

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Бокал Жанна Миколаївна**

УДК 621.396.4:621.396.96:519.24

**НЕПАРАМЕТРИЧНІ АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ ЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В  
ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ**

Спеціальність 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ - 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент

**Сініцин Рустем Борисович,**

Національний авіаційний університет, м.Київ, доцент кафедри електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та інтернету речей

Опоненти:

доктор технічних наук, професор

**Павліков Володимир Володимирович,**

Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", м.Харків, проректор з наукової роботи;

доктор технічних наук, професор

**Дружинін Володимир Анатолійович,**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м.Київ, в.о. завідувача кафедри інформаційних систем та технологій

Захист відбудеться “\_\_\_” “\_\_\_\_\_” 2024 р. об 11<sup>00</sup> годині в аудиторії \_\_\_ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.08 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, пр-т Л.Гузара, 1.

З дисертацією можна ознайомитись на офіційному сайті <https://asdoc.nau.edu.ua/> та в науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, Київ, проспект Любомира Гузара, 1, корпус 8б, каб. 20.

Реферат розісланий “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.062.08

Сергій ДОЛГОРУКОВ

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Завдання дистанційного зондування атмосфери за допомогою локаційних засобів є дуже важливими для багатьох галузей економіки. В першу чергу вони важливі для забезпечення безпеки польотів. Моніторинг атмосферних умов допомагає виявляти небезпечні погодні явища, такі як зсуви вітру, які можуть бути небезпечними для літальних апаратів. Це особливо важливо для забезпечення безпеки польотів у цивільній авіації. Також дистанційне зондування дозволяє відслідковувати забруднення повітря та виявляти джерела забруднення тим самим виконувати екологічний моніторинг. Це сприяє захисту довкілля та здоров'я населення.

Інша галузь застосування це метеорологія, де збирання даних про погодні умови в режимі реального часу покращує точність прогнозів погоди, що є важливим для планування в різних секторах економіки, від сільського господарства до логістики. У сільському господарстві дані про погодні умови та кліматичні зміни важливі для планування сільськогосподарських робіт, що сприяє підвищенню врожайності та стійкості до несприятливих погодних умов. Інформація про атмосферні умови допомагає в проектуванні та будівництві інфраструктури, враховуючи можливі екстремальні погодні явища, що важливо в інфраструктурному плануванні.

Розвиток дистанційного зондування та обчислювальної техніки створює нові можливості для впровадження складних непараметричних алгоритмів, які можуть обробляти великі обсяги даних у реальному часі. Це підвищує ефективність та точність аналізу атмосферних даних.

Сучасні сенсори забезпечують дані в різних спектральних діапазонах, що дозволяє отримувати детальнішу інформацію про склад та стан атмосфери. Непараметричні методи можуть краще використовувати ці багатомірні дані для аналізу та інтерпретації складних атмосферних процесів.

Непараметричні алгоритми не вимагають попередніх припущень щодо розподілу даних, що робить їх більш універсальними та застосовними до широкого спектру задач дистанційного зондування атмосфери.

Зростаючі проблеми, пов'язані зі змінами клімату, вимагають точного моніторингу атмосфери для виявлення і аналізу змін у її складі та поведінці. Непараметричні алгоритми можуть забезпечити більш гнучкий та точний аналіз даних, що дозволяє краще розуміти кліматичні процеси та вплив антропогенних факторів.

Сучасні системи прогнозування погоди потребують обробки великих обсягів даних з різних джерел, таких як супутники, наземні станції та радіолокаційні системи. Непараметричні методи можуть покращити точність та швидкість обробки цих даних, що сприяє підвищенню надійності прогнозів.

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Дистанційне зондування атмосфери за допомогою локаційних засобів полягає у використанні різноманітних технологій для спостереження і вимірювання властивостей

атмосфери на відстані. Цей процес включає в себе використання радарних та лідарних технологій, супутникове зондування, радіометричні та акустичні методи. Акустичні локатори (содари) активно використовуються в метеорології для дослідження атмосфери. В першу чергу для одержання вертикального доплерівського зрізу атмосфери, що дозволяє вимірювати швидкість вітру і напрямок вітру в різних недоступних для звичайних метеорологічних методів точках атмосфери. Це важливо і для авіації, тому що дозволяє попереджати про таке непередбачуване небезпечне явище, як «зсув вітру» в аеропортах. Також для вивчення турбулентності, для вимірювання рівнів турбулентності та визначення зон турбулентності в нижніх шарах атмосфери. Недоліками таких локаторів є обмежена висота вимірювань, низька роздільна здатність і недостатня точність вимірювань. Содари зазвичай обмежені висотою до кількох сотень метрів і вимірювання на більших висотах можуть бути неточними через затухання звукових хвиль. Також, акустичний локатор використовує активний принцип роботи, тобто він випромінює звукові хвилі і потім аналізує відбиті від об'єктів хвилі. Отже, акустичний локатор потребує активного випромінювання звуку, що може бути виявлено іншими пристроями.

Шумовий локатор, що використовує випадковий зондувальний сигнал, працює на основі генерації та обробки широкопasmового сигналу, який має властивості білого шуму. Такий сигнал характеризується рівномірним розподілом енергії по всьому спектру частот, що робить його схожим на білий шум. Спектр цього зондувального сигналу нагадує спектр ідеального низькочастотного сигналу, який містить рівномірно розподілені частоти у заданому діапазоні. Це дозволяє шумовому локатору ефективно працювати в умовах перешкод та забезпечувати точне виявлення об'єктів на фоні складного акустичного середовища.

Шумові содари в широкій практиці майже невідомі. Пропозиції їхнього застосування і теоретичні аспекти застосування акустичних шумових сигналів уперше розглянуті в декількох публікаціях Сініцина, Р.Б. та Яновського Ф.Я., на які уже є посилання іноземних дослідників.

Цікавим є застосування широкопasmових шумових локаторів, які мають численні переваги, включаючи високу роздільну здатність по дальності, стійкість до перешкод, високу конфіденційність і здатність проникнення через перешкоди. Широка смуга частот дозволяє досягати дуже високої роздільної здатності, що дозволяє розрізняти об'єкти, які знаходяться близько один до одного. Завдяки широкопasmовим сигналам локатори можуть точно визначати положення, швидкість і інші характеристики цілей. Шумоподібні сигнали важко виявити та перехопити, що підвищує рівень конфіденційності і безпеки передачі. Отже, широкопasmові шумові локатори пропонують багато переваг, але їх складність, висока вартість, вимоги до обчислювальних ресурсів, можливість інтерференції, високе енергоспоживання та вплив погодних умов є основними недоліками, які можуть обмежувати їх застосування в деяких

ситуаціях. Ширококутові шумові локатори потребують складних електронних компонентів та програмного забезпечення для генерації, передачі та обробки шумових сигналів. Але найголовніше це складність обробки сигналів. Обробка ширококутових шумових сигналів вимагає потужних обчислювальних ресурсів і швидкодії процесорів для кореляції та аналізу сигналів у реальному часі. Необхідна розробка передових алгоритмів і методів обробки сигналів, що полегшить розробку і впровадження таких систем.

Виникає необхідність додаткової розробки алгоритмів зокрема непараметричних для обробки цих сигналів, які також дозволяють збільшити ефективність виявлення рухомих об'єктів або рухомих засобів і домогтися стабільності їхніх помилок.

На даний час проблемою статистичного підходу є синтез алгоритмів виявлення, оцінювання або класифікації в умовах апріорної невизначеності (неповної інформації про статистичні властивості моделі). Відповідні питання достатньо глибокого розглядалися в роботах таких вчених як: Білецький А.Я., Яновський Ф.Й., Прокопенко І.Г., Корніл'єв Е.А., Давлет'янц О.І.

На сучасному етапі такі методи обробки сигналів, як кореляційний та крос-кореляційний аналіз, не є універсальними, оскільки вони зазвичай базуються на припущенні, що оброблюваний сигнал має нормальний розподіл, що часто не відповідає дійсності. Кореляційний аналіз вимагає значних обчислювальних ресурсів, особливо при обробці ширококутових сигналів і кореляція може бути менш ефективною в умовах високого рівня шуму та завад.

Таким чином, у предметній області, що розглядається, існує протиріччя, яке, з одного боку, полягає в необхідності вдосконалення статистичних підходів до обробки даних, зокрема для підвищення точності та надійності виявлення сигналів у складних умовах, а з іншого — у відсутності ефективних методів і моделей, здатних адекватно вирішувати ці завдання за умов апріорної невизначеності та впливу перешкод. Це протиріччя визначає актуальність теми дисертації, підкреслюючи важливість розробки нових підходів, які дозволять подолати існуючі обмеження і забезпечити надійну обробку сигналів в умовах реальних сценаріїв застосування. Таким чином, дисертаційне дослідження спрямоване на вирішення цієї наукової проблеми, що має значний потенціал для практичного застосування в різних галузях, зокрема в метеорології, управлінні повітряним рухом та екологічному моніторингу.

