

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ТИМОЩУК ОЛЕНА МИКОЛАЇВНА

УДК 621.396.96.095.4

**СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНИХ
НАДШИРОКОСМУГОВИХ РАДІОМЕТРИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному університеті інфраструктури та технологій МОН України

Науковий консультант Заслужений винахідник України, доктор технічних наук, професор БОГОМ'Я Володимир Іванович, ректор інституту підготовки фахівців ДП «УкрНДНЦ» Міністерства економічного розвитку та торгівлі України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник БИКОВ Віктор Миколайович, професор кафедри теоретичної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти та науки України

доктор технічних наук, доцент ВАСИЛИШИН Володимир Іванович, начальник кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба Міністерства оборони України

доктор технічних наук, професор ПАШКОВ Дмитро Павлович, провідний фахівець лабораторії космічних систем дистанційного зондування Землі, навігації, зв'язку та контролю космічного простору центру спеціальних програм Національного центру управління та випробування космічних засобів Державного космічного агентства України.

Захист відбудеться “10” листопада 2017 р. о 13⁰⁰ – годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: кімн. №13, пр. Науки, 14, м. Харків, 61166.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки МОН України за адресою: пр. Науки, 14, м. Харків, 61166 та на веб-сайті ХНУРЕ за адресою: <http://nure.ua/university/structure/science/theses-counsils/d-64-052-03>.

Автореферат розісланий “9” жовтня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. До перспективних напрямків розвитку радіотехнічних систем (РТС) можна віднести загальносвітову тенденцію наслідування принципів “Green Engineering”: зниження енергоспоживання; зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище і біологічні об'єкти; зменшення масогабаритних характеристик і ін. Цим вимогам задовольняють мікрохвильові пасивні радіотехнічні комплекси (ПРТК), які обробляють власне радіовипромінювання або випромінювання сторонніх джерел, перевідбите досліджуваними об'єктами. Розвиток ПРТК залежить від досягнень мікрохвильової радіометрії – області науки і техніки, пов'язаної з вивченням і розробкою методів і засобів прийому мікрохвильового випромінювання, вимірювання його параметрів і характеристик. Методи мікрохвильової радіометрії широко використовуються для вирішення задач дистанційного зондування, радіоастрономії, медицини, метеорології, агропромислового комплексу і контролю водних акваторій, охорони об'єктів і ін.

Слід зазначити, що переважна більшість сучасних радіометрів обробляють вузькосмугові сигнали і, відповідно, методи вилучення інформації, які передбачають вирішення зворотних задач, прийнятні у вузькосмуговому наближенні. У той же час ширина робочої смуги частот є вельми важливим параметром радіометрів, який визначає їх основні параметри та характеристики. Зокрема, розширення робочої смуги знижує похибку оцінок параметрів радіотеплового випромінювання об'єктів, а також покращує флуктуаційну чутливість приймача і зменшує неоднозначності вимірювання просторових координат. Останні є причиною значного рівня дифракційних пелюсток функції невизначеності (ФН) ПРТК. Тому можна стверджувати, що вузькосмугове наближення суттєво обмежує потенційні характеристики ПРТК.

Обробка надширокосмугових (НШС) сигналів у одно- та багатоканальних радіометрах значно покращує їх показники якості. Тому найбільш перспективним є перехід до обробки НШС у ПРТК. На сьогодні такі комплекси найбільш затребувані у радіоастрономії та дистанційному зондуванні Землі. Наразі вагомі відомості щодо розвитку радіоастрономії отримують за допомогою ALMA (Atacama Large Millimeter and Submillimeter Area, Чилійські Анди), GIANT, VLA (Very Large Antenna, Пуна, Індія), SKA (Square Kilometer Area, Австралія, ПАР та Нова Зеландія) і ін. Особливість цих комплексів у тому, що вони за рахунок обробки просторово-часових сигналів (вузькосмугових) дозволяють отримати вузькоспрямовані однопелюсткові ФН з використанням системи розріджених антен, а не однієї континуальної антени великого розміру. Платою за використання розріджених антенних решіток є зменшення флуктуаційної чутливості по відношенню до континуальних (суцільних) антен. Наразі найбільша база ПРТК реалізована у проєкті «Радиоастрон» – 189 000 км.

Позитивний досвід радіоастрономів перейнято для дослідження Землі з космосу. Так проєкт Європейської космічної агенції «SMOS» (Soil moisture and ocean salinity) дозволяє отримувати радіометричні зображення акваторій морів і

океанів з найбільшою (серед існуючих дециметрових радіометрів космічного базування) розрізнявальною здатністю – 25 км² на піксель зображення. Ці радіометричні зображення через вирішення зворотних задач дозволяють визначати солоність вод та вологість ґрунтів у глобальних масштабах.

Для сучасних ПРТК характерні наступні риси: використання великої кількості (десятки і сотні) антен задля досягнення однозначних вузько спрямованих ФН; значне енергоспоживання (сотні і тисячі кореляторів, які оброблюють сигнали на виходах) та потреби у високих розрахункових потужностях і системах охолодження. Все це обмежує можливість застосування існуючих ПРТК у таких галузях як народне господарство, медицина і ін. У той же час їх облік можна змінити за рахунок обробки НШС просторово-часових сигналів. Особливо слід відзначити досягнення цифрової елементної бази, яка дозволяє реалізовувати гнучкі алгоритми обробки сигналів, наприклад аналого-цифрові перетворювачі з бітністю 14 і більше, програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС) з наносекундною затримкою на вентилях.

Проте ці досягнення техніки мають супроводжуватися відповідними досягненнями у створенні алгоритмів обробки НШС сигналів. Можливі два варіанти розвитку теоретичних відомостей: евристичний та статистичний. Евристичний є наслідком накопичення практичних знань та передбачувані на їхній основі ефективних операцій з обробки сигналів. Він потребує мінімальних відомостей щодо статистичної природи сигналів, але характеризується наступними недоліками: застосовується висококваліфікованими спеціалістами; не завжди є інваріантним до зміни умов проведення експериментальних досліджень, а також ускладнюється вибором конкретних значень параметрів налаштування систем, кожен з яких може змінюватися у широких межах.

Ці недоліки не властиві статистичному підходу, який передбачає синтез алгоритмів оптимальної (за обґрунтованим критерієм) обробки сигналів і розробки на їхній основі структури ПРТК. Тому доцільно саме розробляти статистичну теорію ПРТК.

Розглянемо досягнення сучасної теорії ПРТК. У роботах Єсепкіної Н. О., Королькова Д.В. і Парійського Ю.М., а також монографіях зарубіжних авторів К. Ван Схонвелда, Томпсона А.Р., Уїлсона Т. та ін. ПРТК наведено лише оглядово. Питання статистичного синтезу ПРТК розглядалися у монографії Караваєва В.В. та Сазонова В.В. Слід зазначити, що підґрунтям для цих робіт стали публікації Мартіна Райла, у яких описано метод так званого пасивного «апертурного синтезу» та його практичну реалізацію. Загалом, робіт, які стосуються методу апертурного синтезу, досить багато і їх неможливо охопити у огляді. Наразі лише Караваєв В.В. досить стисло вказується на перспективність створення ширококугових ПРТК. Проте, уже у 2007 році німецькі інженери М. Jirousek, М. Peichl, Н. Suess, як це характерно для науки, передбачили доцільність розробки та технічно реалізували НШС систему апертурного синтезу. Проте підхід до створення цієї системи був суто інженерним і результати експериментальних досліджень цієї системи у літературі не відображено.

Базові елементи теорії НШС ПРТК кристалізувалися у працях Волосюка В.К. Передумовою появи цих праць стало створення Волосюком В.К. математичних перетворень, які у літературі отримали назву V -перетворень. Ці перетворення є узагальненням перетворень Фур'є, Лапласа, Френеля, Ганкеля на випадок обробки НШС просторово-часових полів та їх статистичних характеристик. Особливістю робіт є те, що НШС поля опрацьовуються переважно у континуальній області та пропонується задля використання теорії здійснювати розбиття цієї області на заключному етапі синтезу, тобто модифікувати саме кінцеву форму алгоритму. Цей шлях не дозволяє відстежити низку особливостей обробки НШС сигналів і тому більше визначає напрямок досліджень, а не визначення практичних особливостей обробки просторово-часових сигналів.

Таким чином, з аналізу слідує, що на сьогодні методи та комплекси мікрохвильової радіометрії широко застосовуються у різних галузях науки і техніки. При цьому вимоги до цих методів та комплексів стрімко зростають, що породжується викликами сучасності щодо підвищення вимог до точності, надійності та оперативності прийняття рішень. Вузкосмугове наближення може забезпечити ці вимоги, проте для цього потрібно суттєво (на порядок і більше) збільшувати кількість просторових каналів обробки сигналів, що значно збільшує не тільки економічні затрати на створення системи, але й протирічить тенденціям «Green Engineering». Альтернативний варіант – перехід до обробки НШС сигналів. Можливість технічної реалізації таких комплексів частково продемонстрована німецькими інженерами. Проте вони не здатні надати ґрунтовних пояснень та фізичної інтерпретації результатам, які спостерігають за допомогою НШС систем. Все це призводить до того, що наразі повною мірою сформувалося наступне протиріччя: *з однієї сторони є необхідність переходу до обробки НШС сигналів, надто, просторово-часових НШС полів, і є необхідна елементна база, а з іншої – статистична теорія НШС пасивних радіотехнічних комплексів має фрагментарний характер і потребує проведення ґрунтовних досліджень та узагальнення.* Це протиріччя породжує актуальну наукову проблему подальшого розвитку статистичної теорії структурного синтезу та аналізу надширококузових пасивних радіотехнічних комплексів і розробки на її основі високоточних комплексів дво- і тривимірного картографування об'єктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження відповідає Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11 липня 2001 року № 2623-III, постанові КМУ «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року», «Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року» та виконано у інтересах науково-дослідних робіт: «Розробка комплексного показника якості пасажирських круїзних суден змішаного плавання в системі безпересадкових круїзних перевезень між портами Дніпра, Чорного моря та Дунаю (№ ДР 0116u03946), яка виконувалася у Київській державній академії водного транспорту, а також «Методи та засоби ідентифікації об'єктів дистанційного спостереження за допомогою радіотехнічних та

діагностичних комплексів аерокосмічного базування», № ДР 0113u000577; «Розвиток теорії, методів та засобів високоточного дистанційного моніторингу природних середовищ надширокосмуговими багатоканальними радіометричними системами», № ДР 0116u003788, які виконувалися в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» у яких автор приймала участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Мета – подальший розвиток статистичної теорії структурного синтезу пасивних радіотехнічних комплексів, розробка на її основі комплексів дво- і тривимірного картографування протяжних об'єктів з дослідженням їх потенційних характеристик.

Для досягнення поставленої мети дослідження потрібно вирішити наступні завдання: провести аналіз математичного апарату V -перетворень та особливостей його застосування для вирішення задач статистичного синтезу ПРТК та інтерпретації параметрів та характеристик надширокосмугових ПРТК; уточнити моделі стохастичних просторово-часових полів радіотеплового випромінювання об'єктів у ближній (Френеля) та дальній (Фраунгофера) зонах; математично формалізувати задачі статистичного синтезу ПРТК різного цільового призначення з розкриттям функціоналів правдоподібності та статистичних характеристик полів та шумів; синтезувати алгоритми оптимальної обробки сигналів радіотеплового випромінювання з метою формування двовимірних радіометричних зображень високого просторового розрізнення, обґрунтувати можливість переходу до квазіоптимальної обробки сигналів і розробити відповідні структурні схеми ПРТК; оптимізувати алгоритми тривимірного картографування об'єктів за допомогою ПРТК, які розміщуються у ближній зоні Френеля відносно протяжних об'єктів дослідження, розробити відповідні структурні схеми ПРТК; розробити методику визначення границь вузько-, широко- та надширокосмуговості ПРТК, яка б враховувала як робочу смугу частот, так і взаємне просторове розміщення антен у антенній решітці, і вигляд ФН ПРТК; дослідити особливості заповнення області просторової спектральної чутливості ПРТК за рахунок трансформації часових частот у просторово-часові; встановити критичні точки існуючої теорії статистичного синтезу ПРТК та вказати шляхи їх подолання; дослідити ФН ПРТК; розробити методику підвищення якості радіометричних зображень, яка б дозволила усунути похибки, які виникають за рахунок значного інтегрального рівня бічних пелюсток ФН; показати можливість створення ПРТК контролю прибережних зон водних акваторій.

Об'єкт дослідження – обробка просторово-часових надширокосмугових сигналів в пасивних радіотехнічних комплексах.

Предмет дослідження – методи, алгоритми і структурні схеми обробки надширокосмугових просторово-часових сигналів в пасивних радіотехнічних комплексах високоточного дво- та тривимірного картографування протяжних об'єктів.

Методи дослідження: методи математичної статистики, функціонального аналізу та оптимальних рішень при вирішенні задач статистичного синтезу

структур пасивних надширокосмугових радіотехнічних комплексів дво- та тривимірною картографування протяжних об'єктів; методи спектрально-кореляційного аналізу і математичний апарат V-перетворень при дослідженні просторових та статистичних характеристик просторово-часових сигналів, а також просторово-спектральних характеристик пасивних радіотехнічних комплексів; методи імітаційного моделювання для підтвердження достовірності синтезованих алгоритмів обробки сигналів та розроблених методів вторинної обробки радіометричних зображень.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Отримали подальший розвиток моделі НШС просторово-часових сигналів, які на відміну від відомих дозволяють врахувати кривизну хвильового фронту поля між просторово-рознесеними антенами для дослідження об'єктів у ближній зоні Френеля, що дозволило формалізувати оптимізаційну задачу структурного синтезу пасивної радіотехнічної системи тривимірною картографування протяжних об'єктів.

2. Удосконалено метод заповнення області просторово-спектральної чутливості систем апертурного синтезу надширокосмуговими просторово-часовими сигналами і показано, що запропонований спектральний метод апертурного синтезу відрізняється від відомих паралельного і послідовного методів апертурного синтезу визначеним автором законом нерівномірного заповнення області просторово-спектральної чутливості, що не спостерігалось раніше. Це вперше дозволило обґрунтувати можливість переходу від обробки надширокосмугових до багатосмугових просторово-часових сигналів з нееквідистантним кроком по частоті.

3. Вперше введено нові та удосконалено ряд наявних визначень, які традиційно використовуються для опису вузькосмугових сигналів, для адекватного визначення фізичної сутності статистичних характеристик надширокосмугових просторово-часових сигналів і алгоритмів їх обробки.

4. Уперше отримано точні явні рішення задач структурного синтезу пасивних надширокосмугових радіотехнічних комплексів високоточного формування радіометричних зображень об'єктів, які розміщені у дальній зоні Фраунгофера, на випадок використання антенних систем з довільним числом елементів. Вперше надано фізичну інтерпретацію радіометричних зображень, отриманих багатоканальними пасивними радіометричними комплексами, зокрема, показано, що вони представляють собою вагові усереднення радіометричних зображень, отриманих на континуумі робочого діапазону частот.

5. Вперше в результаті вирішення зворотних задач формування радіометричних зображень розроблено метод інверсної просторової фільтрації первинних двовимірних радіометричних зображень, який передбачає попереднє оцінювання узагальненої функції невизначеності комплексу і наступне їхнє відновлення з точністю, яка суттєво вища за ту, яка визначається функцією невизначеності системи на кожній з частот у межах робочого діапазону. Особливістю запропонованого методу є те, що він може застосовуватися для

обробки зображень, які, окрім протяжних, містять хоча б одне точкове джерело радіовипромінювання.

6. Вперше запропоновано, синтезовано та ґрунтовно досліджено пасивні радіотехнічні системи тривимірного картографування протяжних об'єктів, які на відміну від активних систем картографування характеризуються меншою точністю, але не потребують зондуючого сигналу і у майбутньому при удосконаленні елементної бази для обробки надширокосмугових сигналів здатні будуть конкурувати по точності з активними.

