

Національна академія наук України  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

**ПОПОВ ІГОР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК. 621.371 + 537.86

**МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИПРОМІНЮВАНЬ  
ІСНУЮЧИХ РАДІОСИСТЕМ НАЗЕМНОГО ТА КОСМІЧНОГО  
БАЗУВАННЯ**

01.04.03 - радіофізика

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків - 2021

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
Національної академії наук України

**Науковий керівник:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Луценко Владислав Іванович**,  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
НАН України, м. Харків,  
завідувач лабораторії моніторингу та спектроскопії  
середовищ відділу радіофізичної інтроскопії

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Лазоренко Олег Валерійович**  
Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна МОН України,  
завідувач кафедри загальної фізики

доктор технічних наук, старший науковий  
співробітник  
**Павліков Володимир Володимирович**  
Національний аерокосмічний університет  
ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний  
інститут», проректор по науковій роботі

Захист відбудеться " 27 " квітня 2021 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН  
України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Ак. Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України за адресою: вул. Ак. Проскури,  
12, м. Харків, 61085.

Автореферат розісланий " 22 " березня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Для діагностики довкілля використовуються спеціалізовані активні радіолокаційні комплекси, які споживають значну кількість електроенергії та вимагають ремонту та обслуговування висококваліфікованим персоналом. Дальність дії таких систем 200-300 км. Для радіолокаційного покриття великих територій потрібно розміщення відповідної кількості радіолокаційних комплексів, що економічно витратно. Використання радіочастот вимагає спеціальних дозволів, а перенасичення радіопередавальних засобів значної потужності сприяє електромагнітному «забрудненню» довкілля.

Сьогодні перспективними представляються підходи, пов'язані з використанням для дистанційного зондування зовнішнього підсвічування сигналами наявних систем наземного та космічного базування, в тому числі не призначених для цілей моніторингу, що дозволяє мінімізувати витрати на дослідження та отримати систему, яка не потребує використання додаткових джерел випромінювання, проводити безперервний моніторинг довкілля на великих територіях без застосування дорогих і енергомістких радіопередавальних пристроїв.

Представляє також інтерес дослідження взаємозв'язку між змінами параметрів сигналів, що випромінюються передавачами КХ, УКХ станцій та супутниковими системами глобальної навігації (ГНСС) з процесами, що відбуваються в іоносфері та тропосфері Землі. Вивчення поведінки сигналів ГНСС дозволяє вирішувати відразу два завдання: створення методів діагностики атмосфери Землі, тобто розв'язання оберненої задачі, та поліпшення характеристик точності навігаційного обладнання, основним джерелом похибок для яких і є процеси в атмосфері планети. Крім аналізу прямого сигналу, який підпадає під вплив довкілля, цікавими є також питання, пов'язані з вивченням сигналів, відбитих від підстильної поверхні та розсіяних повітряними об'єктами, що знаходяться на шляху поширення сигналів.

Використання випромінювання КХ радіомовних станцій для діагностики внаслідок особливостей наддалекого поширення радіохвиль цього діапазону дозволяє здійснювати виявлення повітряних об'єктів іоносферною хвилею на відстані в кілька тисяч кілометрів від передавальної станції. Довжини хвиль мовних станцій КХ діапазону (10...100 м) співмірні з геометричними розмірами літаків, і розсіювання від них відбувається в резонансній області, на відміну від НВЧ діапазону, де ЕПР літаків не перевищує  $10 \text{ м}^2$  та досягає сотень - тисяч квадратних метрів, що полегшує умови їх виявлення. В цьому діапазоні хвиль також на ЕПР не позначається форма об'єкта та наявність покриттів, що поглинають, тобто підходи технології "Стелс", що дозволяють знизити на кілька порядків ЕПР літаків у НВЧ діапазоні, в діапазоні декаметрових хвиль виявляються неефективними.

Таким чином, актуальність теми дисертації зумовлена необхідністю вирішення завдань моніторингу та визначення параметрів довкілля з використанням випромінювань наявних систем наземного та космічного базування.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

У дисертації наведено узагальнені результати досліджень, отримані автором в період 2013 -2020 рр., засновані на програмах, планах і держбюджетних темах наукових досліджень Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України: «Просторово-часові нестаціонарні електромагнітні та акустичні взаємодії в системі атмосфера - море - речовина; вплив стану середовища та складних відбивачів на дистанційну діагностику при локаційному і ретрансляційному зондуванні та на метеорний радіозв'язок (шифр «Обрій»), яка виконувалася в період із 01.01. 2013 р. по 31.12. 2017 р. на підставі Постанови Бюро ВФА НАН України від 23.05.2012 р., протокол № 5, № державної реєстрації 0113U000048 (виконавець); «Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів», шифр «Діагностика» (2013 –2014 рр.), яка виконувалась відповідно до цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012 – 2016 рр. за розпорядженням Президії НАН України від 01.02.13 № 56 (1-й етап) та від 04.03.14 № 140 (2-й етап), № Державної реєстрації 0113U002976 (виконавець); «Взаємодії електромагнітних і акустичних хвиль в системі докілья-речовина та їх використання для вирішення проблем радіолокації, енергетики, екології, медицини та зв'язку» (шифр "Обрій-2"), яка виконується в період із 01.01.2018 р. по 31.12.2022 р. на підставі Постанови Бюро ВФА НАНУ від 06.06.2017р., протокол № 4, № державної реєстрації 0118U003034 (виконавець).

**Мета і задачі дослідження.** Мета досліджень полягає в розробці радіофізичних методик моніторингу навколишнього середовища з використанням випромінювань наявних телевізійних і радіомовних станцій, а також систем супутникової глобальної навігації.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було вирішити такі завдання:

1. Теоретично й експериментально дослідити особливості застосування сигналів радіомовних і телевізійних станцій КХ і УКХ діапазонів, ГНСС для моніторингу навколишнього середовища та вирішення завдань радіолокації.

2. Розробити і створити: двоканалний комплекс для вимірювання на просторово рознесені антени амплітуд сигналів телевізійних центрів УКХ діапазону; вимірювальні комплекси для приймання сигналів КХ діапазону; мобільний комплекс для дистанційного моніторингу та діагностики стану морської поверхні за допомогою сигналів навігаційних супутників.

3. Теоретично та експериментально дослідити статистичні характеристики сигналів передавальних станцій УКХ і КХ діапазонів, які можуть бути використані для підсвічування, в смузі доплерівських частот для оцінки характеристик виявлення активно-пасивних систем радіолокації та розробки алгоритмів виділення сигналів, відбитих від повітряних об'єктів.

4. Дослідити можливість використання властивостей магнічних квадратів для побудови двовимірних нееквідистантних антенних решіток. Розробити способи побудови й алгоритми синтезу двовимірних антенних решіток, що забезпечують, при високому ступені розрідження, досить малий рівень бічних пелюсток.

5. Розробити нові методики, що засновані на використанні вкладених напівмарківських процесів, атомарних функцій Кравченка - Рвачова та апарату матриць кореляції спектральних компонент (МКСК) для опису нестационарних процесів.

*Об'єкт дослідження* - процеси поширення радіохвиль в атмосфері Землі та розсіювання природними та антропогенними неоднорідностями.

*Предмет дослідження* - параметри прийнятого випромінювання радіомовних КХ, телевізійних УКХ станцій, навігаційних супутників Землі і їх взаємозв'язок з характеристиками тропосфери, об'єктів та підстилаючої поверхні, методики моніторингу довкілля.

**Методи досліджень.** Теоретичні методи статистичної радіофізики, дистанційного зондування атмосферних процесів, радіотехніки, математичної статистики, теорії статистичних рішень і експериментальні методи вивчення особливостей поширення радіохвиль в атмосфері.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

1. Запропоновано методику оцінки рефракційних властивостей тропосфери по амплітуді УКХ сигналів на загоризонтній трасі шляхом вимірювання множника послаблення в просторово рознесених по висоті точках.

2. Експериментально отримано характеристики інверсійних шарів, що відбивають в тропосфері, по змінах інтенсивності сигналу на приземних загоризонтних трасах для середньої смуги широт. Показано, що у більшості випадків кількість інверсійних шарів не перевищує 2-х зі стрибком індексу рефракції на межі шарів 6 ... 14 N- одиниць. Висота їх розміщення, як правило, не перевищує 650 м, а швидкість змінт висоти - кілька сотень метрів на годину.

3. Запропоновано методику оцінки дальності виявлення та ЕПР повітряних об'єктів для активно - пасивних систем зондування. Наведено теоретичні оцінки ЕПР повітряних об'єктів для різних поляризацій падаючого випромінювання.

