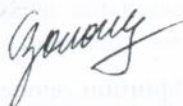


ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

На правах рукопису

УДК 621.396

ВОЛОШИНОВСЬКИЙ Святослав Володимирович



**ФОРМУВАННЯ РАДІОМЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ОБ'ЄКТІВ
В СИСТЕМАХ З АДАПТИВНО-ПАРАМЕТРИЧНОЮ
ОБРОБКОЮ СИГНАЛІВ**

Спеціальність 05.12.17 - *радіотехнічні та телевізійні
системи і пристрої*

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів - 1996



00760051 (J)

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Державному університеті "Львівська політехніка"

Наукові керівники - доктор технічних наук,
професор **ГРИЦЬКІВ Зенон Дмитрович**

- кандидат технічних наук,
доцент **ПРУДИУС Іван Никифорович**

Офіційні опоненти - доктор технічних наук,
с.н.с. **ВЛАДІМІРОВ Валеріан Леонідович**

- кандидат технічних наук
с.н.с. **МАРТИНІВ Мирон Стефанович**

Провідна організація - науково-дослідний інститут "**Квант**"
(м. Київ)

Захист відбудеться "20" листопада 1996 р. о "14" год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.04.06.13 в Державному університеті "Львівська політехніка" (290013, Львів -13, вул. С.Бандери, 12)

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка" (290013, Львів -13, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "10" жовтня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
кандидат технічних наук

Ю.М. Романишин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Неперервно зростаючі потреби в отриманні даних для багатьох прикладних ділянок науки та техніки, а також для виробництва, зумовлюють інтенсивний розвиток систем збору інформації, у тому числі і систем радіотехнічного типу. Складність вирішуваних задач приводить до необхідності аналізу просторової структури процесів і полів. При цьому особливого поширення набувають системи, спроможні подавати інформацію у вигляді зображень, які є найбільш інформативною, ефективною та природною формою сприйняття інформації людиною.

Серед радіотехнічних систем збору інформації особливе місце належить радіометричним системам (РМС), які, як відомо, функціонують на основі використання власного випромінення досліджуваних об'єктів в радіочастотному діапазоні. До переваг таких систем відносять порівняно високу інформативність одержуваних зображень, здатність формувати зображення в специфічних зовнішніх умовах, скритність роботи, суттєве зменшення споживаної системою потужності, маси та габаритів системи. Послідовне впровадження РМС дозволить на якісно новому рівні розв'язати ряд задач, серед яких, наприклад, **виявлення об'єктів** (в межах аеропортів, морських та річкових портів, на трасах річкової навігації тощо), **картографування** (берегової лінії акваторій із складним рельєфом, міських районів з метою моніторингу навколишнього середовища, посівів сільськогосподарських культур, водної поверхні, хмарового покриву тощо), **оцінка зображень об'єктів** з метою їх подальшого розпізнавання. Однак для ефективного вирішення цих та подібних задач необхідне покращення ряду параметрів і характеристик РМС до яких, в першу чергу, слід віднести просторову роздільну здатність, швидкодію, завадозахищеність, габарити та масу антенних пристроїв РМС. Зі сказаного впливає актуальність дисертаційної роботи.

В рамках даної роботи задача досліджень у цілому сформульована як пошук нових системних рішень щодо побудови РМС малої дальності дії (до 3 км) з високою просторовою роздільною здатністю, яка має більш високі, у порівнянні з відомими рішеннями, показники технічної реалізації (менша апертура антени, більш висока стійкість характеристик РМС до шумового впливу та дії дестабілізуючих факторів при "прийнятному" обсязі апаратурної реалізації).

Поставлена задача розглядається з позиції розв'язку обернених задач, де корисна інформація добувається шляхом вторинної обробки. У свою чергу, обернені задачі зводяться до розв'язку інтегральних рівнянь, які здебільшого є некоректними за Адамаром і вимагають спеціальних методів регуляризації.

Мета роботи полягає в розробці, теоретичному та експериментальному дослідженні методу формування радіометричних зображень (РМЗ) об'єктів з підвищеною просторовою роздільною здатністю і узгодженому з цим методом синтезі оптимальних антенних систем.