7. Запропоновано новий критерій вузько-, широко- та надширокосмуговості для ПРТК, який на відміну від відомих, передбачає аналіз функції невизначеності пасивного радіометричного комплексу і, відповідно, залежить не тільки від відношення ширини робочої смуги частот до центральної частоти налаштування приймача, а й від розміщення антенної системи. Цей критерій усуває наявні розбіжності у визначенні належності систем до вузько-, широко- та надширокосмугових.

Практичне значення одержаних результатів:

1) отримані відомості є підґрунтям для формування обліку перспективних високоточних ПРТК дво- і тривимірного картографування;

2) запропонований та розрахований ПРТК контролю акваторій може бути використаний для створення перспективних прибережних систем виявлення-супроводження надводних суден;

3) методики розрахунку характеристик спрямованості ПРТК можуть бути використані для обґрунтування вибору їх основних параметрів та характеристик при проектуванні, зокрема, при фіксованій антенній системі можна обґрунтувати робочий діапазон частот, який забезпечить вирішення задачі з заданою точністю;

4) аналітичні вирази для розрахунку потенційної флуктуаційної чутливості та граничної похибки оцінок параметрів доцільно використати для визначення меж, до яких слід наближатися при проектуванні ПРТК.

Результати дисертаційних досліджень реалізовано у наступних організаціях: Державному підприємстві «Морський торговельний порт Усть-Дунайськ», Київській державній академії водного транспорту; Інституті підготовки фахівців ДП «УкрНДНЦ»; Підприємстві ГВСП «Кілійський суднобудівельний-судноремонтний завод» ПрАТ «УДП»; Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; дочірньому підприємстві «Захист і автоматизація об'єктів НДІРВ».

Зокрема реалізовані наступні результати досліджень:

– запропонований та розрахований пасивний радіотехнічний комплекс контролю акваторій може бути використаний для створення перспективних прибережних систем виявлення-супроводження надводних суден;

– запропоновані методики розрахунку характеристик спрямованості пасивних радіотехнічних систем можуть бути використані для обґрунтування вибору їх основних параметрів та характеристик на етапі проектування, зокрема, при фіксованій антенній системі можна обґрунтувати робочий діапазон частот, який забезпечить вирішення задачі з заданою точністю, і навпаки, розрахувати

можливу геометрію антенної системи та визначити кількість антен у ній при фіксованій робочій смузі комплексу;

- аналітичні вирази для розрахунку потенційної флуктуаційної чутливості та граничної похибки оцінок параметрів доцільно використати для визначення меж, до яких слід наближатися при проектуванні нових пасивних радіотехнічних комплексів;

- структурна схема та супровідні розрахунки пасивного радіотехнічного комплексу контролю прибережних зон водних акваторій разом з методикою подавлення фантомних об'єктів на радіозображенні;

- методика розрахунку функції невизначеності надширокосмугових пасивних радіотехнічних комплексів з багатоелементними антенними системами увійшли до звіту з НДР №ДР 0113u000577;

- запропоновані визначення характеристик пасивних радіотехнічних комплексів, які є більш адекватними при аналізі надширокосмугових полів радіотеплового випромінювання увійшли до звіту з НДР № ДР 0116u003788.

Результати досліджень впроваджені у навчальні дисципліни «Сучасні методи експериментальних досліджень та обробки даних в навігації та управлінні судном», «Технічні засоби судноводіння», «Сучасні автоматизовані системи управління рухом суден. Навігаційні інформаційні системи з електронними картами. Інформаційні технології».

Особистий внесок здобувача. Формулювання і рішення задач, які наведено у роботах [1–6, 39,40], виконано автором самостійно.

У наукових статтях, опублікованих у співавторстві, автору належать наступні результати:

- дослідження фізичних можливостей вимірювання дальності до елемента протяжного об'єкта виконано у [10];

- обґрунтування доцільності вирішення задачі та синтез оптимального алгоритму виявлення протяжного об'єкта у зоні дії пасивного радіотехнічного комплексу виконано у [11, 25, 31];

- узагальнення алгоритму виявлення протяжного об'єкту у системі тривимірного картографування на випадок використання N -елементної антенної решітки виконано у [12, 30];

- обґрунтування необхідності розробки теорії та розробка структурної схеми з наступним імітаційним моделюванням її роботи виконано у [13, 41];

- синтезовано алгоритм формування радіометричних зображень альтернативний системам апертурного синтезу, який потребує сканування діаграмою спрямованості антени у [14];

- досліджено алгоритм оптимального формування двовимірних зображень з найкращою у своєму класі радіометрів флуктуаційною чутливістю у [15];

- синтез алгоритму високоточного формування радіометричного зображення у надширокосмуговому пасивному радіотехнічному комплексі з двома антенами виконано у [16, 26];

- отримано явний алгоритм обробки сигналів у триантенному пасивному радіометричному комплексі у [17, 28, 32];

– досліджено явний алгоритм обробки сигналів для формування двовимірних радіометричних зображень високого просторового розрізнення за допомогою надширокосмугових пасивних радіотехнічних комплексів у [7, 23, 34, 37];

– визначено квазіоптимальні геометрії антенних решіток для різних ширин робочого діапазону частот та досліджено їх функції невизначеності у [19];

– досліджено фізичну сутність полів радіотеплового випромінювання поблизу антенної системи та записано функціонали правдоподібності для різних завадових обставин у [20, 38];

– у [21, 22, 33] встановлено фізичну сутність деяких V_F -перетворень відповідно до обробки надширокосмугових сигналів згідно синтезованих алгоритмів оптимальної обробки;

– у [18, 35, 36] запропоновано деякі нові визначення параметрів надширокосмугових просторово-часових сигналів та їх статистичних характеристик, а також розроблено їх математичне формалізоване представлення;

– у [8, 9] з аналізу статистичних характеристик надширокосмугових просторово-часових сигналів пропонуються декілька евристичних алгоритмів визначення радіояскравісних зображень у пасивних радіотехнічних комплексах;

– постановка задачі та дослідження алгоритму тривимірного картографування підстильної поверхні у ближній зоні Френеля виконано у [24];

– запропоновано та синтезовано алгоритм обробки сигналів для створення системи контролю прибережних зон акваторій [27];

– постановка задачі, структурний синтез багатоантенних надширокосмугових ПРТК [29].

Апробація результатів дисертації. Результати дослідження апробовані на наступних конференціях: International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). – April 21–24, 2015, Kharkiv, Ukraine; International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF-2015). – September 29 – October 2, 2015, Dnipropetrovsk, Ukraine; Eighth International Conference «Acoustooptical and Radar Methods for Information Measurements and Processing», Sept. 20 – 23, 2015, Suzdal, Russia; Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні. ІКТМ'2015 : Всеукр. наук.-техн. конф. : тези доп. / М-во освіти і науки України, Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Х., 2015; Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених і студентів «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2015, 25-27 листопада 2015 р., Дніпропетровськ, Україна, 2015; The IX International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16) : symp. proc., Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016; Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science. TCSET'2016 : proc. of the XII Intern. conf., Feb. 23–26, 2016, Lviv-Slavsko, Ukraine; Ninth International Conference «Acoustooptical and Radar Methods for Information Measurements and Processing», October 2 – 5, 2016, Suzdal, Russia;

Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. (UWBUSIS 2016) Sept., 2016, Odesa; First International Conference “Radioelectronics & Infocommunications” UKRCON’2016, Kyiv, 11–16 Sept., 2016, Ukraine; IEEE Radar Methods and Systems Workshop, RMSW’2016, Kyiv, 27–28 Sept., 2016.

Публікації. Основні результати дослідження опубліковані у 41 науковій праці, серед них: у 23 статтях (23 статі у наукових фахових виданнях України, з яких 16 статей входять до міжнародних наукових баз даних, 1 – у закордонному виданні), у 2 тезах доповідей і 13 збірниках доповідей в працях міжнародних конференцій, 3 звітах по НДР.

У Scopus відображено 8 робіт (сторінка у Scopus <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56784308400>).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить вступ, шість розділів, висновки, два додатки, список використаних джерел. Повний об’єм дисертації – 265 сторінок, у тому числі 14 сторінок додатків, 31 сторінка списку використаних джерел у кількості 194 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Перший розділ містить аналіз фізичних основ радіотеплового випромінювання та конструювання пасивних радіотехнічних комплексів високого просторового розрізнення. Наведено визначення, співвідношення та закони радіотеплового випромінювання. Проаналізовано принципи конструювання та особливості функціонування ПРТК високого просторового розрізнення SMOS, VLA, GIANT, ALMA, SKA. Дано основні відомості щодо статистичного синтезу радіотехнічних систем, зокрема, розкрито особливості конструювання умовних щільностей ймовірностей спостережень. Обґрунтовується доцільність обробки НШС просторово-часових полів.

У другому розділі «Математична формалізація основних визначень, які використовуються для обґрунтування постановок і вирішень задач оптимальної статистичної обробки просторово-часових НШС сигналів» розглянуто та удосконалено математичний апарат V -перетворень. Виконані дослідження дозволили обґрунтувати низку нових математично формалізованих визначень, які обґрунтовують основні характеристики НШС антенних систем і спектрально-кореляційні характеристики просторово-часових (ПЧ) сигналів в областях їх спостереження, а також знайти аналітичні вирази для формування моделей радіометричних зображень (РМЗ) протяжних джерел НШС випромінювання. Зокрема, зв’язок радіотеплового хвильового поля в площині реєстрації антенною системою та спектрально-кутової щільності комплексної амплітуди власного випромінювання об’єкта пов’язані між собою прямим V_F та зворотнім V_F^{-1} перетвореннями

$$f^{-2}c^2\dot{A}(\vec{q}, f) = V_F [s(\vec{r}', t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int s(\vec{r}', t) \exp\{-j2\pi f(t \pm c^{-1}\vec{q}\vec{r}')\} dt d\vec{r}', \quad (1)$$

$$s(\vec{r}', t) = V_F^{-1} [\dot{A}(\vec{\vartheta}, f)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{A}(\vec{\vartheta}, f) \exp\{j2\pi f [t \pm c^{-1} \vec{\vartheta} \vec{r}']\} df d\vec{\vartheta}. \quad (2)$$

Тут $\dot{A}(\vec{\vartheta}, f)$ – спектральна щільність комплексної амплітуди випромінювання (СЩКА) по часовим частотам f і просторовим координатам $\vec{\vartheta}$; $s(\vec{r}', t)$ – поле в області його реєстрації D' , яке залежить від часу $t \in (0, T_{ob})$ і просторових координат $\vec{r}' = (x', y') \in D'$; c – швидкість розповсюдження поля; $\vec{\vartheta} = [\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z]^T = [\cos \theta_x, \cos \theta_y, \cos \theta_z]^T$ – вектор напрямних косинусів, який характеризує кутові положення елементів просторово-протяжних джерел випромінювання чи розсіювання електромагнітних хвиль, « T » – оператор транспонування вектора.

Пряме V_ϕ та зворотне V_ϕ^{-1} перетворення дозволяють аналізувати НШС поля у ближній зоні Френеля (має важливе значення для синтезу пасивних систем дальнометрії)

$$R_0 f^{-2} c^2 \dot{A}(\vec{r}, f) = V_{\phi 1} [s(\vec{r}', t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s(\vec{r}', t) \exp\{-j2\pi f R_0^{-1} c^{-1} (t - 0,5 |\vec{r} - \vec{r}'|^2)\} dt d\vec{r}', \quad (3)$$

$$s(\vec{r}', t) = R_0^{-1} V_{\phi 1}^{-1} [\dot{A}(\vec{r}, f)] = R_0^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{A}(\vec{r}, f) \exp\{j2\pi f (t - 0,5 R_0^{-1} c^{-1} |\vec{r} - \vec{r}'|^2)\} df d\vec{r}. \quad (4)$$

Тут R_0 – відстань між початками систем координат, пов'язаних з областями випромінювання D і реєстрації D' ; $\dot{A}(\vec{r}, f)$ – СЩКА відносно частот f і координат $\vec{r} = (x, y) \in D$. Перетворення V_ϕ , V_ϕ^{-1} – є узагальненням перетворень Френеля на випадок опису НШС хвильових полів.

Функції $\dot{A}(\vec{\vartheta}, f) \exp(j2\pi f t) df d\vec{\vartheta}$ і $\dot{A}(\vec{r}, f) \exp(j2\pi f t) df d\vec{r}$ характеризують властивості окремих просторових елементів $df d\vec{\vartheta}$ і $df d\vec{r}$ об'єкту дослідження.

Математичний апарат V -перетворень обґрунтовує узагальнений вигляд теореми Ван Циттерта-Церніке, яка застосовується на етапі евристичного синтезу ПРТК апертурного синтезу.

У цьому ж розділі надано фізико-алгоритмічний опис математичного апарату V_F -перетворень, які містять основні операції спектрального аналізу полів у областях часових і просторових частот та відповідають фільтрації в часі і діаграмо-утворенні просторово-розподілених систем на задані ділянки протяжних джерел випромінювання або розсіювання сигналів. Введено ряд визначень (на кшталт часової імпульсної характеристики ПРТК, спектральна щільність просторової автокореляційної функції амплітудно-фазового розподілення і ін.) і математичних співвідношень, які необхідні для опису основних характеристик НШС антенних систем і спектрально-кореляційних характеристик ПЧ сигналів на їх входах і виходах.

Тут також виведено (евристичним шляхом) аналітичні вирази, які встановлюють однозначний зв'язок між РМЗ, характеристиками радіотеплового випромінювання об'єктів та характеристиками ПРТК, зокрема, введеними для аналізу НШС ПЧ сигналів.

У третьому розділі «Теоретичні основи синтезу просторово-розподілених радіометричних комплексів з оптимальною обробкою НШС радіометричних полів» визначено критичні точки існуючої теорії синтезу широкосмугових ПРТК та дістала подальшого розвитку теорія структурного синтезу НШС ПРТК з суттєво просторово-розподіленими багатоелементними антенними системами. Показано, що перехід до обробки НШС ПЧ радіометричних сигналів забезпечить високу точність оцінювання енергетичних та неенергетичних параметрів різноманітних джерел радіотеплового випромінювання, відносно низьку споживана потужність і повну біологічну безпеку та створює усі передумови конкурентоспроможності ПРТК з активними радіолокаційними системами. Проте такому розвитку повинна передувати відповідна теорія синтезу ПРТК на системному рівні.

Застосовуючи методи теорії функціонального аналізу та математичної індукції синтезовано узагальнений алгоритм обробки сигналів у НШС ПРТК з M -елементними антенними системами у такому вигляді

$$\begin{aligned} & \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^M \int_{-\infty}^{\infty} A_{eff} \left(f, \mathbf{g} - \mathbf{g}_0 \right) \mathcal{G}_{ji}^{\&1}(\cdot) e^{j2\pi f (\mathbf{g} - \mathbf{g}_0) \Delta \mathbf{a}_{ij}^{\mathbf{r}} c^{-1}} df = \\ & = \frac{1}{T_{ob}} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^M \int_{-\infty}^{\infty} A_{eff} \left(f, \mathbf{g} - \mathbf{g}_0 \right) \left| \mathcal{K}(j2\pi f) \right|^2 \left[\mathcal{G}_{ji}^{\&1}(\cdot) \right]^2 \times \\ & \quad \times \mathcal{U}_{T,i}^{\&}(j2\pi f) \mathcal{U}_{T,j}^{\&}(j2\pi f) e^{j2\pi f (\mathbf{g} - \mathbf{g}_0) \Delta \mathbf{a}_{ki}^{\mathbf{r}} c^{-1}} df, \end{aligned} \quad (5)$$

де $\mathcal{G}_{ji}^{\&1}(\cdot)$ – ij -й елемент матриці, зворотної до матриці спектральних щільностей потужностей (СЩП) спостережень; $A_{eff}(\cdot)$ – ефективна площа однієї антени у антенній системі (вважалося, що усі антени однакові); $\left| \mathcal{K}(j2\pi f) \right|$ – амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) вхідного тракту (до вибілюючого фільтру); $\mathcal{U}_{T,i}^{\&}(j2\pi f)$ – спектр спостереження на виході i -го каналу (i -ї антени і вхідного тракту з АЧХ $\left| \mathcal{K}(j2\pi f) \right|$); $\Delta \mathbf{a}_{ki}^{\mathbf{r}}$ – відстань між фазовими центрами i -ї та k -ї антен; c – швидкість світла. Слід відзначити, що на сьогодні точного рішення задачі відтворення РМЗ за допомогою ПРТК з антенною системою з довільним числом антен при спостереженні НШС сигналів на фоні корельованих шумів не існувало. Вираз (5) у часовій області знайдено у такому вигляді:

$$\hat{\mathbf{I}}_{A:} \left(\mathbf{g} \right) = \frac{1}{T_{ob}} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^M \int_0^{T_{ob}} u_{1,W}(t) u_{2,W} \left(t - 2\pi f \left(\mathbf{g} - \mathbf{g}_0 \right) \Delta \mathbf{a}_{ij}^{\mathbf{r}} c^{-1} \right) dt, \quad (6)$$

де $u_{i,w}(t)$ – спостереження у часовій області після вибілюючої фільтрації.