Аналіз науково-технічної літератури в галузі статистичної обробки сигналів, а також у роботах з математичної статистики, свідчить про те, що перспективним напрямом є дослідження та побудова ефективних алгоритмів в умовах апріорної невизначеності. У зв'язку з цим актуальною є розробка алгоритмів виявлення сигналів і оцінки їх параметрів з високим ступенем апріорної невизначеності, перш за все, для застосування у МІМО шумових

локаторах, пасивній радіолокації, содарах та метеорологічних локаторах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Результати дисертаційного дослідження були використані під час виконання науково-дослідної роботи, що проводилася в Національному авіаційному університеті у рамках науково-дослідної кафедральної роботи: зокрема матеріали її досліджень, що викладені у звіті з НДР № 685-ДБ 10 «Теоретико–експериментальне обґрунтування шляхів розширення функціональних можливостей метеорологічного радіолокатора та підвищення ефективності виявлення небезпечних метеорологічних явищ за рахунок використання поляризаційних властивостей зондувальних і відбитих сигналів» (Звіт № держ. реєстрації 0110U007697, 2012, розд. 2.6-2.7, с. 99-109, розд. 4.2, с. 168-176), впроваджені у комплексному проекті «Розроблення першого вітчизняного наземного когерентного метеорологічного радіолокатора», код фундаментальної НДР 2201020, початок 01 липня 2010 р., закінчення 30 червня 2013 р.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка та впровадження непараметричних алгоритмів обробки локаційної інформації для підвищення точності і надійності виявлення сигналів в умовах дистанційного зондування атмосфери, зокрема для радіотехнічних систем, що використовують широкосмугові випадкові сигнали.

Для досягнення мети в роботі поставлені такі завдання:

- здійснити аналіз непараметричних алгоритмів виявлення сигналу шумового локатора відбитого від цілі з невідомою доплеровською швидкістю за допомогою їх чисельного моделювання, а також їх експериментальну перевірку;
- дослідити роздільну здатність випадкових шумових широкосмугових сигналів для вимірювання дальності і швидкості;
- побудувати моделі широкосмугових випадкових сигналів;
- здійснити синтез нових непараметричних алгоритмів виявлення сигналів для шумових локаторів;
- розробити методики непараметричного виявлення сигналів рухомих цілей за допомогою широкосмугового шумового локатора;
- провести дослідження копулярної радіолокаційної широкосмугової функції невизначеності для широкосмугового локатора для аналізу та виявлення локаційних сигналів;
- провести чисельне та експериментальне моделювання роботи непараметричних алгоритмів виявлення-вимірювання для сигналів пасивного локатора;
- розробити та виготовити експериментальні зразки та імітаційні моделі локаторів.

*Об'єктом дослідження* є процес обробки широкосмугових випадкових радіолокаційних сигналів.

*Предметом дослідження* є непараметричні методи і алгоритми виявлення і вимірювання сигналів та їх використання в задачах метеорології та управління повітряним рухом.

*Методи дослідження.* Методи дослідження базуються на теорії статистичних методів обробки інформації. Зокрема, використовувалися такі статистичні підходи до обробки сигналів:

- непараметричні алгоритми перевірки гіпотез і максимального правдоподібного оцінювання;
- теорія ядерних оцінок;
- алгоритми прийняття рішень за критерієм Неймана-Пірсона;
- теорія рангових критеріїв;
- методи статистичного моделювання.

Експериментальні дослідження синтезованих алгоритмів проводилися на реальних сигналах, отриманих за допомогою експериментального локатора, розробленого на кафедрі електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та інтернету речей Національного авіаційного університету.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

*Уперше:*

- синтезовано непараметричні алгоритми виявлення сигналів для шумових та пасивних МІМО локаторів;
- синтезовано непараметричний алгоритм виявлення сигналу шумового локатора, відбитого від цілі з невідомою доплерівською швидкістю.
- синтезовано параметричні алгоритми виявлення сигналів для пасивних та шумових МІМО локаторів та параметричний алгоритм виявлення сигналу шумового локатора, відбитого від цілі з невідомою доплерівською швидкістю.
- запропоновано новий варіант радіолокаційної функції невизначеності – копулярна функція невизначеності.
- запропоновано та доведено доцільність використання копулярної функції невизначеності для широкосмугового пасивного локатора

*Удосконалено:*

- концепція широкосмугової функції невизначеності, яка враховує умови апріорної невизначеності перешкод і використовує поняття копули для більш точного моделювання та аналізу сигнальних характеристик у радіолокаційних системах. Це удосконалення дозволяє значно підвищити ефективність і надійність виявлення сигналів у складних умовах роботи радіолокаційних систем, особливо в тих випадках, коли параметри перешкод невідомі або змінюються з часом.

*Отримав подальшого розвитку:*

- непараметричні алгоритми виявлення сигналів з апріорно невідомою щільністю розподілу. Ці алгоритми дозволяють ефективно працювати в умовах невизначеності, забезпечуючи більш точне і надійне виявлення

сигналів, навіть коли параметри розподілу завад невідомі або змінюються.

**Практичне значення одержаних результатів:** Отримані результати дисертаційної роботи надають можливість:

- покращити точність вимірювань метеорологічних параметрів, для одержання вертикального доплерівського зрізу атмосфери, що дозволяє вимірювати швидкість вітру і напрямок вітру в різних недоступних для звичайних метеорологічних методів точках атмосфери;

- підвищити ефективність та точність аналізу атмосферних даних, а також отримати детальнішу інформацію про склад та стан атмосфери;

- покращити ефективність систем дистанційного зондування; в тому числі використання широкосмугових випадкових сигналів дозволяє покращити просторову роздільну здатність та точність вимірювань у радіолокаційних системах. Це є особливо важливим для задач управління повітряним рухом, де точність і надійність є критичними;

- покращити обробку сигналів у складних умовах. Розроблені алгоритми можуть ефективно працювати в умовах апріорної невизначеності та впливу перешкод з невідомими характеристиками. Це важливо для військових застосувань та інших сфер, де система працює в умовах змінних та невідомих перешкод;

Розроблені алгоритми обробки сигналів та їх експериментальна перевірка може бути базисом:

- для продовження комплексу науково-дослідних робіт з метою удосконалення використання копулярної функції для широкосмугового пасивного локатора;

- для впровадження в навчальний процес під час підготовки фахівців кафедри електроніки, робототехніки, технологій моніторингу та інтернету речей;

Отримані у дисертаційній роботі результати досліджень мають важливе практичне значення і були використані у навчальному процесі НАУ:

- для вдосконалення існуючих та розробки нових систем радіолокації, що застосовуються у метеорології, аерокосмічних системах управління та інших областях (акт впровадження від 04.06.2024).

- для інтегрування нових методів у реальні системи дистанційного зондування та радіолокації, що підвищує їхню надійність та ефективність (акт впровадження від 23.05.2024).

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати отримано здобувачем самостійно й опубліковано в 17 наукових працях. З робіт, що опубліковані у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належать: роботи [5, 10] – виконані самостійно; в [1] – на основі запропонованого підходу розробила нові непараметричні алгоритми виявлення радіолокаційних сигналів та проаналізувала можливість