Для досягнення вказаної мети поставлено наступні задачі:

- проведення аналізу відомих методів відновлення зображень щодо їх придатності для розв'язку задач відновлення радіометричних зображень об'єктів в умовах жорстких апаратних і часових обмежень при фіксованому максимальному розмірі апертури приймальної антени;

- вибір критерію точності відновлення зображень як засобу порівняльної оцінки якості відновлення зображень;

- розробка вимог до математичної моделі системи формування радіометричних зображень, які при технічній реалізації методу обробки приводять до найбільш простих технічних рішень;

- розробка методу відновлення радіометричних зображень об'єктів, який характеризується підвищеною стійкістю до шумів, швидкодією та адаптацією до поточної обстановки;

- синтез антенних систем, узгоджених із методом вторинної обробки, виходячи з умов мінімізації похибки формування зображень системою в цілому;

- проведення експериментального підтвердження теоретичних висновків та результатів комп'ютерного моделювання на прикладі тестових об'єктів.

Методи дослідження. Для розв'язку поставлених задач в роботі використовувався апарат цифрової обробки багатомірних сигналів, лінійної алгебри, теорії інтегральних рівнянь, елементів функціонального аналізу, варіаційного числення та методів розв'язку некоректних обернених задач.

В ході роботи розв'язувалися проблеми різного рівня: постановка задачі, розробка математичної моделі та методу розв'язку, проведення експерименту та обробка його результатів.

Наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

1. Запропоновано та експериментально перевірено метод відновлення радіометричних зображень об'єктів, який базується на розв'язку оберненої задачі на основі ітераційних методів з параметричними обмеженнями на розв'язок та адаптивною регуляризациєю і дозволяє суттєво підвищити характеристики радіометричних систем в умовах апаратних, часових і апертурних обмежень.

2. Вперше для задач відновлення зображень об'єктів запропоновано підхід, який полягає в підборі оптимальної структури антенної системи, узгодженої з екстраполяційними можливостями методу відновлення зображень, що дозволяє розглядати процес розробки різних функціональних вузлів радіометричних комплексів з єдиних позицій.

3. У відповідності з запропонованим методом відновлення зображень встановлено розподіл поля в апертурі приймальної антени та проведено синтез розріджених антенних решіток, які забезпечують задані вимоги щодо точності формування зображень при фіксованому розмірі решітки з меншою кількістю антенних елементів.

4. Розроблено методику подання функції спрямованості антени за допомогою просторово-роздільних функціональних рядів, що спрощує процес відновлення зображень щодо загальної кількості операцій та складності розрахунків.

5. Сформульовані основні вимоги та практичні рекомендації до апаратурної реалізації пристроїв оцінки параметрів РМЗ об'єктів.

6. Запропоновано програмне забезпечення для аналізу та синтезу радіометричних систем формування зображень, яке дозволяє узгодити структуру антенної системи з конкретним видом цифрової обробки РМЗ і встановити основні метрологічні характеристики таких систем.

Обґрунтування і достовірність отриманих в роботі результатів, висновків і рекомендацій визначається використанням в їх основі загально-прийнятих методів радіофізики; широко вживаних моделей, які враховують основні процеси в некогерентних системах; експериментальними результатами, отриманими в даній роботі; використанням адекватного математичного апарату; співставленням результатів даної роботи з результатами, отриманими в роботах інших авторів.

На захист виносяться наступні наукові положення та результати:

1. Для підвищення ефективності радіометричних систем щодо побудови зображень об'єктів з підвищеною роздільною здатністю в умовах жорстких обмежень на фізичні розміри приймальної антени, часта апаратуру обробки доцільно використати нелінійні методи відновлення зображень на основі ітераційних схем з обмеженнями на регуляризацію.

2. Доцільна побудова радіометричної станції базується на узгодженні характеристик антенних систем із особливостями метода відновлення зображень, зумовлених його екстраполяційними можливостями щодо однозначного продовження спектральних гармонік зображення, яке підлягає реставрації.

3. Для підвищення екстраполяційних можливостей алгоритма відновлення зображень слід використовувати наявну апріорну інформацію про предмет радіометричного дослідження у вигляді обмежень на розв'язок поряд з проведенням попередньої фільтрації зображень з метою зменшення рівня зашумленості даних, а також адаптивно-параметричний підхід, який дозволяє адаптуватися до локальних особливостей зображення.