На рис. 1 показано структурну схему РМК з M елементною антенною системою, яка реалізує обробку сигналів згідно (6).

Схема працює наступним чином. Сигнали з виходів вхідних частин приймачів (Вх. тракт) надходять на вибілюючі фільтри (Φ) і далі на систему кореляторів (\times і $T_{ob}^{-1} \int dt$). На другі входи кореляторів надходять сигнали з інших каналів, попередньо пропущені через систему частотно-незалежних фазообертачів (ЧНФ) для вирівнювання фазового фронту. На виході кожного корелятора формується оцінка інтенсивності, як функції просторових координат. Виходи всіх пар кореляторів складуються. При правильно підібраній геометрії антенної системи і робочому діапазоні частот забезпечується формування РМЗ високого просторового розрізнення.

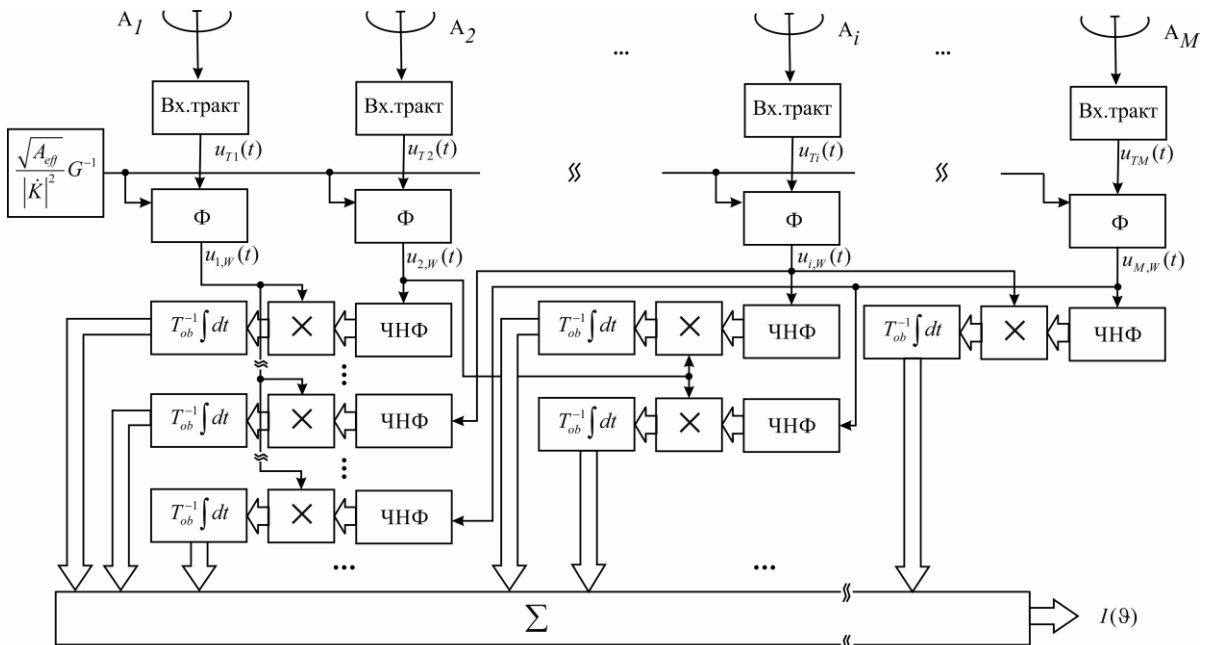


Рисунок 1 – Структурна схема ПРТК

Із лівої частини (5) вичленено узагальнену ФН ПРТК у вигляді

$$\Psi(\cdot) = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^M \int_{-\infty}^{\infty} A_{eff} \left(f, \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}} - \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}_0 \right) \mathcal{G}_{ji}^{\–1} \left(\cdot, B(f, \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}) = \delta(\overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}} - \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}_0) \right) e^{j2\pi f \left(\overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}} - \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}_0 \right) \Delta a_{ij}^{\mathbf{r}} c^{-1}} df, \quad (7)$$

де $\mathcal{G}_{ji}^{\–1} \left(\cdot, B(f, \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}) = \delta(\overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}} - \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}_0) \right)$ – ij -й елемент матриці, зворотної до матриці СЩП, в якому введено заміну $B(f, \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}) = \delta(\overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}} - \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}_0)$.

Узагальнена гранична похибки формування зображення

$$\sigma_B^2 \left(\overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}} - \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}_0 \right) = \left(\frac{T_{ob}}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \text{spur} [\underline{L}(\cdot)]^2 df \right)^{-1}, \quad (8)$$

де $\underline{L}(\cdot) = \frac{\delta \underline{G}(\cdot)}{\delta B(f, \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}')} \underline{G}^{-1}(\cdot)$ (тут $\delta/\delta B(\cdot)$ – варіаційна похідна) з елементами

$$L_{ij}(\cdot) = \sum_{r=1}^M \exp \left(j2\pi f (\overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}} - \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}_0) \Delta a_{ir} c^{-1} \right) G_{rj}^{-1}(\cdot), \quad G_{rj}^{-1}(\cdot) - rj\text{-й елемент матриці}$$

$\underline{G}^{-1}(\cdot)$, а слід цієї матриці знайдено у наступному вигляді:

$$\text{spur} [\underline{L}(\cdot)]^2 = 2^{1-\delta_{ij}} \sum_{i,j=1}^M \left\{ \begin{array}{l} \sum_{r=1}^M \exp \left(j2\pi f (\overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}} - \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}_0) \Delta a_{ir} c^{-1} \right) G_{rj}^{-1}(\cdot) \times \\ \times \sum_{r=1}^M \exp \left(j2\pi f (\overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}} - \overset{\mathbf{r}}{\mathcal{G}}_0) \Delta a_{jr} c^{-1} \right) G_{ri}^{-1}(\cdot) \end{array} \right\}, \quad (9)$$

δ_{ij} – символ Кронекера.

Для багатьох практичних задач, реалізація складних вибілюючих фільтрів є не обов'язковою. Особливо це актуально з економічної точки зору. Тому у ряді випадків доцільно використовувати квазіоптимальні алгоритми обробки сигналів без вибілюючої фільтрації.

Формули (6) – (8) дають інженерне уявлення щодо принципу побудови ПРТК та аналізу їх характеристик спрямованості. Вони можуть бути використані на етапі проектування ПРТК з довільною кількістю антен і конфігурацією їх розміщення, а також стосовно вибору смуги пропускання.

З аналізу графіків функцій невизначеності (побудованих згідно (7)) слідує що традиційне для активної радіолокації розподілення вузькосмугова-широкосмугова-надширокосмугова система по відношенню ширини робочої смуги до центральної частоти налаштування приймача не справедливе для пасивної радіолокації. Виникає необхідність детального дослідження границь такого переходу, яке проводиться у наступному розділі.

Четвертий розділ присвячений дослідженню ФН РМК і розробленню критеріїв вузькосмуговості, широкосмуговості та надширокосмуговості ПРТК. Важливість цього дослідження полягає у тому, що на сьогодні один з основних критеріїв за яким активні радіолокаційні системи розділяють на вузькосмугові, широкосмугові та НШС є порівняння з порогом відношення ширини смуги ΔF робочих частот до центральної частоти f_0 високочастотної частини приймача. Таке розподілення не може бути перенесено на класифікацію ПРТК. У розділі не уточнюються відомі критерії, а розробляються нові критерії класифікації РМК, засновані на аналізі форми ФН ПРТК.

При дослідженні ФН ПРТК з багатоелементними антенними системами слід враховувати, що вона значною мірою залежить від геометрії їх просторового положення. Для моделювання ФН ПРТК (7) представимо його наступним чином (виконано перехід до квазіоптимальної обробки сигналів)

$$\Psi_Q(\cdot) = 2 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^M a_{xij}^{-1} c \int_0^\infty A_{eff} \left(f_{xij} a_{xij}^{-1} c, \vartheta_x - \vartheta_{x0}, \vartheta_y - \vartheta_{y0} \right) \times \\ \times \cos \left(2\pi f_{xij} \left(\vartheta_x - \vartheta_{x0} + a_{yij} a_{xij}^{-1} \left(\vartheta_y - \vartheta_{y0} \right) \right) \right) f_{xij}, \quad (10)$$

де $f_{xij} = f a_{xij} c^{-1}$ – просторова частота, $\Delta \mathbf{a}_{ij} = [a_{xij}, a_{yij}]$.

На рівні з ФН (10) для дослідження властивостей ПРТК аналізують функцію просторово-спектральної чутливості (ФПСЧ), яка пов'язана з ФН двовимірним перетворенням Фур'є по кутовим координатам, тобто

$$A_Q(\cdot) = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^M \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_{eff} \left(f_{xij} a_{xij}^{-1} c, \vartheta_x - \vartheta_{x0}, \vartheta_y - \vartheta_{y0} \right) \times \\ \times \exp \left(j2\pi \left[\left(f a_{xij}^{-1} - f' d_{xij}^{-1} \right) \left(\vartheta_x - \vartheta_{x0} \right) + \left(f a_{yij}^{-1} - f' d_{yij}^{-1} \right) \left(\vartheta_y - \vartheta_{y0} \right) \right] \right) df d\vartheta_x d\vartheta_y. \quad (11)$$

Досліджено ФН і ФПСЧ ПРТК з різними геометріями антенних систем і різною кількістю елементів (зокрема, досліджувалися суттєво розріджені антенні системи). Встановлено, що навіть при фіксованому відношенні $\Delta F / f_0$ розширення області просторової спектральної чутливості відбувається за рахунок розширення бази антени. Встановлено, що ПРТК у різних просторових напрямках та при різних геометріях антенної системи може проявляти чи не проявляти властивості надширокосмуговості. Зокрема, для ПРТК з двоантенною системою на малих базах не проявляє властивостей широкопсмуговості. У той же час, збільшуючи базу антенної системи спостерігається і розширення (вздовж однієї просторової частоти f_x) області просторової спектральної чутливості ($\text{supp} A_Q(\cdot)$). Це має важливе значення і призводить до нового (дослідженого у роботі) ефекту «модуляція синком» ФН ПРТК, який виникає при обробці сигналів у НШС ПРТК і не спостерігається при обробці квазімонохроматичних сигналів. Суть цього ефекту полягає у наступному: при фіксованому відношенні $\Delta F / f_0$ збільшення бази збільшує число дифракційних максимумів та з'являється огинаюча у вигляді функції $\sin(x)/x$ (рис. 2).

Досліджено залежність ФН ПРТК від відношення $\Delta F / f_0$. На рис. 3, 4 показано січні ФН і область ФПСЧ ПРТК з двоелементною антеною. На рис. 5–7 показані тривимірні зображення ФН РМК і двовимірні зображення їх січних площинами (ϑ_x, θ, z) . Встановлено, що при фіксованій базі можливо реалізувати

НШС ПРТК розширенням смуги пропускання при незмінній центральній частоті настройки приймача, що еквівалентно $\Delta F / f_0 = \text{var}$.

Виявлено ефект «зміни згинаючої ФН елементарної антени», який полягає у тому, що огинаюча ФН є усередненою по робочим частотам ПРТК (див. криву 2 на рис. 4.а). Слід зазначити, що для вузькосмугових процесів такого усереднення не спостерігається.

На рис. 5 показана триелементна антенна система, а на рис. 6, 7 – ФН та ФПСЧ ПРТК при різних значеннях відношення $\Delta F / f_0$ ($f_0 = 3 \text{ ГГц}$).

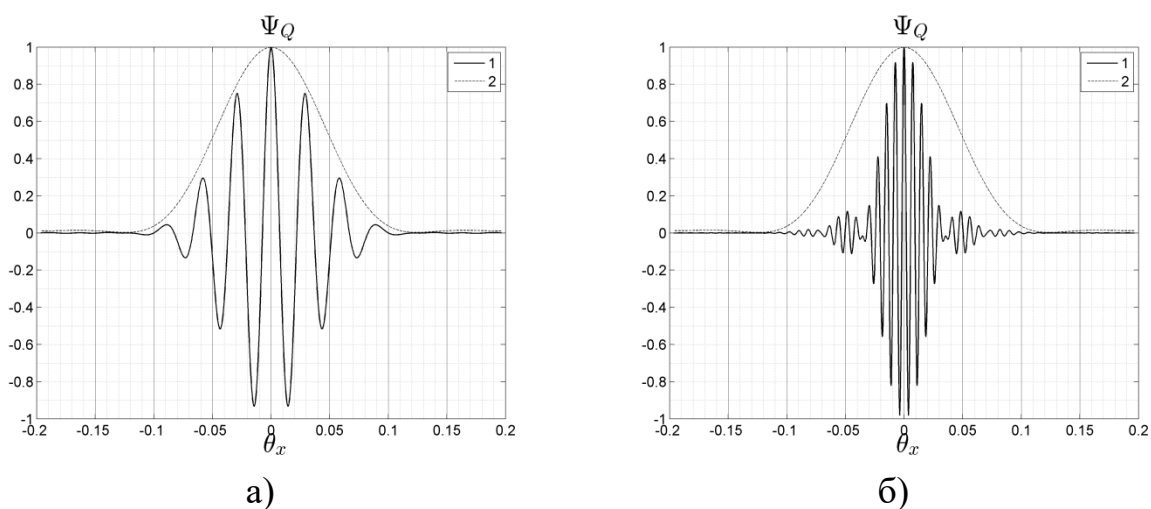


Рисунок 2 – Січні ФН двоантенного ПРТК для баз 3,41 м – а) і 19,41 м – б) (діаметр кожної антени 1 м, $\Delta F / f_0 = 0,2$, 1 – ФН ПРТК, 2 – ДС антени)