використання алгоритму швидкого перетворення Фур'є для забезпечення високої швидкості обробки сигналу в алгоритмах обробки сигналу радіолокаційних станцій; в [2] – розробка алгоритмів обробки сигналів та зображень для реалізації тестових сценаріїв а також проведення попередніх експериментів в лабораторії Zero-G включаючи операції зближення, стиковки та орбітальної взаємодії, вимірюванню координат; у роботі [3] – на основі запропонованого підходу обґрунтувала використання алгоритму швидкого перетворення Фур'є для забезпечення високої швидкості обробки сигналу в алгоритмах обробки сигналу радіолокаційних станцій; у роботі [4] – перевірила нові непараметричні оцінки функції щільності ймовірності та запропонувала алгоритм виявлення і розпізнавання, а також обробила звукові сигнали розмовної мови; в [6] – розробка нового непараметричного алгоритму на основі рангового тесту та перестановок часткових відношень правдоподібності. Отримала результати для подальшого застосування виявлення радіолокаційних сигналів у системах спостереження та дистанційного зондування, особливо в умовах попередньої невизначеності; у роботі [7] – обґрунтувала підхід для розробки алгоритмів виявлення радіолокаційних сигналів, які можна застосовувати коли апріорна інформація обмежена, а також сформулювала задачу для перевірки гіпотези про вид функції щільності; у роботі [8] – обґрунтувала переваги використання інформації численних бортових датчиків в системах автоматичного залежного спостереження (ADS-B); [9] – розробка нової статистики, яка є інваріантною до всіх можливих змін функції щільності ймовірності звукових або відбитих сигналів; у роботі [11] – запропонувала та обґрунтувала застосування непараметричної оцінки характеристичної функції, та на основі цих оцінок розробила непараметричні алгоритми класифікації звуків; у роботі [12] – обґрунтувала використання проекції щільності для випадкового процесу та розрахувала щільність ймовірності; у роботі [13] – розробка непараметричних алгоритмів класифікації звуків, а також запропонувала використання проекції випадкового процесу на множину випадкових величин, де щільність ймовірностей визначається як добуток двовимірних щільностей; в [14] – запропонувала підхід, що дозволяє представити оцінку багатовимірної щільності та характеристичних функцій як добуток двовимірної оцінки функції щільності ймовірності. Перевірила нові непараметричні оцінки функції щільності ймовірності; у роботі [15] – визначила та класифікувала алгоритми, які базуються на запропонованих оцінках, а також розрахувала ядерну оцінку двовимірної характеристичної функції і відповідної їй щільності ймовірності для двох моментів часу; в [16] – запропонувала підхід що дозволяє розробити рангові тести більш чутливими до змін статистики суми корисного сигналу та шуму; у роботі [17] – проаналізувала вимоги до системи автоматичного залежного спостереження на основі інформації про погоду, яка необхідна для безпечного польоту.

**Апробація результатів дисертаційної роботи** відбувалася на наукових та науково-практичних конференціях, у тому числі міжнародних, всеукраїнських та за міжнародною участю а саме: «Політ. Сучасні проблеми науки» (Київ, 2005; 2006; 2007); «Signal Processing Symposium (SPS)» (Jachranka, 2007; 2009); «International Radar Symposium (IRS 2009)» (Hamburg, 2009); «Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)» (Київ, 2008; 2011); «International Radar Symposium (IRS 2010)» (Vilnius, 2010); «Radar Conference (EuRAD 2010)» (Paris, 2010); «The fourth World Congress “Aviation in the XXI-st Century”. Safety in Aviation an Space Technologies» (Київ, 2010); «9th Innovative Research Workshop & Exhibition (INO 2010)» (Britinique, 2010); «Second International Conference «Statistical Methods of Signal and Data Processing» (Київ, 2013).

**Публікації.** Основні положення дисертації повністю відображені у 18 друкованих роботах. Основний зміст і результати дослідження викладено в одному друкованому науковому фаховому виданні (категорії "Б"), рекомендованому МОН України, та у двох статтях, опублікованих в іноземних журналах, зареєстрованих у наукометричній базі Scopus (одна з них з квантилем Q3). Також опубліковано 11 доповідей у збірках праць міжнародних науково-технічних конференцій, із яких 9 реферовані в наукометричній базі Scopus.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, 5 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 120 сторінок, з них: 73 рисунків за текстом; 6 таблиць за текстом; 48 найменувань використаних літературних джерел.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведено характеристики наукової новизни та практичного значення отриманих результатів і їх впровадження.

**Перший розділ** роботи спрямований на аналіз проблем та завдань досліджень. Спочатку розглядається дистанційне зондування атмосфери за допомогою локаційних засобів, яке полягає у використанні різноманітних технологій для спостереження і вимірювання властивостей атмосфери на відстані. Проаналізувавши всі технології і засоби які використовуються можна сказати що вони мають як свої переваги так і недоліки. Лідари та радары забезпечують високоточні вимірювання на великих відстанях і висотах, але можуть бути дорогими та складними в обслуговуванні. Содари менш дорогі, але мають обмежену висоту вимірювань. Ультразвукові анемометри забезпечують точні локальні вимірювання, але обмежені по висоті. Супутникові системи забезпечують глобальні дані, але з меншою роздільною

здатністю на локальному рівні.

Далі у цьому розділі розглядаються акустичні локатори та шумові локатори, їх особливості застосування в метеорології. Акустичні прилади для вимірювання швидкості повітряних потоків виготовляються та застосовуються у багатьох країнах світу і як наукові прилади для дослідження атмосфери, і для комерційного застосування. Недоліки, пов'язані з низькою роздільною здатністю і недостатньою точністю вимірювань. Шумові содари в широкій практиці майже невідомі. Шумовий локатор використовує пасивний принцип роботи, тобто він не випромінює звукові хвилі, а лише вловлює існуючі звуки або шуми, творювані об'єктами. Він аналізує акустичні сигнали, що виникають в середовищі, для виявлення і визначення місцезнаходження об'єктів.

Також у цьому розділі розглядається застосування ширококутового випадкового сигналу та його особливості. Проаналізувавши головні особливості ширококутового випадкового сигналу можна відзначити наступні переваги і недоліки таких сигналів. По-перше це висока роздільна здатність. Завдяки широкому спектральному діапазону, ці сигнали можуть забезпечувати високу просторову та часову роздільну здатність. Стійкість до перешкод. Випадковий характер сигналу робить його менш вразливим до вузькосмугових перешкод. Інформаційна ємність: ширококутові сигнали можуть передавати більше інформації за одиницю часу. Недоліками можна вважати високі вимоги до обчислювальних ресурсів. Обробка ширококутових сигналів вимагає високої обчислювальної потужності. Складність синтезу та аналізу. Складність у генеруванні та аналізі випадкових сигналів через їх непередбачуваність. Для порівняння розглядаються вузькосмугові сигнали та лінійно модульовані сигнали.

Отже, модель ширококутового випадкового сигналу є потужним інструментом для застосувань, де висока роздільна здатність і стійкість до перешкод є критичними. Незважаючи на складність обробки та вимоги до обчислювальних ресурсів, ці сигнали забезпечують високу точність і надійність.

Також у цьому розділі досліджується статистичний підхід до обробки сигналів, який базується на використанні статистичних методів для виявлення, оцінювання та класифікації сигналів у присутності шуму та інших перешкод. Проблемою статистичного підходу є синтез алгоритмів виявлення, оцінювання або класифікації в умовах апріорної невизначеності.

Основні етапи статистичної обробки сигналів включають:

1. Моделювання сигналу та перешкод. Сигнал та перешкоди моделюються як випадкові процеси з певними статистичними характеристиками. Часто передбачається, що перешкоди мають гауссовий розподіл, однак на практиці характеристики перешкод можуть бути складнішими.
2. Параметричні та непараметричні методи. Параметричні методи базуються на припущеннях про відомі розподіли сигналів і перешкод. Непараметричні

методи не вимагають точних знань про розподіли і можуть використовуватися в умовах невизначеності.

3. Виявлення сигналів. Процес виявлення включає визначення наявності сигналу на фоні шуму та перешкод. Використовуються різні критерії, такі як критерій Неймана-Пірсона, який максимізує ймовірність правильного виявлення при фіксованій ймовірності помилкової тривоги.
4. Оцінювання параметрів. Оцінювання параметрів сигналу, таких як амплітуда, частота, фаза, та інші, що є важливими для подальшої обробки та аналізу.
5. Класифікація сигналів. Процес класифікації включає віднесення сигналу до одного з можливих класів на основі його характеристик.

Проблема апріорної невизначеності полягає в тому, що у реальних умовах характеристики перешкод часто невідомі або змінюються в процесі спостереження. Це створює значні труднощі для традиційних методів обробки сигналів.

Отже, статистичний підхід до обробки сигналів є потужним інструментом для виявлення, оцінювання та класифікації сигналів у присутності шуму та перешкод. Однак, апріорна невизначеність і невідомі характеристики перешкод створюють значні труднощі для традиційних методів. Розробка нових непараметричних алгоритмів та використання сучасних методів статистичного аналізу дозволяють підвищити точність і надійність обробки сигналів в умовах невизначеності.

У другому розділі представлена розробка параметричних алгоритмів для виявлення сигналів у локаторах з широкосмуговими випадковими сигналами. Представлено моделі для виявлення таких сигналів і синтез параметричних алгоритмів. Також представлено дослідження параметричних алгоритмів виявлення та їх застосування в обробці широкосмугових сигналів.