4. З використанням іоносферної хвилі мовних КХ станцій як сигналу підсвічування вперше експериментально встановлено, що ЕПР літаків в резонансній області як на горизонтальній, так і на вертикальній поляризаціях сягають тисяч м<sup>2</sup>. Це дає можливість використовувати для освітлення повітряного стану у КХ діапазоні поверхневу хвилю вертикальної поляризації.

5. Вперше запропоновано методику використання сигналів ГНСС для оцінки коефіцієнтів відбиття від схвильованого моря і ступеня шорсткості поверхні та хвилювання моря.

6. На основі вкладених двокомпонентних напівмарківських процесів запропоновано імітаційну модель завад, створюваних випромінюванням радіомовних станцій КХ і УКХ діапазонів.

7. Запропоновано методику синтезу нееквідистантних розріджених антенних решіток для систем моніторингу навколишнього середовища, засновану на використанні магічних квадратів, і вивчено їх властивості.

8. Експериментально досліджено уповільнення електромагнітної хвилі симетричного вібратора, плечі якого складаються з циліндричних спіралей з діаметром і кроком спіралі, малими в порівнянні з довжиною хвилі. Показано, що такий вібратор

є структурою, що сповільнює, в якій мають місце резонанси, коли вздовж вібратора укладається ціле число півхвиль.

9. Запропоновано опис статистичних взаємозв'язків різних спектральних компонент сигналу радіомовних станцій з використанням апарату МКСК. Дослідження коефіцієнтів взаємної кореляції різних спектральних компонент сигналів радіомовних станцій дозволили виявити наявність корельованої області в спектрах. Встановлено, що поява додаткових елементів з високою кореляцією на частотах гармонік свідчить про наявність нелінійних спотворень в приймальному тракті і може використовуватися для їх моніторингу.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в наступному:

1. Пропоновані підходи, що засновані на використанні радіовипромінювання станцій КХ і УКХ діапазонів, дозволяють без істотних матеріальних і фінансових витрат отримати дані про атмосферні процеси, здійснювати безперервний контроль стану тропосфери, вирішувати завдання радіолокації.

2. Запропонована методика використання сигналів ГНСС може бути використана для діагностики стану підстильної поверхні, оцінки коефіцієнтів відбиття, шорсткості поверхні та ступеня хвилювання моря.

3. Отримані оцінки ЕПР літака, що спостерігається в дослідах, величина яких становить кілька тисяч квадратних метрів, дозволяють при порівнянних потенціалах РЛС збільшити дальність виявлення в КХ діапазоні в 30 ... 300 разів у порівнянні з діапазоном НВЧ.

4. Запропонована методика синтезу нееквідистантних розріджених антенних решіток, яка заснована на використанні властивостей магічних квадратів, дозволяє конструювати великі антенні решітки, що забезпечує з додатковими елементами повне покриття просторових частот при малих значеннях коефіцієнтів заповнення до 0,01 і надмірності менше ніж 0,5.

5. Геометричні розміри симетричного вібратора, плечі якого складаються з циліндричних спіралей, можуть до 10 разів бути меншими ніж у традиційного лінійного симетричного вібратора, при цьому відрізняючись ширшою смугою робочих частот, що важливо для побудови антен КХ діапазону.

6. Апарат МКСК може використовуватися для створення спектрально-поляризаційних портретів розсіяних сигналів, які можуть знайти застосування при розв'язанні задач розпізнавання та синтезі багатоканальних систем виявлення, а також вивчення особливостей, які властиві відбиттям від морської поверхні, гідрометеорів, наземних і надводних об'єктів та випромінюванням мовних станцій КХ діапазону.

**Особистий внесок здобувача.** У дисертаційній роботі викладено результати досліджень, виконаних автором самостійно і в співавторстві з колегами. Особистий внесок дисертанта полягає в наступному. У роботах [23, 24] - розробка методик і створення двоканального апаратного комплексу для моніторингу тропосферної рефракції за множниками послаблення сигналів телевізійних центрів на загоризонтних трасах. Проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз отриманих даних. У роботах [4, 5, 14, 17, 18, 26] - розробка методики виявлення повітряних об'єктів в бістатичних РЛС, які використовують як сигнал підсвічування іоносферні сигнали радіомовних КХ станцій. Проведення експериментальних досліджень, обробка та

аналіз отриманих даних. У роботах [12, 15, 19, 20, 27] - розробка методики застосування сигналів ГНСС для діагностики тропосферної рефракції, стану морської поверхні, моніторингу хвилювання. Участь в проведенні експериментальних досліджень, обробці та аналізі отриманих даних. У роботах [11, 25] - розробка методики для опису завад, що створюються для систем моніторингу випромінюванням радіомовних станцій КХ та УКХ діапазонів, на основі напівмарківських вкладених процесів. Створення апаратного комплексу для дослідження завад активно-пасивним системам, які використовують для підсвічування випромінювання радіомовні станції КХ і УКХ діапазонів. Проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз отриманих даних. У роботах [6, 7, 9, 10, 21] - розробка концепції побудови двовимірних нееквідистантних антенних решіток з використанням властивостей магічних квадратів. У роботах [1, 16] - експериментальне дослідження властивостей спірального напівхвильового вібратора, що працює в режимі поперечного випромінювання. Розробка відбивача-калібратора для зовнішнього калібрування РЛС і імітації ЕПР рухомої радіолокаційної цілі. У роботах [2, 3, 8, 13, 22] - розробка методик опису законів розподілу різних нестационарних процесів за допомогою атомарних функцій Кравченка - Рвачова, апарату МКСК.

#### **Апробація результатів дисертації**

Матеріали дисертації доповідалися на міжнародних і вітчизняних конференціях і симпозиумах (усього 12 доповідей), в тому числі: 2<sup>nd</sup> Microwave & Radar Week in Poland: International Radar Symposium IRS (Krakow 2006, 2009), European Radar Conference EURAD (Paris 2010, Amsterdam 2012), 16<sup>th</sup> International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON (Krakow, 2006), The 38<sup>th</sup> European Microwave Conference EuMC (Amsterdam, 2008), IX Научно - практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике» (Муром 2018), International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkiv 2016, 2020), Международная Крымская конференция "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии" КрыМиКо 2004 (Севастополь 2004).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковано в 27 наукових роботах, у тому числі в 15 статтях у фахових українських і закордонних наукових журналах з імпаکت-фактором, які входять до наукометричної бази SCOPUS, і в 12 збірниках доповідей на українських і міжнародних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, переліку умовних позначень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та 5-ти додатків. Її повний обсяг складає 210 сторінок, з них 132 сторінки основного тексту. Дисертація містить 48 рисунків (з них 6 на 6 окремих сторінках) і 18 таблиць (з них 2 на 2-х окремих сторінках). Список використаних джерел на 26 сторінках нараховує 234 найменування. Додатки займають 27 сторінок.

## **ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації. Викладено зв'язок роботи з науковими програмами та темами. Сформульовано тему і задачі досліджень, вказано

об'єкт, предмет і методи досліджень. Показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відзначено особистий внесок автора в роботах, виконаних в співавторстві, апробацію та відомості про публікації за темою дисертації.

У розділі 1 дисертації проведено аналіз робіт, присвячених активно-пасивним комплексам моніторингу довкілля, які використовують як сигнал підсвічування випромінювання наявних цивільних станцій наземного та космічного базування, особливостям поширення радіохвиль в атмосфері Землі та методам діагностики атмосфери Землі, антенним системам радіоастрономічних інструментів КХ діапазону.

У розділі 2 представлено результати експериментальних досліджень рефракційних властивостей тропосфери, виявлення повітряних об'єктів, діагностики стану морської поверхні з використанням випромінювання УКХ телевізійних, КХ радіомовних станцій та супутників ГНСС. Запропоновано методику оцінки рефракційних властивостей тропосфери та діагностики умов поширення сигналів УКХ діапазону по експериментально отриманому значенню множника послаблення поля на загоризонтних трасах. На рис. 1 представлено типову поведінку сигналу на загоризонтній трасі при наявності інверсійних шарів. Видно наявність глибоких завмирань сигналу, викликаних багатопроменевістю в каналі поширення.

Для вимірювання множника послаблення поля та оцінки за експериментальними даними значень ефективного градієнта індексу рефракції було обрано 3 траси: Білгород-Харків; Курськ-Харків; Красногорівка-Харків. Отримано співвідношення, що дозволяють оцінити значення ефективного градієнта індексу рефракції за отриманими експериментально значеннями множника послаблення поля, та порівняти із даними метеорологічних вимірювань.