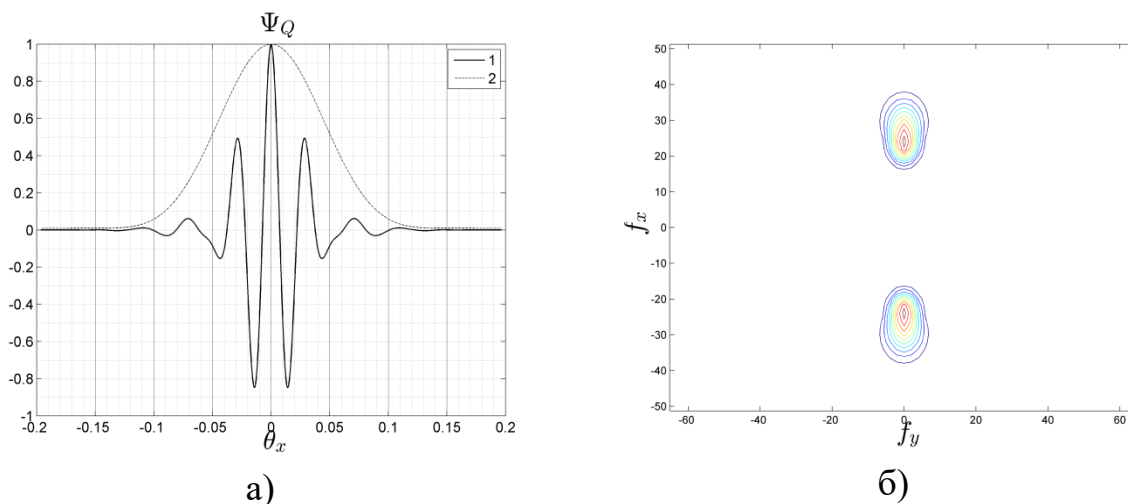
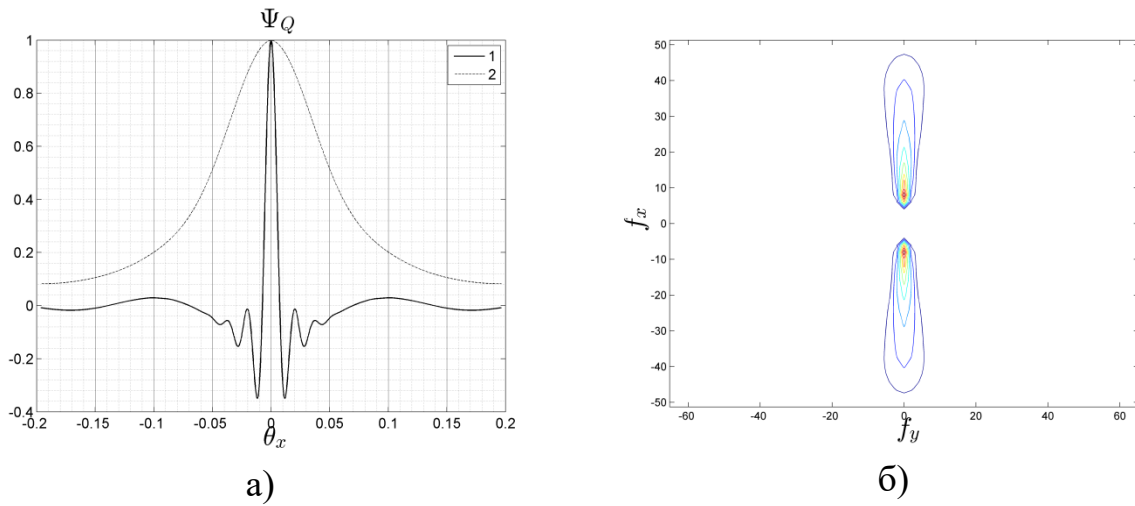


Рисунок 3 – Січна ФН двоантенного ПРТК при $\Delta F / f_0 = 0,5$ – 1.а, огинаюча ФН елементарної антени – 2.а, проекція ФПСЧ на площину $(f_x, 0, f_y)$ – б



а) б)
 Рисунок 4 – а) – Січна ФН двоантенного ПРТК при $\Delta F / f_0 = 1,5 - 1$ а; огинаюча ФН елементарної антени -2 а; б) – проєкція ФПСЧ на площину (f_x, θ, f_y)

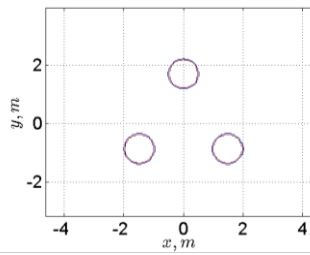
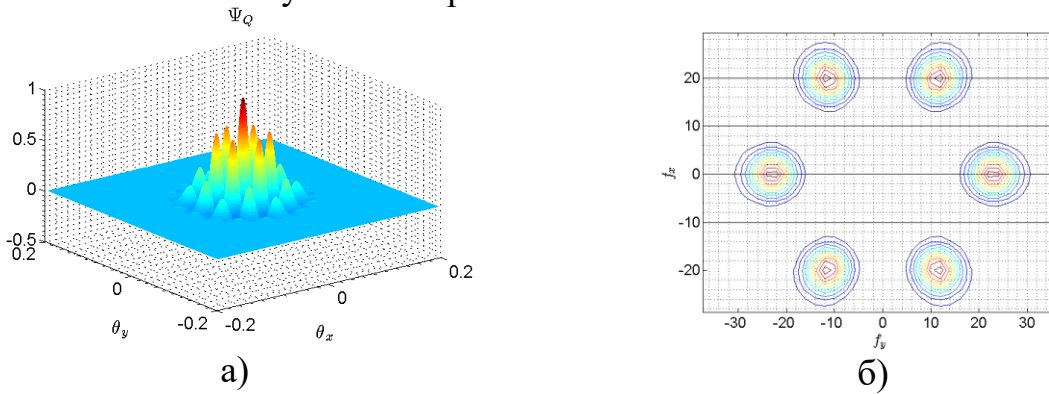
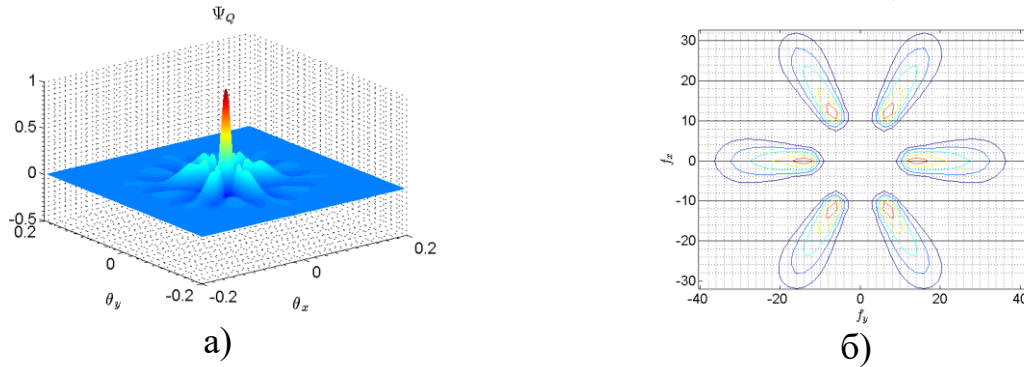


Рисунок 5 – Триелементна антенна система



а) б)
 Рисунок 6 – ФН – а) і ФПСЧ – б) ПРТК при $\Delta F / f_0 = 0,2$



а) б)
 Рисунок 7 – ФН – а) і ФПСЧ – б) ПРТК при $\Delta F / f_0 = 1$

З аналізу рис. 6, 7 слідує, що збільшення відношення $\Delta F / f_0$ призводить до розширення області реєстрації просторових частот і, відповідно, до зниження рівня дифракційних максимумів.

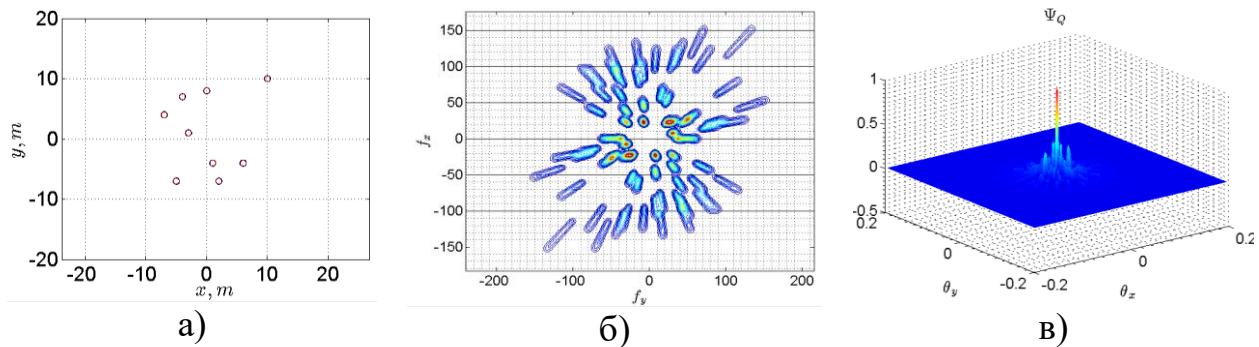


Рисунок 8 – Дев’ятиантенна решітка, сформована методом Монте Карло –а), область її просторово-спектральної чутливості при $\Delta F / f_0 = 0,3$ – б), ФН – в)

Аналізувалися різноманітні геометрії антенних решіток і їх ФН та ФПСЧ при різних значеннях $\Delta F / f_0$. На рис. 8 показана антенна система з випадковим розміщенням антен, ФН і ФПСЧ, а на рис. 9 – Y-подібна антенна і ФН та ФПСЧ. При моделюванні використано $\Delta F / f_0 = 0,3$, $f_0 = 3$ ГГц.

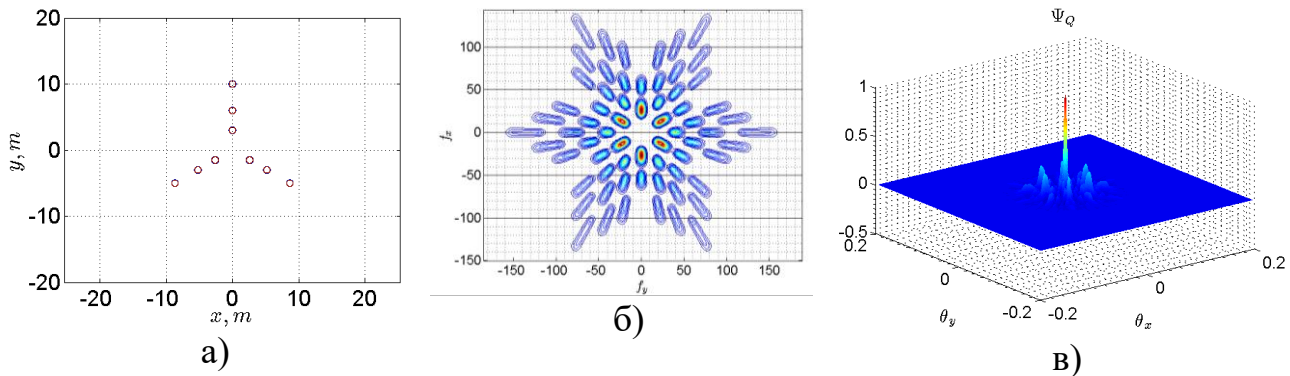


Рисунок 9 – Дев’ятиантенна Y подібна антенна решітка –а), область її просторово-спектральної чутливості при $\Delta F / f_0 = 0,3$ – б), ФН ПРТК – в)

Порівнюючи регулярні кругові та Y подібні антенні решітки та решітки з випадковим розміщенням елементів і їхні ФН отримано наступні висновки: геометрія антенної системи суттєво впливає на вигляд ФН ПРТК, а саме на рівень бічних пелюсток, їх інтегральний рівень і просторове положення; випадкове розподілення антен у заданій площі можливо має переваги над регулярним, але не при малій кількості антен; практично доцільним розміщенням невеликої кількості антен є кругове еквідистантне розміщення, яке забезпечує радіальну симетрію ФН РМК.

Отримані результати становлять підґрунтя для розробки критерію вузько-широко-надширокосмуговості ПРТК, який виражається одним числом, має ясну

фізичну сутність, відносно просто розраховується з аналізу ФН ПРТК. Це критерій відношення рівня максимальної бічної пелюстки $\max(\Psi_{Q,SL})$ до рівня головної пелюстки $\max(\Psi_{Q,ML})$

$$\begin{aligned}
 1 &\geq \frac{\max(\Psi_{Q,SL}(\cdot))}{\max(\Psi_{Q,ML}(\cdot))} \geq 0.8 && \text{– вузькосмуговий РМК,} \\
 0.8 &> \frac{\max(\Psi_{Q,SL}(\cdot))}{\max(\Psi_{Q,ML}(\cdot))} \geq 0.5 && \text{– широкосмуговий РМК,} \\
 0.5 &> \frac{\max(\Psi_{Q,SL}(\cdot))}{\max(\Psi_{Q,ML}(\cdot))} && \text{– надширокосмуговий РМК.}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Запропонований критерій є простим, але він не містить інформації щодо впливу загального об'єму бічних пелюсток на якість формування РМЗ. Вочевидь, що інтегральний об'єм бічних пелюсток значно перевищує об'єм головної пелюстки. Тому необхідно провести детальне дослідження впливу бічних пелюсток на якість формування РМЗ. Основні результати такого дослідження наведені у цьому ж розділі. Проведено моделювання РМЗ згідно лівої частини (5). У якості тестового зображення використана модель, показана на рис. 10, на якій представлено декілька характерних елементів (групи близько розміщених об'єктів, точкові об'єкти, текстурні області).

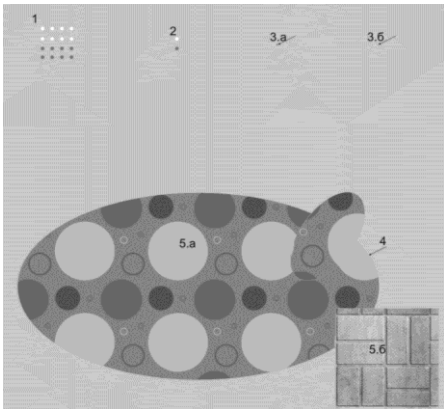


Рисунок 10 – Тестове зображення з характерними елементами:

1, 2 – групи об'єктів з різною інтенсивністю; 3.a і 3.б – малорозмірні (точкові) об'єкти (вказані стрілками); 4 – мало контрастна границя об'єкта; 5.a і 5.б – текстурні області зображення інформацію. Такі спотворення викликані значним інтегральним об'ємом бічних пелюсток.

Алгоритм формування РМЗ наведено на рис. 11 (див. блоки до первинного РМЗ). Нижче буде показано, що первинне РМЗ спотворено «проникаючою потужністю радіотеплового випромінювання об'єктів по бічним пелюсткам» і потрібно розробити методику підвищення якості РМЗ. Цій методиці відповідають блоки алгоритму, які розташовані після «Первинне РМЗ».

Результати моделювання РМЗ показані на рис. 12. З візуального аналізу рис. 12 слідує, що первинні РМЗ містять спотворену

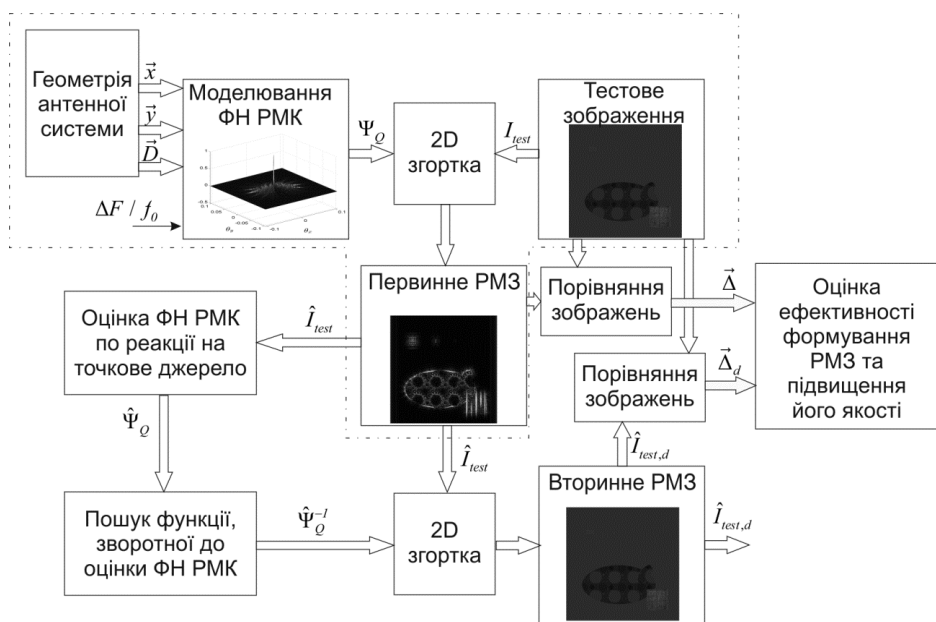


Рисунок 11 – Розширений алгоритм формування РМЗ, підвищення його якості та оцінки похибки формування РМЗ

Для підвищення якості первинних РМЗ була розроблена відповідна методика, яка містить наступні операції: визначається на первинному зображенні область, яка відповідає реакції системи на точкове джерело, та виділити цю область у якості оцінки усередненої по частотам ФН $\hat{\Psi}_\varrho$; математичним шляхом знаходиться функція, обернена до ФН; згортка цієї функції з первинним радіометричним зображенням підвищує якість РМЗ.