Спочатку наводиться модель локаційної системи з одним передавачем і одним приймачем, яка використовує широкосмуговий випадковий сигнал. Врахувавши щільність ймовірності завади маємо спільну щільність ймовірності зондувального і відбитого сигналу та двомірну щільність ймовірності сумарного відбитого сигналу і зондувального сигналу. Припускається також, що зондувальний сигнал представляє собою широкосмуговий випадковий процес з нормальним розподілом. Спільна щільність ймовірності зондувального і відбитого сигналу (2.1) передбачає наявність коефіцієнта кореляції, який характеризує наявність цілі залежність між прийнятим і відбитим сигналом.

$$f_{x_{yo}}(x, y_o) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_{y_o}\sqrt{1-r_o^2}} \exp \left\{ \frac{-1}{2(1-r_o^2)} \times \right. \\ \left. \times \left[ \frac{(x_i - m_x)^2}{\sigma_x^2} - 2r_o \frac{(x_i - m_x)(y_{oi} - m_{y_o})}{\sigma_x\sigma_{y_o}} + \frac{(y_{oi} - m_{y_o})^2}{\sigma_{y_o}^2} \right] \right\} \quad (2.1)$$

На рисунку 2.1 показана щільність ймовірності при відсутності корисного сигналу та при його наявності.

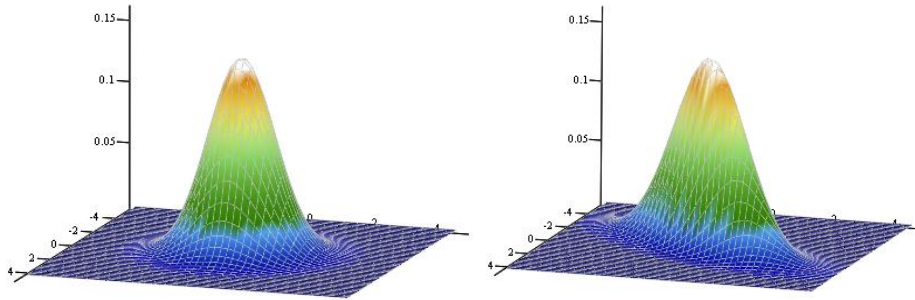


Рисунок 2.1. Взаємна щільність ймовірності зондувального і відбитого сигналу при відсутності корисної цілі та при її наявності

Задача виявлення корисного сигналу за критерієм Неймана-Пірсона призводить до обчислення відношення правдоподібності. Логарифм відношення правдоподібності порівнюється з порогом рішення  $C$ , при перевищенні якого приймається рішення про наявність корисного сигналу (цілі). Таким чином, процедура виявлення зводиться до обчислення оцінок других моментів розподілу і порівняння їх з порогом рішення. Відношення правдоподібності (2.2):

$$l(x, y) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{1+b(1-r_o^2)}} \exp \left\{ \frac{1}{2(1+b(1-r_o^2))} \times \left[ \frac{-br_o^2}{\sigma_x^2} (x_i - m_x)^2 + \frac{2r_o\sqrt{b}}{\sigma_x\sigma_n} (x_i - m_x)(y_i - m_y) + \frac{b(1-r_o^2)}{\sigma_n^2} (y_i - m_y)^2 \right] \right\}. \quad (2.2)$$

Розв'язувальне правило визначається як логарифм відношення правдоподібності, який порівнюється з порогом рішення  $C$ .

Далі було проведено аналіз алгоритму за допомогою статистичного моделювання методом Монте-Карло.

Також було розроблено параметричний алгоритм виявлення для локатора з широкосмуговим випадковим сигналом та з багатьма входами і багатьма виходами (МІМО). Модель сигналу для МІМО локатора приблизно така ж сама тільки з урахуванням того що у нас не один передавач а багато передавачів і приймачів і відповідно змінюються формули для щільностей ймовірностей. Тут використані багатомірні щільності.

Застосовуємо розроблений алгоритм виявлення в експериментальному локаторі для отримання зображення місцевості. На рисунку 2.2 сірим показано канал другого приймача і чорним канал першого приймача. Показана залежність від відстані до цілі для розв'язувального правила синтезованого для параметричного алгоритму виявлення в разі застосування для локатора з одним передавачем і двома приймачами.

Зображення місцевості отримане за допомогою параметричного алгоритму для двоканального випадку показане на рисунках. Вид зверху на розв'язувальну функцію і розв'язувальна в аксонометрії. На відстані 70м від локатора на другому рисунку (2.2) можна побачити відображення від будівлі.

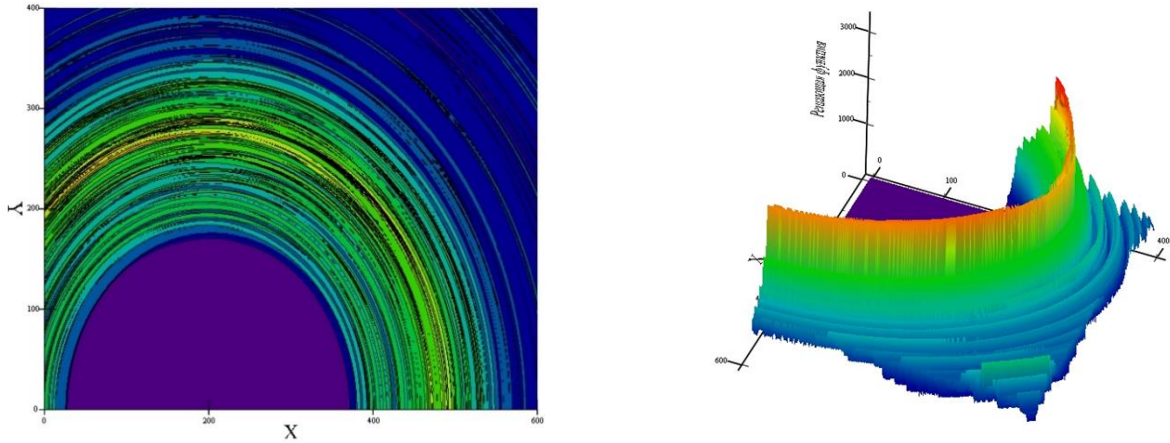


Рисунок 2.2. Синтезоване зображення місцевості для параметричного алгоритму виявлення.

**Третій розділ** дисертаційної роботи присвячено розробці непараметричних алгоритмів виявлення випадкових широкосмугових сигналів, які базуються на оцінках інтегральної функції розподілу ймовірності. Він охоплює формулювання проблеми, різні алгоритми виявлення та аналіз їх ефективності за допомогою використання експериментальних локаторів..

Основна проблема полягає в необхідності створення ефективних алгоритмів обробки сигналів в умовах апріорної невизначеності та впливу перешкод з невідомими характеристиками. Задача полягає у виявленні корисного сигналу на фоні перешкод. Для цього використовується непараметричний підхід, який не потребує точних знань про розподіл перешкод.

Розглядається модель сигналу, який зазнає впливу адитивної перешкоди. Перешкода моделюється випадковим процесом з невідомими характеристиками. Обчислюється щільність розподілу перетвореної статистики для двох гіпотез. Далі визначається розв'язувальне правило на основі обчисленої статистики. Обчислюється щільність розподілу для перетвореної статистики (3.1) у випадках відсутності та наявності сигналу.

$$y_{sj} = \hat{F}(x_{sj}) = \frac{1}{2\pi N} \sum_{k=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Theta_w(v_j)}{-iv_j} \cdot e^{-iv_j(x_{sj}-x_k)} dv_j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Theta_w(v_j)}{-iv_j} \cdot e^{-iv_j(x_{sj}-x_k)} dv_j \quad (3.1)$$

Розв'язувальне правило (3.2) для прийняття рішення про наявність або відсутність сигналу.

$$l(\mathbf{y}_s) = \prod_{j=1}^n \hat{f}_y(y_{sj}) = \prod_{j=1}^n \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_{w_y}(v_j) \cdot e^{-iv_j(y_{sj}-y_k)} dv_j \quad (3.2)$$

Розроблено також алгоритм виявлення сигналу, що базується на ядерних оцінках характеристичної функції. Описано методику синтезу цього алгоритму. Описуються методи ядерних оцінок (3.3) для обчислення характеристичної функції випадкових процесів. Це дозволяє отримати більш

точні оцінки розподілу ймовірностей для обробки сигналів.

$$\hat{\Theta}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(x) \cdot e^{ivx} dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w(x - x_k) \cdot e^{ivx} dx = \Theta_w(v) \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{ivx_k} = \Theta_w(v) \cdot \Theta^*(v) \quad (3.3)$$

Далі проводиться аналіз запропонованого алгоритму виявлення та його статистичне моделювання, оцінюється його ефективність та робастність у різних умовах. Статистичне моделювання та аналіз алгоритму проводиться для оцінки його ефективності та надійності в різних умовах.