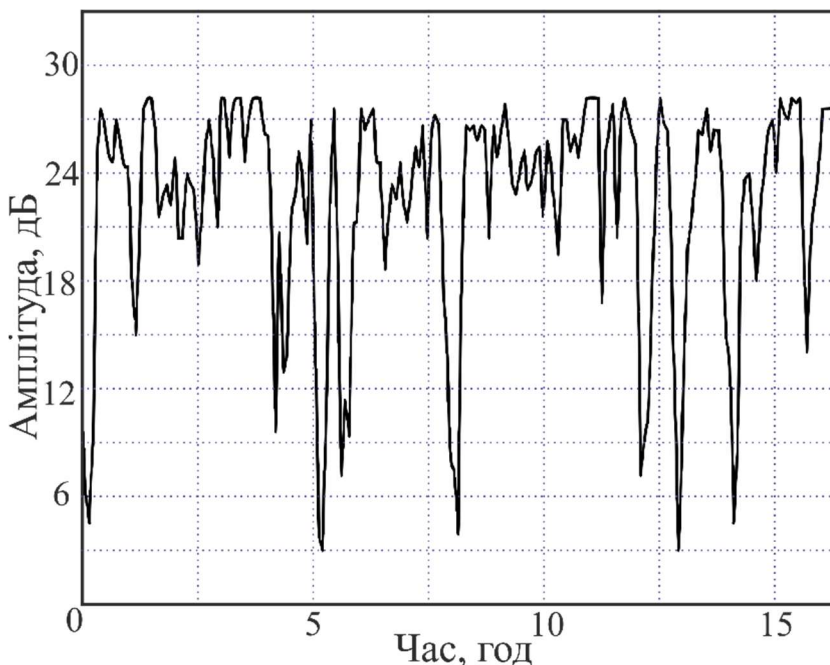


Рисунок 1 - Типова поведінка УКХ сигналу при поширенні на загоризонтній трасі при наявності інверсійних шарів, що відбивають

Експериментальні дослідження сигналів телевізійних центрів на загоризонтних трасах дозволили встановити, що в період із пізньої весни по ранню осінь в прийнятому сигналі протягом доби могли спостерігатися глибокі інтерференційні завмирання. В результаті обробки прийнятих УКХ сигналів на загоризонтній трасі спільно з результатами аерологічних досліджень за допомогою куль-зондів встановлено, що в середній смузі широт інверсійні шари, що відбивають, розташовуються, як правило, на висотах

50 ... 650 м, зі стрибком індексу рефракції на межі шарів 6 ... 14 N-одиниць. Швидкість



їх переміщення по висоті становить від одиниць до сотень метрів на годину. Інтерференція сигналів, відбитих від інверсійних шарів та прямого, призводить до появи замирань глибиною від -3 дБ до -23 дБ.

Експериментально вивчено можливість моніторингу повітряних об'єктів з використанням випромінювань радіомовних станцій КХ діапазону. На рис. 2 наведено спектр прийнятого сигналу, на якому видно несучу частоту радіомовної станції та зміщене на доплерівську частоту відбиття від літака АН-74, який був отриманий в телеграфному (Тлг) режимі роботи приймача при відбудові на 1710 Гц при підсвічуванні іоносферною хвилею. Отримано співвідношення для оцінки ЕПР повітряних об'єктів для активно-пасивних систем моніторингу з підсвічуванням іоносферною хвилею КХ радіомовних станцій з використанням експериментальних даних по їх виявленню. Встановлено, що значення спостережуваної в досліді ЕПР літака становить кілька тисяч квадратних метрів. Експериментально не було виявлено суттєвої різниці в ЕПР літака на вертикальній і горизонтальній поляризаціях. Даний факт узгоджується з результатами модельних експериментів із вивчення матриць розсіювання тіл складної форми. З урахуванням значень ЕПР, розрахованих за даними, отриманими експериментально, виходить, що при порівнянних потенціалах РЛС дальність виявлення в КХ діапазоні може в 30 ... 300 разів

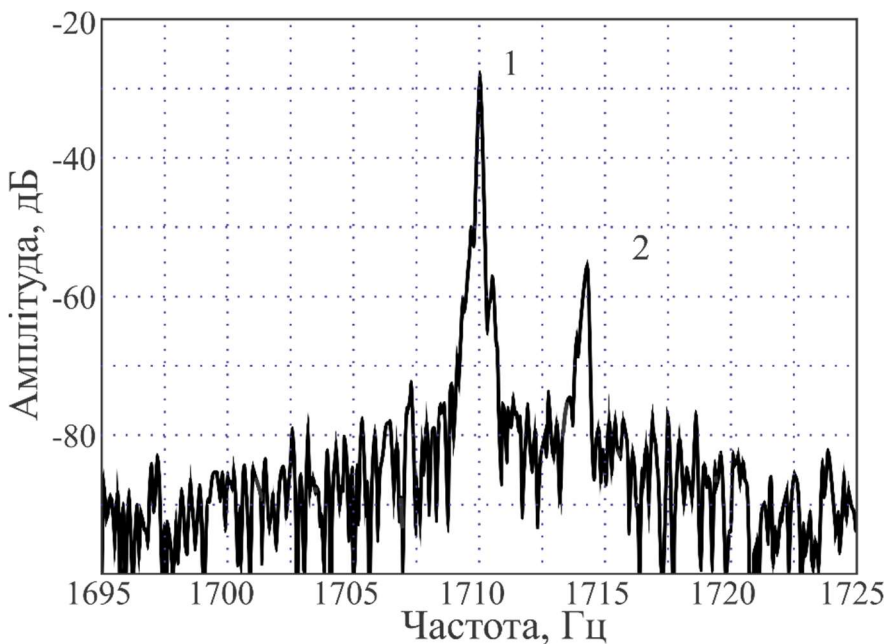


Рисунок 2 - Спектр сигналу біля несучої частоти КХ радіостанції. Несуча (1) та сигнал, відбитий від літака (2)

перевищувати дальності виявлення для НВЧ діапазону. Це може мати вирішальне значення для моніторингу в КХ діапазоні малопомітних об'єктів із використанням поверхневої хвилі на вертикальній поляризації.

Розглянуто можливість використання сигналів ГНСС для моніторингу морської поверхні, розроблено методику і створено мобільний вимірювальний комплекс, що складається з одночастотного ГНСС - приймача вітчизняного виробництва типу СН- 4706, телескопічної антени та персонального комп'ютера з програмним забезпеченням для збору та обробки навігаційної інформації. Сигнали, що реєструються в моделі супутник - підстильна поверхня - приймальна антена, є сумою прямого та відбитого від морської поверхні сигналів. При наявності морського хвилювання в сигналі, що реєструється, з'являються флуктуаційні компоненти, частота й інтенсивність яких буде залежати від шорсткості поверхні та періоду морського хвилювання. В експериментах за основу бралися дані супутників GPS через повторюваність їх орбіт,

вить кілька тисяч квадратних метрів. Експериментально не було виявлено суттєвої різниці в ЕПР літака на вертикальній і горизонтальній поляризаціях. Даний факт узгоджується з результатами модельних експериментів із вивчення матриць розсіювання тіл складної форми. З урахуванням значень ЕПР, розрахованих за даними, отриманими експериментально, виходить, що при порівнянних потенціалах РЛС дальність виявлення в КХ діапазоні може в 30 ... 300 разів

що дозволяло досліджувати одні й ті ж ділянки морської поверхні при різних її станах. Виділення флуктуаційної компоненти здійснювалося одним із двох способів.

При першому здійснювалася високочастотна фільтрація прийнятого від супутника та відбитого від поверхні моря сигналів. Вона проводилася за допомогою фільтра чересперіодної компенсації:  $\hat{S}(\beta_i) = S(\beta_i) - S(\beta_{i-1})$ , де  $S(\beta_i), S(\beta_{i-1})$  - сигнали при кутах місця (підвищеннях) супутника  $\beta_i$  і  $\beta_{i-1}$  відповідно.

При іншому підході виділення флуктуаційної складової здійснювалося з використанням вейвлет перетворення, виділення його високочастотних компонентів і здійснення зворотного вейвлет перетворення.

Трендова складова виділялась шляхом згладжування або також за допомогою вейвлет аналізу. Трендову складову сигналу радіосходу супутника ГНСС, яка виділена за допомогою згладжування в ковзному вікні, та оцінені по ній значення коефіцієнта відбиття від моря для хвилювання 3-4 бали показано на рис. 3.

