, а також у 15 матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація має анотацію, перелік скорочень та умовних познач, вступ, шість розділів, висновки, перелік джерел посилання, додатки. Повний обсяг дисертації становить 448 сторінок, з яких анотація на 14 сторінках, зміст на 7 сторінках, перелік скорочень та умовних познач на 1 сторінці, основний текст на 291 сторінці, перелік джерел посилання зі 379 найменувань на 44 сторінках, 3 додатки на 22 сторінках. Робота містить 21 таблицю, з яких 11 на 13 окремих сторінках, 162 рисунка, з яких 108 на 55 окремих сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми, сформульовано мету, завдання та методи дослідження, наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів, надано відомості про зв'язок роботи з науковими роботами університету, де її було виконано, наведено дані щодо публікації, апробації та використання результатів проведених досліджень.

У **першому розділі** виконаний аналіз сучасного стану розвитку поляриметричних радіолокаційних систем, розв'язуваних ними завдань та рівень їх технічних можливостей. Проведено аналіз результатів провідних наукових шкіл і організацій в галузі радіолокаційної поляриметрії, сучасного стану проблеми розпізнавання радіолокаційних об'єктів з використанням поляризаційних ознак, обґрунтовано мету і завдання досліджень.

Всепогодні, високоточні та інформативні системи радіолокаційного спостереження широко використовуються при вирішенні широкого класу задач дослідження навколишнього середовища, таких як вивчення природних ресурсів, земних покривів і морської поверхні, екологічного моніторингу, дистанційного картографування земної поверхні.

Для вирішення цих задач все ширше застосовуються поляризаційно-багатоканальні радіолокаційні комплекси. На сьогоднішній день радіолокаційна поляриметрія найбільш розвинена для космічних літальних апаратів. Зараз активно експлуатуються німецькі супутники TerraSAR-X та TanDEM-X, космічне угруповання COSMO-SkyMed 1 4 Італійської космічної агенції (ASI), космічний апарат ALOS-2 з поляриметром PALSAR-2 Японської аерокосмічної агенції (JAXA), індійський RISAT-1 та ін., роздільна здатність яких досягає одиниць метрів. За останні 15 років практично всі провідні країни світу підключилися до досліджень в області поляриметричної радіолокації.

Аналіз розвитку технічних характеристик бортових поляриметрів показує стійку тенденцію переходу до систем з повним прийомом поляризаційної інформації (Full Polarimeter) за чотирма поляризаційними каналами (Quad mode) з реєстрацією як амплітуд, так і фаз відбитих сигналів за рахунок квадратурного прийому комплексного сигналу. Це пов'язано з тим, що до кінця минулого століття традиційні одноканальні радіолокаційні засоби вичерпали свої можливості, не зважаючи на їх високу роздільну здатність.

Однак ефективність застосування сучасних поляриметричних радіолокаційних засобів обмежується методами обробки сигналів, що отримуються. Історично в поляриметрії існувало 2 напрямки обробки сигналів - когерентний (coherent) і некогерентний (incoherent). Неможливість прямого виміру комплексного сигналу в оптиці привела до розвитку інтегральних методів оцінки стану поляризації електромагнітної хвилі, які принципово передбачають усереднення потужності прийнятого сигналу, а некогерентність перших радіолокаційних станцій - до переносу досягнень оптичної поляриметрії в радіолокаційну, введення в радіолокаційну теорію понять неполяризованої і частково поляризованої хвилі і методів обробки, заснованих на коваріаційних матрицях відбитих

об'єктами поляриметричних сигналів. Некогерентний напрямок ґрунтується на роботах таких вчених як Н. Mueller, W.-M. Boerner, Л. Т. Тучков, В. В. Богородський, А. І. Козлов, К. Sarabandi, J.-S. Lee. Суттєвого прогресу в задачах класифікації і розпізнавання просторово-розподілених радіолокаційних об'єктів було досягнуто завдяки роботам С. Клода (S.R. Cloude) и Е. Поттьє (E. Pottier), у яких було обґрунтовано використання відносних (неенергетичних) поляризаційних ознак при вирішенні практичних завдань радіолокаційної поляриметрії. Однак використання усереднення даних для отримання ознак об'єктів знижує їх інформативність при вирішенні задач розпізнавання малорозмірних радіолокаційних об'єктів.

Когерентний напрямок обробки поляриметричних сигналів було закладено в роботах Д. Хайнена (J. R. Huynen) і Д. Б. Канарейкіна, розвинуто Е. Крогагером (E. Krogager), В. Камероном (W. L. Cameron), Р. Тузи (R. Touzi), Ф. Чарбоне (F. Charbonneau), Л. Ліхардом (L. P. Ligthart). Важливий внесок у вирішення теоретичних проблем і практичних завдань поляриметричної радіолокації зробили українські вчені Г. П. Кульомін, В. Б. Расказовський, Ф. Й. Яновський, О. І. Сухаревський, О. О. Мартинчук, В. К. Волосюк, В. І. Луценко, Є. Л. Казаков та ін. Особливе місце в теорії когерентної обробки поляриметричних сигналів займають праці К. Г. Гусева, в яких було створено теорію поляризаційної модуляції сигналів для вирішення задач зв'язку, та М. Ф. Бабакова, який розширив її на радіолокаційні сигнали. Ця дисертаційна робота є логічним продовженням даного напрямку.

Суттєвою перевагою когерентного підходу є можливість обробки поляриметричних сигналів у реальному масштабі часу, що надає передумови для вирішення задач підвищення безпеки польотів літальних апаратів, забезпечення пошуково-рятувальних робіт з використанням авіаційної техніки, тощо. Розвиток цього напрямку довгий час гальмувався відсутністю швидкодіючої елементної бази радіолокаційних систем, і лише останні 15-20 років появилася можливість технічної реалізації теоретичних принципів, запропонованих вченими.

Наявність різноманітних методів опису поляризації електромагнітних хвиль та поляризаційних характеристик радіолокаційних об'єктів потребує визначення по можливості максимально повної множини поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів для подальшого дослідження з метою виявлення найбільш інформативних для розпізнавання малорозмірних об'єктів.

У **другому розділі** на ґрунті аналізу існуючих математичних моделей (матричних, параметричних, феноменологічних, подвійної комплексної площини) сигналів та об'єктів поляриметричного радіолокаційного спостереження запропоновано операторну модель радіолокаційного об'єкту, яка за рахунок використання математичного апарату подвійного комплексного простору та інваріантної декомпозиції поляризаційної матриці розсіювання на відміну від існуючих математичних матричних моделей надає роздільний опис перетворень амплітуди, фази та поляризації сигналу при його відбитті об'єктом незалежно від поляризаційних параметрів випроміненого сигналу, та розроблено метод отримання нових поляризаційних ознак для розпізнавання радіолокаційних

об'єктів.

Традиційним аналітичним описом поляризації електромагнітних хвиль є вектор Джонса (R. C. Jones)

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_{\{x,y\}} \cdot e^{j\omega t}, \quad \vec{E}_{\{x,y\}} = \begin{bmatrix} E_x \cdot e^{j\psi_x} \\ E_y \cdot e^{j\psi_y} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $\psi_x$ ,  $\psi_y$  – амплітуди та фази комплексних проекцій на осі ортогональної системи координат (поляризаційного базису)  $\{x, y\}$ .

При переході від одного ортонормованого базису до іншого, поверненого на кут  $\theta$  у площині фазового фронту з еліптичністю ортів  $\phi$ , компоненти хвилі перетворюються шляхом множення на комплексну матрицю перетворення базису  $\dot{Q}$

$$\vec{E}_{\{\phi,\theta\}} = \dot{Q} \cdot \vec{E}_{\{x,y\}}, \quad \dot{Q} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -j \cdot \sin \phi \\ -j \cdot \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

При зондуванні об'єкту радіолокаційним сигналом  $\dot{E}_S$  відбитий сигнал  $\dot{E}_R$  представляють у вигляді

$$\dot{E}_R = \dot{S} \cdot \dot{E}_S, \quad \dot{S} = \begin{bmatrix} S_{xx} \cdot e^{j\psi_{xx}} & S_{xy} \cdot e^{j\psi_{xy}} \\ S_{yx} \cdot e^{j\psi_{yx}} & S_{yy} \cdot e^{j\psi_{yy}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де  $x, y$  – поляризаційний базис сигналу зондування,

$\dot{S}_{ij}$  – комплексні коефіцієнти відбиття радіолокаційного сигналу об'єктом, які утворюють поляризаційну матрицю розсіювання (ПМР)  $\dot{S}$ .

При зміні поляризаційного базису зондування на базис  $\{\phi, \theta\}$  ПМР (3) перетворюється згідно (2)

$$\dot{S}_{\{\phi,\theta\}} = \dot{Q} \cdot \dot{S}_{\{x,y\}} \cdot \dot{Q}^T. \quad (4)$$

Вирази (2), (4) демонструють головну проблему опису поляризаційних властивостей радіолокаційного об'єкту за допомогою ПМР (3) – елементи матриці залежать від взаємної орієнтації у площині хвильового фронту антени та радіолокаційного об'єкту.

Як відомо, ПМР (3) може бути приведена до діагонального вигляду

$$\dot{S}_E = \dot{Q}_{\{\phi_E, \theta_E\}}^T \cdot \dot{S} \cdot \dot{Q}_{\{\phi_E, \theta_E\}}, \quad \dot{S}_E = \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_1 & 0 \\ 0 & \dot{\lambda}_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де  $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$  – власні числа,  $\dot{Q}_{\{\phi_E, \theta_E\}}$  – власні вектори (2) матриці ПМР (3).

У поляриметрії власні вектори інтерпретують як поляризації об'єкту, що створюють власний поляризаційний базис  $\{\varphi_E, \theta_E\}$ , у якому коефіцієнти відбиття сигналу  $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$  є максимальними, тобто визначаються тільки властивостями об'єкта. Співвідношення власних чисел  $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$  визначає так звані поляризації нульового сигналу  $\{\varphi_Z, \theta_Z\}$ . Поляризаційні характеристики  $\varphi_E, \theta_E, \varphi_Z, \theta_Z$  є інваріантними поляризаційними ознаками радіолокаційного об'єкту, але не надають у явному вигляді інформації щодо його електрофізичних властивостей.

Альтернативним до (1) є опис електромагнітних хвиль з використанням подвійного комплексного простору

$$\ddot{E}(t) = E \cdot e^{-ij\varphi} e^{i\theta} e^{j(\omega t + \psi - 2\pi z/\lambda)}, \quad (6)$$

де  $i$  – просторова уявна одиниця (площина  $(1, i)$  співпадає з площиною фазового фронту електромагнітної хвилі);  $j$  – часова уявна одиниця (напрямок  $(0, j)$  співпадає з напрямком розповсюдження електромагнітної хвилі);  $E, \omega, \psi, \lambda$  – амплітуда, частота, фаза та довжина хвилі, що розповсюджується за координатою  $z$ ;  $\varphi, \theta$  – еліптичність та орієнтація електромагнітної хвилі.

При відбитті сигналу  $\ddot{E}_S$  радіолокаційним об'єктом змінюються амплітуда сигналу, його фаза та поляризація (еліптичність та орієнтація), що у дисертаційній роботі запропоновано подати аналогічно (3) у термінах подвійного комплексного простору як

$$E_R \cdot e^{-ij\varphi_R} e^{i\theta_R} e^{j\psi_R} = \ddot{S}(\bullet) \times \left( E_S \cdot e^{-ij\varphi_S} e^{i\theta_S} e^{j\psi_S} \right), \quad (7)$$

де  $\ddot{S}$  – оператор перетворення параметрів електромагнітної хвилі при її відбитті радіолокаційним об'єктом,  $\times$  – символ операторного множення.

На ґрунті декомпозиції матриць (5) власних чисел  $\dot{S}_E$  та власних векторів  $\dot{Q}_{\{\varphi_E, \theta_E\}}$  синтезовано операторну форму передатної функції радіолокаційного об'єкту  $\ddot{S}$ , у якій радіолокаційний об'єкт представлено як послідовно з'єднані незалежні амплітудний, фазовий та поляризаційний модулятори сигналу:

$$\ddot{S}(\vec{\lambda}, \check{\zeta}_E) = \Lambda(\vec{\lambda}) \cdot e^{j\psi_T} \cdot \ddot{\Theta}(\theta_T) \cdot \ddot{\Phi}(\varphi_T, \theta_E), \quad (8)$$

де  $\vec{\lambda} = [\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2]$  – власні числа ПМР об'єкту (5),  $\check{\zeta}_E = \zeta(\varphi_E, \theta_E)$  – власна поляризація об'єкту, що визначається за матрицею власних векторів ПМР  $\dot{Q}_{\{\varphi_E, \theta_E\}}$  (5),  $\Lambda(\vec{\lambda})$  – передатна функція радіолокаційного об'єкту за амплітудою  $\Lambda(\vec{\lambda}) = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}$  – визначає радіолокаційний "розмір" об'єкту,  $(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)$  має значення максимальної ефективної поверхні розсіювання об'єкту);

$e^{j\psi_T}$  – передатна функція за фазою сигналу;  $\ddot{\Theta}(\theta_T)$  – передатна функція за орієнтацією вектора поляризації сигналу  $\ddot{\Theta}(\theta) = e^{i\theta}$ ;  $\ddot{\Phi}(\varphi, \theta)$  – оператор зміни еліптичності сигналу (передатна функція за еліптичністю)

$$\ddot{\Phi}(\varphi, \theta) = \left\{ \ddot{\Theta}\left[-\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)\right] \times e^{-ij\varphi} \right\} \cdot \ddot{\Theta}\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right);$$

$\varphi_T$ ,  $\theta_T$ ,  $\psi_T$  – параметри трансформації об'єктом еліптичності, орієнтації і фази сигналу.