Рисунок 12 – Первинні РМЗ, отримані триелементною антенною системою: а) та дев'ятиелементною системою; б) ($f_0 = 3 \text{ ГГц}$, $\Delta f / f_0 = 0,01$)

Цій методиці відповідає частина алгоритму моделювання, яка знаходиться поза межами штрих-пунктирної лінії на рис. 11. На рис. 13 наведено вторинне РМЗ, отримане згідно з запропонованою методикою з первинного РМЗ, яке показано на рис. 12.б.

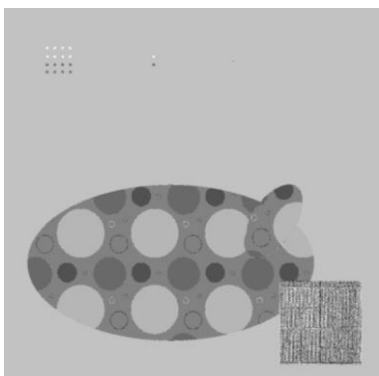


Рисунок 13 – Вторинне РМЗ

Проведене чисельне порівняння вторинного РМЗ та тестового зображень за SSIM та DSSIM метриками з аналізу яких слідує, що запропонована методика дозволяє отримати досить високу якість відновлення РМЗ. Виходячи з цього було запропоновано узагальнену структурну схему первинної і вторинної обробки радіометричної інформації, яку наведено на рис. 14. Робота структурної схеми, яка реалізує первинну обробку ПЧ радіометричних сигналів описана вище.

Результатом первинної обробки є первинне РМЗ $\hat{I}_{QA}(\mathcal{I})$, яке, як показано вище, може бути значно спотворене проникненням сигналів по бічним пелюсткам ФН ПРТК. Таке зображення повинно бути оброблено на етапі вторинної обробки (див. виділене пунктирною лінією на рис. 14), реалізація якої потребує відомостей щодо точної форми ФН ПРТК $\Psi_{\varrho}(\cdot)$. Враховуючи, що інформація про $\Psi_{\varrho}(\cdot)$ може бути відсутня, необхідно оцінити ФН. Для цього необхідно побудувати зображення точкового джерела (фізичне наближення просторової дельта-функції), реакцією систем на яку буде $\hat{\Psi}_{\varrho}(\cdot)$. Після цього розраховується $\hat{\Psi}_{\varrho}^{-1}(\cdot)$ і вирішується задача підвищення якості первинного РМЗ – перехід до вторинного РМЗ $\hat{I}_{QA}(\mathcal{I})$.

У п'ятому розділі вирішується задача структурного синтезу пасивних радіотехнічних комплексів тривимірного картографування протяжних об'єктів. Проблематика дослідження породжена тим, що задачі пасивного тривимірного картографування об'єктів майже не розглядаються у науковій літературі та періодичних виданнях. Передусім це є наслідком того, що на сьогодні точність оцінювання рельєфу активними радіосистемами перевершує точність пасивних радіосистем. Проте бурхливий розвиток НШС радіоелементної бази і технологій виготовлення високошвидкісних і високорозрядних ПЛІС дозволяє прогнозувати суттєве підвищення точності пасивних радіосистем. Все це свідчить про актуальність проведення досліджень щодо оптимізації алгоритмів обробки НШС радіотеплових сигналів і ПЧ полів з метою формування тривимірних карт протяжних об'єктів.

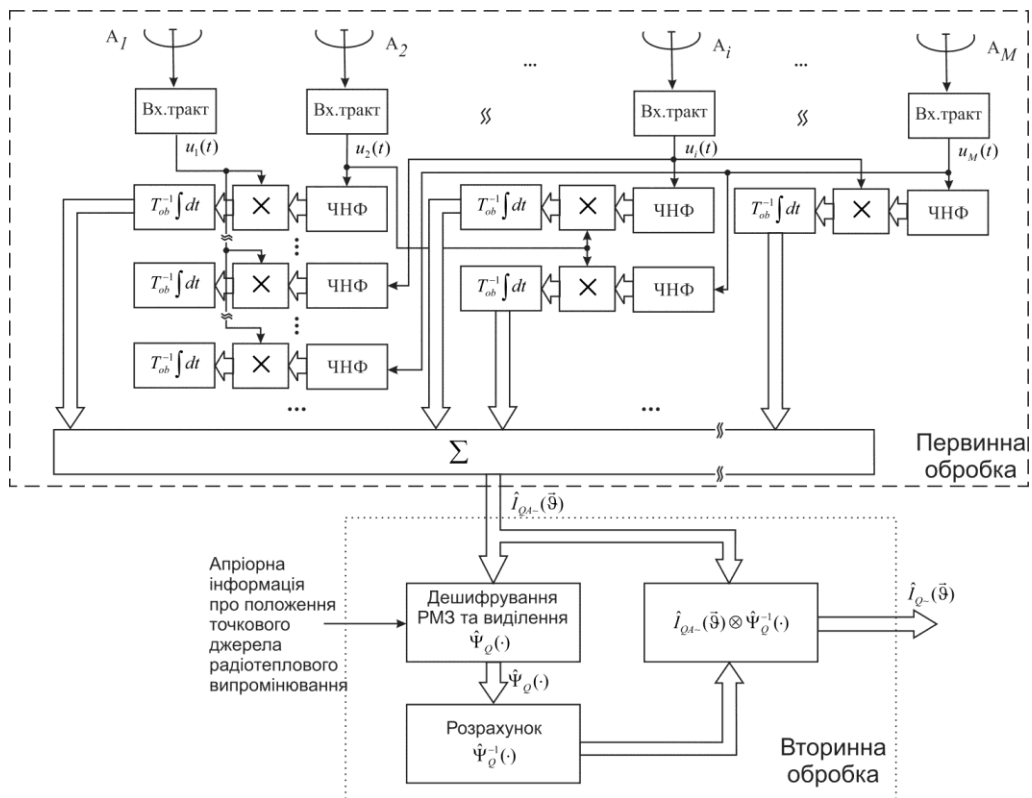


Рисунок 14 – Узагальнена структура ПРТК з первинною обробкою сигналів (обмежено штриховою лінією) та вторинною обробкою РМЗ (обмежено пунктирною лінією)

Розділ містить наступні три напрямки, які в комплексі вирішують проблему структурного синтезу: синтез багатоантенного оптимального виявника, який визначає наявність або відсутність просторово-протяжного джерела радіотеплового випромінювання в заданій області простору; синтез алгоритму оптимального оцінювання координат просторово-протяжного об'єкта; розробка структурної схеми пасивної радіотехнічної системи, що забезпечує формування рельєфу протяжного об'єкта. Постановка задачі наступна. Заданою є геометрія N -елементної антенної системи, а вхідні тракти приймачів, встановлених після кожної антени, задовольняють умові надширокопосмугові, при цьому кожна з антен знаходиться в дальній зоні Фраунгофера, а в цілому антенна система знаходиться у в ближній зоні Френеля. За результатами спостереження сигналів на виходах вхідних трактів необхідно вирішити задачу оцінки дальності до різних елементів протяжного об'єкта, що забезпечить оцінку його тривимірного рельєфу. Оцінці координат протяжного об'єкта передують рішення задачі виявлення цього об'єкта в заданій зоні спостереження. Оптимальний виявник повинен реалізувати синтезований алгоритм обробки сигналів наступного вигляду:

$$Z_{NW} = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^N \int_0^T u_{iW}(t)u_{jW}(t)dt \stackrel{>}{<} Z_0, \quad (13)$$

де $u_{iW}(t) = F^{-1}\{\dot{U}_{iW}(j\omega)\} = F^{-1}\{|\dot{K}_W(j\omega)|\dot{U}_i(j\omega)\}$, Z_0 – поріг виявлення, $|\dot{K}_W(j\omega)| = |\dot{K}_H(j\omega)| \left[|\dot{K}_H(j\omega)|^4 + W_1 |\dot{K}_H(j\omega)|^2 + W_2 \right]^{-0,5}$ – АЧХ вибілюючого фільтру, $|\dot{K}_H(j\omega)| = |\dot{K}(j\omega)|/K_0$,

$$W_2 = N_{0r}^2 |\dot{K}_0|^{-4} [(N \cdot N_{0s} + N_{0n})N_{0n}]^{-1},$$

$$W_1 = |\dot{K}_0|^{-2} (N \cdot N_{0s} + 2N_{0n})N_{0r} [(N \cdot N_{0s} + N_{0n})N_{0n}]^{-1}.$$

Після вирішення задачі виявлення синтезовано алгоритм оцінки координат протяжного об'єкта

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^N \int_0^T u_{iW}(t)u_{jW}[t - \tau_{ij}(\mathbf{r})]dt = 0. \quad (14)$$

Алгоритм (14) передбачає виконання наступних дій: вибілення спостереження $u_i(t)$, $i = 1..N$ (проходження сигналу через фільтри з АЧХ $|\dot{K}_H(j\omega)|$ и $|W(\omega)|$); розрахунок функцій просторово-часової кореляції між спостереженнями, які прийнято різними антенами; складання усіх кореляційних функцій; визначення напрямків усіх антен, при яких досягається максимум сумарної просторово-часової кореляційної функції; розрахунок дальності до ділянки протяжного об'єкта згідно виразу

$$R_{01} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=2}^N |\overline{O'_1 O'_i}| \sin(\overline{\mathcal{G}}_{0i}, \overline{O'_1 O'_i}) \left[\sin \left[(\overline{\mathcal{G}}_{0i}, \overline{O'_1 O'_i}) + (\overline{\mathcal{G}}_{01}, \overline{O'_1 O'_i}) \right] \right]^{-1};$$

розрахунок координат усіх елементарних ділянок згідно виразу

$$(x', y', z') = R_{01}(\mathcal{G}_{01x}, \mathcal{G}_{01y}, \mathcal{G}_{01z}) + (x'_1, y'_1, z'_1).$$

Слід зазначити, що визначити усі координати елементарних (які розрізняються ФН) ділянок протяжного об'єкта можна одним з наступних методів: використати послідовне у часі сканування; сформуванню віяло парціальних променів і паралельно (одночасно) оцінити усі дальності.

Аналітичний вираз для граничних похибок має вигляд:

$$\sigma_{\bar{r}}^2 = \Phi_{\bar{r}, \bar{r}}^{-1} = - \frac{2}{\mu^2 q} \left(\frac{d^2 r_{sW}(\tau)}{d\tau^2} \Big|_{\tau=0} \right)^{-1} = \frac{2}{\mu^2 q \Omega_e^2},$$

$$\text{де } \Omega_e^2 = \frac{d^2 r_{sW}(\tau)}{d\tau^2} \Big|_{\tau=0}, r_{sW}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{M}_W(j\omega)|^2 e^{j\omega\tau} d\omega, q = - \sum_{i,j=1}^N \tau'_{ij} \tau'_{ji} = \sum_{i,j=1}^N (\tau'_{ij})^2$$

$$\mu = \sqrt{T 2 \Delta f_r N_{0s}} \left[N N_{0s} N_{0n} + N_{0n}^2 \right]^{-0,5} = \sqrt{M} N_{0s} \left[N N_{0s} N_{0n} + N_{0n}^2 \right]^{-0,5}.$$

Потенційна флуктуаційна чутливість ПРТК знайдена у вигляді

$$\Delta T_{\min}^{\circ} = \sqrt{\frac{\pi}{k_B \Delta f_r T}} \frac{\sqrt{N N_{0s} N_{0n} + N_{0n}^2}}{N_{0s} \sqrt{\frac{d^2}{d\tau^2} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{M}_W(j\omega)|^2 e^{j\omega\tau} d\omega} \Big|_{\tau=0} \sqrt{\sum_{i,j=1}^N (\tau'_{ij})^2}}.$$

Структурну схему ПРТК побудуємо відповідно до операцій обробки сигналів (13) і (14) у вигляді, показаному на рис. 15, де введено наступні позначення: A_i ($i=1..N$) – i -а антена, AO – алгоритм оперативного управління напрямками ДС усіх антен у системі, BK_i ($i=2..N$) – блок керування напрямком ДС антени A_i , \times – перемножувач, $\int dt$ – інтегратор, Σ – суматор, $ЛЗ$ – керована лінія затримки, $K_{1,2}$ – ключі, $ПП$ – пороговий пристрій, $ЕОМ$ – електронна обчислювальна машина, яка реалізує алгоритми виявлення і побудови тривимірної карти в залежності від того, який режим (виявлення чи «рельєф») обрано.

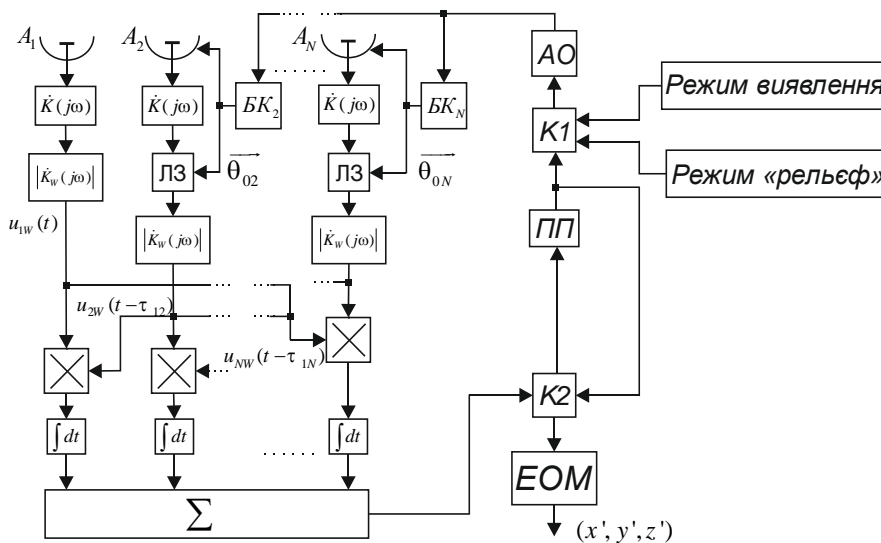


Рисунок 15 – Структурна схема ПРТК тривимірного картографування

Робота схеми. Максимум діаграми спрямованості (ДС) антени A_1 зафіксовано у напрямку $\vec{\theta}_{01}$. Блоки керування ($BK_i, i = 2..N$) змінюють напрямок ДС антен A_i . Керування ДС антен узгоджується центром управління (ЦУ). Передбачено два режими роботи ПРТК: виявлення і «рельєф». У **режимі виявлення** сигнал опорного каналу подається на оптимальний фільтр з АЧХ $|\dot{K}_W(j\omega)|$. Сигнали інших каналів надходять до оптимального фільтру $|\dot{K}_W(j\omega)|$ через лінії затримки. Інформація про напрямки $\vec{\theta}_{0i}$ ДС антени A_i з BK передається до ЛЗ. Сигнали з виходів оптимальних фільтрів різних каналів перемножуються і подаються на інтегратори, а далі через ключ K_2 надходять до $ПП$. Після порівняння у $ПП$ з порогом Z_{NW} визначається чи є на цій дальності протяжний об'єкт. Якщо об'єкт відсутній, то система перефокусується на наступну дальність і алгоритм дії повторюється. При виявленні спрацьовує **режим «рельєф»**. Оцінка $\hat{\epsilon}$ керує ключами K_1 і K_2 , а апіорна інформація про діапазон дальностей, де знаходиться об'єкт, використовується для обмеження сектору сканування діаграмами спрямованості антен. АО передає обробку сигналів у ПРТК і ЕОМ працює згідно алгоритму формування рельєфу об'єкта.