Глибина інтерференційних завмирань сигналу ( $V_{min}, V_{max}$ ) дозволяє оцінити величину коефіцієнта відбиття  $R$  від морської поверхні. За відомими значеннями коефіцієнта відбиття  $R(\beta)$  та кутах візування супутника ГНСС  $\beta$  можна визначити значення середньоквадратичних значень висоти морських хвиль.

Запропонований підхід відкриває нові можливості для моніторингу морської

поверхні за допомогою розгалужених у світі систем глобальної супутникової навігації.



а)



б)

Рисунок 3 - Трендова складова (а) й оцінка коефіцієнта відбиття від морської поверхні (б) із використанням сигналу ГНСС в залежності від кута піднесення супутника

поверхні за допомогою розгалужених у світі систем глобальної супутникової навігації.

У розділі 3 представлено результати експериментальних досліджень завад, що створюються випромінюванням мовних станцій УКХ і КХ діапазонів для активно-пасивних систем моніторингу з використанням іоносферної та поверхневої хвиль на різних частотах і в різний час доби. На рис. 4 представлено результати апроксимації спектрів радіомовних станцій методом найменших квадратів (МНК) та отримані оцінки швидкості убавання спектральної густини вище і нижче частоти максимуму.

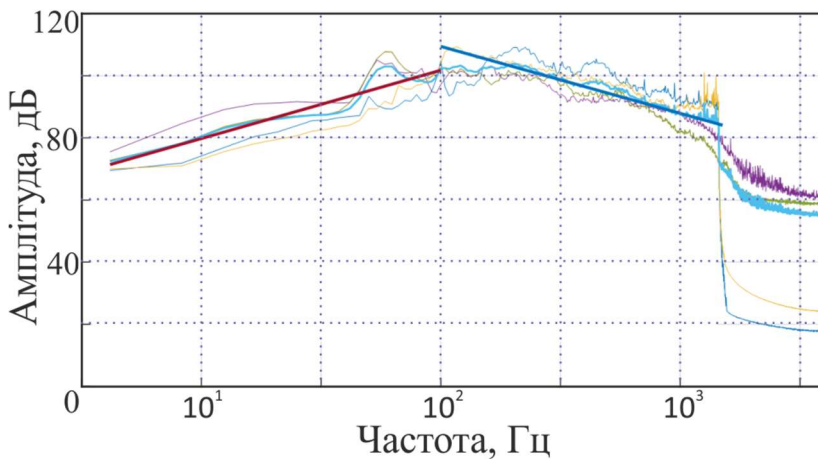


Рисунок 4 - Нормовані спектри сигналів радіомовних КХ станцій

Спектр можна апроксимувати залежностями виду:

$$S(F) = \left[ 1 + \left| \frac{F-F_0}{\Delta F_{\pm}} \right|^{n_{\pm}} \right]^{-1},$$

де  $F_0$  - частота максимуму спектральної густини,  $\Delta F_{\pm}$  - напівширина, а  $n$  характеризує швидкість зменшення правого  $n_+$  і лівого  $n_-$  скатів спектра. Апроксимація низькочастотної ділянки спектра здійснювалася від приблизно 2 Гц до 100 Гц, а високочастотного - від 100 Гц до приблизно

2000 Гц. Слід зазначити, що для всіх частот КХ діапазону, незалежно від часу доби, нахил спектра, як правило, має величину:  $n_+ = 1,8..2,3$ , а  $n_- = 1,6..2,3$ , тобто в першому наближенні для апроксимації можна використовувати однакові значення  $n \approx n_+ \approx n_- \approx 2$ .

При використанні для підсвічування радіомовних станцій КХ діапазону розсіяний об'єктом сигнал  $\dot{S}_T(t)$  має структуру, схожу зі структурою сигналу підсвічування  $\dot{S}_{Tr}(t)$ . Доплерівський зсув частоти розсіяного об'єктом сигналу визначається швидкістю зміни суми відстаней від передавача до цілі та від цілі до приймача. Оцінки показують, що для повітряних об'єктів, що мають крейсерські швидкості польоту від 600 км/год до 2000 км/год, діапазон доплерівських зміщень частоти в декаметровому діапазоні довжин хвиль 60 м ... 20 м лежить в межах 3 Гц ... 30 Гц. Разом з тим, спектр інформаційного сигналу радіомовних станцій зосереджено на частотах вище 50 Гц. Це означає, що в інтервалі частот між несучою та частотами інформаційного повідомлення можливе виявлення сигналів, відбитих від повітряних об'єктів.

Аналіз даних, отриманих в ході експериментів, показує, що рівень завад практично однаковий при зміщенні як вліво, так і вправо від несної частоти. Різниця, як правило, не перевищує 3 дБ. Ширина лінії несучої, як правило, менше в тих випадках, коли спостерігаються великі співвідношення сигнал-завада.

Для завад, створюваних активно-пасивним системам випромінюванням мовних станцій КХ діапазону в смузі доплерівських частот 0 ... 70 Гц, характерна наявність двох фаз різної інтенсивності, які фізично обумовлені дискретним характером модуляції сигналів: звуків мови та музики.

Оскільки, як було показано експериментально, опис функції розподілу може базуватися на полігаусовому розподілі, то імітаційна модель завад від сигналу підсвічування може будуватися на основі напівмарківських вкладених процесів. Статистичний опис ґрунтується на використанні вкладених двокомпонентних випадкових процесів  $\{\overrightarrow{S}(t), \theta(t)\}$ , у яких одна компонента неперервна  $\overrightarrow{S}(t)$ , а інша дискретна  $\theta(t) = v_i$ .

На рис. 5 в масштабі, що лінеаризує нормальний закон розподілу, представлено функції розподілу сигналів КХ діапазону радіомовної станції. Видно, що для функцій

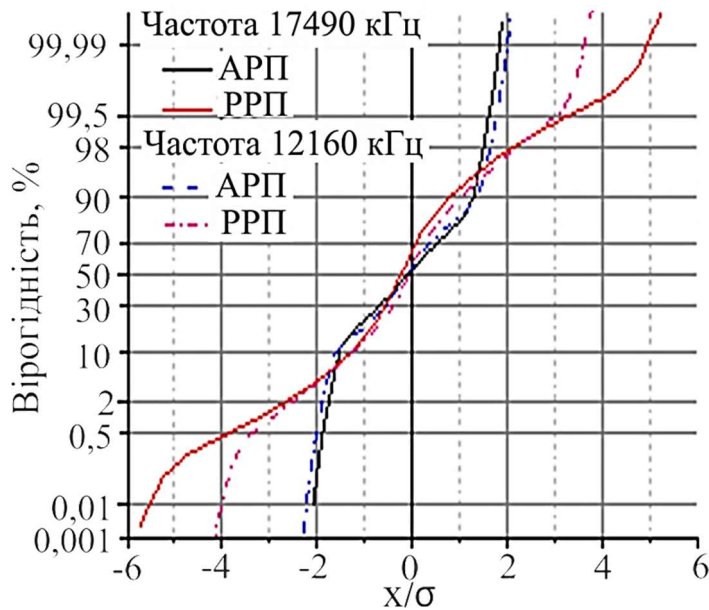


Рисунок 5 - Функції розподілу сигналу: АРП, РРП - автоматичне і ручне регулювання підсилення

придушення завад при фільтрації в смузі доплерівських частот від 0 до 70 Гц. Вони мають величину до 30 дБ.

У розділі 4 представлено результати дослідження властивостей магічних квадратів для конструювання двовимірних нееквідистантних антенних решіток.

Запропоновано способи побудови та алгоритми синтезу двовимірних антенних решіток на їх основі, що забезпечують при високому ступені розрідження малий рівень бічних пелюсток. Особливо актуально це для систем дистанційного зондування, радіолокації та низькочастотної радіоастрономії декаметрового діапазону довжин хвиль, у яких антенні решітки можуть мати значні розміри.

Одним з важливих завдань є знаходження безнадлишкової конфігурації з заданим числом елементів, що забезпечує повне покриття центральної області максимального розміру в площині просторових частот ( $u, v$  - площині). Для безнадлишкових решіток характерно повне покриття всієї сітки частот в області розташування антени. Розглядаючи елементи магічного квадрата як відстані між сусідніми елементами антенної решітки, було запропоновано алгоритм визначення їх координат.