Ще один запропонований підхід заснований на використанні непараметричних оцінок інтегральної функції розподілу, щільності ймовірності й характеристичної функції, а також застосування цих оцінок для перетворення вхідної інформації в статистику, що є інваріантною до заданої групи перетворень.

У даному розділі також розглянуті алгоритми обробки і виявлення локаційних сигналів, які базуються на використанні багатомірних щільностей імовірності зондувальних і прийнятих приймачем відбитих від передбачуваних цілей сигналів. Запропонований підхід дозволяє не тільки здійснити оптимальне виявлення сигналів, враховуючи взаємозв'язок переданих та прийнятих сигналів, але і виконати стиснення прийнятих сигналів у часі, використовуючи інформацію про часову структуру сигналу, тобто про його багатомірну щільність розподілу. Використання багатомірного нелінійного перетворення за допомогою оцінки багатомірної інтегральної функції розподілу, дозволяє отримати інваріантні до зміни багатомірної щільності ймовірності сигналів і перешкод алгоритми виявлення та обробки сигналів.

Природнім узагальненням поняття кореляційної функції у випадку руху цілі, приймачів, передавачів є радіолокаційна функція невизначеності. Враховуючи широкосмугову природу сигналу, а також його випадковий характер в нашому випадку для оцінки взаємного зв'язку між зондувальними і відбитими сигналами необхідно використовувати широкосмугову функцію невизначеності для випадкових процесів.

Отримана в результаті, широкосмугова функція невизначеності для МІМО локатора (3.4):

$$\chi(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\alpha}) = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N (x_{ij}(t) - m_{u_{ij}})(y_{ik}(\alpha_{ik}(t - \tau_{ik})) - m_{v_{ik}}) \quad (3.4)$$

Цей вираз дуже схожий на широкосмугову функцію невизначеності для детермінованих сигналів. Порівнюючи його з порогом рішення, можна перевірити гіпотезу про наявність цілі, що рухається з заданою радіальною швидкістю. Узагальнену функцію невизначеності для МІМО можна визначити як очікуване значення функції правдоподібності для отриманих даних та за допомогою евристичних спрощень отримати вираз, який можна розглядати як визначення копулярної функції невизначеності для МІМО.

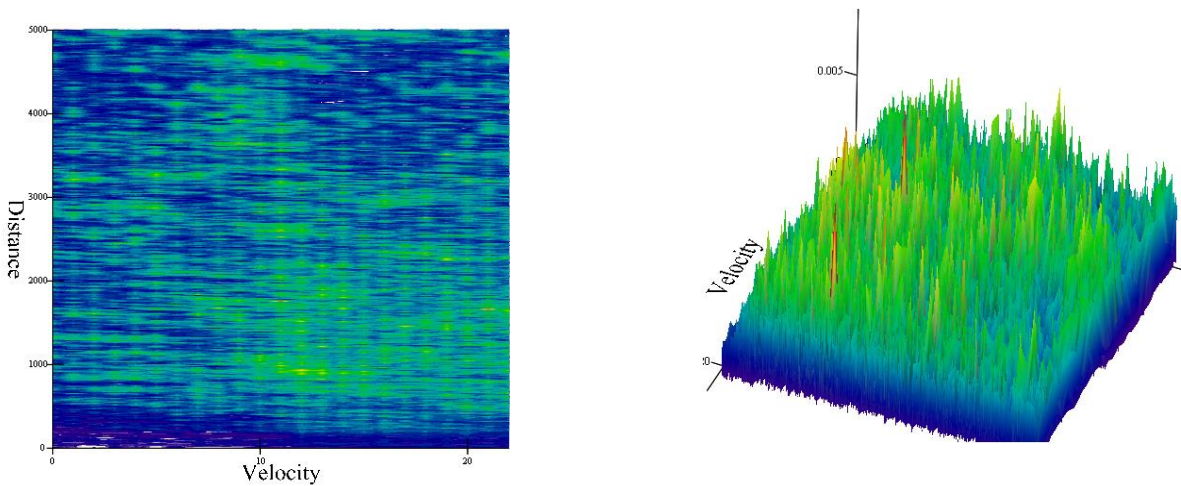


Рисунок 3.1. Взаємна функція невизначеності. Відбиття від атмосфери. Дальність і швидкість в умовних одиницях (комірки масиву)

На рисунках 3.1 показані результати обробки акустичного сигналу, відбитого від вільного повітряного простору. На графіку можна розібрати профіль вітру. Швидкість вітру на різних відстанях змінюється від 0 до 5 м/сек. Відбитки з нульовою швидкістю обумовлені бічними пелюстками ДС (відбиття від землі). Нульова швидкість відповідає цифрі 11 (номер комірки масиву). Таким чином, експериментальні вимірювання підтверджують можливість отримати високу роздільну здатність при застосуванні шумового сигналу для содара при побудові профілю вітру.

Результати експериментальних перевірок розроблених непараметричних алгоритмів під час опадів.

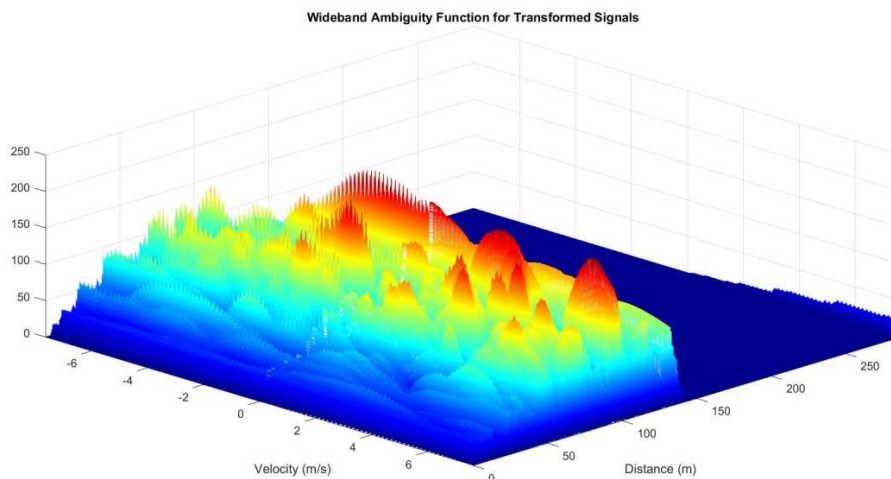


Рисунок 3.2 Взаємна функція невизначеності. Відбиття від опадів (дощ). Дальність і швидкість в умовних одиницях (комірки масиву)

Отже, розроблені непараметричні алгоритми дозволяють ефективно виявляти випадкові широкосмугові сигнали в умовах невідомих характеристик перешкод. Використання ядерних оцінок і концепції копули

забезпечує високу точність і надійність обробки сигналів у складних умовах. Це сприяє підвищенню ефективності і надійності сучасних радіолокаційних систем, особливо у системах МІМО.

Також, в даному розділі були розглянуті різні аспекти алгоритмів обробки сигналів для локатора з випадковим сигналом. На думку автора локатори з випадковим сигналом є найбільш цікавим типом локаторів, так як перш за все вони поєднують властивості ширококутових локаторів з деякими характеристиками, які базуються на використанні випадкової природи зондувального сигналу. Ці нові властивості дозволяють спростити алгоритми виявлення сигналу, та одночасно вимірювати відстань, азимут і швидкість до цілі з високим рівнем розділення і високою точністю використовуючи шумовий зондувальний сигнал. Непараметричні алгоритми мають чудові властивості інваріантності до груп шумових та сигнальних перетворень та стабільний рівень ймовірності хибної тривоги. Важливо пам'ятати що всі хороші властивості зберігаються тільки у випадку використання незалежних вибірок. Завдяки своїй природі шумовий сигнал може формувати незалежні вибірки. Розглянуто декілька альтернативних підходів до побудови алгоритмів виявлення сигналу. Ці підходи приводять до процедур виявлення із приблизно ідентичною ефективністю. Показано взаємозв'язок параметричних і непараметричних підходів. Використання ядерних оцінок характеристичної функції було запропоновано, розроблене й перевірено для задач виявлення різних типів радіолокаційних сигналів. Нові непараметричні алгоритми виявлення радіолокаційних сигналів були розроблені на основі запропонованої методики.

Аналіз довів високу ефективність запропонованих алгоритмів виявлення. Новий підхід і розроблений алгоритм можуть використатися в різних типах радіолокаційних систем.