Синтезована операторна модель процесу перетворення радіолокаційного сигналу при його відбитті об'єктом не залежить від поляризації сигналу зондування, надає на відміну від існуючих математичних матричних моделей роздільний опис перетворень амплітуди, фази та поляризації сигналу і надає нові інваріантні поляризаційні ознаки радіолокаційного об'єкту – параметри трансформації об'єктом еліптичності  $\varphi_T$ , орієнтації  $\theta_T$  і фази  $\psi_T$  сигналу.

Необхідно відзначити важливу особливість операційного уявлення властивостей об'єкта, що відрізняє його від векторно-матричного. Загальний фазовий множник елементів ПМР (3) зазвичай виносять довільним чином, приймаючи його по фазі одного з елементів ПМР, і відносять його до загальної фази відбитої хвилі, зумовленої відстанню до об'єкта. Згідно операторного уявлення (8) фазовий множник  $\psi_T$  характеризує затримку сигналу радіолокаційним об'єктом, тобто визначається властивостями об'єкта, тому його було виділено у (8) окремо і названо поляризаційним фазовим зсувом.

Для визначення компонент хвилі  $\ddot{E}_R$ , відбитої об'єктом, в поляризаційному базисі антени, наприклад, традиційному  $\{H, V\}$  (горизонталь  $H$ , вертикаль  $V$ ), необхідно записати сигнал зондування  $\ddot{E}_S$  у вигляді (6), надати його в базисі об'єкта  $\ddot{\zeta}_E$  (5), виконати його операторне множення на (8) і результат, отриманий у власному базисі об'єкта, привести до вихідного поляризаційного базису  $\{H, V\}$ :

$$\ddot{E}_R \Big|_{HV} = \left[ \ddot{S}(\vec{\lambda}, \ddot{\zeta}_E) \times \left( \ddot{E}_S \Big|_{HV} \cdot e^{ij\varphi_E} \cdot e^{-i\theta_E} \right) \right] \cdot e^{-ij\varphi_E} \cdot e^{i\theta_E}.$$

Для забезпечення можливості практичного використання операторної моделі радіолокаційного об'єкту та нових інваріантних поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів, що запропоновано, розроблено метод оцінки значень параметрів операторної моделі за результатами експериментальних вимірювань поляризаційної матриці розсіювання радіолокаційного об'єкту, який містить наступні етапи:

– за допомогою чотирьохканального когерентного радіолокаційного поляриметра вимірюється повна поляризаційна матриця радіолокаційного об'єкту у ортогональному поляризаційному базисі, наприклад  $\{H, V\}$ ,  $\dot{S} \Big|_{HV}$ ;

– за відомими співвідношеннями обчислюються власні числа  $\vec{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2]$

(5) ПМР  $\dot{S}|_{HV}$ ;

– передатна функція за амплітудою визначається  $\Lambda(\vec{\lambda}) = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}$ ;

– за відомими співвідношеннями обчислюються власні вектори  $\dot{Q}_{\{\varphi_E, \theta_E\}}$

(5) ПМР  $\dot{S}|_{HV}$ ;

– за результатами обчислень власних векторів за відомими співвідношеннями обчислюються параметри власного поляризаційного базису

$\ddot{\zeta}_E = \zeta(\varphi_E, \theta_E)$  об'єкту радіолокаційного спостереження;

– знаходиться орієнтація "рівноважного" базису об'єкту як

$$\theta_R = \theta_E + \pi/4, \text{ якщо } |\theta_E| \leq 45^0, \text{ інакше } \theta_R = \theta_E - \pi/4;$$

– знаходяться допоміжні кутові характеристики:

$$\gamma_T = \arctan\left(\frac{|\lambda_2|}{|\lambda_1|}\right) + \theta_R, \quad \dot{p}_T = \frac{\dot{\lambda}_2}{\dot{\lambda}_1}, \quad \Delta\psi_T = \arctan\left(\frac{\text{Im } \dot{p}_T}{\text{Re } \dot{p}_T}\right);$$

– знаходяться оцінки параметрів операторної моделі – параметри передатних функцій об'єкту за кутом еліптичності  $\varphi_T$  та кутом орієнтації  $\theta_T$ :

$$\varphi_T = \frac{1}{2} \arcsin\{\sin(2\gamma_T) \cdot \sin(\Delta\psi_T)\}, \quad \theta_T = \arctan\left\{\frac{\sin(2\gamma_T) \cdot \cos(\Delta\psi_T)}{\cos(2\gamma_T) + \cos(2\varphi_T)}\right\}; \quad (9)$$

– оцінка поляризаційного фазового зсуву  $\psi_T$ , що вноситься об'єктом до сигналу при його відбитті, знаходиться як

$$\psi_T = \arctan\left(\frac{\cos\varphi_T \cdot \sin\frac{\Delta\psi_T}{2} \cdot \cos(\theta_T + \gamma_T) - \sin\varphi_T \cdot \cos\frac{\Delta\psi_T}{2} \cdot \sin(\theta_T - \gamma_T)}{\cos\varphi_T \cdot \cos\frac{\Delta\psi_T}{2} \cdot \cos(\theta_T - \gamma_T) + \sin\varphi_T \cdot \sin\frac{\Delta\psi_T}{2} \cdot \sin(\theta_T + \gamma_T)}\right) + \frac{\psi_\Sigma}{2},$$

де  $\psi_\Sigma = \arg \dot{S}_{HH} - \arg \dot{S}_{HV} + \arg \dot{S}_{VH} - \arg \dot{S}_{VV}$ ,  $\dot{S}_{ij}$  – елементи  $\dot{S}|_{HV}$ .

Розроблений метод оцінки нових інваріантних поляризаційних ознак перевірявся як аналітично на типових математичних моделях об'єктів, так і експериментально шляхом вимірювання сигналів, відбитих від об'єктів з відомою ПМР, у безлунній камері за допомогою спеціально розробленого поляриметричного вимірювального стенду. Експериментальна перевірка підтвердила адекватність розроблених операторної моделі та методу оцінки її параметрів, похибка оцінки інваріантних поляризаційних ознак трансформації об'єктом еліптичності  $\varphi_T$ , орієнтації  $\theta_T$  і поляризаційного фазового зсуву  $\psi_T$  в експерименті не перевищувала 5%, основний внесок у похибку вносили завади по мережі живлення (з частотами, кратними 50 Гц).



У **третьому розділі** проведено аналіз, класифікацію та теоретичне дослідження інформативності всіх відомих автору поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів, виконано дослідження впливу шумів на сталість оцінок поляризаційних ознак при їх обчисленні за результатами вимірювань відбитих об'єктами радіолокаційних сигналів, визначено множину поляризаційних ознак для подальших експериментальних досліджень.

Пошук інформативних поляризаційних ознак для розпізнавання об'єктів радіолокаційного спостереження триває більш 50 років. За цей час дослідниками з різних країн та організацій було запропоновано більше 60 поляризаційних ознак, отримуваних різними методами. Також має місце дублювання ознак, коли одні й ті ж ознаки запропоновано їх авторами незалежно один від одного під різними назвами. За результатами класифікації відомих ознак встановлено, що на сьогоднішній день є 3 головних шляхи отримання поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів: використовуючи елементи ПМР (3) та її декомпозиції, на основі коваріаційної матриці та матриці когерентності, складених з елементів ПМР. Безпосередньо за результатами вимірів елементів ПМР отримують коефіцієнти деполаризації (лінійні деполаризаційні відношення (LDR) у радіолокаційній метеорології)  $C_H$ ,  $C_V$ , кути еліптичності  $\varphi_H$ ,  $\varphi_V$  та орієнтації  $\theta_H$ ,  $\theta_V$  відбитого сигналу при  $H$  та  $V$  зондуванні, коефіцієнти асиметрії  $C_A$  та лінійної  $A_L$  та енергетичної  $A_K$  анізотропії, коефіцієнти реполаризації  $C_R$ , фактору форми, тощо. На ґрунті інваріантної декомпозиції ПМР (5) використовуються у якості поляризаційних ознак власні числа ПМР  $\lambda_1, \lambda_2$ , "розмір" об'єкта  $\Lambda$  (8), кути еліптичності  $\varphi_E$  та орієнтації  $\theta_E$  власної та "нульової" ( $\varphi_Z, \theta_Z$ ) поляризації об'єкту. До цієї ж категорії відносяться запропоновані автором параметри трансформації об'єктом еліптичності  $\varphi_T$ , орієнтації  $\theta_T$  і фазового зсуву  $\psi_T$  сигналу. Окремою "гілкою" поляризаційних ознак, отримуваних на ґрунті ПМР, є ознаки, отримувані в результаті феноменологічної декомпозиції ПМР, "загальна орієнтація об'єкта"  $\beta_P$ , "тип розсіювання"  $\alpha_P$ , запропоновані В. Камероном (Cameron W.L.) та "сфероїдальність"  $C_S$ , "двогранність"  $C_D$ , "спиралевидність"  $C_X$  об'єкту, запропоновані Є. Крогагером (Krogager E.).

Другим напрямком виділення поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів є декомпозиція коваріаційної матриці  $\dot{C}$ , отримуваної з ПМР  $\dot{S}$  (3):

$$\dot{S} \rightarrow \vec{\dot{S}}_L^{(3)} = \left[ \dot{S}_{HH} \quad \sqrt{2}\dot{S}_{HV} \quad \dot{S}_{VV} \right]^T \rightarrow \dot{C} = \left\langle \vec{\dot{S}}_L^{(3)} \cdot \vec{\dot{S}}_L^{*(3)} \right\rangle,$$

на основі якої отримують коефіцієнти "поверхневого розсіювання"  $f_S$  (surface scattering), "двогранності" (double-bounce scattering)  $f_D$ , "об'ємного розсіювання" (volume scattering)  $f_V$ , "спиралевидності" (helix scattering)  $f_H$ , запропоновані J. Van Zyl, A. Freeman та Y. Yamaguchi (від використання безпосередньо елементів матриці  $\dot{C}$  для вирішення задач розпізнавання майже відмовилися).

Найбільш застосовуваним на сьогодні підходом до виділення поляриза-

ційних ознак радіолокаційних об'єктів є декомпозиція матриці когерентності  $\mathbf{T}$

$$\mathbf{T} = \langle \vec{S}_P \cdot \vec{S}_P^\oplus \rangle, \quad \vec{S}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \dot{S}_{HH} + \dot{S}_{VV} & \dot{S}_{HH} - \dot{S}_{VV} \\ \dot{S}_{HV} + \dot{S}_{VH} & \dot{S}_{HV} - \dot{S}_{VH} \end{bmatrix},$$

на ґрунті якої отримують ознаки "переважна орієнтація відбивача"  $\beta_C$ , "тип розсіювання"  $\alpha_C$ , "ентропія розсіювання"  $H_C$ , "анізотропії розсіювання"  $A_C$ , запропоновані С. Р. Клодом (S. R. Cloude) та Е. Потье (E. Pottier).

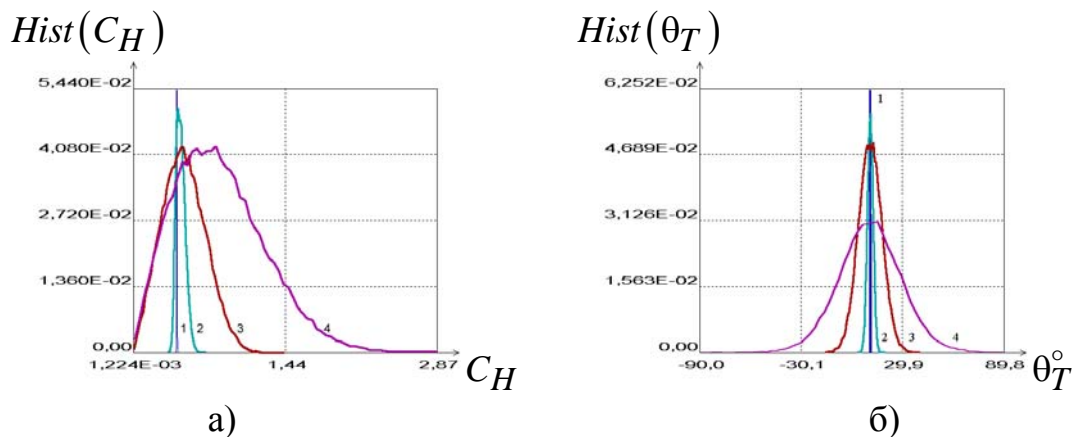
Теоретичний аналіз поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів проводився за допомогою традиційної у поляриметрії дводіпольної моделі, формувалися ПМР типових радіолокаційних об'єктів, досліджувалася залежність поляризаційних ознак від орієнтації, форми об'єкта у площини хвильового фронту та його опуклості. За результатами теоретичного аналізу було виявлено поляризаційні ознаки, які не зважаючи на різні методи їх отримання, мають однакові залежності від властивостей об'єкту, що надало можливість скоротити множину ознак для подальших досліджень. Крім того було виявлено, що запропоновані інваріантні поляризаційні ознаки "трансформація орієнтації"  $\theta_T$  практично лінійно залежить від форми об'єкта у площини хвильового фронту незалежно від його орієнтації і "опуклості", "фазовий зсув"  $\psi_T$  однозначно пов'язаний з відстанню між елементарними відбивачами об'єкта, а "трансформація еліптичності"  $\phi_T$  – з еліптичністю відбитого сигналу в "рівноважному" базисі.

Оскільки поляризаційні ознаки радіолокаційних об'єктів обчислюються за результатами вимірів параметрів відбитих сигналів, досліджувався вплив шумів на сталість оцінок поляризаційних ознак. Аналіз сучасних поляриметричних радіолокаційних засобів, виконаний у розділі 1, показав, що основним способом отримання поляриметричних даних є вимір комплексної ПМР об'єкта шляхом реєстрації квадратурних компонент відбитого об'єктом сигналу при різній поляризації зондування і прийому. Для моделювання шуму приймачів у кожному з 8 квадратурних каналів використовувався гаусівський некорельований шум з нульовим середнім із змінною дисперсією, у якості моделі сигналу – ПМР об'єкту з рівними значеннями елементів ПМР, за якою були обчислені еталонні значення поляризаційних ознак. Співвідношення сигнал/шум (SNR) визначалося як відношення повної енергії корисного сигналу в усіх каналах поляриметру до повної енергії шуму. Аналізувалася асиметрія закону розподілу кожної ознаки, тому що зміщення оцінок під впливом шуму можливе як внаслідок зміни форми закону розподілу, так і внаслідок зміщення математичного очікування симетричного розподілу, що не може бути компенсоване при подальшій обробці реальних даних, отриманих при невідомому SNR.