розподілу характерна негаусовість, яка проявляється у відхиленні їх від лінійної залежності. По осі абсцис відкладено значення, що нормоване на середньоквадратичне значення процесу. Функції розподілу для різних станцій мають приблизно однаковий характер поведінки, відмінності виявляються на "хвостах" функцій розподілу при значеннях  $\left| \frac{X}{\sigma} \right| \geq 3,5$ , коли починають позначатися ефекти обмеження сигналу на приймальному пристрої. Експериментально оцінено коефіцієнти

Очевидно, що магічний квадрат, побудований з послідовності натуральних чисел  $(1, n^2)$ , є нормальним квадратом за визначенням, який покриває в  $u, v$  - площині частоти  $(1, n^2)$ . Координати елементів решітки отримують за допомогою породжувальної матриці  $\|S\|$ , яка складається з елементів магічного квадрата.

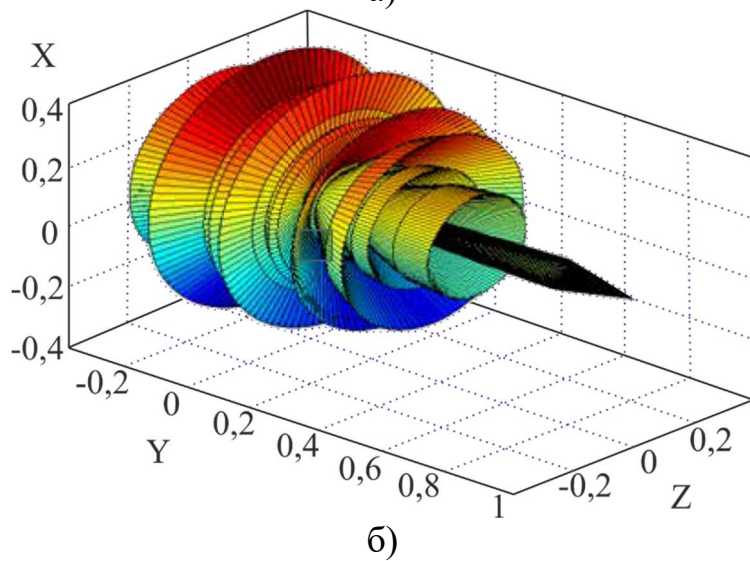
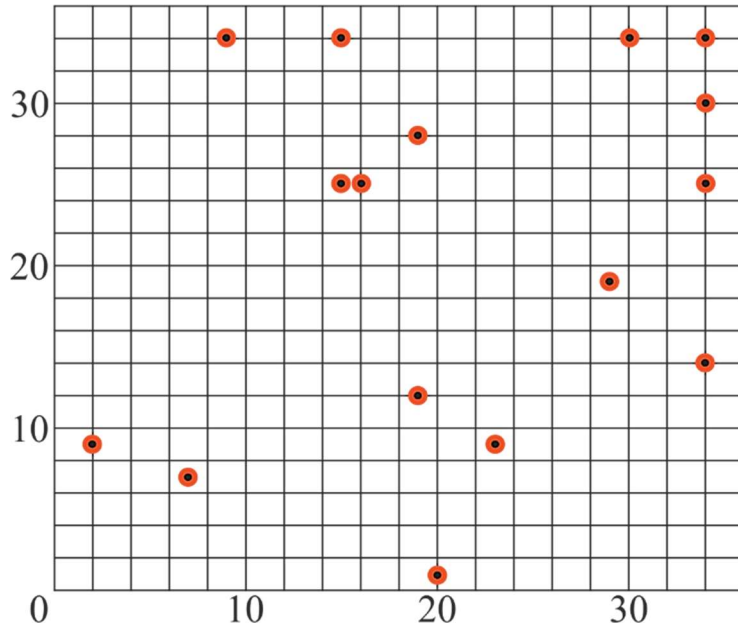


Рисунок 6 – Розташування елементів решітки на координатній площині на основі квадрата Кхаджурахо 4-го порядку (а) та тривимірна діаграма спрямованості цієї антенної решітки (б)

На рис. 6 показана решітка на основі квадрата Кхаджурахо 4-го порядку та тривимірна діаграма спрямованості цієї антенної решітки, побудованої на основі цього квадрата.

Встановлено, що нормальні квадрати майже повністю покривають просторову область частот, в якій розташовано їхні елементи. Доповнення синтезованих решіток декількома елементами (для квадратів 4-го порядку не більше трьох) дозволяє отримати повне покриття. Антенні решітки, що отримані на основі квадратів, мають істотно менші значення коефіцієнтів заповнення та надмірності, ніж отримані на основі дискретних різницевих множин.

Експериментально досліджено уповільнення електромагнітної хвилі, розподіл поверхневого струму та вхідного імпедансу симетричного вібратора, плечі якого складаються з циліндричних спіралей з діаметром і кроком, малими в порівнянні з довжиною хвилі.

В результаті вимірювань вхідного імпедансу вібраторів зі спіральним намотуванням встановлено, що перший резонанс (послідовний) спостерігається при  $0,04 l/\lambda$ , при  $0,051 l/\lambda$  спостерігається другий резонанс (паралельний) зі значним зростанням активного опору. Розподіл струму при першому резонансі за формою близький до синусоїдального і відповідає розподілу струму півхвильового симетричного вібратора. Вимірюваний

коефіцієнт уповільнення хвилі склав величину 6,25. Встановлено, що спіральний вібратор виявляється більш широкосмуговим і зручним для узгодження з навантаженням в порівнянні з лінійним вібратором.

На основі розглянутої уповільнюючої випромінюючої структури у вигляді спірального напівхвильового симетричного вібратора, що працює в режимі поперечного випромінювання, запропоновано відбивач-калібратор для зовнішнього калібрування РЛС і імітації ЕПР рухомої радіолокаційної цілі. З огляду на відносно невеликі габаритні розміри, вагу, а також споживану потужність, калібратор може бути використаний автономно.

У розділі 5 розглянуто можливість використання математичної моделі вкладених напівмарківських процесів для опису нестационарних негаусових процесів, один

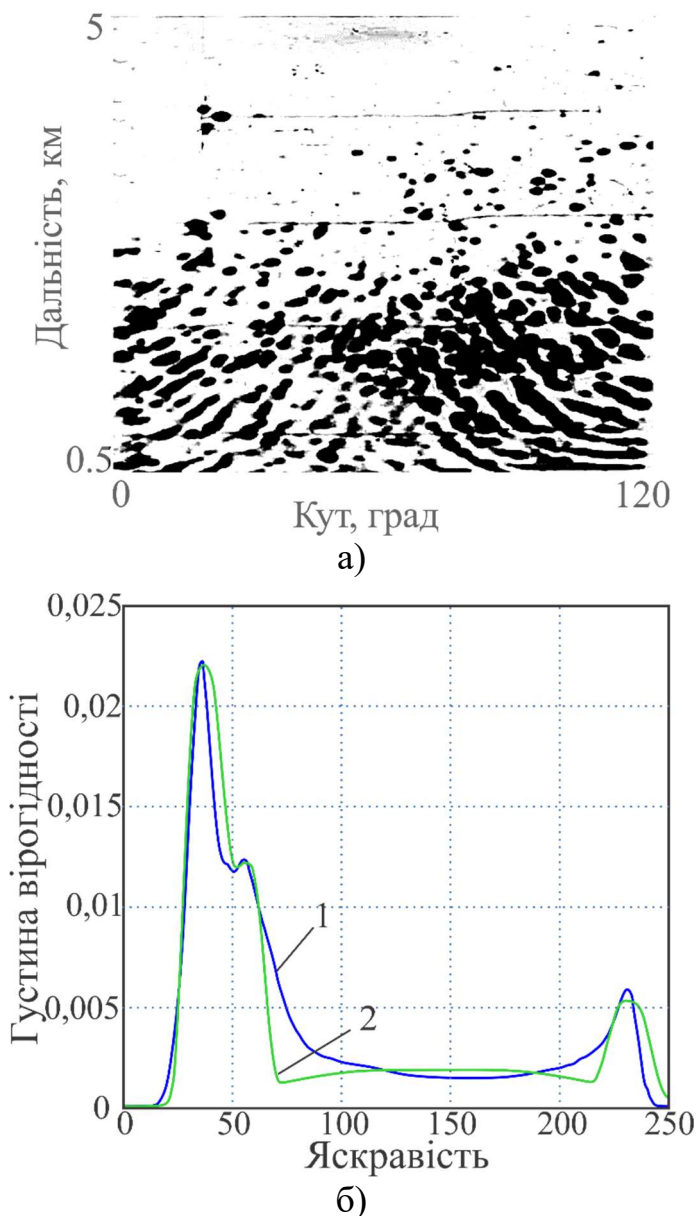


Рисунок 7 - Радіолокаційне зображення морської поверхні (а) та густини розподілу яскравості зображення й його апроксимація функціями Кравченка-Рвачова (б).