4. Метод відновлення радіометричних зображень на основі "швидких" цифрових алгоритмів обчислення згортки, який має високі показни-

ки технічної реалізації, що досягається використанням просторово-роздільної апроксимації функції спрямованості антени.

5. Методика подання функції спрямованості антени просторово-роздільними функціональними рядами.

6. Порівняльна оцінка ефективності використання найбільш відомих методів відновлення зображень в радіометричних комплексах у поєднанні з типовими розподілами поля в апертурі антени і можливостями забезпечення необхідної точності відновлення зображень за допомогою розріджених антенних решіток зі зменшеною кількістю елементів.

7. Програмне забезпечення для розв'язку задач відновлення зображень та моделювання радіометричних систем формування зображень.

Реалізація і впровадження результатів. Теоретичні та практичні результати, отримані автором, використовувалися в науково-дослідних роботах Львівського науково-дослідного радіотехнічного інституту та Фізико-механічного інституту ім. Карпенка НАН України (м. Львів), що засвідчено актами впровадження.

Апробація роботи. Окремі результати роботи доповідались і обговорювались на: 12 міжнародному симпозіумі з проблем електромагнітної сумісності "Electromagnetic Compatibility" (Вроцлав, 1994); міжнародній конференції "Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів" (Львів, 1994, 1996); засіданні національної асоціації "Анени" (Харків, 1994); міжнародній конференції "Сучасна радіолокація" (Київ, 1994); 3 міжнародній конференції "Досвід та застосування САПР в мікроелектроніці" (Львів, 1995); міжнародній конференції "Holography and Correlation Optics" (Чернівці, 1995); конференції "Telecommunications KST'95" (Бидгощ, 1995); міжнародній конференції "Техніка передачі, приймання та обробки інформації" (Харків, 1995); міжнародній конференції "Теорія і техніка антен" (Харків, 1995); 2 конференції "TELSIKS'95" (Ніш, 1995); XI міжнародній конференції "MIKON'96" (Варшава, 1996), міжнародній конференції "Design Methodologies for Signal Processing" (Закопане, 1996), XXV Генеральній асамблеї URSI (Ліль, 1996).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 20 роботах, з них 9 статей. Новизна технічного рішення щодо способу формування радіометричних зображень захищається заявкою на винахід. При цьому в роботах, написаних у співавторстві здобувачу належить: розробка всіх алгоритмів та обробка результатів числового моделювання; в роботах [4-7] - обґрунтування та розробка комплексного адаптивно-параметричного методу відновлення зображень; в роботах [11,12, 17] - розробка математичної моделі каналу формування РМЗ об'єктів і оцінка ступеня спотворення зображень; в роботах [1,13] - постановка задачі та комп'ютерне моделювання відновлення просторових сигналів на

основі метода Джансона; в роботах [8,9,14,16,18,19] - новий підхід до синтезу антенних систем, узгоджених з властивостями нелінійного методу відновлення зображень, проведення комп'ютерного моделювання, оцінка метрологічних характеристик РМС, формулювання рекомендацій до антенних пристроїв, принцип врахування анізотропії зображень при розробці РМС; в роботі [20] - розробка методики подання функції спрямованості антени просторово-роздільними рядами.

Структура і обсяг дисертації. Робота складається з вступу, чотирьох розділів і висновків, які викладені на 197 сторінках машинописного тексту (у тому числі 77 сторінок рисунків і таблиць), списку літератури з 120 найменувань, додатків на 73 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблем, які досліджуються в роботі, мета досліджень, коротко викладено зміст дисертації, отримані в ній результати та основні положення, які виносяться на захист.

Перший розділ **“Аналіз методів відновлення зображень. Розробка математичної моделі каналу формування РМЗ”** має частково оглядовий характер і відображає сучасний стан техніки радіометрії та тих проблем, які стримують подальший розвиток цієї галузі. Серед основних вихідних факторів виділено обмеження на апертуру приймальної антени, допустимий час обробки результатів вимірювань та складність апаратури, яка реалізує необхідну обробку (швидкодія процесора, оперативна пам'ять).