У **четвертому розділі** покращення та узагальнення ширококутової функції невизначеності для локаційних сигналів. Зондувальні сигнали та відбиті локаційні сигнали мають різні функції щільності ймовірності, що не береться до уваги в класичному визначенні звичайної функції невизначеності. Узагальнення функції невизначеності, яке пропонується в даній роботі, базується на понятті Копули і не залежить від функції щільності ймовірності. Застосування запропонованого підходу дає змогу не бути залежними від щільності ймовірності сигналу, а використовувати також непараметричний підхід з постійною ймовірністю хибних тривог.

За допомогою методів ядерних оцінок було обчислено копулярну функцію для широкого класу сигналів та перешкод. Це дало можливість врахування складні залежності та покращити точність оцінок параметрів сигналів. Ядерні оцінки інтегральних функцій розподілу застосовувались як функції перетворення. Отже, оцінка двомірної копулярної функції щільності  $c(x_T, y_T)$  була представлена як сума ядер  $K_i(x_T, y_T)$ .

$$\hat{c}(x_T, y_T) = \sum_{i=1}^n K_i(x_T, y_T) \quad (4.1)$$

де  $n$  - розмір вибірки.

Копулярна ядерна оцінка щільності обчислена для сигналів акустичного шумового локатора і представлена на рисунку 4.1.

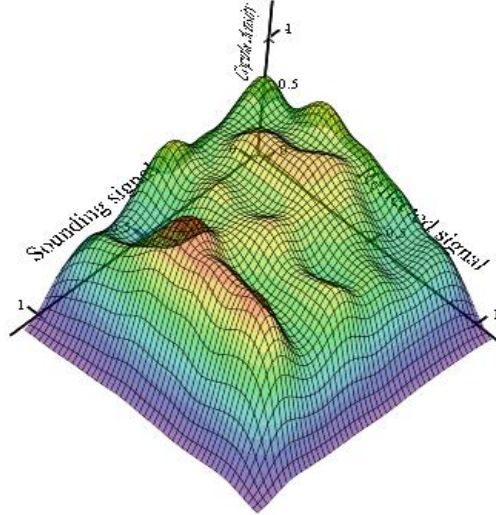


Рисунок 4.1. Ядерна оцінка двомірної копулярної щільності для акустичного локаційного сигналу.

Копулярна функція невизначеності в свою чергу дозволила описати взаємозв'язок між різними компонентами широкосмугових сигналів і забезпечила більш точне виявлення і оцінку параметрів у присутності перешкод. Використовуючи копулярну функцію щільності, було знайдено її копулярну функцію невизначеності, як другий центральний момент щільності розподілу копули (4.2):

$$\chi(\tau, \alpha) = \sqrt{\alpha} E \{ (F_x(X(t)) - m_x)(F_y(Y^*(\alpha(t - \tau))) - m_y) \} \quad (4.2)$$

За допомогою розробленого і сконструйованого шумового акустичного локатора, копулярна функція невизначеності була виміряна для реальних сигналів. Для цих сигналів було знайдено функцію невизначеності і копулярну функцію невизначеності.

Переріз функції невизначеності в часовій (відстань) області при нульовій швидкості цілі являється кореляційною функцією. Такі ж обчислення були зроблені і для перерізу копулярної функції невизначеності (рисунок 4.3).

Форма запропонованого варіанту функції невизначеності не залежить від функції щільності ймовірності зондувального та відбитих сигналів. Тому алгоритми виявлення сигналу, які базуються на цьому понятті не залежать від форми функції розподілу. Вони також мають постійний рівень ймовірності хибної тривоги. Виявлення можна провести за допомогою простого порівняння з порогом копулярної функції невизначеності.

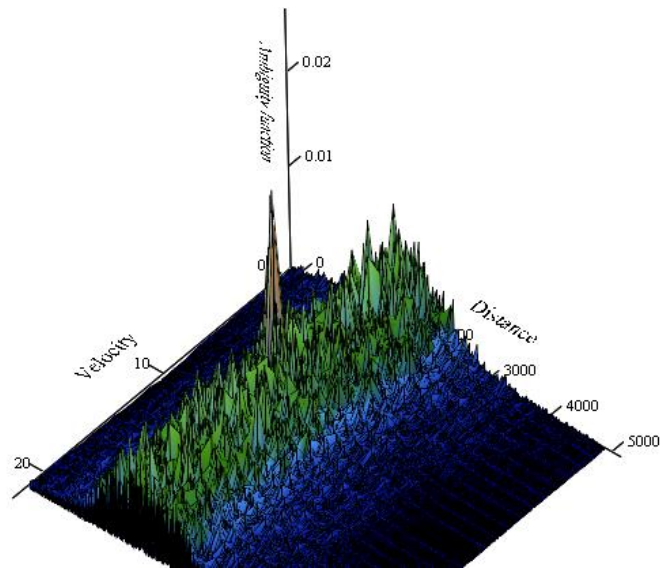


Рисунок 4.2. Оцінка копулярної функції взаємної невизначеності (з додатковим функціональним перетворенням) для акустичного локатора.

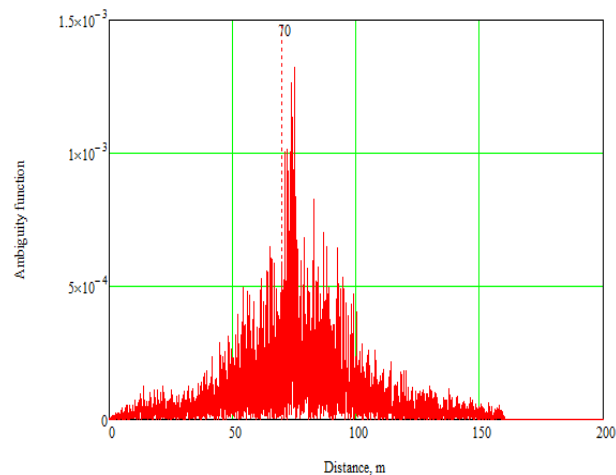


Рисунок 4.3. Оцінка перерізу копулярної функції взаємної невизначеності (взаємна кореляційна функція) для акустичного локатора

В цьому розділі запропоновано узагальнення функції невизначеності для локаційних сигналів. На відміну від класичного представлення функції невизначеності, запропонований варіант функції не залежить від функції щільності ймовірності сигналу. Запропонований підхід може бути використаний для опису властивостей випадкового зондувального сигналу та для непараметричного сигналу. Застосування такого підходу корисно для обробки сигналу в шумовому локаторі та у випадку пасивного локатора з опорним сигналом різних джерел розроблених для різних цілей. Запропоновані методи використання копулярної функції невизначеності і ядерних оцінок забезпечують більш точне і надійне виявлення та оцінку параметрів широкопasmових сигналів в умовах невизначеності. Це дозволяє покращити ефективність сучасних радіолокаційних систем і систем дистанційного зондування.

У п'ятому розділі описується розробка та функціонування експериментального звукового локатора. Основною метою звукового локатора є вимірювання швидкості вітру та виявлення дощу. Для проведення експериментів і вимірювань були виготовлені два макети звукового локатора. У першому зразку були застосовані дві параболічні антени для передавача і приймача. Застосування параболічних антен дозволило збільшити дальність. Але відсутність механічного сканування променем не дозволяла отримувати двомірну картину відображуваного простору.

Другий зразок звукового локатора був виготовлений за принципом МІМО: один передавач два приймача, що дозволило побудувати двомірну картину відображуваного простору. Другий варіант локатора також використовувався і в пасивному режимі, що дозволило визначати координати «звукових» цілей.



Рисунок 5.1. Перша модель експериментального звукового локатора

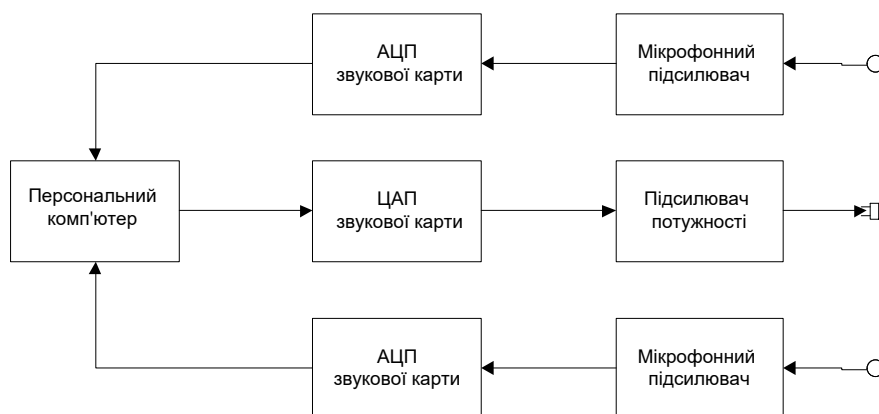


Рисунок 5.2. Макет експериментального локатора з багатьма входами і одним виходом (МІМО).