з яких, напівмарківський - визначає зміну фазових станів, а другий - визначає поведінку системи всередині фазового стану, густина якого може бути описана локально гаусовим розподілом або фінітними функціями Кравченка - Рвачова. Представлено результати апроксимації розподілу інтенсивності відбиттів від моря, сезонної поведінки УЕПР ділянок суші з рослинним покривом, показника хлорофільного індексу. На рис. 7 наведено радіолокаційне зображення морської поверхні на дальностях 0,5 ...5 км, довжина хвилі РЛС 2 см, хвилювання моря 6 балів, густини розподілу яскравості зображення та його апроксимація функціями Кравченка - Рвачова. Для повністю білих пікселів яскравість дорівнює 0, для повністю чорних пікселів - 255.

На радіолокаційному зображенні простежується періодичність, пов'язана з періодом морських хвиль і напрямком опромінення. Характер поведінки густини розподілу радіолокаційного зображення морської поверхні для зони інтенсивного відбиття є бімодальним. Перший максимум відповідає зонам слабого відбиття, а другий - сильного відбиття від гребенів морських хвиль.

Якщо роздільна здатність системи зондування по дальності та кутових координатах висока, спостерігаються істотні відхилення від стандартних законів розподілу флуктуацій сигналів, відбитих підстильними поверхнями та «ясним» небом. Це обумовлено послідовним і роздільним спостереженням ділянок поверхні з відмінними статистичними властивостями нерівностей, що породжують нестаціонарність і негаусовість розсіяного сигналу. Для морської поверхні це ділянки, в яких знаходяться гребені морських хвиль, що мають підвищену відбивну здатність.

Для виявлення статистичних зв'язків між окремими спектральними компонентами нестаціонарних сигналів  $S_1$  та  $S_2$  запропоновано використання апарату МКСК:

$$\rho(F_i, F_j) = \frac{\langle S_1(F_i, t) S_2(F_j, t) \rangle - \langle S_1(F_i, t) \rangle \langle S_2(F_j, t) \rangle}{\sqrt{(\langle S_1^2(F_i, t) \rangle - \langle S_1(F_i, t) \rangle^2)(\langle S_2^2(F_j, t) \rangle - \langle S_2(F_j, t) \rangle^2)}}$$

де  $S(F_i, t), S(F_j, t), \rho(F_i, F_j)$  -модуль спектральної густини на  $F_i$  и  $F_j$  частотах в момент часу  $t$  і коефіцієнт взаємної кореляції відповідно.

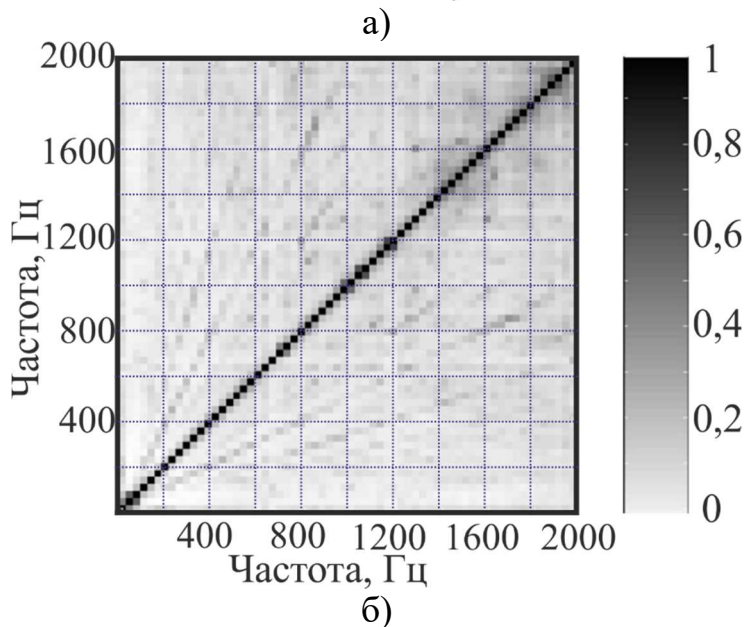
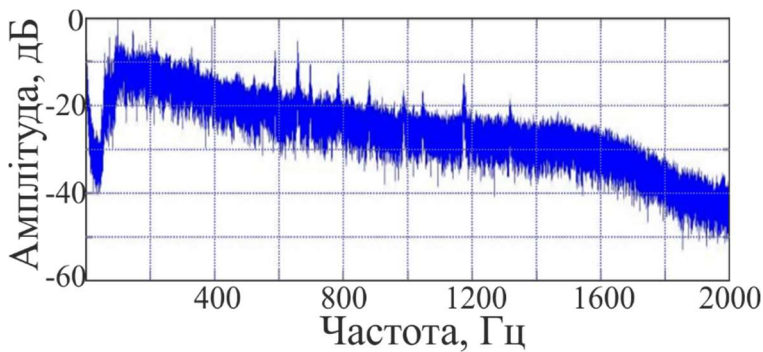


Рисунок 8 - Спектр (а) та матриця коефіцієнтів кореляції спектральних компонент (б) КХ станції

нелінійних спотворень в тракці при його роботі.

Дослідження коефіцієнтів взаємної кореляції різних спектральних компонент дозволили виявити наявність в спектрах сигналів мовних радіостанцій області частот з високою кореляцією. На рис. 8 наведено спектр (а) та матрицю коефіцієнтів кореляції спектральних компонент (б) КХ станції мовлення Kashi, China, частота 17490 кГц. Потужність 500 кВт, дальність 5350 км, азимут підсвічування 95 °.

Величина коефіцієнта взаємної кореляції визначається яскравістю. Шкала яскравості приведена поруч. З вигляду матриці кореляції спектральних компонент видно, що найбільша кореляція спостерігається у діагональних елементах. При зміщенні від діагоналі коефіцієнт кореляції різко падає. Поява нелінійних спотворень в тракці приводить до появи зон підвищеної кореляції на гармоніках, що дозволяє здійснювати моніторинг рівня

У ДОДАТКУ А наведено наукові роботи, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації.

У ДОДАТКУ Б - двоканальне вимірювання амплітудних значень УКХ сигналів.

У ДОДАТКУ В - ЕПР деяких типів літальних апаратів.

У ДОДАТКУ Г - дослідження стану морської поверхні і моніторинг хвилювання.

У ДОДАТКУ Д - апаратура і характеристики станцій підсвічування для вимірювання завад, створюваних випромінюванням мовних станцій УКХ і КХ діапазонів.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено задачу створення методик для моніторингу рефракційних властивостей тропосфери, морського хвилювання, розв'язання задач радіолокації з використанням наявних випромінювань КХ радіомовних, УКХ телевізійних станцій, глобальних навігаційних супутникових систем GPS, GLONAS. Розроблено нові методики опису нестационарних негаусових процесів та нові підходи до створення двовимірних антенних решіток.

Створено методику моніторингу тропосферної рефракції по множниках послаблення сигналу на загоризонтній трасі на просторово рознесених антенах в УКХ діапазоні частот. Створено апаратурний комплекс та проведені експериментальні дослідження, які показали слабку (менше ніж 0,15) кореляцію сигналів, що приймаються на просторово - рознесені антени (на 15 ... 20  $\lambda$ ) як для однакових, так і різних частотних каналів.

Експериментальні дослідження інтерференційних явищ в каналі поширення на загоризонтних трасах в середній смузі широт (Україна), які виникають при наявності інверсійних шарів, показали, що кількість інверсійних шарів, як правило, не перевищує 2-х, зі стрибком індексу рефракції на межі шарів 6 ... 14 N одиниць, висота їх розміщення не перевищує 650 м, швидкість переміщення становить від одиниць до декількох сотень метрів на годину, глибина завмирань сигналу становить від -3 дБ до - 23 дБ.

Запропоновано методику для оцінки дальності виявлення та ЕПР повітряних об'єктів для активно - пасивних систем зондування.