За результатами дослідження завадостійкості поляризаційних ознак встановлено, що наявність шумів вимірювальної системи істотно впливає на форму закону їх розподілу, за якою всі ознаки можуть бути розділені на 3 великі групи: ознаки з істотною асиметрією розподілу, ознаки з бімодальним розподілом та ознаки з симетричним розподілом. До першої групи належить більшість ознак, що не мають інваріантності, зокрема коефіцієнти деполаризації, асимет-

рії, асиметрії, "загальна орієнтація об'єкта"  $\beta_P$ , "тип розсіювання"  $\alpha_P$ , для яких асиметрія закону розподілу зростає в міру зменшення SNR (рис. 1-а, гістограми не нормовано для більшої наочності).

Бімодальність законів розподілу з'являється під впливом шумів у кутових ознак, які визначаються безпосередньо за ПМР, таких як кути еліптичності та орієнтації відбитих сигналів ( $\varphi_H$ ,  $\varphi_V$ ,  $\theta_H$ ,  $\theta_V$ ). Для більшості ознак з симетричним законом розподілу, наприклад "сфероїдальності"  $C_S$ , "двогранності"  $C_D$ , "спіралевидності"  $C_X$  об'єкту, характерним є зсув середнього значення при збільшенні потужності шумів, і лише у інваріантних поляризаційних ознак "трансформація орієнтації"  $\theta_T$ , "фазовий зсув"  $\psi_T$  та "трансформація еліптичності"  $\varphi_T$  зростає тільки дисперсія (рис. 1-б).



1 – точне значення ознаки; 2 –  $SNR=30$  дБ; 3 –  $SNR=20$  дБ; 4 –  $SNR=10$  дБ;  
Рисунок 1 – Залежність форми гістограм оцінок коефіцієнта деполаризації  $C_H$  (а) та "трансформації орієнтації"  $\theta_T$  (б) від потужності шуму

Чисельно завадостійкість поляризаційних ознак, як здатності зберігати свою інформативність за умов впливу шумів оцінювалася за критеріями відносного зміщення оцінки  $\Delta x_k$  та її варіації  $v_k$ :

$$\Delta x_k = \left| x_k^{\circ} - \hat{x}_k \right| / x_k^{\circ}, \quad v_k = \hat{\sigma}_k / x_k^{\circ},$$

де  $x_k^{\circ}$  – точне значення  $k$ -ї ознаки;  $\hat{x}_k$  – оцінка її середнього значення;  $\hat{\sigma}_k$  - середньоквадратичне відхилення оцінки.

Поляризаційні ознаки з найкращою та найгіршою завадостійкістю наведено у табл. 1. Таким чином, за результатами теоретичних та статистичних досліджень поляризаційних ознак було визначено множину поляризаційних ознак для подальших експериментальних досліджень. Практично важливим результатом дослідження є висновок, що майже всі поляризаційні характеристики об'єктів з достатньою точністю зберігають свої інформаційні властивості при відношенні сигнал / шум вище 20 дБ, що слід враховувати при їх експериментальних дослідженнях.

Таблиця 1 – Результати оцінки завадостійкості поляризаційних ознак

№	Поляризаційна ознака	Позначення	Зміщення оцінки $\Delta x_k$	Варіація $v_k$
1	"Поляризаційний фазовий зсув"	$\psi_T$	0,016	9,69
2	"Трансформація орієнтації"	$\theta_T$	0,017	7,31
3	"Трансформація еліптичності"	$\varphi_T$	0,026	7,10
4	"Двогранність" об'єкта	$C_D$	0,034	6,11
...				
34	Коефіцієнт деполаризації $H$ поляризації	$C_H$	10,18	46,0
35	Коефіцієнт деполаризації $V$ поляризації	$C_V$	12,58	58,9

У **четвертому розділі** надано опис автоматизованого радіолокаційного поляриметру 3-см діапазону, що використовувався у натурних експериментальних дослідженнях поляризаційних ознак реальних радіолокаційних об'єктів, методик його калібрування та вимірювань у натурних умовах, проведено аналіз результатів досліджень поляризаційних ознак малорозмірних наземних та надводних об'єктів, у т.ч. мобільних, та підстильних морської поверхні у різних метеорологічних умовах та земної поверхні з рослинністю різного типу, у т.ч. гірських масивів. За результатами статистичного аналізу експериментальних даних запропоновано використання багатовимірних негаусівських статистичних моделей та розроблено метод оцінки їх параметрів, сформовано базу даних статистичних характеристик поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів для подальшого аналізу їх інформативності.

Для експериментальних досліджень поляризаційних ознак малорозмірних радіолокаційних об'єктів було розроблено автоматизований радіолокаційний поляриметр 3-см діапазону (рис. 2-а), який забезпечував вимірювання комплексної ПМР (3) радіолокаційних об'єктів в діапазоні відстаней від 1,5 км до 20 км з роздільною здатністю 75 м та цифровою реєстрацією амплітуд та фаз отриманих сигналів з розрядністю до 20 біт. Завдяки внутрішньому та зовнішньому калібруванню похибка вимірювання ефективної поверхні розсіювання еталонних кутових відбивачів не перевищувала 1 дБ на відстані до 10 км, різності фаз  $\pm 1^\circ$  (при SNR більш 20 дБ) при рівні крос-поляризаційної розв'язки до -35 дБ. Спеціалізована цифрова вимірювально-керуюча ЕОМ забезпечувала реєстрацію миттєвих реалізацій сигналів у "вікні" 2 км за відстанню, сканування простору з шагом від 7,5 до 60 м за відстанню і  $0.1^\circ$  за кутовими координатами та довготривале (до 30 хв) спостереження за точкою у просторі для накопичення даних.

Поляриметр встановлювався на даху будинку. Досліджувалися ПМР та поляризаційні ознаки стаціонарних наземних об'єктів: поодиноких будинків різної етажності, труб промислових об'єктів, вежі телецентру, опор ліній електропередач, телекомунікаційних веж, баштових будівельних кранів. За результатами радіолокаційних вимірювань обчислювалися досліджувані поляризаційні

ознаки, проводився їх статистичний аналіз, побудова гістограм, поляриметричних діаграм та кореляційний аналіз отримуваних ознак.

Встановлено, що стаціонарні будівлі мають незначний рівень флуктуацій елементів ПМР (до 1 дБ), але внаслідок різних розмірів, форм та кутів спостереження їх ефективна поверхня розсіювання може змінюватися в діапазоні до 50 дБ. Деполаризація відбитого сигналу складає -4 дБ...-15 дБ при незначній еліптичності (до  $5^\circ$ ), тобто відбитий сигнал має майже лінійну поляризацію, але орієнтація власного базису  $\theta_E$  є нахиленою на  $10^\circ \dots 30^\circ$  в залежності від етажності будівлі. В той же час запропоновані інваріантні поляризаційні ознаки різних будівель групуються у достатньо вузькій області з симетричними законами розподілу: "трансформація еліптичності"  $\varphi_T \approx 2 \dots 6^\circ$  та "трансформація орієнтації"  $\theta_T \approx 25^\circ \pm 2,5^\circ$  для бетонних будівель та  $\theta_T \approx 20^\circ \pm 3,6^\circ$  для цегляних.

Сигнали, відбиті стаціонарними вертикально орієнтованими металевими спорудами, мають квазіперіодичні флуктуації, обумовлені хитавицею вершини об'єкта під впливом вітрового навантаження (рис. 2-б), що викликає значну варіацію майже усіх неінваріантних поляризаційних ознак (рис. 2-в).

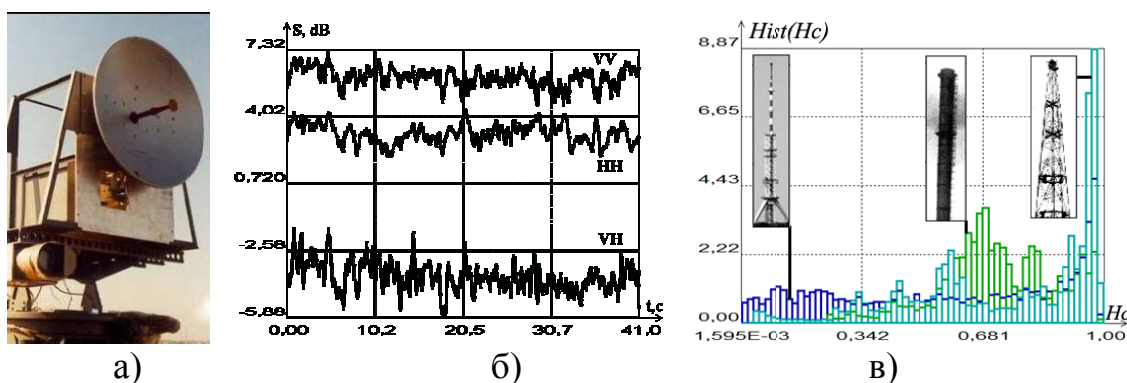
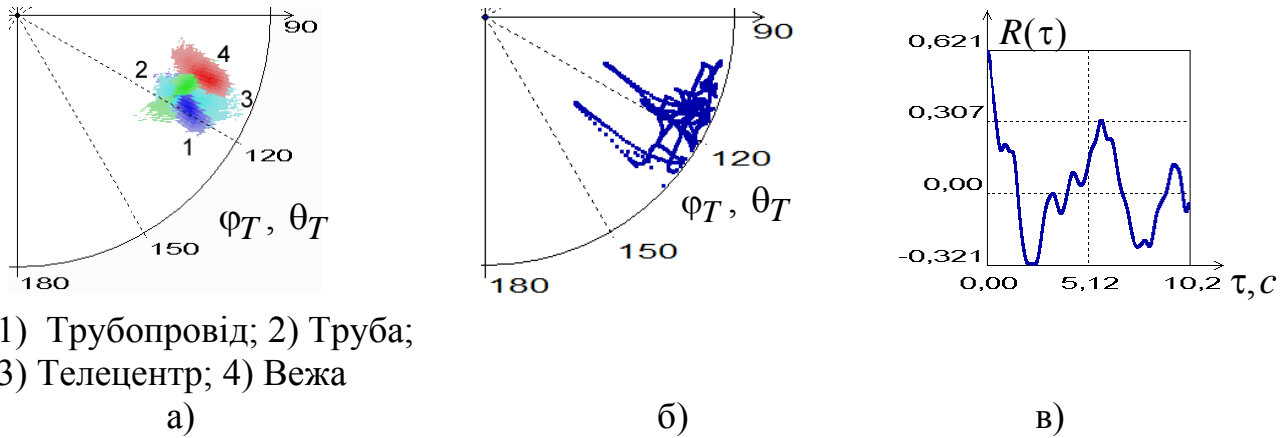


Рисунок 2 – Радіолокаційний поляриметр (а), флуктуації ПМР стаціонарної споруди (б) та гістограми неінваріантної поляризаційної ознаки "ентропія розсіювання"  $H_C \in [0 \dots 1]$  (в)

В той же час гістограми інваріантних поляризаційних ознак  $\theta_T$ ,  $\varphi_T$  є симетричними і для різних металевих споруд достатньо щільно групуються на поляризаційній діаграмі (рис. 3-а). Аналогічні властивості мають і сигнали, відбиті малорозмірними мобільними об'єктами – на поляриметричній діаграмі інваріантні поляризаційні ознаки "трансформація орієнтації"  $\theta_T$  та "трансформація еліптичності"  $\varphi_T$  автомобілів з металевим кузовом займають ту ж саму область, що й металеві споруди (рис. 3-б). Флуктуації елементів ПМР рухомих малорозмірних об'єктів хоча й досягають рівня 20 дБ, але не є хаотичними. Поляризація відбитого сигналу змінюється відносно повільно і описує у часі "поляризаційну траєкторію", викликаною зміною ракурсу спостереження (рис. 3-б, час спостереження 10 с), а флуктуації елементів ПМР мають високий рівень кореляції із зміною орієнтації  $\theta_E$  власного поляризаційного базису об'єкту (рис. 3-в). Це дозволяє зробити висновок, що флуктуації елементів ПМР обумовлені в першу чергу зміною орієнтації об'єкту у площині хвильового фронту, і пояс-

ннює достатньо високу сталість запропонованих поляризаційних ознак "трансформація орієнтації"  $\theta_T$  та "трансформація еліптичності"  $\varphi_T$ , – ці ознаки отримано в результаті декомпозиції матриці власних чисел ПМР (5), яка не залежить від орієнтації власного поляризаційного базису об'єкту.



- 1) Трубопровід; 2) Труба;  
 3) Телецентр; 4) Вежа

Рисунок 3 – Положення на поляриметричній діаграмі гістограм (а) інваріантних поляризаційних ознак  $\theta_T$ ,  $\varphi_T$  стаціонарних металевих об'єктів (див. рис. 2), реалізація ознак  $\theta_T(t)$ ,  $\varphi_T(t)$  (б) автомобіля МАЗ-516 при його русі та взаємна кореляційна функція  $R(\tau)$  флуктуацій  $S_{VV}(t)$  та  $\theta_E(t)$  автомобіля МАЗ-516 (в)

На поляризаційні ознаки надводних малорозмірних об'єктів (досліджувалися металеві моторні човни, швартовочні діжки, кутові відбивачі на радіопрозорих поплавках, тощо) суттєво впливає підстильна морська поверхня, яка попадає у імпульсний об'єм радіолокатора, що викликає зміщення оцінок поляризаційних ознак у порівнянні з ознаками геометрично подібних наземних об'єктів. Крім того з ростом сили морських хвиль спостерігається зміщення законів розподілу в сторону положення поляризаційних ознак підстильної поверхні. Наприклад, за ознаками "трансформація орієнтації"  $\theta_T$  та "трансформація еліптичності"  $\varphi_T$  (рис. 4) металева швартовочна діжка (діаметр 2,5 м) при силі хвиль до 1,5 бала "схожа" на металеві наземні об'єкти (рис. 3), але з ростом сили хвиль поляризаційний контраст цього малорозмірного об'єкту на фоні підстильної морської поверхні знижується.