Достовірність підтверджено імітаційним моделюванням. Для цього було обрано ділянку карти місцевості, показану на рис. 16.а. На рис. 16.б показано результат відновлення рельєфу, отриманий в результаті моделювання роботи синтезованого ПРТК.

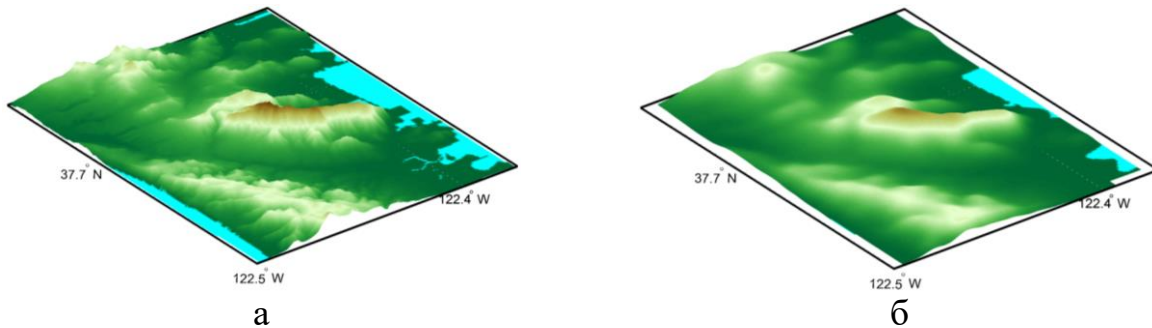


Рисунок 16 – Тестовий рельєф – а) і його оцінка – б)

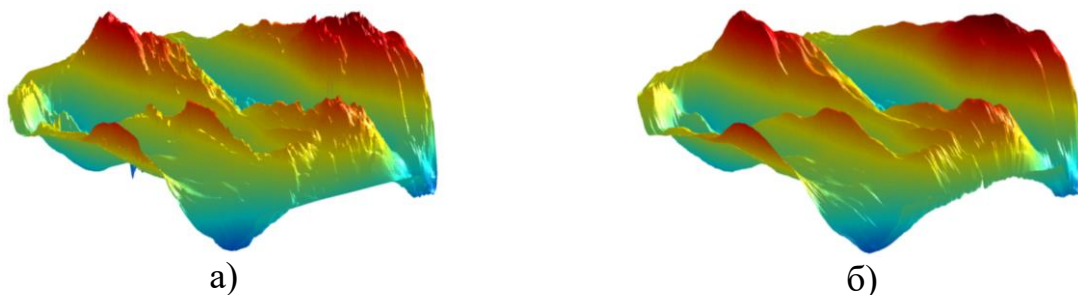


Рисунок 17 – Істинний рельєф – а) і його оцінка – б)

Моделювання виконувалося в припущенні, що антена містить 5 елементів, розміщених у формі правильного п'ятикутника. Паредавальна характеристика

додетекторної частини приймача задовольняє умові НШС (показник широкосмуговості – 0,7). При моделюванні передбачалося, що система рухається над поверхнею на фіксованій висоті. Передбачалося, що помилки 1 і 2 роду відсутні.

Аналогічний приклад при використанні показника широкосмуговості 0,5 і 7-ми елементної антенної решітки (антена має Y-подібну форму) показано на рис. 17. На рис. 17.а наведено рельєф поверхні, а на рис. 17.б – його оцінка.

З аналізу отриманих результатів слідує, що ПРТК не відновлює мілкі деталі рельєфу. У той же час великомасштабна структура рельєфу відновлена у вигляді, прийнятному для візуального сприйняття.

У шостому розділі розглядаються прикладні аспекти застосування розробленої теорії до вирішення задач контролю водних акваторій, а саме розрахунку ПРТК виявлення та оцінювання параметрів руху надводних об'єктів у прибережних зонах. Для її вирішення було вирішено наступні завдання: виявлення та обчислення кількості надводних об'єктів на поверхні моря; визначення координат цих об'єктів в заданому секторі сканування системи. При цьому повинні бути досягнуті наступні показники якості: ймовірність правильного виявлення не менше 0,99 при ймовірності хибної тривоги 10^{-7} ; дальність дії системи: від 150 м до 10 км; сектор сканування не менше 60 градусів.

Геометрія задачі наведена на рис. 18. В якості моделі моря використано модель плоскої поверхні (верхній шар – повітря, нижній – морська вода з заданою солоністю).

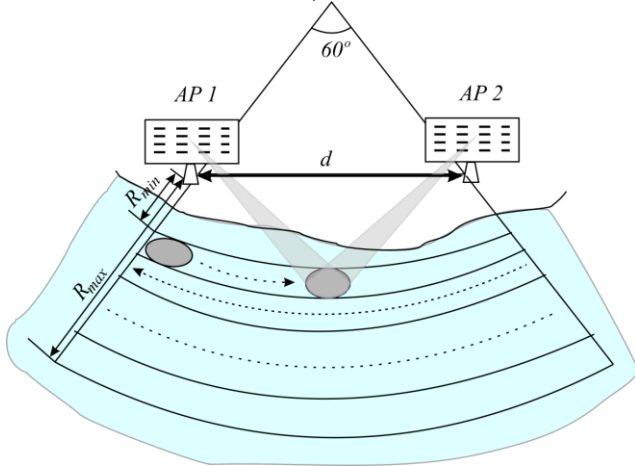


Рисунок 18 – Геометрія задачі

Робоча смуга частот $2\Delta f = 4$ ГГц з центральною частотою $f_0 = 10$ ГГц. Так як металеві об'єкти (надводні кораблі, човни) відбивають температуру неба, тому в подальших розрахунках застосуємо температуру яскравості об'єкту рівну 70°K (характерна для центральної частоти $f_0 = 10$ ГГц). Розрахунки показали, що яскравісна температура корабля на тлі моря завжди дає позитивний приріст на горизонтальній

поляризації і може давати позитивний і від'ємний на вертикальній поляризації. Тому для розробки системи оброблювалися сигнали горизонтальної поляризації.

Для визначення положення об'єкта за допомогою ПРТК, як це визначено у розділі 5, необхідно, щоб об'єкт знаходився в ближній зоні щодо системи. Це еквівалентно тому, що максимальна дальність дії системи повинна задовольняти наступній умові $R_{\max}^2 \leq 0,38d^3\lambda^{-1}$, де d – база системи (відстань між антенами), λ – довжина хвилі. З аналізу вихідних даних слідує, що мінімальна база системи дорівнює $d_{\min} = 202,5$ м.

Для виявлення надводного об'єкту (корабля, човна) на тлі води доцільно використовувати розроблений у розділі 5 радіометр. Побудовано графік залежності ймовірності хибної тривоги від порогу для наступних значень: $T_s^\circ = 20K$, $T_{s_0}^\circ = 70K$, $T_n^\circ = 300K$, $2T\Delta f_r = 2 \cdot 10^6$. Після цього, визначено величину порогу по заданому значенню ймовірності хибної тривоги $L \approx 10^{-7}$. Побудовано криву виявлення для необхідної ймовірності хибної тривоги. З аналізу отриманих результатів випливає, що для виявлення надводного об'єкту (корабля) на тлі моря з імовірністю правильного виявлення $D \approx 0,998$ при заданій ймовірності хибної тривоги $L \approx 10^{-7}$ необхідне значення відношення сигнал/шум $\mu_e \approx 8,11$ дБ. Час інтегрування $T = 0,01$ с.

Структурна схема пасивної радіотехнічної системи показана на рис. 19. Тут A_1, A_2 – антени радіотехнічної системи, G – генератор модулюючої напруги, CS – керований перемикач (Control Switch), Z^{-1} – лінія затримки, CL – лінія зв'язку (Communication Line), \times – помножувач, $\int_0^T dt$ – інтегратор, \lesssim – пороговий пристрій, M – блок пам'яті (Memory).

Режим «Калібрування» передбачає визначення коефіцієнта підсилення. При цьому центр управління (Control Center) формує сигнал управління першим керованим перемикачем (CS), який відключає від входу приймача антени. Синхронно цей сигнал передається на генератор напруги, що модулює (блок G) для періодично підключення до входу першого каналу гарячого і холодного еталонних джерел з температурами T_{hot} , T_{cold} , відповідно, і на другий перемикач для подачі сигналу після лінійної частини приймача (ЛЧП) на квадратичний детектор. Шуми "гарячого" і "холодного" джерела проходять детекторні частина приймача з частотної характеристикою $\dot{K}(j2\pi f)$, де змішуються з внутрішніми шумами $n(t)$ і підсилюються у K_0 разів. Після квадратичного детектора, сигнали послідовно проходять синхронний детектор, інтегратор і підсилюються у $2[k_B T \Delta F (T_{hot}^\circ - T_{cold}^\circ)]^{-1}$ разів.

Режим «виявлення» і «оцінювання координат» слідує за режимом калібрування і є основним режимом роботи ПРТК. Центр управління подає сигнали управління першим і другим перемикачами для підключення антен до входу приймача і формує сигнал керування напрямком першої антени $\vec{\theta}_{01}$. Сигнал після ЛЧП проходить лінію затримки (Z^{-1}) і надходить на блок перемноження.

Лінія затримки налаштовується сигналом, отриманим з центру управління згідно наступного виразу $\tau_0 = (O_1 S - O_2 S) c^{-1}$. Центр управління формує і сигнали управління напрямком антени $\vec{\theta}_{02}$ згідно формули $\vec{\theta}_{02} = \overline{O_2 S} / |\overline{O_2 S}|$.

Друга антена отримує сигнал управління від центру управління через лінію зв'язку (Communication Line). Сигнал на виході ЛЧП другого каналу передається через лінію зв'язку і поступає на другий вхід блоку множення. Далі сигнал

проходить інтегратор, підсилюється в K_1 і $(K_0^2 k_B T \Delta f)^{-1}$ разів і надходить до порогового пристрою. В пороговому пристрої здійснюється порівняння величини Z з порогом для встановлення факту наявності чи відсутності об'єкта на ділянці, де перехрещуються ДС. Результат виявлення буде зберігатися в Memory разом зі значеннями напрямків антен і подається в обчислювальну машину для визначення координат виявлених об'єктів і побудови карти, яку показується в Scope. Координати об'єкта в декартовій системі $O_1 x_{uz}$ визначаються згідно наступної формули

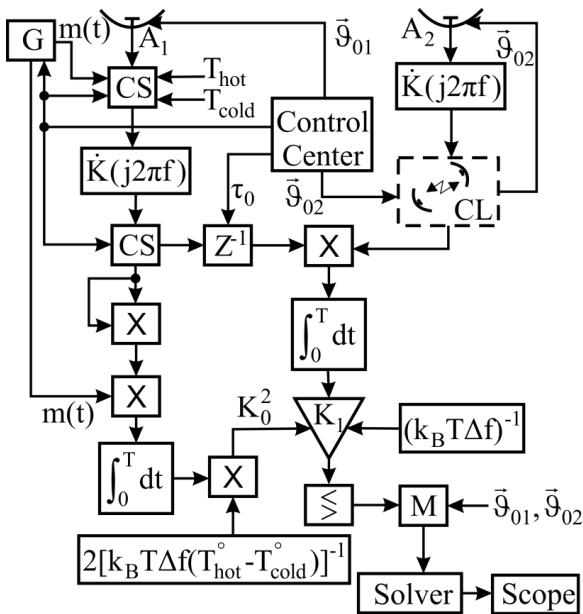
$$(x_{S(O_1)}, y_{S(O_1)}, z_{S(O_1)}) = -h / g_{01z} (g_{01x}, g_{01y}, g_{01z}).$$


Рисунок 19 – Структурна схема виявлювача

На рис. 20 введено наступні позначення: A1, A2 – антенні решітки; область 1 – область пересічення ДС з підстильною поверхнею (акваторією) з якої надходить сигнал у кожен з антен; область 2 – область пересічення ДС обох антен; область 3 – область високої кореляції (коефіцієнтом кореляції більший 0,5).

З аналізу рис. 20 витікає, що область високої кореляції у випадку обробки вузькосмугових сигналів багатозначна (див. рис. 20.а) і не дозволить однозначно визначити положення об'єкту. У той же час, обробка НШС значно звужує область високої кореляції (див. рис. 20.б), що дозволяє провести однозначні

вимірювання.

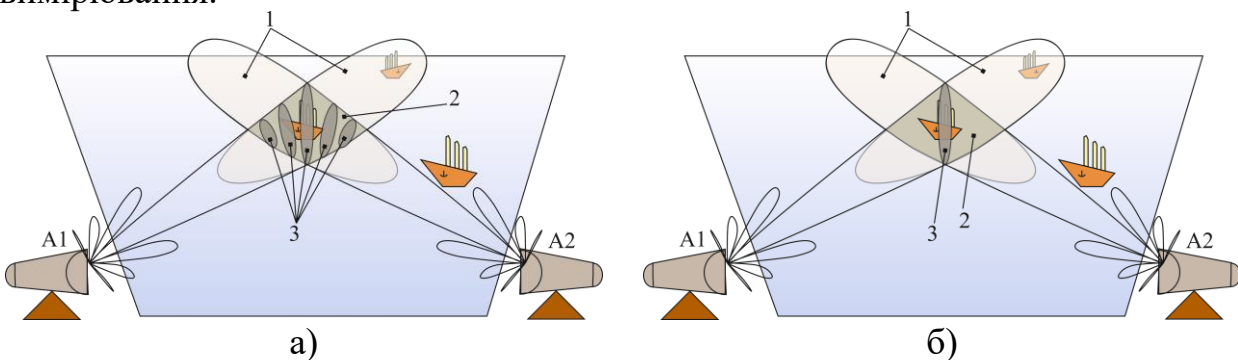


Рисунок 20 – Геометрія імітаційного моделювання: а)вузькосмугова ПРТК; б)надширокосмугова ПРТК

На рис. 21 показано результати моделювання. На рис. 21.а показана карта істинного розміщення надводних об'єктів. На рис. 21.б – результат моделювання виявлення та оцінювання координат при використанні вузькосмугової ПРТК, а на рис. 21.в – при використанні НШС ПРТК.

З аналізу рис. 21 слідує, що у НШС ПРТК відсутні хибні виявлення. Це пояснюється суттєво більшим усередненням незалежних відкликів (розширення смуги збільшує число незалежних відкликів у часовій області).

На рис. 22 наведено результати вимірювання кількості виявлених об'єктів при використанні вузькосмугової ПРТК (при використанні НШС ПРТК багатопелюстковість ФН не спостерігається, тому для них не досліджена частота «фантомів»). На рис. 22 введено наступні позначення осей: $N_{targets}$ – кількість виявлених об'єктів; n – частота повторення результату експерименту. При проведенні моделювання проведено 1000 імітацій експерименту.