При виявленні літака Ан-74 з використанням як сигналу підсвічування іоносферної хвилі радіомовних КХ станцій вперше експериментально встановлено, що ЕПР літаків в резонансній області як на горизонтальній, так і на вертикальній поляризаціях сягають тисяч м<sup>2</sup>. Це означає, що при порівнянних потенціалах РЛС дальність виявлення в КХ діапазоні може в 30 ... 300 разів перевищувати їх дальності виявлення у НВЧ діапазоні, а також дає можливість використовувати для освітлення повітряного стану в КХ діапазоні поверхневу хвилю вертикальної поляризації.

Запропоновано методику використання сигналів ГНСС для дистанційного моніторингу та діагностики стану морської поверхні. Експериментально встановлено, що рівні флуктуаційної компоненти та глибина завмирань (трендів) сигналів навігаційних супутників чутливі до зміни стану підстильної поверхні та ступеня хвилювання. Показано можливість визначення по ним стану морської поверхні.

Запропоновано імітаційну модель завад, створюваних для активно-пасивних систем випромінюванням радіомовних станцій на основі вкладених напівмарківських



процесів з урахуванням присутності в сигналі двох фаз різної інтенсивності, які фізично обумовлені дискретним характером модулюючих сигналів. Проведено аналіз отриманих в ході експериментів співвідношень рівня несучої до рівня завад на різних частотах для різних поляризацій приймання та частот сигналу. Показано, що їх співвідношення сягає 40 дБ. Проведено аналіз періоду завмирань сигналу для різних однострибкових і багатострибкових трас для автоматичного та ручного режимів регулювання підсилення (АРП і РРП) при прийманні.

Розроблено методику синтезу нееквідистантних антенних решіток, яку засновано на використанні властивостей магічних квадратів. Показано, що при розміщенні елементів решітки, використовуючи числа, з яких составлений «магічний» квадрат, вдається отримати при малих коефіцієнтах заповнення до 0,01 і надмірності менше ніж 0,5 майже повне покриття просторових частот в області розміщення елементів. Показано, що синтез великих АР можливий з використанням вкладення декількох магічних квадратів. Алгоритм доповнення елементів решітки, сформованої елементами магічного квадрата додатковими елементами для забезпечення повного покриття частот АР, може бути так само ефективно використаний і для побудови АР на основі вкладеного квадрата. Використовуючи взаємні повороти окремих шарів, що входять до синтезованої решітки, можна істотно поліпшити її характеристики.

Експериментально досліджено симетричний спіральний вібратор з малими діаметром і шагом спіралі в порівнянні з довжиною хвилі та показано, що він є структурою що сповільнює, в якій мають місце резонанси, коли вздовж вібратора укладається ціле число півхвиль, та на його основі запропоновано відбивач-калібратор для зовнішнього калібрування РЛС.

Розглянуто можливість використання атомарних функцій Кравченка - Рвачова для опису законів розподілу нестационарних негаусових процесів. Показано, що фінитність атомарних функцій Кравченка-Рвачова має фізичні передумови їхнього використання для процесів, з декількома фазовими станами, де в середині кожного фазового стану як апроксимуючі функціонали використовуються гаусові густини розподілу. Аналіз похибок апроксимації експериментальних густин розподілу показав, що використання фінитних функцій Кравченка - Рвачова в більшості випадків дає кращі результати, ніж використання функцій Гауса, і тим більше, Лоренца.

Запропоновано опис статистичних взаємозв'язків різних спектральних компонент сигналу радіомовних КХ і УКХ станцій з використанням апарату МКСК. Дослідження коефіцієнтів взаємної кореляції різних спектральних компонент сигналів радіомовних станцій дозволили виявити наявність корельованої області в спектрах. Встановлено, що поява додаткових елементів з високою кореляцією на частотах гармонік свідчить про наявність нелінійних спотворень в приймальному тракті і може використовуватися для їх моніторингу.

## **СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Мельяновский П. А. Спиральная антенна с поперечным излучением / П. А. Мельяновский, И. В. Попов // Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. – 2003. – Т. 8, № 3. – Харьков. – С. 438-441.

2. Луценко И. В. Спектральные методы оценивания характеристик вторичных источников в каналах с многолучевостью / И. В. Луценко, И. В. Попов, В. И. Луценко. //, Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. – 2006. – Т. 11, № 1. – Харьков. – С. 144-148.

3. Луценко В. И. Использование методов обнаружения-измерения для анализа характеристик каналов с многолучевостью / И. В. Попов, И. В. Луценко, В. И. Луценко //, Радиофизика и электроника: сб. научн. тр – 2006. – Т. 11, № 2. – Харьков. – С. 305-308.

4. Луценко В.И. Бистатистические РЛС с подсветкой ионосферными сигналами связанных станций коротковолнового диапазона. / И. В. Попов, В. И. Луценко, В. И. Луценко // Радиофизика и электроника: сб. научн. трудов – 2007. – Т. 12, № 1. – Харьков. – С. 199-203.

5. Луценко В.И. Мониторинг воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций коротковолнового диапазона / В. И. Луценко, И. В. Луценко, И.В. Попов // Изв. Вузов Радиофизика. – 2015. – Т. 58, № 1. – С. 10-20.

6. Кравченко В.Ф. Неэквидистантные двумерные антенные решетки на основе «магических» квадратов / Кравченко В.Ф., Луценко В.И., Луценко И.В., Ло Иян, Мазуренко А.В., Попов И.В. // Физические основы приборостроения. – 2017. – Т. 6, № 3(25). – С. 4-27.

7. Kravchenko V.F. Nonequidistant Two-Dimensional Antenna Arrays Based On Magic Squares / Kravchenko V.F., Lutsenko V. I., Lutsenko I.V. , Popov I.V., LUO Yi-Yang, A.V.Mazurenko // Journal of Measurement Science and Instrumentation. -2017, V.8, No 3, Sept. 2017, P. .244-253.

8. Lutsenko V. I. Description of nonstationary non-Gaussian processes using finite atomic functions / V.F. Kravchenko, V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, I. V. Popov, Luo Yiyang // Journal of Measurement Science and Instrumentation. -2017, V.8, № 1, Mar. 2017, P 37-45.

9. Lutsenko V. I. Non-equidistant two-dimensional antenna arrays are based on Latin squares for registration of cosmic, atmospheric and lithospheric radiation / Nguyen Xuan Anh, V. I. Lutsenko, Luo Yiyang, I. V. Popov // Journal of Marine Science and Technology. 2017. Vol. 17, N 4B. P. 14-20.

10. Кравченко В. Ф. Неэквидистантные двумерные антенные решетки на основе латинских квадратов / В. Ф. Кравченко, В. И. Луценко, Ло Иян, И. В. Попов // Физические основы приборостроения. 2018. Т. 7, № 1(27). С. 4-23.

11. Lutsenko V. I. Interference to Active-Passive Radar Systems Created by Emissions from HF and VHF Broadcasting Stations / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, A. V. Soboliak, I. V. Popov, N. X. Anh, & Y. Luo // Telecommunications and radio engineering – 2020, vol. 79, Issue 10, P 829-845.

12. Lutsenko V. I. Testing of GNSS Receivers of Space Objects in Earth Conditions and the Implementation of Spoofing using Simulator of GNSS Signals / N.X. Anh, A.G. Laush, Yu. Khomenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, & I.V. Popov // Telecommunications and radio engineering – 2020, vol. 79, Issue 20, PP 1773-1784.

13. Луценко В. И. Обнаружение–измерение параметров неизвестного количества сигналов в условиях негауссовых помех / И. В. Попов, И. В. Луценко,

В. И. Луценко // АНПРЭ "Прикладная радиоэлектроника" – 2006. – Т. 5, № 3. – Харьков. – С. 378-382.

14. Луценко В. И. Освещение воздушной обстановки с использованием излучения вещательных станций КВ диапазона / И. В. Попов, В. И. Луценко, И. В. Луценко // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. научн. трудов. Под ред. Громыко А. И., Сарафанова А. В. М.: Радио и связь, 2006. С. 25-28.

15. Кривенко О. В. Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів / О. В. Кривенко, А. Г. Лауш, В. І. Луценко, І. В. Луценко, Д. О. Попов, І. В. Попов, О. В. Соболяк // ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. – 2015. – Т. 21, № 3 С.83-90.

16. Мельяновский П. А. Малогабаритный активный доплеровский калибратор / П. А. Мельяновский, И. В. Попов // 14th International Crimean Conference, Microwave and Telecommunication Technology, CriMico 2004, 13-17 September, 2004 P: 701-702.

17. Lutsenko V. I. Illumination of Air Environment Using Radiation of SB Broadcast Station / V. I. Lutsenko, I. V. Popov // International Radar Symposium IRS 2006, 24-26 May. 2006: conf. proc. – Krakov, P. 233-236.