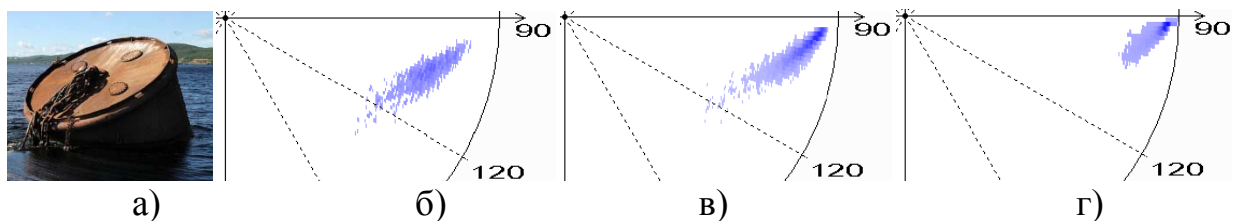


Рисунок 4 – Швартовочна діжка (а) та положення гістограм її інваріантних поляризаційних ознак  $\varphi_T$ ,  $\theta_T$  на поляриметричній діаграмі при силі морських хвиль 1,5 (б), 3 (в) та 5 (г) балів

Для вирішення задачі розпізнавання малорозмірних об'єктів на тлі підстильної поверхні за поляризаційними характеристиками відбитих сигналів необхідне знання поляризаційних властивостей можливих підстильних (морської, земної) поверхонь. Тому проводилися експериментальні дослідження поляризаційних ознак просторово - розподілених об'єктів, таких як морська поверхня, гірські масиви, рослинність різних типів.

Лісові масиви та чагарники створюють відбиті сигнали в широкому діапазоні амплітуд, який може досягати 30 дБ з хаотичною поляризацією та великим рівнем деполаризації сигналу (від -10 дБ до +10 дБ), тобто сигнал у крос-поляризаційному каналі може перевищувати сигнал у каналі з узгодженою поляризацією за рахунок багаторазових відображень. Власний поляризаційний базис флюктує у широких межах як за орієнтацією, так і за еліптичністю (рис. 5-а). Інваріантні поляризаційні ознаки рослинності  $\varphi_T$ ,  $\theta_T$  мають асиметричні закони розподілу і займають велику область поляризаційної діаграми (рис. 5-в, об'єкт 1), яка співпадає з розподілом  $\varphi_T$ ,  $\theta_T$  для будівель (2 на рис. 5-в) і частково – з розподілом  $\varphi_T$ ,  $\theta_T$  наземних металевих об'єктів (3 на рис.5-в).

Гірські масиви створюють потужні відображення, які у фіксованій точці є достатньо стабільними (при відсутності рослинності), але при скануванні у просторі їх ПМР може змінюватись більш ніж на 50 дБ. Однак власний поляризаційний базис цього об'єкту є майже лінійним (рис. 5-б), тобто усі зміни амплітуди відбитого сигналу відбуваються за рахунок зміни орієнтації сигналу зондування. Інваріантні поляризаційні ознаки трансформації поляризації  $\varphi_T$ ,  $\theta_T$  (рис. 5-г) розподілені майже симетрично у широкому діапазоні кутів орієнтації, і їх положення на поляриметричній діаграмі співпадає з розподілом цих ознак для бетонних будинків (рис. 5-в), які мають такі ж самі електрофізичні властивості, як і каміння гірського масиву.

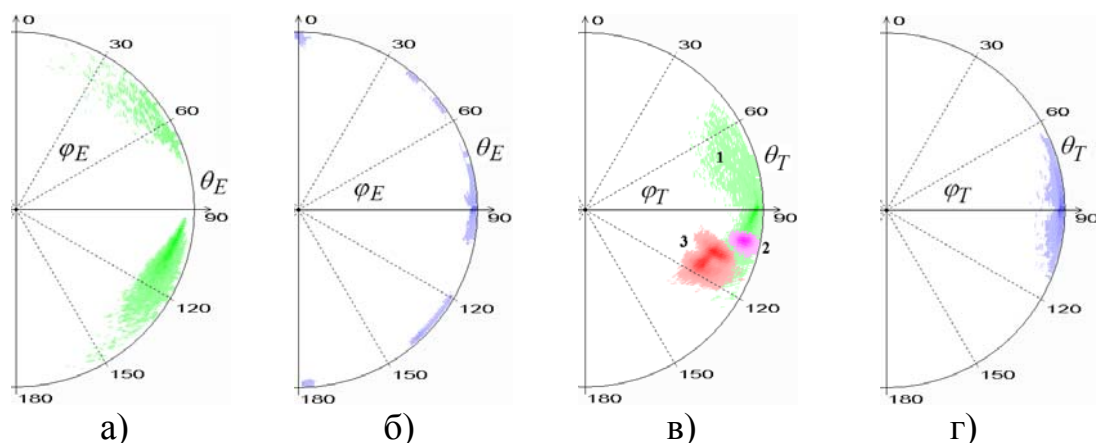


Рисунок 5 – Положення на поляриметричній діаграмі власного поляризаційного базису  $\{\theta_E, \varphi_E\}$  рослинності (а), гірського масиву (б) та трансформації поляризації  $\{\theta_T, \varphi_T\}$  (в) рослинності (1), будинків (2) та металевих об'єктів (3) та гірського масиву (г)

Найбільш складним для аналізу радіолокаційним об'єктом є морська поверхня, відбиття сигналів від якої суттєво залежить від кутів спостереження за

нахилом та азимутом (відносно напрямку руху морських хвиль), напрямку вітру та часом розгону хвиль, сили морських хвиль, наявності бризок, піни, обвалення хвиль і т.д. В результаті багаторічних спостережень за допомогою радіолокаційного поляриметра, розташованого на березі моря на висоті 30 м, виявлено ефект поляризаційної модуляції відбитого морськими хвилями сигналу та залежності законів розподілу поляризаційних ознак від сили морських хвиль (рис. 6), але для вирішення задачі розпізнавання надводних об'єктів в умовах апіорної невизначеності щодо стану морської поверхні було сформовано інтегральний клас об'єктів "море", до якого рівною імовірністю увійшли дані про сигнали, відбиті морською поверхнею від вітрової брижі до шторму силою 5 балів при ракурсах спостереження хвиль від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ .

$Hist(S_{HH})$

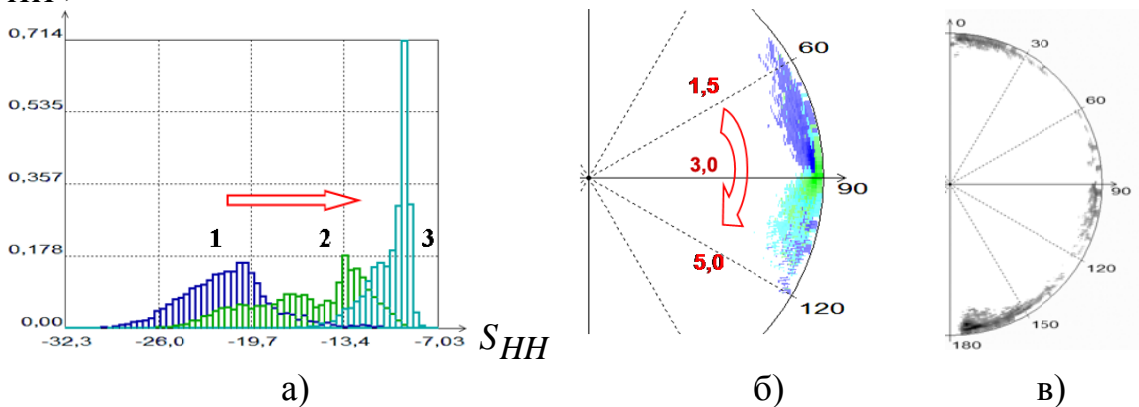


Рисунок 6 – Гістограми елемента ПМР  $S_{HH}$  (а), трансформації поляризації  $\{\theta_T, \varphi_T\}$  сигналу, відбитого морською поверхнею (б) з силою хвиль 1,5 (1), 3 (2) та 5 (3) балів, та інтегральний розподіл власної поляризації  $\{\theta_E, \varphi_E\}$  (в)

Як показали результати експериментальних досліджень, поляризаційні ознаки радіолокаційних об'єктів є багатовимірними корельованими випадковими процесами, і мають різні закони розподілу ймовірностей, які в багатьох випадках є негаусівськими. Тому було визнано за доцільне використовувати єдину статистичну модель – систему розподілів ймовірностей Джонсона, що складається з 3-х розподілів  $S_B$ ,  $S_U$  та  $S_L$ , які накривають усю площину моментів, окрім критичної області багатомодових розподілів, і можуть приймати довільні форми (рис. 7-а). Вибір типу розподілу Джонсона здійснюється на підставі положення оцінок коефіцієнтів асиметрії і ексцесу на площині моментів. За результатами статистичного аналізу поляризаційних ознак досліджуваних радіолокаційних об'єктів більш 90% гістограм було визнано такими, що можуть бути апроксимовані чотирьох параметричним  $S_B$  – розподілом Джонсона

$$\rho_{Sb}(x) = \frac{\eta}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\lambda}{(x - \varepsilon) \cdot (\lambda - x + \varepsilon)} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \gamma + \eta \cdot \ln \left( \frac{x - \varepsilon}{\lambda + \varepsilon - x} \right)^2 \right] \right\}, \quad (10)$$

де  $\eta > 0$ ,  $\gamma \in (-\infty, +\infty)$ ,  $\varepsilon \in (-\infty, +\infty)$ ,  $\lambda > 0$  – параметри розподілу.



Недоліком розподілів Джонсона є відсутність безпосереднього зв'язку статистичних оцінок середнього  $\hat{x}$ , дисперсії  $\hat{\sigma}^2$ , асиметрії  $\hat{a}$  та ексцесу  $\hat{e}$  вибіркового даних  $x$  з параметрами  $\varepsilon, \lambda, \eta, \gamma$  закону розподілу (10).

Всі відомі методи оцінки параметрів розподілів Джонсона є ітераційними та не надають гарантованої збіжності, яка необхідна при автоматичній обробці великих обсягів експериментальних даних. Тому для оцінки параметрів одновимірних розподілів (10) запропоновано використання відомого методу моментів, сформульованого у вигляді оптимізаційної задачі з цільовою функцією

$$Q(\varepsilon, \lambda, \eta, \gamma) = (m(\varepsilon, \lambda, \eta, \gamma) - \hat{x})^2 + (\sigma(\varepsilon, \lambda, \eta, \gamma) - \hat{\sigma})^2 + (a(\varepsilon, \lambda, \eta, \gamma) - \hat{a})^2 + (e(\varepsilon, \lambda, \eta, \gamma) - \hat{e})^2 + \psi(\lambda, \eta), \quad (11)$$

де  $m(\varepsilon, \lambda, \eta, \gamma)$ ,  $\sigma(\varepsilon, \lambda, \eta, \gamma)$ ,  $a(\varepsilon, \lambda, \eta, \gamma)$ ,  $e(\varepsilon, \lambda, \eta, \gamma)$  – теоретичні значення середнього  $m$ , дисперсії  $\sigma^2$ , асиметрії  $a$  та ексцесу  $e$  розподілу (10);  $\psi(\lambda, \eta)$  – штрафна функція для врахування обмежень на параметри  $\lambda, \eta$ :

$$\psi(\lambda, \eta) = \psi_\lambda(\lambda) + \psi_\eta(\eta), \quad (12)$$

$$\psi_\lambda(\lambda) = \begin{cases} 0, \lambda \geq 0 \\ |\lambda| \cdot K_1 + K_0, \lambda \leq 0, \end{cases} \quad \psi_\eta(\eta) = \begin{cases} 0, \eta \geq 0 \\ |\eta| \cdot K_1 + K_0, \eta \leq 0, \end{cases}$$

$K_1 + K_0$  – коефіцієнти штрафу за вихід параметрів оптимізації за обмеження.

Цільова функція (11) є унімодальною, але має злами за рахунок обмежень на параметри, тому мінімізація функції (11) виконувалася методом Розенброка, що забезпечує мінімізацію унімодальних функцій з розривами похідних.

Багатовимірна статистична модель на ґрунті розподілів Джонсона

$$\rho(\vec{x}(t_j)) = (2\pi)^{-MN/2} \|R\|^{-1/2} \prod_{j=1}^M \prod_{i=1}^N \frac{\eta_i \lambda_i}{(x_i(t_j) - \varepsilon_i)(\varepsilon_i + \lambda_i - x_i(t_j))} \times (13)$$

$$\times \exp \left[ -\frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^M \sum_{i,l=1}^N R_{ijkl}^{-1} \left( \gamma_i + \eta_i \ln \frac{x_i(t_j) - \varepsilon_i}{\varepsilon_i + \lambda_i - x_i(t_j)} \right) \left( \gamma_l + \eta_l \ln \frac{x_l(t_k) - \varepsilon_l}{\varepsilon_l + \lambda_l - x_l(t_k)} \right) \right],$$

потребує оцінки кореляційної матриці  $\mathbf{R}$ , яка не дорівнює оцінці кореляційної матриці за вибілковими даними. Запропоновано метод знаходження оцінки кореляційної матриці  $\mathbf{R}$  у (13), заснований на використанні перетворень Джонсона, які перетворюють вибірку  $x$  з негаусівським законом розподілу на вибірку  $z$  з нормальною щільністю розподілу ймовірностей, для якої оцінюється кореляційна матриця  $\mathbf{R}$ , що використовується у (13), після чого оцінки параметрів розподілу (13) уточнюються за багатовимірною гістограмою  $H(\vec{x})$  вибіркового даних  $\vec{x}$  оптимізаційними методами шляхом мінімізації цільової функції

$$Q(\vec{\varepsilon}, \vec{\lambda}, \vec{\eta}, \vec{\gamma}, \mathbf{R}) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ H(\vec{x}) - \rho(\vec{x}; \vec{\varepsilon}, \vec{\lambda}, \vec{\eta}, \vec{\gamma}, \mathbf{R}) \right]^2 d\vec{x} + \psi(\vec{\lambda}, \vec{\eta}).$$

Приклад результатів застосування запропонованого методу побудови двовимірної статистичної моделі за гістограмою реальних даних наведено на рис. 7.