З урахуванням цих особливостей викладено загальну постановку задачі та обґрунтовано основні вимоги до математичної моделі системи формування РМЗ. В результаті розв'язку поставленої задачі встановлено, що поставленим вимогам найбільш повно відповідає детерміністична модель системи формування РМЗ, яка описується двомірним інтегральним рівнянням Фредгольма першого роду з різницеvim ядром, яке отримано в результаті аналізу просторово-частотної кореляційної форми подання сигналу на виході радіометричного приймача. Крім зазначених особливостей така модель дозволила безпосередньо встановити ступінь спотворення РМЗ атмосферою та діаграмою спрямованості антени (ДСА), а також визначити енергетичний потенціал на виході приймача, що в сукупності визначає подальший вибір методів для усунення цих спотворень, а отже і структуру РМС в цілому.

Для оцінки “якості” отриманих РМЗ проведено аналіз та вибір критеріїв, які відображають характеристики точності системи. Як критерій якості формування зображень вибрано принцип “подібності” з порівнянням зображень у метричному просторі квадратично інтегрованих функцій. У відповідності з вибраним критерієм досліджено вплив розподілу поля та геометрії антени (визначників форми ДСА) на похибку формування РМЗ. Серед досліджених розподілів мінімальну похибку забезпечує рівномірний розподіл поля в антені, оскільки йому притаман-

ний найвищий ступінь відбору енергії з апертури. Показано, що при цьому використання розглянутих розріджених антенних решіток в системах без обробки є недоцільним, оскільки похибка формування РМЗ є незменшуваною при збільшенні розмірів апертури. Це диктується тим, що хоча при збільшенні апертури зростає гранична частота просторового спектра ДСА, однак одночасно росте неоднозначність вимірювань, зумовлена багатопелюстковістю ДСА, що в свою чергу визначається наявністю "дірок" в просторовому спектрі ДСА. При технічно доцільних розмірах приймальної апертури відзначена неспроможність розглянутих систем (тобто систем без обробки сигналів, спрямованої на підвищення просторової роздільної здатності) передавати детальну структуру РМЗ об'єкта, що визначається невідповідністю між просторовим спектром РМЗ і просторовим спектром антенної системи.

З метою формування більш якісних РМЗ об'єктів проведено аналіз основних підходів до розв'язку цієї задачі з позицій методів прикладного спектрального аналізу та методів розв'язку обернених математичних задач. Враховуючи всі переваги та недоліки цих методів, вибір зупинено на останніх і запропоновано розглядати задачу формування РМЗ як процес відновлення характеристик просторових полів. У відповідності з цим проведено аналіз та систематизацію відомих методів відновлення зображень щодо придатності їх використання саме в РМС в математичному та технічному аспектах, тобто щодо спроможності цих методів однозначно відновлювати РМЗ при заданих спотвореннях ДСА та відношенні сигнал/шум і існуючих вимогах до апаратури, яка реалізує цю обробку в межах відведеного часу. Згідно з проведеною класифікацією методів встановлено, що найбільш узгоджуються з жорсткими вимогами функціонування РМС нелінійні методи відновлення зображень на основі ітераційних алгоритмів розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь з обмеженнями на розв'язок.

Другий розділ "**Розробка та дослідження адаптивно-параметричного метода відновлення РМЗ**" присвячено розгляду оберненої задачі, тобто задачі відновлення РМЗ об'єкта з усуненням спотворень, внесених системою формування зображень. З єдиних вихідних позицій проведено синтез комплексного адаптивно-параметричного метода відновлення зображень, основу якого складають вищезгадані ітераційні методи. Розробка метода проведена з урахуванням ефективності та простоти технічної реалізації обчислювального процесу, що дозволило звести основні математично місткі операції до обчислення двомірних згорток. Вихідним пунктом при розробці метода виступала ідея мінімізації похибки відновлення РМЗ об'єкта. Для цього записано та проаналізовано основні співвідношення, які визначають цю величину. Так, зокрема встановлено, що основні похибки при розв'язку задачі відновлення РМЗ зумовлені двома складовими - параметрами регуляризації задачі (кроком просторової дискретизації

зації, тихонівською/вінерівською регуляризацією, кількістю ітерацій, які мають “згладжуючий” вплив, і неповним усуненням спотворюючого впливу ДСА, яке виражається через незбіжність ітераційного процесу з межами граничної частоти системи формування.