18. Lutsenko V. I. Illumination of Air Environment Using Radiation of SW Broadcasting stations / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, Popov I.V. // The 5th European Radar Conference, 30–31 October 2008, Amsterdam, The Netherlands, P. 396-399.

19. Lutsenko I. V. Usage of Electromagnetic Fields of Antropogenic Irradiation Sources for Remote Sensing of Atmosphere / I. V. Lutsenko, V. I. Lutsenko, I. V. Popov, V. B. Sinitsky, E. V. Tarnavsky, N. X. Anh // The 6th European Radar Conference, 2009, EuRAD, 28 Sept - 2 Oct 2009, Rome, Italy, P. 545-548.

20. Gudkov V. N. Using Signals of the Global Navigation Satellites for Diagnostics of Above Land Troposphere Refraction / V. N. Gudkov, V. I. Lutsenko, I.V Lutsenko, N. X. Anh, I. V Popov, V. B. Sinitskiy // The 7th European Radar Conference, 2010, EuRAD, 30 Sept - 1 Oct 2010, Paris, France, P. 495-498.

21. V. I. Lutsenko Nonequidistant Two-Dimensional Antenna Arrays are Based on Magic Squares / V. I. Lutsenko, I. V. Popov, I. V. Lutsenko Luo Yiyang, A. V. Mazurenko // 9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Kharkiv, 2016, pp. 1 - 4, doi: 10.1109/MSMW.2016.7538080, IEEE Conference Publications.

22. Kravchenko V. F. Description of nonstationary non-Gaussian processes using finite atomic functions / V. F. Kravchenko, Luo Yiyang, V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, I. V. Popov // 9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Kharkiv, 2016, pp. 1 - 4, doi: 10.1109/MSMW.2016.7538171, IEEE Conference Publications.

23. Луценко В. И. Мониторинг тропосферной рефракции с использованием излучений телевизионных центров на загоризонтной трассе / В. И. Луценко, И. В. Луценко, И. В. Попов, Н. С. Ань (NguyenXuanAnh), Цзянь Гуо (QiangGuo), Юн Джин (YuZheng) // II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», 26 - 28 июня 2018г., Муром, Россия, С. 220-227.

24. Луценко В. И. Радиоклиматические особенности Вьетнама / В. И. Луценко, И. В. Луценко, И. В. Попов, Н. С. Ань (Nguyen Xuan Anh) // IX Научно - практический семинар «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике», 26 - 28 июня 2018г., Муром, Россия, - С. 668-697.

25. V. I. Lutsenko Characteristics of Interference to Active-Passive Radar Systems from Emissions of HF and VHF Broadcasting Stations / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, A. V. Soboliak, I. V. Popov, Anh Nguyen, & Luo Yiyang. // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, Volume 2 on 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS). – P. 259-262.

26. V. I. Lutsenko Use of Radiation of Broadcast Stations of HF Range for Detection of Air Objects / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, A. V. Soboliak, I. V. Popov, Anh Nguyen. // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, Volume 2 on 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS). – P. 267-271.

27. V. I. Lutsenko GNSS Signal Use for Sea Waves Monitoring / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, I. V. Popov, Yi-yang Luo, Nguyen Xuan Anh, Qiang Guo, Yu Zheng. // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) Kharkiv, Ukraine, September 21 – 25, Volume 2 on 2020 IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW). – P. 768-771.

## АНОТАЦІЯ

Попов І.В. Моніторинг довкілля з використанням випромінювання існуючих радіосистем наземного та космічного базування. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 - радіофізика. Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м Харків, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню завдання дистанційної діагностики стану поверхні моря, тропосфери Землі та виявленню в ній утворень і об'єктів природного та антропогенного походження з використанням випромінювань телевізійних, радіомовних станцій і ШСЗ систем глобальної навігації.

Розроблено методику оцінки рефракційних властивостей тропосфери за амплітудою УКХ сигналів на загоризонтній трасі, використовуючи рознесені по висоті антени.

Розроблено методику для оцінки дальності виявлення та ЕПР повітряних об'єктів для активно - пасивних систем зондування. Оцінено теоретично й експериментально встановлено, що ЕПР літаків у ДКМ діапазоні в резонансній області на вертикальній та горизонтальній поляризаціях може сягати тисяч квадратних метрів.

Розроблено методику застосування сигналів систем глобальної супутникової навігації для діагностики стану морської поверхні та моніторингу хвилювання за величиною флуктуаційної складової та рівнях замирань трендової складової прийнятого ГНСС сигналу.

На основі властивостей магічних квадратів запропоновано методику синтезу нееквідистантних розріджених антенних решіток, які забезпечують досить малий рівень бічних пелюсток при високому ступені розрідження.

Показано можливість використання МКСК для з'ясування міжспектральних кореляційних зв'язків в сигналах, розсіяних морською поверхнею, гідрометеорами, об'єктами, а також в сигналах КХ і УКХ радіомовних станцій.

**Ключові слова:** розсіювання радіохвиль, РЛС, інтерференційні явища, коефіцієнт заломлення тропосфери, ЕПР, матриці кореляції, нееквідистантні решітки, інверсійний шар, підстильна поверхня.

## АННОТАЦИЯ

Попов И.В. Мониторинг окружающей среды с использованием излучения существующих радиосистем наземного и космического базирования. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика. Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков, 2021.

Диссертация посвящена решению задачи дистанционной диагностики состояния поверхности моря, тропосферы Земли и выявлению в ней образований и объектов природного и антропогенного происхождения с использованием излучений телевизионных, радиовещательных станций и ИСЗ систем глобальной навигации.

Разработана методика оценки рефракционных свойств тропосферы по амплитуде УКВ сигналов на загоризонтной трассе, используя разнесенные по высоте антенны.

Разработана методика для оценки дальности обнаружения и ЭПР воздушных объектов для активно - пассивных систем зондирования. Оценено теретически и экспериментально установлено, что ЭПР самолетов в ДКМ диапазоне в резонансной области на вертикальной и горизонтальной поляризациях может достигать тысяч квадратных метров.

Разработана методика применения сигналов систем глобальной спутниковой навигации для диагностики состояния морской поверхности и мониторинга волнения по величине флуктуационной составляющей и уровнях замираний трендовой составляющей принятого ГНСС сигнала.

На основе свойств магических квадратов предложена методика синтеза нееквидистантних разреженных антенных решеток, которые обеспечивают достаточно низкий уровень боковых лепестков при высокой степени разрежения.

Показана возможность использования МКСК для выяснения между спектральных корреляционных связей в сигналах, рассеянных морской поверхностью, гидрометеоры, объектами, а также в сигналах КВ и УКВ радиовещательных станций.

**Ключевые слова:** рассеяние радиоволн, РЛС, интерференционные явления, коэффициент преломления тропосферы, ЭПР, матрицы корреляции, нееквидистантные решетки, инверсионный слой, подстилающая поверхность.

## ABSTRACT

Popov IV Monitoring of environment by using radiation from existing ground and space-based radio systems. - The manuscript.

Thesis for a Candidate Degree of Physical and Mathematical Sciences by specialty 01.04.03 -radiophysics. - O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to solving the problem of developing methods for monitoring the refractive properties of the troposphere, sea waves, solving radar problems using existing HF radio broadcasting, VHF television stations, global navigation satellite systems GPS, GLONAS.

A technique for determining the parameters of inversion layers of the troposphere on the interference structure of the signal and assessing the refractive properties of the troposphere, based on the amplitude and angles of arrival of VHF signals on the over-the-horizon path, using antennas spaced apart on height, is developed.

A technique for assessing the detection range and RCS of air objects for active - passive sensing systems has been developed. It has been theoretically evaluated and experimentally established that the RCS of aircraft in the HF band in the resonant region for horizontal and vertical polarization can reach thousands of square meters.

A technique has been developed for the application of signals from global satellite navigation systems for diagnosing the state of the sea surface and sea waves monitoring on fluctuations and fading of the received GNSS signal.

Based on the properties of magic squares, a technique for the synthesis of non-equidistant rarefied antenna arrays is proposed, which provide a sufficiently low level of side lobes at a high degree of rarefaction.

It is proposed to use MSCC to clarify within spectral correlations in signals scattered by the sea surface, hydrometeors, objects, as well as in the signals of HF and VHF broadcasting stations.

**Key words:** scattering of radio waves, radar, interference phenomena, tropospheric refractive index, RCS, correlation matrices, nonequidistant gratings, inversion layer, underlying surface.