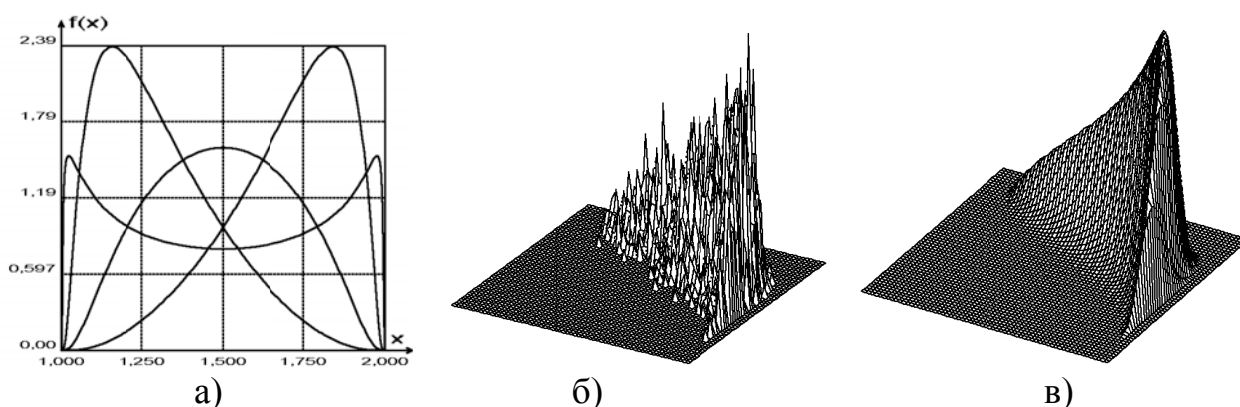


Рисунок 7 – Форма  $S_B$  – розподілу Джонсона при різних значеннях параметрів розподілу  $\eta$  і  $\gamma$  (а), двовимірна гістограма поляризаційних ознак (б) та її апроксимація (в) двовимірним розподілом ймовірностей (13)

Таким чином результатами експериментальних вимірювань у натурних умовах поляриметричних сигналів, відбитих реальними радіолокаційними об'єктами, було отримано дані про поляризаційні ознаки малорозмірних наземних та надводних об'єктів і підстильних поверхонь, на ґрунті яких були побудовані багатовимірні негаусівські статистичні моделі поляризаційних ознак для подальшого аналізу їх інформативності для розпізнавання малорозмірних об'єктів на фоні підстильної поверхні за умов апіорної невизначеності.

У **п'ятому розділі** на ґрунті статистичної теорії прийняття рішень та теорії інформаційної достатності розроблено метод оцінки ступеню розрізнення множини класів об'єктів за векторною ознакою з негаусівським законом розподілу ймовірностей, який, на відміну від традиційної імовірності правильного розрізнення не залежить від методу прийняття рішень та придатний для аналізу інформативності ознак з негаусівськими законами розподілу навіть у випадках повного маскуванню одного з класів об'єктів іншими. В результаті інформаційного аналізу результатів експериментальних досліджень виявлено векторні поляризаційні ознаки, які групують радіолокаційні об'єкти у класи за їх електрофізичними та геометричними властивостями, та виявлено сукупності ознак, що забезпечують поляризаційний контраст малорозмірних об'єктів на тлі підстильної поверхні, достатній для їх розпізнавання.

На ґрунті теорії інформації виконано аналіз мір інформативності параметрів сигналів з негаусівськими законами розподілу, запропоновано замість "міжкласових" відстаней Махаланобіса (P. Mahalanobis), Бхаттачарія (A. Bhattacharyya), Матусити (J. Matusita) та імовірності вірного розпізнавання використовувати міру розрізнюваності класів об'єктів  $a_k$  за векторною ознакою  $\vec{\xi}$  з негаусівською щільністю розподілу  $\rho(\vec{x}|a_k)$  на основі дивергенції Кульбака (S. Kullback), розповсюдженої на випадок великої кількості  $K$  класів об'єктів

$$J(a_k | \bar{\xi}) = \int_{-\infty}^{\infty} \{ \rho(\bar{x} | a_k) - \rho(\bar{x} | \bar{a}_k) \} \cdot \ln \frac{\rho(\bar{x} | a_k)}{\rho(\bar{x} | \bar{a}_k)} d\bar{x}, \quad (14)$$

де  $\rho(\bar{x} | \bar{a}_k)$  – суміш щільності ймовірностей всіх класів, за винятком  $a_k$

$$\rho(\bar{x} | \bar{a}_k) = \frac{1}{1 - P(a_k)} \sum_{i \neq k=1}^K \rho(a_i, \bar{x}), \quad \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\bar{x} | \bar{a}_k) d\bar{x} = 1,$$

$P(a_k)$  – апіорні ймовірності появи класів об'єктів  $a_k$ , у випадку апіорної невизначеності  $P(a_k) = 1/K$ .

Тоді середнє значення  $J(a_k | \bar{\xi})$ ,  $k = \overline{1, K}$  надає узагальнену міру інформативності сукупності ознак  $\bar{\xi}$  для розпізнавання об'єктів  $a_k$ ,  $k = \overline{1, K}$

$$J\{\bar{\xi}\} = \sum_{k=1}^K P(a_k) \cdot J(k). \quad (15)$$

Максимум міри (15) вказує на ознаки, за якими можна розпізнати об'єкти. Мінімум (15) дозволяє виявити, за якими ознаками різні об'єкти подібні один до одного навіть у випадку повного маскуванню одних класів об'єктів іншими, що можливо при негаусівських законах розподілу ознак, як показано на рис. 8-а. Наприклад, розрізнюваність для класу №3 на рис. 7-а  $J(a_3 | x) = 0,159$ , для класу №4  $J(a_4 | x) = 0,143$  за мірою інформативності (14), хоч імовірність правильного розпізнавання цих класів на фоні інших дорівнює нулю.

Міра розрізнюваності класів об'єктів (15) забезпечує порівняльний аналіз інформативності ознак при їх негаусівських розподілах, проте залежить від кількості класів об'єктів, тому необхідно розробити критерій, що визначає мінімально-достатнє для надійного розпізнавання об'єктів значення розрізнення (15) заданої множини класів. В роботах Г. Г. Косенко, присвячених теорії інформаційної достатності, було введено поняття мінімально достатньої (для подолання апіорної невизначеності  $H[P(a_k)]$ , тобто для впевненого прийняття рішень) кількості інформації (МДКІ)

$$\Psi_k = H[P(a_k)] - H[1 - P(a_k)],$$

яка для міри інформації Кульбака має вигляд

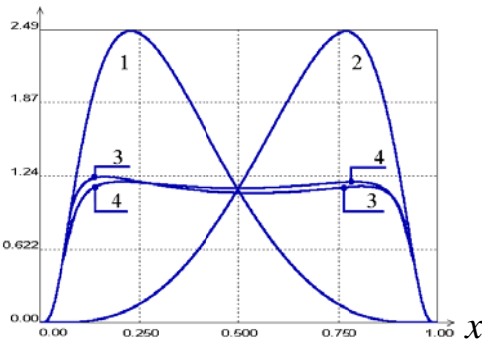
$$\Psi_k = 2 \cdot \ln[(1 - P(a_k)) / P(a_k)] \quad (16)$$

та надає поріг прийняття рішення за результатами вимірювання ознаки  $x$  та обчислення отриманої кількості інформації  $I(\bar{x} | a_k)$  на користь класу об'єктів  $a_k$ , як показано на рис. 8-б, де

$$I(\bar{x} | a_k) = \ln \left\{ \frac{[(1 - P(a_k)) \cdot \rho(a_k, \bar{x})]}{P(a_k) \cdot \sum_{j \neq k=1}^N \rho(a_j, \bar{x})} \right\}. \quad (17)$$

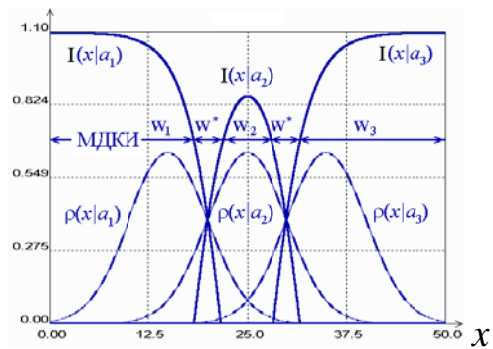
Порогове значення (16) "вирізає" з областей прийняття рішень діапазони значень ознаки  $x$ , на яких ймовірність прийняття помилкового рішення є занадто великою, і таким чином, фіксує значення імовірності помилки на рівні, меншому за 0,1.

$\rho(x|a_k)$



а)

$\rho(x), I(x|a_k)$



б)

Рисунок 8 – Маскування класів об'єктів при негаусівських законах розподілу ймовірностей (а) та визначення областей прийняття рішень за критерієм мінімально достатньої кількості інформації (б)

На ґрунті теорії інформаційної достатності отримано вираз мінімально достатньої розрізняваності (МДР) для узагальненої дивергенції Кульбака (15)

$$\mathfrak{J}_k = \left[ \frac{(1 - P(a_k))^2}{P(a_k)^2} - 1 \right] \cdot \ln \left[ \frac{(1 - P(a_k))^2}{P(a_k)^2} \right] \cdot [1 - P(a_k)]. \quad (18)$$

Запропоновані поняття узагальненої дивергенції (15) і мінімально достатньої розрізняваності (18) забезпечують побудову методу дослідження інформативності ознак об'єктів, згідно з яким досліджувана ознака визнається достатньо інформативною для розпізнавання об'єкту, якщо значення узагальненої дивергенції (15) перевищує поріг МДР (18).

Оскільки при радіолокаційному зондуванні з борту літального апарату одночасно можуть спостерігатися як малорозмірні об'єкти, так і місцеві предмети (будинки, споруди, тощо), а також підстильна поверхня, для порівняльного аналізу інформативності поляризаційних ознак використовувалися «інтегральні» статистичні моделі (13), побудовані у розділі 4 за результатами експериментальних досліджень, що поєднують в один клас об'єкти однакової фізичної природи: клас «море», що об'єднує поляризаційні ознаки морської поверхні з різною силою хвиль при різних ракурсах її спостереження; клас «ліс» – хвойні та листяні лісові масиви; клас «поле» – земна поверхня з трав'яною і чагарниковою рослинністю; клас «гори» – гірські масиви; клас «метал», що включає різні наземні металоконструкції (вишки, щогли, труби промислових об'єктів і т.д.), в т.ч. мобільні об'єкти; клас «бетон» – наземні будівлі і споруди різної конфігурації. Було проведено дослідження інформативності 35 поляризаційних ознак, відібраних для подальших досліджень у розділі 3 за результатами теоретичного

аналізу. У якості чисельної оцінки ступеню розрізнюваності одного класу об'єктів на фоні інших використовувалася дивергенція (14), для оцінки інформативності ознаки – узагальнена міра (15), а у якості критерію достатньої інформативності – значення МДР (18) при рівномірній гіпотезі появи класів об'єктів  $P(a_k) = 1/K$ ,  $k = \overline{1, K}$ .

Аналіз інформативності поодиноких поляризаційних ознак показав, що найбільш інформативними є поляризаційні характеристики радіолокаційних об'єктів, одержувані на основі інваріантної декомпозиції ПМР об'єкта: кути еліптичності та орієнтації власного поляризаційного базису об'єкта  $\varphi_E$ ,  $\theta_E$  ( $J\{\varphi_E\}=8,96$  и  $J\{\theta_E\}=6,61$ ) та параметри запропонованої у розділі 2 операторної моделі – "трансформація орієнтації"  $\theta_T$ , "трансформація еліптичності"  $\varphi_T$ , та "поляризаційний фазовий зсув" ( $J\{\psi_T\}=8,48$ ,  $J\{\varphi_T\}=7,37$ ,  $J\{\theta_T\}=6,23$ ). Однак жодна з цих ознак не є достатньо інформативною для розпізнавання досліджуваних об'єктів (рівень (17) для 5 класів об'єктів дорівнює  $\mathfrak{Z}=64$ ).

Деталізований аналіз інформативності поляризаційних ознак для різних малорозмірних металевих об'єктів показав, що інваріантні поляризаційні ознаки  $\theta_T$ ,  $\varphi_T$ ,  $\psi_T$ , які описують трансформацію поляризації сигналу при його відображенні об'єктом, дають низьке ( $J < 4$ ) розрізнення металевих об'єктів різної форми, та одночасно мають високу інформативність для розпізнавання класів об'єктів з різними електрофізичними властивостями. Цей факт дозволяє припустити, що інваріантні поляризаційні ознаки трансформації поляризації можуть використовуватися для розпізнавання металевих об'єктів довільної форми і орієнтації на тлі підстильної поверхні, тобто є інваріантними (не залежними від форми і орієнтації) ознаками металевих об'єктів.

При дослідженні двовимірних поляризаційних ознак виконувався повний перебір можливих неповторюваних комбінацій з 35 ознак (595 варіантів), але жодний варіант не надав мінімально достатнього рівня розрізнюваності об'єктів. Взаємне розташування законів розподілу поляризаційних ознак для найбільш інформативних двовимірних векторів наведено на рис. 9.