За допомогою виготовленого обладнання було перевірено і підтверджено ефективність всіх запропонованих в роботі алгоритмів. Крім того, самі по собі запропоновані конструкції локатора можна застосовувати для метеорологічних вимірювань, а також для вимірювань інтенсивності звуку і координат повітряного судна для цілей екології та захисту навколишнього середовища.

## ВИСНОВКИ

У дисертації були розглянуті та вирішені наступні наукові задачі. Перш за все, досліджувалася роздільна здатність випадкових шумових ширококутових сигналів для вимірювання дальності та швидкості. Для цього були побудовані відповідні моделі ширококутових випадкових сигналів, що дозволило детально проаналізувати їх поведінку в умовах реального використання. Моделювання показало, що ширококутові сигнали мають переваги у точності вимірювань порівняно з традиційними вузькосмуговими сигналами.

Наступним кроком став синтез нових непараметричних алгоритмів виявлення сигналів для шумових локаторів. Було розроблено декілька варіантів алгоритмів, заснованих на різних методах обробки сигналів, таких як методи ядерних оцінок та алгоритми рангових критеріїв. Ці алгоритми забезпечують високу точність та надійність виявлення сигналів навіть у складних умовах зашумленості.

Одним із важливих аспектів роботи стала розробка методики непараметричного виявлення сигналів рухомих цілей за допомогою ширококутового шумового локатора. Це дозволило значно підвищити ефективність роботи радіотехнічних систем у динамічних умовах. Алгоритми були протестовані за допомогою чисельного моделювання, що показало їх високу ефективність.

Аналіз непараметричних алгоритмів виявлення сигналу шумового локатора, відбитого від цілі з невідомою доплерівською швидкістю, проводився за допомогою чисельного моделювання. Моделювання включало оцінку параметрів сигналу та його обробку за допомогою розроблених алгоритмів. Крім того, були проведені експериментальні дослідження для перевірки ефективності запропонованих алгоритмів. Експерименти проводилися на реальних сигналах, отриманих за допомогою експериментального локатора, розробленого на кафедрі електроніки Національного авіаційного університету.

Особливу увагу було приділено дослідженню копулярної радіолокаційної ширококутової функції невизначеності, яка використовується для аналізу та виявлення локаційних сигналів. Копулярний підхід дозволив врахувати взаємозалежності між різними параметрами сигналу, що значно підвищило точність виявлення. Було проведено чисельне та експериментальне моделювання роботи непараметричних алгоритмів виявлення-вимірювання для сигналів пасивного локатора, що підтвердило їх ефективність на практиці.

У процесі роботи були розроблені та виготовлені експериментальні макети локаторів, що дозволило впровадити отримані результати у практику. Експериментальні дослідження показали, що розроблені алгоритми забезпечують високу точність та надійність виявлення сигналів у різних умовах експлуатації.

У процесі виконання дисертаційної роботи отримані такі основні результати:

1. Проаналізовано сучасний стан та перспективи розвитку алгоритмів обробки локаційної інформації в задачах дистанційного зондування атмосфери.

2. Проведений аналіз існуючих методів дистанційного зондування атмосфери з використанням радарів, лідарів, содарів та супутникові системи з акцентом на використання широкосмугових випадкових сигналів. В дисертації досліджуються параметричні та непараметричні алгоритми виявлення сигналів, їх моделі та особливості.

3. Синтезовано непараметричні алгоритми виявлення сигналів для пасивних шумових МІМО локаторів.

4. Синтезовано непараметричний алгоритм виявлення сигналу шумового локатора, відбитого від цілі з невідомою доплерівською швидкістю.

5. Синтезовано параметричні алгоритми виявлення сигналів для пасивних шумових МІМО локаторів та параметричний алгоритм виявлення сигналу шумового локатора, відбитого від цілі з невідомою доплерівською швидкістю

6. Запропоновано новий варіант радіолокаційної функції невизначеності – копулярна функція невизначеності.

7. Запропоновано та доведено доцільність використання копулярної функції невизначеності для широкосмугового пасивного локатора

8. Мета дисертаційної роботи, що полягає в розробці та впровадженні непараметричних алгоритмів обробки локаційної інформації для підвищення точності і надійності виявлення сигналів в умовах дистанційного зондування атмосфери, зокрема для радіотехнічних систем, що використовують широкосмугові випадкові сигнали досягнута та всі поставлені задачі вирішені.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Bokal Zh., Sinitsyn R., Kernel estimate of the spoken language sound multivariate probability density function. *Photonics Applications in Astronomy Communications Industry and High-Energy Physics Experiments 2008*. Poland: Proceedings of SPIE Wilga 2007. Vol. 6937. article id. 693739, P 1-7. 2008. DOI: 10.1117/12.784827. (*Scopus*); (особистий внесок автора: на основі запропонованого підходу розробила нові непараметричні алгоритми виявлення радіолокаційних сигналів та проаналізувала можливість використання алгоритму швидкого перетворення Фур'є для забезпечення високої швидкості обробки сигналу в алгоритмах обробки сигналу радіолокаційних станцій)

2. Bokal Zh., Olivares-Mendez M., Makhdoomi M., Yalçın B., Zero-G Lab: A multi-purpose facility for emulating space operations. *2023 Journal of Space Safety Engineering*. 2023. P. 509–521 (*Scopus*). Q3 *Особистий внесок автора: розробка алгоритмів обробки сигналів та зображень для реалізації тестових сценаріїв а також проведення попередніх експериментів в лабораторії Zero-G включаючи операції зближення, стиковки та орбітальної взаємодії, вимірюванню координат.*

3. Bokal, Z. M., and R. B. Sinitsyn. "Kernel estimate of the spoken language sound multivariate probability density function" *Proceedings-SPIE the International Society for Optical Engineering*. Vol. 6937. No. 2. 6937-117. International Society for Optical Engineering; 1999, 2008. *(особистий внесок автора: на основі запропонованого підходу обґрунтувала використання алгоритму швидкого перетворення Фур'є для забезпечення високої швидкості обробки сигналу в алгоритмах обробки сигналу радіолокаційних станцій)*

4. Бокал Ж.М., Сініцин Р.Б., Nonparametric method for estimating the spoken language sound multivariate probability density function. *2008 Microwaves Radar and Remote Sensing Symposium. Proceedings of MRRS2008*, 22-24 September 2008. Київ: НАУ, 2008. P. 170-171. (*Scopus*); *(особистий внесок автора: перевірила нові непараметричні оцінки функції щільності ймовірності та запропонувала алгоритм виявлення і розпізнавання, а також обробила звукові сигнали розмовної мови)*

5. Bokal Zh., Random signal sodar for meteorology. *Signal Processing Symposium 2009. Proceedings of SPS2009*, 28-30 May 2009. Jachranka: 2009. P. 18-23. (*Scopus*); *(особистий внесок автора: розробила експериментальний содар та провела експериментальні вимірювання відбиття сигналу від об'єкту)*

6. Bokal Zh., Sinitsyn R., Rank signal detection algorithms based on permutations of partial likelihood ratios. *International Radar Symposium 2010. Proceedings of IRS2010*, 16-18 June 2010. Vilnius: 2010. P. 1-4. (*Scopus*); *(особистий внесок автора: розробка нового непараметричного алгоритму на основі рангового тесту та перестановок часткових відношень правдоподібності. Отримала результати для подальшого застосування виявлення радіолокаційних сигналів у системах спостереження та дистанційного зондування, особливо в умовах попередньої невизначеності)*

7. Bokal Zh., Sinitsyn R., Nonparametric signal detection algorithm using permutation statistics of signal partial likelihood ratios. *European Microwave Week*

2010: *The 7th European Radar Conference. Proceedings of EuRAD*, 30.09 – 01.10.2010. Paris: 2010. P. 260-263. (Scopus); (особистий внесок автора: обґрунтувала підхід для розробки алгоритмів виявлення радіолокаційних сигналів, які можна застосовувати коли апіорна інформація обмежена, а також сформулювала задачу для перевірки гіпотези про вид функції щільності)

8. Bokal Zh., Yanovsky F., Weather data obtaining and dissemination using ADS-B. *The 9th EUROCONTROL Innovative Research Workshop. Session 2: CNS. Proceedings of INO Workshop*, 7-9 December 2010. Paris: 2010. paper №167. (Scopus); (особистий внесок автора: обґрунтувала переваги використання інформації численних бортових датчиків в системах автоматичного залежного спостереження (ADS-B))

9. Bokal Zh., Sinitsyn R., Yanovsky F., Copula ambiguity function for wideband random radar signals. *2011 Microwaves Radar and Remote Sensing Symposium. Proceedings of MRRS2011*, 25-27 August 2011. Київ: НАУ, 2011. С. 313-316. (Scopus); (особистий внесок автора: розробка нової статистики, яка є інваріантною до всіх можливих змін функції щільності ймовірності звукових або відбитих сигналів).