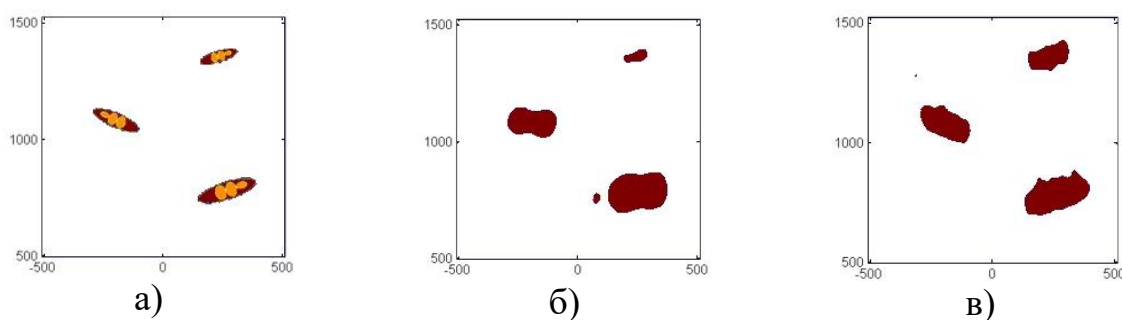


Рисунок 21 – а) – істинне розміщення водного транспорту; б) – карта розміщення об'єктів, отримана з використанням вузько смугової радіометричної системи; в) – карта розміщення об'єктів, отримана з використанням надширокосмугової радіометричної системи

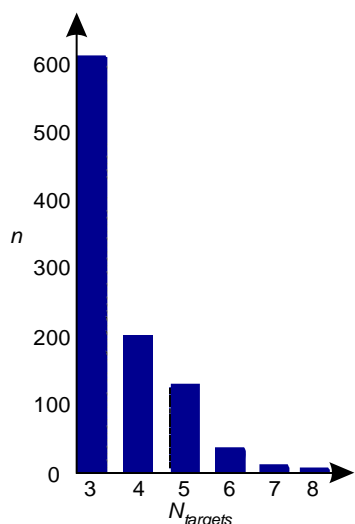


Рисунок 22 – Частота n визначення $N_{targets}$ з використанням вузькосмугової ПРТК

Реальна кількість надводних об'єктів – 3. Ймовірність появи хибних об'єктів – «фантомів» можна зменшити за рахунок розробленого методу «ознак» (видаляє майже 50% «фантомів») та усереднення карт, отриманих на суміжних інтервалах спостереження. Застосування розробленої методики зменшує імовірність виникнення хибних об'єктів у більш як 6 разів.

ВИСНОВКИ

Вирішена актуальна наукова проблема подальшого розвитку статистичної теорії структурного синтезу та аналізу НШС ПРТК і розробки на її основі високоточних комплексів дво- і тривимірного картографування об'єктів, зокрема комплексів контролю прибережних зон водних акваторій річок та морів.

Міжнародна наукова спільнота встановлює жорсткі вимоги до перспективних напрямків розвитку техніки. Зокрема, такі вимоги відзначено у наступних принципах ідеології «Green Engenereeng»: зниження енергоспоживання; зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище і

біологічні об'єкти; скорочення масогабаритних характеристик систем. Усім цим вимогам відповідають радіометричні пристрої та системи.

Проведене дослідження показує, що перехід до обробки НШС сигналів здатний значно вплинути як на вигляд радіометрів (зменшення кількості елементів у антенній системі, зменшення числа кореляторів і ін. при збереженні або, навіть, підвищенні якісних показників функціонування вузькосмугових радіометрів), так і на їхні характеристики (флуктуаційну чутливість, точність оцінювання, розрізнявальну здатність по кутовим координатам і ін.). Такий перехід до обробки НШС просторово-часових сигналів вимагає проведення низки ґрунтовних різноманітних досліджень, які б охоплювали: особливості їх обробки з урахуванням якості вирішення прямих і зворотних задач радіолокації; розробку нових та уточнення наявних моделей радіотеплових НШС полів; дослідження діаграм спрямованості та функцій невизначеності НШС радіометричних комплексів; розробку методик інтерпретації отриманих даних; визначення можливостей технічної реалізації синтезованих алгоритмів; дослідження можливості вирішення радіометричних задач нового класу, пов'язаних з тривимірним картографуванням просторово-протяжних об'єктів, тощо.

Цей далеко не вичерпний перелік питань, які потребують відповіді, породжує суперечності у наявній теорії та відповідну актуальну наукову проблему дисертаційного дослідження – подальшого розвитку статистичної теорії структурного синтезу та аналізу надширокосмугових пасивних радіотехнічних комплексів і розробки на її основі високоточних комплексів дво- і тривимірного картографування об'єктів.

Вирішення цієї проблеми у роботі забезпечується: використанням єдиного статистичного підходу до вирішення низки поставлених задач; впровадженням нових термінів та їх визначень, які більш адекватні як для опису НШС просторово-часових полів, так і для аналізу характеристик НШС радіометричних комплексів; розробкою адекватних математичних моделей радіотеплового випромінювання та відповідним формуванням рівнянь спостережень; дослідженням потенційних точності та флуктуаційної чутливості, притаманних синтезованим алгоритмам та розробленим на їхній основі радіометрам.

При рішенні проблеми отримано наступні найбільш важливі наукові результати:

1. Отримали подальший розвиток моделі НШС просторово-часових сигналів, які на відміну від відомих дозволяють врахувати кривизну хвильового фронту поля між просторово-рознесеними антенами для дослідження об'єктів у ближній зоні Френеля, що дозволило формалізувати оптимізаційну задачу структурного синтезу пасивної радіотехнічної системи тривимірного картографування протяжних об'єктів.

2. Удосконалено метод заповнення області просторово-спектральної чутливості систем апертурного синтезу надширокосмуговими просторово-часовими сигналами і показано, що пропонуємий спектральний метод апертурного синтезу відрізняється від відомих паралельного і послідовного

методів апертурного синтезу за рахунок нерівномірного заповнення області просторово-спектральної чутливості, що не спостерігалось раніше. Це вперше дозволило обґрунтувати можливість переходу від обробки надширокосмугових до багатосмугових просторово-часових сигналів.

3. Вперше введено нові та удосконалено ряд наявних визначень, які традиційно використовуються для опису вузькосмугових сигналів, для адекватного визначення фізичної сутності статистичних характеристик надширокосмугових просторово-часових сигналів і алгоритмів їх обробки.

4. Уперше отримано точні явні рішення задач структурного синтезу пасивних надширокосмугових радіотехнічних комплексів високоточного формування радіометричних зображень об'єктів, які розміщені у дальній зоні Фраунгофера, на випадок використання антенних систем з довільним числом елементів. Раніше були отримані точні рішення тільки для двох і трьох антен. Вперше надано фізичну інтерпретацію радіометричних зображень, отриманих багатоканальними пасивними радіометричними комплексами, зокрема, показано, що вони представляють собою вагові усереднення радіометричних зображень, отриманих на континуумі робочого діапазону частот.

5. Вперше з вирішення зворотних задач формування радіометричних зображень розроблено метод інверсної просторової фільтрації первинних двовимірних радіометричних зображень, який передбачає попереднє оцінювання узагальненої функції невизначеності комплексу і наступне їхнє відновлення з точністю, яка суттєво вища за ту, яка визначається функцією невизначеності системи на кожній з частот у межах робочого діапазону.

6. Вперше запропоновано, синтезовано та ґрунтовно досліджено пасивні радіотехнічні системи тривимірного картографування протяжних об'єктів, які на відміну від активних систем картографування наразі характеризуються меншою точністю, але не потребують зондуючого сигналу і у майбутньому, при удосконаленні елементної бази для обробки надширокосмугових сигналів, здатні будуть конкурувати по точності з активними.

7. Запропоновано новий критерій широкосмуговості та надширокосмуговості, який на відміну від відомих, передбачає аналіз функції невизначеності пасивного радіометричного комплексу і, відповідно, залежить не тільки від відношення ширини робочої смуги частот до центральної частоти налаштування приймача, а й від геометрії антенної системи. Цей критерій усуває наявні розбіжності у визначенні належності систем до вузько-, широко- та надширокосмугових.

8. Досить важливими є показані у роботі наступні залежності:

– розширення смуги пропускання в N раз, як це слідує з аналізу основних формул, отриманих у роботі, підвищує флуктуаційну чутливість приймача у \sqrt{N} раз та зменшує граничну похибку у N раз;

– зменшення кількості елементів у антенній системі з M до $M-Q$ (тобто у Q раз) призводить до зменшення кількості кореляторів у ПРТК (при відсутності автокореляційних каналів) з $0,5(M-1)M$ до $0,5(2MQ-Q-Q^2)$.

Таким чином, при розширенні смуги пропускання у 4 рази можна з десятиелементної антенної решітки перейти до восьмиелементної решітки при збереженні точності та флуктуаційної чутливості при зменшенні кількості кореляторів з 45 до 38. Зважаючи на те, що антени та корелятори є найбільш дорогими елементами ПРТК, їх зменшення призводить до здешевлення ПРТК у цілому.

9. Виходячи з комплексності вирішених задач та ґрунтовності їх опрацювання слідує, що мета дослідження – розвиток статистичної теорії структурного синтезу пасивних радіотехнічних комплексів, розробка на її основі комплексів дво- і тривимірного картографування протяжних об'єктів з дослідженням їх потенційних характеристик – досягнута.

Слід відзначити наступне практичне значення результатів дослідження: нові математичні моделі надширокосмугових просторово-часових сигналів та алгоритми їх обробки є теоретичним підґрунтям для формування напрямків розвитку перспективних високоточних пасивних радіотехнічних комплексів дво- та тривимірного картографування; запропонований та розрахований пасивний радіотехнічний комплекс контролю акваторій може бути використаний для створення перспективних прибережних систем виявлення-супроводження надводних суден; ґрунтовні дослідження функцій невизначеності пасивних радіотехнічних комплексів та алгоритми її моделювання дозволяють визначити можливості модернізації існуючих радарів за рахунок розширення частотного діапазону (переходом до обробки багатьох частот або ж ширококосмуговості) з суттєвим підвищенням розрізнявальної здатності по просторовим координатам та флуктуаційної чутливості при одночасному зменшенні кількості елементів антенної системи; аналітичні вирази для розрахунку потенційної флуктуаційної чутливості та граничної похибки оцінок параметрів доцільно використати для визначення меж, до яких слід наближатися при проектуванні нових пасивних радіотехнічних комплексів; системи обробки просторово-часових радіометричних сигналів, розроблені на основі синтезованих алгоритмів, відповідають вимогам «Green Engeneering», що забезпечує високу конкурентоспроможність на міжнародному ринку.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тимощук О. М. Структурний синтез надширокосмугового радіометричного комплексу контролю прибережних акваторій / О.М. Тимощук // Водний транспорт. – 2016. – Вип. 2(25). – С.107–112.

2. Тимощук Е.Н. Потенциальные характеристики двухантенных сверхширокополосных систем апертурного синтеза / Е. Н. Тимощук // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2016. – № 3(77). – С.14–19.

3. Tymoshchuk O.M. Mathematical Models of Stochastic Radiothermal Signals/ О.М. Тимощук // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2016. – № 5(102). – С.65–72.

4. Тимощук О.М. Реалізаційні основи методу просторової декореляції радіометричних зображень /О.М. Тимощук // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2016. – № 4(101). – С.44–53.

5. Тимощук О.М. Про деякий підхід до оцінки ефективності навігаційного обслуговування /О.М. Тимощук //Новітні технології. – 2016. – № 1(1). – С.32–35.

6. Тимощук Е.Н. Структурный синтез сверхширокополосных пассивных радиотехнических систем рельефометрии / Е. Н. Тимощук // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». – 2016. – Вып. 185. – С. 15 – 23.

7. Павликов В. В. Синтез оптимального алгоритма оценки радиометрических изображений в радиометрических комплексах/Е.Н.Тимощук, В.В. Павликов, Нгуен Ван Киём //Новітні технології. – 2016. – № 2(2). – С.68–74.

8. Волосюк, В.К. Особенности использования вещественных функций когерентности в широкополосных радиометрических комплексах / В.К. Волосюк, Е.Н. Тимощук //Системи управління, навігації та зв'язку. – 2015. – № 4(36). – С. 22 – 26.

9. Волосюк, В.К. Оптимизация оценок пространственно-распределенных параметров и статистических характеристик протяженных источников излучения в пассивных радиотехнических комплексах / В.К. Волосюк, В.В. Павликов, Е.Н. Тимощук //Системи управління, навігації та зв'язку. – 2015. – № 3(35). – С. 14 –17.

10. Волосюк, В. К. Статистический синтез радиометрической системы с N антенными решетками для измерения дальности до заданного участка пространственно-протяженного объекта/В. К. Волосюк, Кыонг Ву Та, Е. Н. Тимощук// Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 5(122). – С. 74–79. – Режим доступа: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgibin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASR_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=aktit_2015_5_15.

11. Ву Та, Кыонг Оптимальное обнаружение в заданной зоне обзора пространственно-протяженного источника радиотеплового излучения/ Кыонг Ву Та, Е. Н. Тимощук // Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Том 14. – № 2. – С. 151–155.

12. Синтез оптимального обнаружителя в многоантенной радиометрической системе / В. К. Волосюк, Кыонг Ву Та, Е. Н. Тимощук, С. С. Жила // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». – 2015. – Вып. 182. – С. 5–12.

13. Волосюк, В. К. Статистическая теория сверхширокополосных пространственно-распределенных радиометрических систем высокого пространственного разрешения / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко, В.В. Павликов, Е.Н. Тимощук // Прикладная радиоэлектроника: науч.-техн. журнал. – 2015. – Том 14. –№ 1. – С. 41–50.

14. Павліков, В. В. Оптимальна оцінка радіометричних зображень у радіометрі зі скануючою діаграмою спрямованості / В. В. Павліков,

К. М. Нежальська, О. М. Тимощук // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: науково-технічний журнал. – 2015. – №4(21). – С. 98–102. – Режим доступу: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/13275>.

15. Радиометричний пристрій нульового типу зі скануюючою діаграмою спрямованості / В. К. Волосяк, В. В. Павліков, К. М. Нежальська, О. М. Тимощук // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: науково-технічний журнал. – 2016. – №1(22). – С. 106–109.

16. Нгуен Ван, Кiem Оптимальная оценка радиояркости протяженного источника радиотеплового излучения в двухантенной сверхширокополосной радиометрической системе / Нгуен Ван Кiem, Е.Н. Тимощук // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2015. – № 4(74). – С.13–18. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2015_4_4.

17. Павліков, В. В. Синтез оптимального алгоритма оценки радиометрических изображений в сверхширокополосных радиометрических комплексах с трехэлементной антенной системой / В. В. Павліков, Нгуен Ван Кiem, Е.Н. Тимощук // Авіаційно-космічна техніка і технологія.– 2015. – № 6(123). – С. 64–68. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2015_6_12.

18. Pavlikov V. V. New method for the spatio-spectral sensitivity domain filling and radiometric imaging with high resolution in aperture synthesis systems/ V. V. Pavlikov, Kiem Nguyen Van, O. M. Tymoshchuk // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. – 2016. – Vol.4.– No.4. – P. 25–34.

19. Nguyen, Van Kiem Research ambiguity function of narrowband, multi-band and ultra-wideband radiometric complexes with multi-antenna systems/ Kiem Nguyen Van, V. V. Pavlikov, O. M. Tymoshchuk // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 5. – No. 2. – P.83–88.

20. Nguyen, Van Kiem Analytical models of stochastic radiothermal signals/ Kiem Nguyen Van, K. N. Nezhalskaya, O. M. Tymoshchuk // Applied radio-electronic.– 2016.– Vol. 15.– No. 2.– P. 105–109.

21. Волосяк, В.К. Обоснование применимости спектрально-волновых V_F -преобразований для физической реализации пространственно-временной обработки сверхширокополосных полей / В.К. Волосяк, В.В. Павліков, Е.Н. Тимощук // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 9(146). – С. 6–12.

22. Волосяк, В.К. Математическая формализация основных понятий и определений для решения задач пространственно-временной обработки сверхширокополосных сигналов / В.К. Волосяк, В.В. Павліков, Е.Н. Тимощук // Системи управління, навігації та зв'язку.– 2015. –№2 (34). –С. 32–38.

23. Волосяк, В.К. Оценки радиояркостных изображений протяженных источников некогерентного сверхширокополосного радиоизлучения / В.К. Волосяк, В.В. Павліков, Е.Н. Тимощук // Системи озброєння і військова техніка: науковий журнал. – 2016.– № 3(47).– С. 50–55.

24. Optimal algorithm for 3D imaging of spatially extended object [Text]/ V. K. Volosyuk, V. V. Pavlikov, Vu Ta Cuong, O. M. Tymoshchuk // Proceedings of 2015 X Anniversary International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). April 21–24, 2015, Kharkiv, Ukraine. – 2015.– P. 182–184.