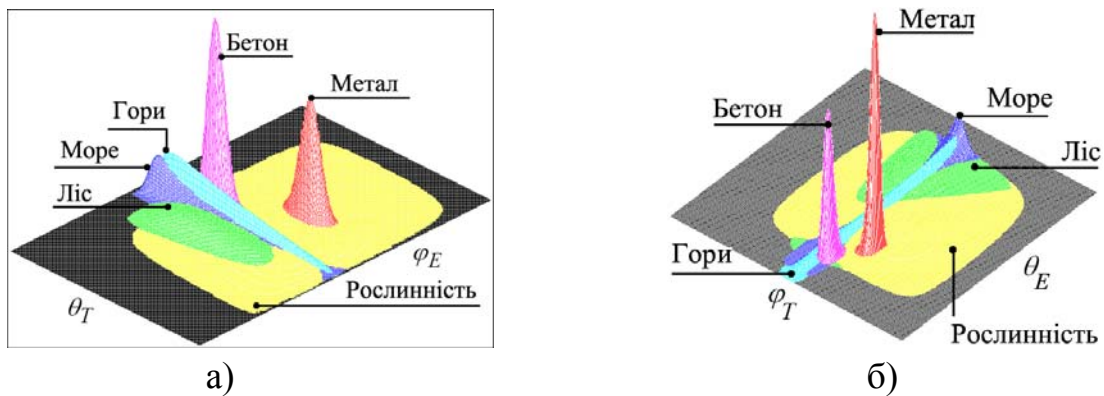


Рисунок 9 – Взаємне розташування законів розподілу найбільш інформативних двовимірних поляризаційних ознак  $\{\theta_T, \varphi_E\}$  (а) та  $\{\varphi_T, \theta_E\}$  (б)

В результаті дослідження інформативності тривимірних поляризаційних ознак (6545 можливих комбінацій) було визначено, що тривимірний ознаковий простір забезпечує інформативність, достатню для розпізнавання малорозмірних об'єктів на фоні місцевих предметів та підстильної поверхні. Перевищення рівня МДР було виявлено для чотирьох векторних поляризаційних ознак, наведених у табл. 2.

Таблиця 2 – Тривимірні поляризаційні ознаки, достатньо інформативні для розпізнавання металевих об'єктів на фоні місцевості

№	Векторна ознака	Розрізняюваність класу об'єктів на фоні інших класів $J(a_k)$					
		“Море”	“Ліс”	“Гори”	“Метал”	“Бетон”	“Поле”
1	$\varphi_T, \theta_Z, \theta_T$	16,20	12,60	17,50	<b>65,60</b>	38,20	12,30
2	$\theta_T, \varphi_E, \theta_E$	18,70	14,20	18,30	<b>65,10</b>	33,80	12,60
3	$\varphi_T, \theta_Z, \varphi_E$	26,20	14,60	55,40	<b>64,60</b>	33,00	13,50
4	$\psi_T, \theta_E, \varphi_T$	13,70	12,50	16,30	<b>64,00</b>	36,70	11,00

Таким чином, на ґрунті отриманих за результатами експериментальних досліджень негаусівських статистичних моделей поляризаційних ознак реальних малорозмірних наземних та надводних об'єктів та підстильних поверхонь та розробленого методу аналізу інформативності багатовимірних ознак з негаусівськими розподілами ймовірностей вперше проведено порівняльний аналіз інформативності запропонованих нових поляризаційних ознак малорозмірних об'єктів з найбільш поширеними поляризаційними ознаками, запропонованих різними науковими школами, у порівняних умовах, що дозволило отримати достатньо інформативні з точки зору теорії інформаційної достатності векторні поляризаційні ознаки для розпізнавання малорозмірних об'єктів із заданими електрофізичними властивостями, зокрема металевих, на фоні типових підстильних поверхонь (рослинність, гірський масив, морська поверхня).

У шостому розділі запропоновано методи розпізнавання радіолокаційних об'єктів із заданими електрофізичними властивостями за їх інваріантними поляризаційними ознаками в умовах апріорної невизначеності щодо кількості та характеристик класів об'єктів, що спостерігаються на місцевості, та автоматичної класифікації об'єктів радіолокаційного спостереження за їх поляризаційними ознаками з використанням критерію мінімально-достатньої кількості інформації при апріорно невідомій кількості класів об'єктів, що є придатними до застосування у реальному масштабі часу, виконано експериментальну перевірку методів, що розроблено.

При вирішенні задач безпеки польотів та пошуково-рятувальних робіт з використанням авіаційної техніки необхідним є прийняття рішень у реальному масштабі часу. При виконанні польотів далеко не завжди є можливість попереднього аналізу радіолокаційної обстановки за маршрутом польоту і визначення повної множини класів об'єктів радіолокаційного спостереження, завжди існує

ймовірність появи неврахованого класу об'єктів, наприклад, мобільних, відсутня достовірна інформація щодо апіорних ймовірностей появи класів об'єктів та їх характеристик. Тому у роботі на ґрунті результатів експериментальних досліджень поляризаційних ознак об'єктів радіолокаційного спостереження та аналізу їх інформативності, з яких слідує, що є інваріантні векторні поляризаційні ознаки, за якими конструктивно різні металеві об'єкти можуть бути згруповані у один клас об'єктів, запропоновано використання принципу подібності у припущенні, що поляризаційні ознаки невідомих об'єктів, зокрема металевих, будуть подібними до ознак об'єктів, що спостерігалися раніше. За аналогією з оптимальною фільтрацією сигналів у частотній області на основі введеного К. Фукунаґою (К. Fukunaga) у статистичну теорію прийняття рішень поняття "ймовірнісне вікно" запропоновано поняття "поляризаційно-імовірнісний фільтр", узгоджений за формою з багатовимірними законами розподілу інваріантних поляризаційних ознак об'єктів радіолокаційного розпізнавання, на ґрунті якого розроблено метод розпізнавання малорозмірних радіолокаційних об'єктів на фоні місцевості за умов апіорної невизначеності.

Аналітично отримано закони розподілу "сигналу" на виході ймовірнісного фільтру при повному збігу характеристик фільтру із характеристиками сигналу (ознаки), що отримується, та при довільних, в т.ч. з негаусівським законом розподілу, характеристиках об'єкту радіолокаційного спостереження (рис. 7), що дозволило сформулювати вирішальне правило у вигляді

$$W(\vec{x} | \vec{\varepsilon}, \vec{\lambda}, \vec{\eta}, \vec{\gamma}) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \left( \left[ \gamma_i + \eta_i \cdot \ln \left( \frac{x_i - \varepsilon_i}{\varepsilon_i - x_i + \lambda_i} \right) \right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times R_{ij}^{-1} \cdot \left[ \gamma_j + \eta_j \cdot \ln \left( \frac{x_j - \varepsilon_j}{\varepsilon_j - x_j + \lambda_j} \right) \right] \right) \right\} \geq \frac{1}{\pi}, \quad (19)$$

де  $\vec{x}$  – відлік векторної поляризаційної ознаки з розмірністю  $M$ ;

$\vec{\varepsilon}, \vec{\lambda}, \vec{\eta}, \vec{\gamma}, \mathbf{R}$  – параметри негаусівської щільності розподілу (13) векторної поляризаційної ознаки радіолокаційного об'єкту, що очікується.

Вихідний сигнал імовірнісного фільтру (19)  $y = W(\vec{x})$  є одновимірної випадкової величиною  $y \in [0, 1]$ . Розрахункова оцінка середньостатистичної ймовірності прийняття правильного рішення для одновимірного негаусівського закону розподілу ознаки становить 0,865 при довільних значеннях параметрів законів розподілу інших об'єктів і зростає із збільшенням розмірності простору ознак.

Експериментальна перевірка розробленого методу розпізнавання малорозмірних об'єктів за інваріантними поляризаційними ознаками в умовах апіорної невизначеності проводилася за допомогою автоматизованого радіолокаційного поляриметра (рис. 2-а).

Фільтр (19) було налаштовано на векторну поляризаційну ознаку  $\{\varphi_T, \theta_T, \varphi_E\}$  з параметрами класу малорозмірних металевих об'єктів, його вихідний сигнал  $y = W(\vec{x})$  обчислювався безпосередньо у темпі надходження відлі-

ків відбитого радіолокаційного сигналу. Зображення вихідного сигналу поляризаційно-імовірнісного фільтру при радіолокаційному скануванні на відстані від 1,5 км до 3,4 км тестової ділянки місцевості з рослинністю різних типів, металевими об'єктами та будинками наведено на рис. 10. Виявленими металевими об'єктами були опори лінії електропередач (1), водонапірна башта (2) та металева споруда (гараж) (3), що підтверджує працездатність запропонованого методу розпізнавання малорозмірних об'єктів у реальному масштабі часу.

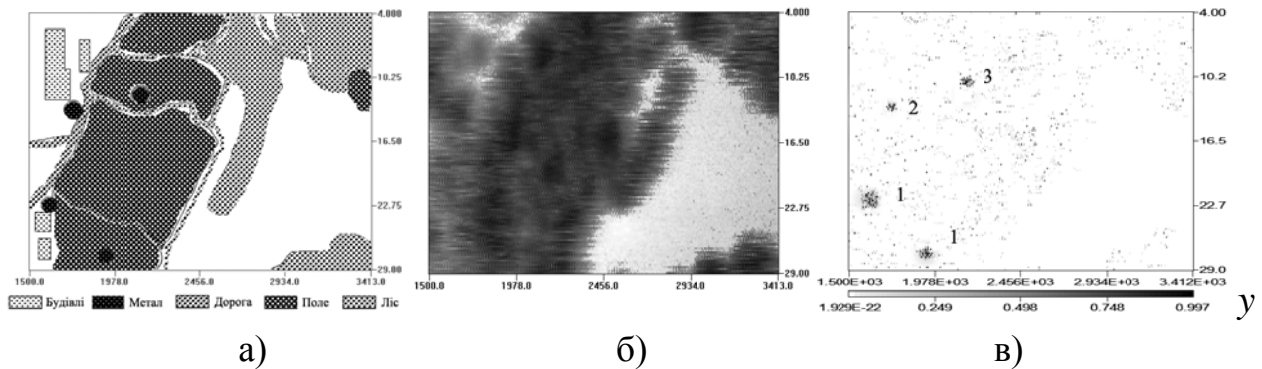


Рисунок 10 – План місцевості за даними GPS (а), радіолокаційне зображення  $S_{HH}$  (б) та вихідний сигнал поляризаційно-імовірнісного фільтру (18):  
1 – опори ЛЕП, 2 – водонапірна башта, 3 – металева споруда

Оцінка імовірності розпізнавання малорозмірного металевого об'єкту (вертикальна труба діаметром 0,5 м і 5 м заввишки) на відстані 6,8 км на фоні гірського масиву проводилася при фіксованому положенні антен поляриметру і тривалому накопиченні даних. Аналіз результатів експерименту показав, що розроблений метод забезпечує середньостатистичні імовірність правильного розпізнавання  $\approx 0,8$  при імовірності "помилкової тривоги" менш ніж 0,1.

Експериментальні дослідження дають можливість оцінити поляризаційні ознаки типових об'єктів радіолокаційного спостереження, що досить добре відрізняються один від одного. У реальних умовах під час польоту літального апарату обстежуються великі ділянки місцевості, і кількість класів об'єктів є невідомою (теоретично  $M \rightarrow \infty$ ), тому не слід виключати можливість появи неврахованих об'єктів з іншими поляризаційними характеристиками. Крім того, як показали результати досліджень поляризаційних ознак підстильних поверхонь, зокрема рослинності та морської поверхні, їх поляризаційні ознаки залежать від стану поверхні, ракурсу спостереження, метеорологічних умов. У зв'язку з цим було визнано за доцільне розробити метод розпізнавання, що не потребує апріорної інформації, передбачає аналіз даних в темпі їх надходження і послідовне самонавчання (класифікацію даних) по мірі надходження нових радіолокаційних даних. Більшість відомих методів автоматичної класифікації поляриметричних радіолокаційних зображень використовуються для пост-обробки радіолокаційних даних. Алгоритми реального часу застосовуються сьогодні в обробці акустичних сигналів, робототехніці та в обробці відеоданих.

Запропоновано метод автоматичної класифікації об'єктів радіолокаційно-



го спостереження за їх поляризаційними ознаками з використанням критерію мінімально-достатньої кількості інформації (16) при апріорно невідомій кількості класів об'єктів. В якості оцінки щільності розподілу ймовірностей, знання якої необхідно для визначення (17), може використовуватися гістограма миттєвої реалізації ознаки  $\bar{x}$ , обчислюваної за отриманим сигналом. При польоті літального апарату над однорідною поверхнею, гістограма ознаки з точки зору критерію МДКІ буде змінюватися несуттєво, наприклад, як показано на рис. 11-а. При зміні властивостей поверхні або при появі нового радіолокаційного об'єкту відбудеться зміна форми гістограми (рис. 11-б), що призведе до перерозподілу ймовірностей для значень ознаки, що еквівалентно зміні умовної кількості інформації згідно (17). Якщо ці зміни перевищать порогове значення, як показано на рис. 11-в, значить, має наявність факт спостереження нового об'єкта, і на інтервалах перевищення порога будуть зафіксовані нові кластери об'єктів, що будуть включені до множини класів об'єктів  $\{A\}$ .