10. Bokal Zh., Advanced copula-based methods for nonparametric detection and characterisation of wideband radar signals. *2024 Electronics and control systems proceeding №3*. September 2024. Київ: НАУ, 2024. С.59-66.

11. Бокал Ж.М., Сініцин Р.Б., Nonparametric method for estimating the spoken language sound multivariate probability density function. *Вісник Національного авіаційного університету. Вісник НАУ*. 2006. №3(29). С. 17–20. (особистий внесок автора: запропонувала та обґрунтувала застосування непараметричної оцінки характеристичної функції, та на основі цих оцінок розробила непараметричні алгоритми класифікації звуків)

#### ПУБЛІКАЦІЇ, ЯКІ ДОДАТКОВО ВІДОБРАЖАЮТЬ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

12. Бокал Ж.М., Ткачук А.В., Kernel estimates of characteristic function for sound recognition. *Політ. Сучасні проблеми науки: V міжнародна науково-практична конференція студентів та молодих вчених*, м. Київ, 8-10 квітня 2005. Київ: НАУ, 2005. С. 703. (особистий внесок автора: обґрунтувала використання проєкції щільності для випадкового процесу та розрахувала щільність ймовірності)

13. Бокал Ж.М., Сініцин Р.Б., Nonparametric method for estimating the spoken language sound multivariate probability density function. *Політ. Сучасні*

*проблеми науки: VI міжнародна науково-практична конференція студентів та молодих вчених, м. Київ, 8-10 квітня 2006. Київ: НАУ, 2006. С. 63. (особистий внесок автора: розробка непараметричних алгоритмів класифікації звуків, а також запропонувала використання проекції випадкового процесу на множину випадкових величин, де щільність ймовірностей визначається як добуток двовимірних щільностей)*

14. Bokal Zh., Sinitsyn R., Kernel estimate of the spoken language sound multivariate probability density function. *Signal Processing Symposium 2007 (SPS 2007)*, 24-26 May 2007, Jachranka, Poland. *Proceedings of SPS2007*. P.28-33. *(особистий внесок автора: запропонувала підхід, що дозволяє представити оцінку багатовимірної щільності та характеристичних функцій як добуток двовимірної оцінки функції щільності ймовірності. Перевірила нові непараметричні оцінки функції щільності ймовірності)*

15. Бокал Ж.М., Сініцин Р.Б., Projective estimates of the probability density function and characteristic function for speech signals. *Наукоємні технології: Матеріали науково-технічної конференції, 15-17 листопада 2007. Київ: НАУ, 2007. С. 11. (особистий внесок автора: визначила та класифікувала алгоритми, які базуються на запропонованих оцінках, а також розрахувала ядерну оцінку двовимірної характеристичної функції і відповідної їй щільності ймовірності для двох моментів часу)*

16. Бокал Ж.М., Сініцин Р.Б., Locally optimal rank signal detection algorithms for radar. *4th World Congress 'Aviation in the XXI-st Century' – 'Aviation safety and space technologies': Radar Methods and Systems Workshop. Proceedings of RMSW*, 21-23 September 2010. Київ: НАУ, 2010. Vol. 2. С. 22.36-22.39. *(особистий внесок автора: запропонувала підхід що дозволяє розробити рангові тести більш чутливими до змін статистики суми корисного сигналу та шуму)*

17. Bokal Zh., Yanovsky F., Weather data obtaining and dissemination using ADS-B. *The 9th EUROCONTROL Innovative Research Workshop. Session 2: CNS. Book of abstracts of INO Workshop*, 7-9 December 2010. Paris: 2010. – P. 9. *(особистий внесок автора: проаналізувала вимоги до системи автоматичного залежного спостереження на основі інформації про погоду, яка необхідна для безпечного польоту)*

## АНОТАЦІЯ

**Бокал Ж.М. Непараметричні алгоритми обробки локаційної інформації в задачах дистанційного зондування атмосфери. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи. – Національний авіаційний університет МОН України, Київ, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розробці та впровадженню непараметричних алгоритмів обробки локаційної інформації в задачах дистанційного зондування атмосфери, зокрема для радіотехнічних систем, що використовують широкосмугові випадкові сигнали. Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності та надійності вимірювань метеорологічних параметрів, важливих для забезпечення безпеки польотів, прогнозування погоди, екологічного моніторингу та інших галузей.

Робота включає аналіз існуючих методів дистанційного зондування атмосфери з акцентом на використання широкосмугових випадкових сигналів. В дисертації досліджуються параметричні та непараметричні алгоритми виявлення сигналів, їх моделі та особливості. Запропоновано нові методи обробки сигналів, що базуються на ядерних оцінках інтегральної функції розподілу ймовірності та характеристичної функції, а також на концепції копул для аналізу багатовимірних розподілів.

Основною метою роботи є розробка алгоритмів, що дозволяють підвищити ефективність і точність виявлення та вимірювання сигналів в умовах апріорної невизначеності та перешкод з невідомими характеристиками. Використання цих алгоритмів дозволяє отримувати більш точні дані про склад та стан атмосфери, що є критично важливим для різних застосувань, від метеорології до управління повітряним рухом.

Експериментальна частина роботи включає розробку та випробування експериментальних зразків локаторів, що використовують широкосмугові випадкові сигнали, та їх апробацію на реальних даних. Результати досліджень показали високу ефективність запропонованих методів для вимірювання швидкості вітру, виявлення дощу та інших атмосферних явищ.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості покращення точності вимірювань метеорологічних параметрів, підвищення ефективності систем дистанційного зондування, а також у розвитку методів обробки сигналів для складних умов. Розроблені алгоритми можуть знайти застосування у військових системах, системах прогнозування погоди та

екологічного моніторингу, забезпечуючи високу точність і надійність обробки даних.

Дисертаційна робота складається з п'яти розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Основні результати досліджень опубліковано у наукових журналах та представлено на міжнародних конференціях.

**Ключові слова:** широкосмугові випадкові сигнали, шумовий локатор, копула, функція невизначеності, ядерні оцінки, характеристична функція, непараметричні алгоритми.

## ABSTRACT

**Bokal Zh.M. Nonparametric algorithms of radar signal processing in remote sensing of atmosphere.**

Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences by specialty 05.12.17. – radio engineering and television systems. - National Aviation University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2024.

This dissertation is dedicated to the development and implementation of nonparametric algorithms for processing locational information in atmospheric remote sensing tasks, particularly for radar systems using wideband random signals. The relevance of the study is driven by the need to improve the accuracy and reliability of meteorological measurements, which are crucial for flight safety, weather forecasting, environmental monitoring, and other fields.

The work includes an analysis of existing methods of atmospheric remote sensing, such as radars, lidars, sodars, and satellite systems, with a focus on the use of wideband random signals. The dissertation investigates parametric and nonparametric signal detection algorithms, their models, and features. New signal processing methods are proposed based on kernel estimates of the integral probability distribution function and characteristic function, as well as on the concept of copulas for analyzing multivariate distributions.

The main goal of the work is to develop algorithms that enhance the efficiency and accuracy of signal detection and measurement under conditions of a priori uncertainty and interference with unknown characteristics. The use of these algorithms allows for more precise data on the composition and state of the atmosphere, which is critically important for various applications, from meteorology to air traffic management.

The experimental part of the work includes the development and testing of

experimental locator prototypes using wideband random signals, and their validation on real data. The research results demonstrated the high efficiency of the proposed methods for measuring wind speed, detecting rain, and other atmospheric phenomena.

The practical significance of the obtained results lies in the potential to improve the accuracy of meteorological measurements, enhance the efficiency of remote sensing systems, and advance signal processing methods for complex conditions. The developed algorithms can be applied in military systems, weather forecasting systems, and environmental monitoring, providing high precision and reliability of data processing.

The dissertation consists of five chapters, conclusions, appendices, and a list of references. The main research results have been published in scientific journals and presented at international conferences.

**Keywords:** wideband random signals, noise radar, copula, ambiguity function, kernel estimations, characteristic function, nonparametric algorithms.