25. Vu Ta, Cuong. Optimal Detection of Elements of Spatially Extended Object at the Intersection of Antenna Patterns of Passive Two-Element Radiointerferometer / Cuong Vu Ta, S. S. Zhyla, O. M. Tymoshchuk // International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF-2015). – September 29 – October 2, 2015, Dnipropetrovsk, Ukraine. – RAA-7.

26. Павликов В.В. Оптимальная оценка радиояркости точечного источника радиотеплового излучения в двухантенной сверхширокополосной радиометрической системе / В.В. Павликов, Нгуен Ван Кiem, Е.Н. Тимощук // Труды 8-ой Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», 20 – 23 сентября 2015, Суздаль, Россия – 2015. – С. 163–166.

27. Tymoshchuk O. M. Radiometric systems for water areas control / O.M. Tymoshchuk, Nguyen Van Kiyem // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні. ІКТМ'2015: всеукр. наук.-техн. конф./ М-во освіти і науки України, Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Х., 2015. – Т.2.– С. 149.

28. Павликов В.В. Синтез оптимального алгоритма оценки радиометрических изображений в сверхширокополосных радиометрических комплексах с трехэлементной антенной системой / В.В. Павликов, Нгуен Ван Хиу, О.М. Тимощук // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених і студентів «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2015, 25-27 листопада 2015 р., – Дніпропетровськ, Україна, 2015. – С. 156–157.

29. Optimal Structural Synthesis of Multi-Antenna UltraWideband Radiometric Complex / V.V. Pavlikov, Kiem Nguyen Van, O.M. Tymoshchuk // The IX International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16): symp. proc., Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016. – [Kharkov, 2016]. – G. – 53. – P. 1–4.

30. Synthesis of Optimal Multiantenna Radiometric 3D Mapping Complexes/ Cuong Vu Ta, V. K. Volosyuk, O.M. Tymoshchuk // The IX International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16) : symp. proc., Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016. – [Kharkov, 2016]. – G. – 54. – P. 1–4.

31. Volosyuk V. K. Optimal Algorithm of Ultra-Wideband Signals Processing in 3D Mapping Systems with Two Antenna Arrays / Valeriy Volosyuk, Cuong Vu Ta, Olena Tymoshchuk // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science. TCSET'2016: proc. of the XII Intern. conf., Feb. 23–26, 2016, Lviv-Slavsko, Ukraine. – [Lviv-Slavsko], 2016. – P. 233–235.

32. Kiem Nguyen Van. Investigation of Ambiguity Function of Ultra-Wideband, Multi-Band and Narrow-Band Radiometric Complex with a Three-Element Antenna System/ Kiem Nguyen Van, O. M. Tymoshchuk // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science. TCSET'2016: proc. of the XII Intern. conf., Feb. 23–26, 2016, Lviv-Slavsko, Ukraine. – [Lviv-Slavsko], 2016. – P. 240-242.

33. Volosyuk V. K. Physical realization features of V_F -transformations in spatio-temporal UWB field processing / V.K. Volosyuk, V.V. Pavlikov, O.M. Tymoshchuk // Proc. of Ninth International Conference «Acoustooptical and Radar Methods for Information Measurements and Processing», October 2 – 5, 2016, Suzdal, Russia.– P. 123–127.

34. Волосюк, В.К. Оценки радиоярких изображений протяженных источников некогерентного сверхширокополосного радиоизлучения / В.К. Волосюк, В.В. Павликов, Е.Н. Тимощук // Труды 9-й Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2016), 2–5 октября 2016, Суздаль, Россия. – 2016. – С.108–114.

35. Нгуен, Ван Кiem Спектральный метод заполнения области пространственно-временной чувствительности в системах апертурного синтеза / Нгуен Ван Кiem, В.В. Павликов, Е.Н. Тимощук // Труды 9-ой Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». 2 – 5 октября 2016, Суздаль, Россия. – 2016. – С. 115–118.

36. Pavlikov, V. V. Spectral Method for the Spatio-Spectral Sensitivity Domain Filling in Aperture Synthesis System / V. V. Pavlikov, Kiem Nguyen Van, O.M. Tymoshchuk // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. (UWBUSIS 2016) : proc. 8th Intern. conf., 5–11 Sept. 2016, Odesa, Ukraine. – [Kharkov], 2016. – P. 124–127.

37. Pavlikov, V. V. Algorithm for Radiometric Imaging by Ultrawideband Systems of Aperture Synthesis/ V. V. Pavlikov, Kiem Nguyen Van, O.M. Tymoshchuk // IEEE Radar Methods and Systems Workshop, September 27–28, Kyiv, Ukraine. – [Kharkov], 2016. – P. 103–106.

38. Nguyen, Kiem Van Development and Research Mathematical Models of Stochastic Radiothermal Signals / Kiem Nguyen Van, K. N. Nezhalskaya, O. M. Tymoshchuk // Proc. of the First International Conference “Radioelectronics & Infocommunications” UkrMiCo’2016, Kyiv, 11–16 Sept., Ukraine. – [Kyiv], 2016. – P. 357–360.

39. Тимощук О.М. Перспективна система контролю та навігації суден/ Водний транспорт. – 2012. – Вип. 2(14).– С.154–157.

40. Тимощук О.М. Функція невизначеності двоантенних радіометричних комплексів / Водний транспорт – 2012. – Вип. 3(15).– С.193–198.

41. Тимощук О.М. Безперервне планування як інструмент комплексного управління суміжними видами транспорту/ О.М. Тимощук, Т.О. Войченко // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту: Серія «Економіка і управління». – 2013. – Вип. 26.– С.17–22.

АНОТАЦІЯ

Тимощук О. М. Структурний синтез просторово-розподілених надширокосмугових радіометричних комплексів. – Кваліфікована наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи (17 Електроніка та телекомунікації).

Державний університет інфраструктури та технологій, Міністерство освіти і науки України, м. Київ, 2017.

Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, м. Харків, 2017.

Вирішена актуальна наукова проблема подальшого розвитку статистичної теорії структурного синтезу та аналізу надширокосмугових (НШС) пасивних радіотехнічних комплексів (ПРТК) і розробки на її основі високоточних комплексів дво- і тривимірного картографування об'єктів, зокрема, комплексів контролю прибережних зон водних акваторій річок та морів.

Створення радіосистем, які задовольняють вимогам «Green Engineering», є вельми актуальним напрямком досліджень, визначеним міжнародною науковою спільнотою. До найбільш вірогідних напрямків досягнення цих вимог можна віднести створення ПРТК, які за рахунок обробки НШС просторово-часових сигналів забезпечать високоточне формування дво- і тривимірних радіометричних зображень. Для цього вирішено низку наукових завдань, серед яких можна відзначити наступні: отримали подальший розвиток моделі НШС просторово-часових сигналів; удосконалено метод заповнення області просторово-спектральної чутливості систем апертурного синтезу НШС просторово-часовими сигналами; вперше введено нові та удосконалено ряд наявних визначень, необхідних для адекватного визначення фізичної сутності статистичних характеристик надширокосмугових просторово-часових сигналів і алгоритмів їх обробки; уперше отримано точні явні рішення задач структурного синтезу пасивних надширокосмугових радіотехнічних комплексів високоточного формування радіометричних зображень об'єктів, які розміщені у дальній зоні Фраунгофера, на випадок використання антенних систем з довільним числом елементів; вперше з вирішення зворотних задач формування радіометричних зображень розроблено метод інверсної просторової фільтрації первинних двовимірних радіометричних зображень, який значно підвищує точність їх відтворення; вперше запропоновано, синтезовано та ґрунтовно досліджено ПРТК тривимірного картографування протяжних об'єктів; запропоновано новий критерій широкосмуговості та надширокосмуговості ПРТК.

Ключові слова: мікрохвильова радіометрія, пасивні радіотехнічні комплекси, надширокосмугові просторово-часові сигнали, картографування, радіометричні зображення, контроль прибережних акваторій.

АННОТАЦІЯ

Тимошук Е. Н. Структурный синтез пространственных сверхширокополосных радиометрических комплексов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. Государственный университет инфраструктуры и технологий, г. Киев, 2017.

Решена актуальная научная проблема дальнейшего развития статистической теории структурного синтеза и анализа сверхширокополосных (СШП) пассивных радиотехнических комплексов (ПРТК) и разработки на её основе высокоточных комплексов двух- и трехмерного картографирования объектов, в том числе, комплексов контроля прибрежных зон водных акваторий рек и морей.

Проблема решалась в соответствии с требованиями международного научного сообщества, устанавливающего жесткие требования к перспективным направлениям развития радиотехнических систем. Эти требования отражены в идеологии «Green Engenereeng»: снижение энергопотребления; уменьшение вредного воздействия на окружающую среду и биологические объекты; сокращение массогабаритных характеристик систем и др. Перечисленным требованиям отвечают радиометрические устройства, системы и комплексы. В настоящее время радиометры широко распространены для решения задач дистанционного зондирования при мониторинге Земли, в радиоастрономии, метеорологии и др. отраслях науки и народного хозяйства.

Сейчас ПРТК разрабатываются в квазимонохроматическом приближении, что существенно ограничивает как качественные показатели функционирования комплексов, так и влияет на их структуру. В частности, для современных (узкополосных) радиометрических комплексов (SMOS, VLA, GMRT, ALMA) характерно использование антенных систем с большим количеством элементов, что обеспечивает заполнение т.н. области пространственной спектральной чувствительности и повышает точность решения задач радиометрии, например, точность восстановления радиометрических изображений, точность оценки параметров объектов и др.

Проведенное исследование показывает, что переход к обработке СШП сигналов значительно повлияет как на вид ПРТК (уменьшит количество элементов в антенной системе, уменьшит число корреляторов при сохранении или даже повышении качественных показателей функционирования узкополосных радиометров), так и на их характеристики (флуктуационную чувствительность, точность оценки, разрешающую способность по угловым координатам и др.). Такой переход к обработке СШП пространственно-временных сигналов потребовал провести ряд следующих фундаментальных исследований: особенности обработки с учетом качества решения прямых и обратных задач радиолокации; разработку новых и уточнения существующих моделей радиотепловых СШП полей; исследование диаграмм направленности и функций неопределенности СШП ПРТК; разработку методик интерпретации полученных данных; определение возможностей технической реализации синтезированных алгоритмов; исследование возможности решения радиометрических задач нового класса, связанных с трехмерным картографированием пространственно-протяженных объектов и тому подобное. Этот далеко не полный перечень вопросов, требующих ответа, породил

противоречие в существующей теории и соответствующую (отмеченную выше) актуальную научную проблему диссертационного исследования.

Решение этой проблемы в работе обеспечено: использованием единого статистического подхода к решению ряда поставленных задач; внедрением новых терминов и их определений, которые более адекватны как для описания СШП пространственно-временных полей, так и для анализа характеристик СШП ПРТК; разработкой адекватных математических моделей радиотеплового излучения и соответствующим формированием уравнений наблюдений; исследованием потенциальной точности и флуктуационной чувствительности, присущих синтезированным алгоритмам и разработанным на их основе ПРТК.

При решении проблемы получены следующие наиболее важные научные результаты: получили дальнейшее развитие модели СШП пространственно-временных сигналов, в отличие от известных позволяют учесть кривизну волнового фронта поля между пространственно-разнесенными антеннами для исследования объектов в ближней зоне Френеля, что позволило формализовать оптимизационные задачи структурного синтеза пассивной радиотехнической системы трехмерного картографирования протяженных объектов; усовершенствован метод заполнения области пространственно-спектральной чувствительности систем апертурного синтеза СШП пространственно-временными сигналами и показано, что предлагаемый спектральный метод апертурного синтеза отличается от известных возможностью неравномерного заполнения области пространственно-спектральной чувствительности, что не наблюдалось ранее. Это впервые позволило обосновать возможность перехода от обработки СШП к многополосным пространственно-временным сигналам; впервые введены новые и усовершенствованы ряд имеющихся определений для адекватного определения физической сущности статистических характеристик СШП пространственно-временных сигналов и алгоритмов их обработки; впервые получены точные явные решения задач структурного синтеза СШП ПРТК высокоточного формирования радиометрических изображений объектов, расположенных в дальней зоне Фраунгофера, в случае использования антенных систем с произвольным числом элементов. Ранее были получены точные решения только для двух и трех антенн. Впервые предоставлено физическую интерпретацию радиометрических изображений, полученных многоканальными пассивными радиометрическими комплексами, в частности, показано, что они представляют собой весовые усреднения радиометрических изображений, полученных на континууме рабочего диапазона частот; впервые по решению обратных задач формирования радиометрических изображений разработан метод инверсной пространственной фильтрации первичных двумерных радиометрических изображений, предусматривающий предварительное оценивание обобщенной функции неопределенности комплекса и последующее их восстановление с точностью, существенно выше той, которая определяется функцией неопределенности системы на каждой из частот в пределах рабочего диапазона; впервые предложены, синтезированы и основательно исследованы

ПРТК трехмерного картографирования протяженных объектов, которые в отличие от активных систем картографирования пока характеризуются меньшей точностью, но не требуют зондирующего сигнала и в будущем, при совершенствовании элементной базы для обработки СШП сигналов, способны будут конкурировать по точности с активными; предложен новый критерий широкополосности и сверхширокополосности, который в отличие от известных, предусматривает анализ функции неопределенности ПРТК и, соответственно, зависит не только от отношения ширины рабочей полосы частот к центральной частоте настройки приемника, но и от геометрии антенной системы. Этот критерий устраняет имеющиеся разногласия в определенные принадлежности систем к узко, широко- и сверхширокополосным.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, пассивные радиотехнические комплексы, сверхширокополосные пространственно-временные сигналы, картографирование, радиометрические изображения, контроль прибрежных акваторий.

ABSTRACT

Tymoschuk O. M. Structural synthesis of spatially distributed ultrashort band radiometric complexes. - Qualified scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.12.17 - radio engineering and television systems (17 Electronics and Telecommunications).

State University of Infrastructure and Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2017.

Actual scientific problem of subsequent development of structural synthesis and statistical theory of analysis of ultrawideband (UWB) passive radio engineering complexes (PREC) and high-precision complexes of two and three dimensional objects mapping development on its basis, in particular coastal zones control complexes of rivers and seas water area was solved.

Radio engineering systems creation that satisfy the requirements of «Green Engineering» is a quite actual research direction, defined by international scientific community. PREC creation, that through UWB processing of spatio-temporal signals will provide the high-precision formation of two- and three dimensional radiometric images can be referred to the most probable directions of these requirements reaching.

A row of scientific problems was solved for this, through which can be mentioned the following: UWB models of spatio-temporal signals received subsequent development; method of spatio-spectral sensitivity domain filling of aperture synthesis systems by UWB spatio-temporal signals was improved;

A row of new and existing definitions, needed for adequate physical essence definition of UWB spatio-temporal signals statistical characteristics and their processing algorithms was firstly introduced and improved. Accurate clear structural synthesis tasks solutions of ultrawideband PREC for objects high-precision radiometric

images forming, which are situated in the far Fraunhofer field, in the case of antenna systems with arbitrary number of elements usage were obtained firstly.

Method of inverse spatial filtering of primary two dimensional radiometric images, which greatly increases accuracy of their reproduction was firstly developed from the solution of inverse radiometric images forming problems;

PREC of extended objects three dimensional mapping were firstly proposed, synthesized and substantially researched; new criterion of PREC widebandity and ultrawidebandity was proposed.

Key words: microwave radiometry, passive radio complexes, ultrawideband spatio-temporal signals. mapping, radiometric images, coastal water monitoring.

Умовн.друк.арк. 2,2
Наклад 100 прим. Зам. 7-127

Державний університет інфраструктури та технологій
Друкарня ДУІТ.
Адреса друкарні: 04073, Київ, вул. Фрунзе, 9, 417-57-23
Підписано до друку 06.10. 2017 р. Формат 60×84/16.