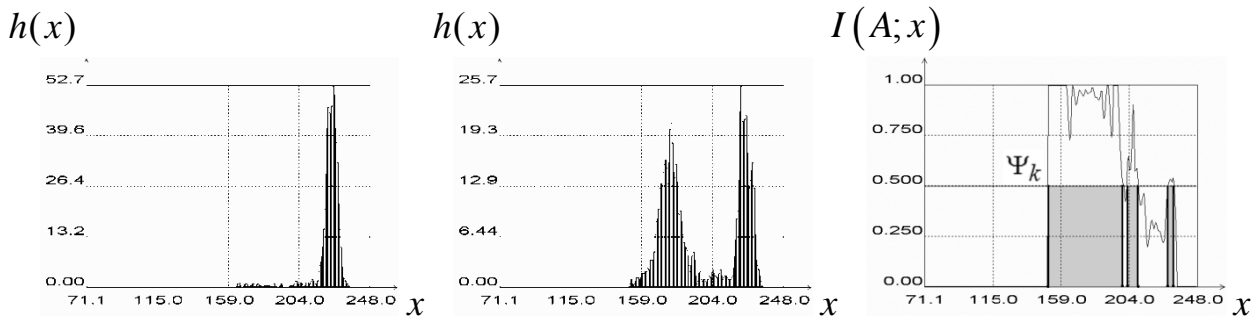


Рисунок 11 – Вихідна гістограма (а) ознаки  $x$ , гістограма ознаки  $x$  при появі нового радіолокаційного об'єкту (б), зміна кількості одержуваної інформації (в)

Для опису кожного виявленого кластеру використовуються оцінки щільності закону розподілу ймовірностей  $\hat{f}(x)$ , параметри котрих обчислюються у границях виявленого кластеру  $x_{\max}, x_{\min}$ , за локальними гістограмами  $h(x)$

$$\hat{m}_k = \left( \sum_{x_{\min}}^{x_{\max}} x \cdot h(x) \right) / \left( \sum_{x_{\min}}^{x_{\max}} h(x) \right), \quad \hat{\sigma}_k^2 = \left( \sum_{x_{\min}}^{x_{\max}} (x - \hat{x}_k)^2 \cdot h(x) \right) / \left( \sum_{x_{\min}}^{x_{\max}} h(x) \right). \quad (20)$$

Оцінки (20) будуть приблизними, але дозволяють зафіксувати параметри виявленого кластеру та його положення у просторі ознак.

В отриманому списку об'єктів можуть бути присутніми повторювані кластери. На наступному етапі необхідно уточнити кількість об'єктів і виключити повторювані. Для їх виявлення пропонується використовувати критерій мінімально достатнього розрізнення (18). Для кожної пари  $i, k$  знайдених кластерів може бути визначена дивергенція Кульбака

$$J_{i,k} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \hat{f}(x|a_k) - \hat{f}(x|a_i) \right] \cdot \ln \frac{\hat{f}(x|a_k)}{\hat{f}(x|a_i)} dx. \quad (21)$$

Якщо в процесі аналізу матриці (21) виявляються кластери, для яких,  $J_{i,k} < \mathfrak{S}$

(18), то можна припустити, що відмінність статистичних параметрів цих кластерів визначається варіацією значень в межах одного класу об'єктів, і, отже, такі кластери можуть бути об'єднані в один клас. Об'єднання проводиться шляхом знаходження статистичних оцінок даних відповідно до (20) на інтервалі, загальному для кластерів, що об'єднуються.

Таким чином, за критерієм мінімально достатньою розрізнення класів об'єктів виділяються і об'єднуються в групи кластери, розрізнення яких менше встановленого порогу. Ступінь розрізнення класів об'єктів, що залишилися (в т.ч. об'єднаних) перевищує мінімально достатню, і, отже, отримана таким способом множина кластерів визначає кількість і параметри класів об'єктів, які можна розрізнити в даних, що надходять.

Якщо наявні статистичні моделі ознак реальних об'єктів, може бути проведена ідентифікація виявлених у автоматичному режимі кластерів шляхом їх порівняння з наявними даними за критерієм (14) у вигляді

$$J(k, j) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ f(\bar{x}|a_k) - \hat{f}(\bar{x}|c_j) \right] \cdot \ln \frac{f(\bar{x}|a_k)}{\hat{f}(\bar{x}|c_j)} d\bar{x} < \mathfrak{S}_M,$$

де  $k$  – номер об'єкту  $a_k$ , для якого наявні статистичні моделі  $f(\bar{x}|a_k)$  ознаки  $\bar{x}$ ;  $j$  – номер кластеру  $c_j$ , що аналізується,  $\hat{f}(\bar{x}|a_j)$  – оцінка закону розподілу ознаки  $\bar{x}$  отримана у процесі кластеризації,  $\mathfrak{S}_M$  – поріг мінімально-достатньої розрізнюваності (18) для визначеної кількості кластерів  $M$ .

Перевірка розробленого методу на тестових даних показала, що імовірність вірної класифікації складає 0,8–0,9 при вірно визначеній кількості класів об'єктів. При тестуванні методу автоматичної класифікації шляхом моделювання відліків багатовимірних поляризаційних ознак об'єктів при їх розміщенні на штучній карті розташування об'єктів спостерігалось розділення деяких просторово-розподілених об'єктів, зокрема, морської поверхні, на два кластери, а ймовірність правильної класифікації малорозмірних об'єктів становила 0,75 – 0,85.

Експериментальна перевірка методу автоматичної класифікації радіолокаційних об'єктів в умовах повної апіорної невизначеності проводилася шляхом класифікації даних, отриманих за допомогою радіолокаційного поляриметра при скануванні тестової ділянки місцевості, план якої наведено на рис. 10, а поляриметричне зображення для векторної поляризаційної ознаки  $\{\varphi_E, \theta_T, \varphi_T\}$  у псевдокольорах (RGB) – на рис. 12-а.

Політ літака моделювався шляхом послідовного подання на класифікатор реалізацій сигналу (строк зображення за відстанню) отриманих поляриметром від імпульсу до імпульсу зондування. В результаті автоматичної кластеризації даних за векторною поляризаційною ознакою  $\{\varphi_E, \theta_T, \varphi_T\}$  було виявлено 7 кластерів, 4 з яких було ідентифіковано за їх електрофізичними властивостями, як показано на рис. 12-б. Нерозпізані зони місцевості у своїй більшості співпадають із ґрунтовими дорогами та ділянками без рослинності.

Таким чином, можна вважати експериментально доведеною можливість

автоматичної класифікації малорозмірних радіолокаційних об'єктів на тлі підстильної поверхні та місцевих предметів за інваріантними поляризаційними ознаками, в т.ч. у реальному масштабі часу.

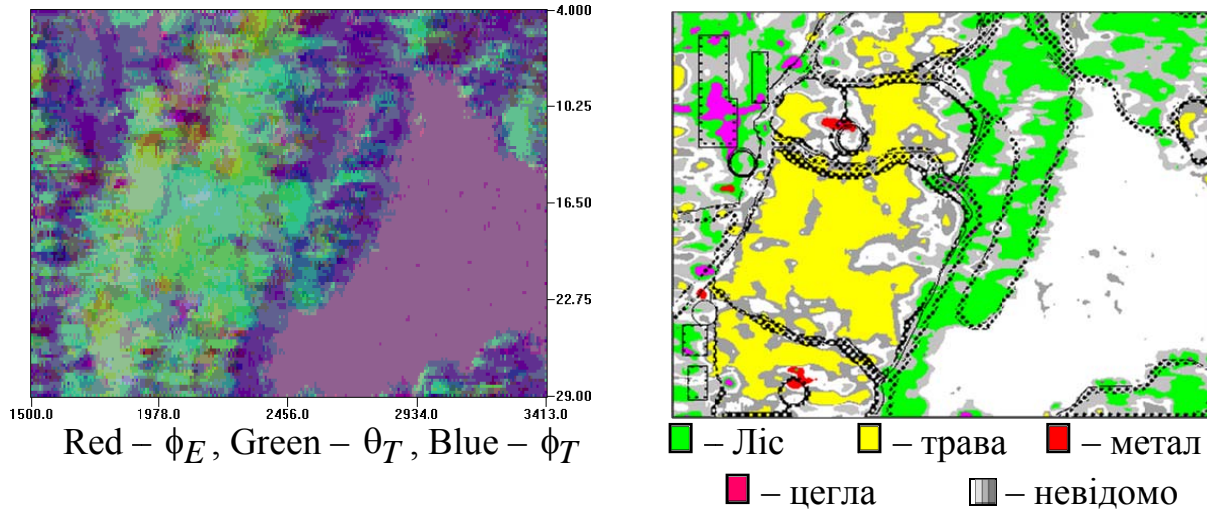


Рисунок 12 – Поляриметричне зображення (розгортка "відстань-азимут") тестової ділянки місцевості (а) та результати автоматичної кластеризації і ідентифікації об'єктів за векторною поляризаційною ознакою  $\{\phi_E, \theta_T, \phi_T\}$ , суміщені з планом місцевості

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну проблему розпізнавання у реальному масштабі часу малорозмірних об'єктів в умовах ап'рорної невизначеності їх характеристик за поляризаційними параметрами відбитих сигналів.

1. Запропоновано нову математичну операторну модель радіолокаційного об'єкту, яка за рахунок використання математичного апарату подвійного комплексного простору та інваріантної декомпозиції поляризаційної матриці розсіювання на відміну від існуючих математичних матричних моделей надала можливість роздільного опису перетворень амплітуди, фази та поляризації сигналу зондування при його відбитті радіолокаційним об'єктом незалежно від поляризаційних параметрів сигналу зондування. Це надало можливість виділення нових поляризаційних ознак для розпізнавання об'єктів радіолокаційного спостереження.

2. Запропоновано нові інваріантні поляризаційні ознаки радіолокаційного об'єкту - параметри передатних функції об'єкту за поляризацією (трансформація еліптичності, орієнтації та поляризаційний фазовий зсув) сигналу, які при фіксованому ракурсі спостереження залежать тільки від геометричних та електрофізичних характеристик об'єкту та частоти сигналу зондування, і на відміну від відомих інваріантних поляризаційних ознак є математично взаємозалежними, що надало можливість підвищення імовірності розпізнавання малорозмірних об'єктів на фоні підстильної поверхні з 0,6 до 0,8.

3. Розроблено метод оцінки параметрів нової математичної операторної

моделі - параметрів передатних функцій об'єкту за амплітудою, фазою та поляризацією сигналу, який дозволяє знаходити оцінки нових поляризаційних ознак за результатами вимірів поляризаційної матриці радіолокаційного об'єкту, що дозволило експериментально оцінити закони розподілу нових поляризаційних ознак реальних малорозмірних об'єктів радіолокаційного спостереження та підстильних поверхонь.

4. Проведено натурні експериментальні дослідження поляризаційних ознак малорозмірних наземних та надводних об'єктів та підстильних морської поверхні у різних метеорологічних умовах та земної поверхні з рослинністю різного типу та гірських масивів. За результатами статистичного аналізу експериментальних даних запропоновано для опису поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів використання багатовимірних негаусівських статистичних моделей на основі розподілів Джонсона та розроблено метод оцінки їх параметрів за експериментальними даними з урахуванням кореляційних зв'язків поляризаційних ознак, що дозволило отримати чисельні значення параметрів багатовимірних статистичних моделей сукупності поляризаційних ознак реальних малорозмірних наземних та надводних об'єктів та підстильних поверхонь (рослинності різних типів, гірських масивів, морської поверхні в різних метеорологічних умовах) та сформувати базу даних статистичних характеристик поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів, що забезпечило подальший аналіз їх інформативності.

5. Розроблено метод оцінки ступеню розрізнення множини класів об'єктів за векторною ознакою з негаусівським законом розподілу ймовірностей, який, на відміну від традиційної ймовірності правильного розрізнення не залежить від методу прийняття рішень та придатний для аналізу інформативності ознак з негаусівськими законами розподілу навіть у випадках повного маскуванню одного з класів об'єктів іншими, що дозволило виявити ознаки, які групують об'єкти у класи за їх електрофізичними та геометричними властивостями, та виявити сукупності ознак, що забезпечують поляризаційний контраст малорозмірних об'єктів на фоні підстильної поверхні, достатній для їх розпізнавання.

6. Проведено порівняльний аналіз інформативності запропонованих нових поляризаційних ознак малорозмірних радіолокаційних об'єктів з найбільш поширеними поляризаційними ознаками у порівняних умовах на основі багатовимірних статистичних моделей, побудованих за експериментальними даними, що дозволило отримати достатньо інформативні з точки зору теорії інформаційної достатності векторні поляризаційні ознаки для розпізнавання малорозмірних об'єктів заданої форми або матеріалу, зокрема металевих, на фоні типових підстильних поверхонь.

7. Розроблено метод розпізнавання малорозмірних об'єктів за векторними поляризаційними ознаками з негаусівськими законами розподілу в умовах апріорної невизначеності, який, на відміну від відомих, не потребує апріорної інформації щодо законів розподілу ознак підстильної поверхні і забезпечує розпізнавання об'єктів з заданими геометричними та електрофізичними

властивостями за поляризаційними ознаками на фоні підстильної поверхні за умов апіорної невизначеності щодо її поляризаційних характеристик в реальному масштабі часу з ймовірністю прийняття правильного рішення 0,8 – 0,85 та ймовірністю хибної тривоги менш, ніж 0,1.

8. Розроблено метод автоматичної класифікації об'єктів радіолокаційного спостереження за їх поляризаційними ознаками з використанням критерію мінімально-достатньої кількості інформації при апіорно невідомій кількості класів об'єктів, який забезпечує ймовірність правильної класифікації малорозмірних об'єктів 0,75 – 0,85. Розроблений метод автоматичної класифікації може використовуватися у реальному часі безпосередньо у процесі польоту літального апарата та дозволяє ідентифікувати об'єкти за їх поляризаційними ознаками.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Lukin V.V. A method for automatic blind estimation of additive noise variance in digital images / V.V. Lukin, S.K. Abramov, A.V. Popov, P.Y. Eltsov, B. Vozel, K. Chehdi // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2010. – Vol. 69, no. 19. – P. 1681–1702. (Scopus, Q3) DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i19.10
2. Popov A.V., Pogrebnyak O., Brashevan A.N. Unsupervised remote sensing data classification using multimodal statistical model / A.V. Popov, O. Pogrebnyak, A.N. Brashevan // *Research in Computer Science*. – 2007. – Vol. 31. – P. 115–124.
3. Пономарев В.И. Экспериментальные исследования возможностей адаптивной пространственно-временной поляризационной селекции / В.И. Пономарев, А.В. Попов, М.Ф. Бабаков // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 1997. – Т. 2, №5. – С.93–96.
4. Попов А.В. Распознавание объектов дистанционного зондирования при неполных априорных данных / А.В. Попов, П.Е. Ельцов // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2002. – Т. 2, № 7. – С. 41–48.
5. Бабаков М.Ф. Применение поляризационно-модулированных сигналов для селекции и распознавания радиолокационных объектов / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов // *Зарубежная радиоэлектроника: Успехи современной радиоэлектроники*. – 1999. – №11. – С. 45–50.
6. Моніторинг навколишнього середовища з використанням космічних знімків супутника NOAA: моногр. за рішенням НТР / С.О. Довгий, Р.Е. Пащенко, Г.Я. Красовський та ін. – Київ: «НПП «Интерсервис», 2013. – 316 с. – С. 190–211.
7. Попов А.В. Операторное описание поляризационных характеристик объектов активного дистанционного зондирования / А.В. Попов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 5 (62). – С. 94-102.
8. Попов А.В. Сравнительный анализ теорем декомпозиции поляризационных характеристик объектов активного аэрокосмического дистанционного зондирования / А.В. Попов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – №5 (72). – С. 90-99.

9. Попов А.В. Критерий различимости объектов дистанционного зондирования при негауссовском распределении признаков / А.В. Попов // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2011. – №3 (51). – С. 30–36.
10. Попов А.В. Экспериментальный анализ информативности поляризационных передаточных характеристик объектов активного дистанционного зондирования / А.В. Попов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – №5 (82). – С. 86–94.
11. Попов А.В. Метод принятия решений при распознавании объектов в условиях существенной априорной неопределенности / А.В. Попов // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2015. – №3 (73). – С. 53–60.
12. Попов А.В. Об информативности инвариантных поляриметрических изображений / А.В. Попов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2002. – №35. – С. 67–72.
13. Попов А.В. Негауссовская статистическая модель многомерных экспериментальных данных / А.В. Попов, А.Н. Брашеван // *Вісник Технологічного університету Поділля*. – 2003. – Т.2, №3. – С.126–129.
14. Попов А.В. Разработка метода построения негауссовских статистических моделей экспериментальных данных / А.В. Попов, И.Н. Колесник // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2009. – №3 (37). – С. 33–39.
15. Васильева И.К. Об информативности коррелированных признаков объектов распознавания / И.К. Васильева, А.В. Попов // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2008. – №3 (30). – С. 56–61.
16. Попов А.В. Экспериментальная проверка корреляционно-спектрального метода оценки параметров движения объектов радиолокационного наблюдения / А.В. Попов, Р.В. Колесник, К.И. Скрыпник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – №60. – С. 76-82.
17. Колесник Р.В. Применение поляризационно-доплеровских сигналов для технической диагностики объектов авиационной техники / Р.В. Колесник, С.А. Ребров, А.В. Попов // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2007. – №3. – С. 14–18.
18. Попов А.В. Оценка параметров движения объектов дистанционного зондирования по данным радиолокационного поляриметра / А.В. Попов, Р.В. Колесник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – №66. – С. 76-82.
19. Попов А.В. Автоматическая классификация данных дистанционного зондирования на основе теоретико-информационных критериев / А.В. Попов, А.Н. Брашеван // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2009. – №2 (36). – С. 120–129.
20. Борцова М.В. Экспериментальная проверка метода моделирования радиолокационных поляриметрических сигналов, отраженных морской поверхностью / М.В. Борцова, А.В. Попов // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2011. – №1 (49). – С. 13–21.
21. Попов А.В. О поляризационной модуляции радиолокационных сигналов, отраженных морской поверхностью / А.В. Попов, М.В. Борцова // *Системы*

управління, навігації та зв'язку. – 2011. – №1 (17). – С. 46–55.

22. Попов А.В. Обнаружение металлических объектов на фоне горных массивов по неэнергетическим поляризационным характеристикам отраженных радиолокационных сигналов / А.В. Попов, М.В. Борцова // Військово-технічний збірник. – 2011. – №2. – С. 59–66.

23. Васильева И.К. Синтез алгоритма распознавания гидрометеорологических объектов по радиолокационным данным / И.К. Васильева, А.В. Попов // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2005. – №4. – С. 17–32.

24. Васильева И.К. Экспериментальная проверка алгоритма распознавания гидрометеобразований по радиолокационным данным / И.К. Васильева, А.В. Попов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – №3 (29). – С. 53–61.

25. Попов А.В. Алгоритм сопровождения объектов в видеопотоке, регистрируемом с беспилотного летательного аппарата / А.В. Попов, И.К. Васильева, А.С. Угарова // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2015. – №6 (123). – С. 77–84.

26. Васильева И.К. Метод синтеза многокомпонентной модели атрибутивных признаков объектов / И.К. Васильева, А.В. Попов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи – 2018. – №2 (86). – С. 13–25.

27. Ребров С.А. О методах калибровки поляриметрических РЛС / С.А. Ребров, А.В. Попов // Технология приборостроения. – 2001. – №1–2. – С. 45–50.

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.***

28. Ponomaryov V.I. Detection and recognition of targets by using signal polarization properties / V.I. Ponomaryov, R. Peralta-Fabi, A.V. Popov, M.F. Babakov // AeroSense '99, Aug. 24, 1999, Orlando, FL, US, printed in Automatic Target Recognition IX. – Vol. 3718 – DOI: 10.1117/12.359960

29. Popov A.V. Informative polarimetric radar invariants / A.V. Popov, O. Pogrebnyak // IEEE Guanajuato Mexico Section 2nd International Workshop on Random Fields Modelling and Processing in Inhomogeneous Media, Nov. 27–29, 2002, Guanajuato, Mexico. – P. 49–51.

30. Popov A.V. Informativity of polarimetric radar invariants / A.V. Popov, O. Pogrebnyak // SPIE's 48th Annual Meeting on Optical Science and Technology, Nov. 10, 2003, San Diego, California, United States, printed in Earth Observing Systems VIII. – Vol. 5151. – P. 74–84. – DOI: 10.1117/12.504093

31. Popov A.V. Radar target recognition by probabilistic filtering / A.V. Popov, O. Pogrebnyak // SPIE 49th Annual Meeting Optical Science and Technology, Oct. 26, 2004, Denver, Colorado, United States, printed in Earth Observing Systems IX – Vol. 5542 – P. 459–467. – DOI: 10.1117/12.558627

32. Popov A.V. Image clustering algorithm using polynormal distribution / A.V. Popov, O. Pogrebnyak, A.N. Brashevan // Optics and Photonics 2005, Aug. 30, 2005, San Diego, California, United States, printed in Mathematical Methods in Pattern and Image Analysis. – Vol. 5916. – DOI: 10.1117/12.617895

33. Popov A. The effects of polarization modulation of radar signals backscattered by the sea surface: modeling and experimental validation / A. Popov, M. Bortsova //

2012 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Aug., 28–30, 2012, Kharkiv, Ukraine. – P. 513–516. – DOI: 10.1109/MMET.2012.6331258

34. Vasil'eva I. An algorithm for recognition of hydrometeors by polarimetric radar data based on the information theory / I. Vasil'eva, A. Popov // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016), June, 20–24, 2016, Kharkiv, Ukraine. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538144

35. Popov A. Polarization transfer functions of remote sensing objects / A. Popov, M. Bortsova // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016), June, 20–24, 2016, Kharkiv, Ukraine. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538155

36. Popov A. Detection of metal objects against mountain ranges using polarization transfer functions / A. Popov, M. Bortsova // 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'2018), July, 2–5, 2018, Kiev, Ukraine. – P. 290–293. – DOI: 10.1109/MMET.2018.8460432

37. Vasil'eva I. Multicomponent model of objects attributive signatures on color pictures / I. Vasil'eva, A. Popov // 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Oct., 9–12, 2018, Kharkiv, Ukraine. – P. 281–284. – DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632110

38. Popov A. Experimental research of polarization transfer functions of mobile ground objects / A. Popov, M. Bortsova // IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON'2019), July, 2–6, 2019, Lviv, Ukraine. – P. 119–122. – DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879940

39. Popov. A. A method for automatic clustering of remote sensing data / I. Vasil'eva, A. Popov // IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON'2019), July, 2–6, 2019, Lviv, Ukraine. – P. 48–51. – DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879828

40. Popov A. Automatization of antenna measurements in the anechoic chamber / A. Popov, D. Kalimullin // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW'2020), Kharkiv, Ukraine, 21–25 Sept, 2020. – P. 183–186. – DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252594.

41. Kalimullin D. Polarization-frequency trajectories of invariant characteristics of UWB remote sensing objects / D.R. Kalimullin, A.V. Popov // IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW'2020), Sept., 21–25, 2020, Kharkiv, Ukraine. – P. 987–990. – DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252680

42. Vasil'eva I. Unsupervised objects classification in ALOS-2 PALSAR-2 Images / I. Vasil'eva, A. Popov // IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW'2020), Sept., 21–25, 2020, Kharkiv, Ukraine. – P. 384–387. – DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252711



## АНОТАЦІЯ

**Попов А.В. Розпізнавання малорозмірних радіолокаційних об'єктів за умов апріорної невизначеності з використанням інваріантних поляризаційних ознак.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Харків, 2021.

Наявне протиріччя між необхідністю вирішення задач пошуково-рятувальних робіт, безпеки польотів та ін. бортовими радіолокаційними системами у реальному масштабі часу та недостатньою пристосованістю існуючих методів виділення інформативних ознак малорозмірних радіолокаційних об'єктів та прийняття рішень за умов апріорної невизначеності щодо характеристик об'єктів та підстильних поверхонь породжує актуальну науково-прикладну проблему розпізнавання у реальному масштабі часу малорозмірних радіолокаційних об'єктів в умовах апріорної невизначеності їх характеристик за поляризаційними параметрами відбитих сигналів.

В дисертаційній роботі на основі математичного апарату подвійного комплексного простору та інваріантної декомпозиції поляризаційної матриці розсіювання розроблено узагальнену поляриметричну модель радіолокаційного об'єкта, на ґрунті якої запропоновано нові інваріантні поляризаційні ознаки та метод їх отримання за результатами вимірювання поляризаційної матриці розсіювання, виконано класифікацію, оцінку завадостійкості та натурні експериментальні дослідження відомих та запропонованих поляризаційних ознак різних малорозмірних радіолокаційних об'єктів та підстильних поверхонь, розроблено метод оцінки параметрів їх багатовимірних негаусівських статистичних моделей за експериментальними даними.

На ґрунті теорії інформаційної достатності розроблено метод аналізу інформативності поляризаційних ознак радіолокаційних об'єктів з урахуванням негаусівського характеру їх законів розподілу, виявлено інваріантні поляризаційні ознаки, що групують об'єкти у класи за їх електрофізичними властивостями та інформативні сукупності поляризаційних ознак, що дозволяють розпізнавати об'єкти різних класів.

Розроблено методи розпізнавання малорозмірних радіолокаційних об'єктів із заданими властивостями за їх інваріантними поляризаційними ознаками в умовах апріорної невизначеності щодо кількості класів об'єктів та їх параметрів, та автоматичної класифікації радіолокаційних об'єктів, придатні до застосування у реальному масштабі часу, виконано експериментальну перевірку розроблених моделей та методів у натурних умовах.

**Ключові слова:** радіолокація, поляриметрія, негаусівський закон розподілу ймовірностей, поляризаційна ознака, автоматична класифікація, розпізнавання.

**ABSTRACT****Popov A.V. Recognition of small radar objects in the conditions of a priory uncertainty with the use of invariant polarization signatures. – Manuscript.**

Thesis for obtaining the degree of Doctor of Technical Science in the speciality 05.12.17 – radio engineering and television systems. – National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkiv, 2021.

The existing contradiction between the necessity of performing real-time search-and-rescue works, ensuring flight safety etc. by on-board radar systems and insufficient suitability of the existing methods of extracting informative signatures of small radar objects and decision-making in conditions of a priory uncertainty as to the characteristics of objects and underlying surfaces brings forth an urgent applied-scientific problem of real-time recognition of small objects in conditions of a priory uncertainty as to their characteristics on the basis of polarization parameters of back-scattered signals.

In the thesis through the mathematical apparatus of the double complex plane and invariant decomposition of the polarization scattering matrix a generalized polarimetric model of a radar object is developed. On the basis of the developed model new invariant polarization signatures and a method of their derivation from the results of polarization scattering matrix measuring are suggested. The known and suggested polarization signatures of various small radar objects and underlying surfaces are classified, assessed in terms of their noise-tolerance, and researched in field experiments. A method to estimate parameters of their multi-dimensional non-Gaussian statistical models from experimental data is developed.

On the basis of the information sufficiency theory a method to analyze informativity of radar objects polarization signatures with account of their non-Gaussian distribution is developed. Invariant polarization signatures which group objects into classes according to their electro-physical properties and some informative combinations of polarization signatures which allow recognizing objects of different classes are revealed.

Methods to recognize small radar objects with given properties by their invariant polarization signatures in conditions of a priory uncertainty as to the number of object classes and their parameters and methods for automatic classification of radar objects are developed. These models and methods are verified in field experiments and can be used in real-time applications.

**Key words:** radiolocation, polarimetry, non-Gaussian distribution, polarization signature, automatic classification, recognition

Підписано до друку 02.04.2021 р. Формат 60x84x1/16  
Папір офсетний. Друк офсетний.  
Наклад 100 прим. Ум. друк. арк. 0,9. Зам. №243/2  
Віддруковано з оригінал-макету у "Центрі цифрової поліграфії"  
м. Харків, пр. Науки, 7, тел. 702-13-88  
e-mail: nauki007@gmail.com