Для усунення впливу регуляризації-згладження запропоновано використати адаптивний підхід до розв’язку задачі у ваговому просторі, для забезпечення збіжності ітерацій - методи передобумовлення та обмеження на розв’язок, які гарантують виконання умов стискання. У відповідності з цим проаналізовано апріорну інформацію, яка є доступною може використовуватися в РМС, а також встановлено інформаційну вагу кожного обмеження у складі ітераційних методів з врахуванням складності їх технічної реалізації. З метою усунення апріорної недовизначності задачі запропоновано використати параметричний підхід для оцінок похідних параметрів зображення, що дозволяє одночасно забезпечити збіжність ітерацій та підвищити завадостійкість метода.

Узагальнений метод відновлення зображень можна записати згідно з формулою

$$\hat{f}^{k+1} = \left(I - \beta \left(A^k H + \alpha C^* C \right) \right) \mathfrak{R} \left[\hat{f}^k \right] + \beta A^k g, \quad (1)$$

де \hat{f}^{k+1} - оцінка зображення на $k+1$ ітерації, I - одинична матриця, релаксаційний параметр β забезпечує збіжність ітерацій і здебільшого вибирається постійним, A^k - передобумовлююча матриця, яка має функції прискорення збіжності ітерацій і згладження шуму у вхідних даних, H - матриця діаграмоутворення, отримана при дискретизації різницевого ядра рівняння Фредгольма. Коефіцієнт α є параметром регуляризації Тихонова, а матриця C утворена з стабілізуючого функціоналу Тихонова, g - згладжене зображення (результат вимірювань), “*” - знак ермітового спряження.

Функції відбору можливих розв’язків покладені на обмежуючий функціонал $\mathfrak{R} \left[\hat{f}^k \right]$, який можна записати в загальному випадку так:

$$\mathfrak{R} \left[\hat{f}^k(r) \right] = \begin{cases} \hat{f}^k(r), a(r) \leq \hat{f}^k(r) \leq b(r), \\ 0, \text{ інакше,} \end{cases} \quad (2)$$

де $r \equiv (i, j)$ - координати елемента зображення, $a(r)$ і $b(r)$ - обмежуючі функції, які отримуються в параметричному вигляді для оцінки плавності локальних фрагментів зображення та області можливих значень розв’язку.

Адаптивна регуляризація при квадратичному стабілізуючому функціоналі будується за схемою

$$\alpha = \mathfrak{I}^{-1} \left\{ \frac{\alpha_0}{|\tilde{F}_0(m)|^2} \right\}, \quad (3)$$

де $\tilde{F}_0(m)$ - фур'є-образ зображення-прототипу f_0 , яке береться з результату попередньої ітерації або з даних параметричного обмеження верхньої границі можливих значень розв'язку, α_0 - константа, а \mathfrak{I}^{-1} - позначає обернене перетворення Фур'є. Крім цього встановлено графічну залежність (рис.1) між адаптивним параметром регуляризації і параметрами зображення. Дана залежність враховує той факт, що на ділянках різких переходів і відносно великих f регуляризація послаблюється, а на

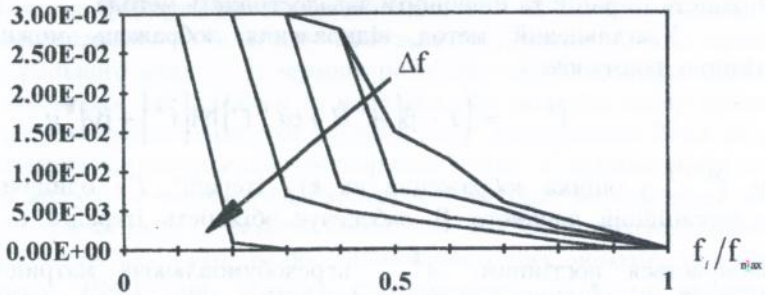


Рис.1. Адаптивний параметр регуляризації α як функція абсолютної величини зображення та її зв'язку з величиною $\Delta f = |f - f_{-1}|/f_{\max}$, рівною {0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1}.

ділянках зображення з повільними змінами інтенсивності і відносно малими f , співрозмірними з певним відношенням сигнал/шум, регуляризація посилюється.

Таким чином, загальний комплексний адаптивно-параметричний метод відновлення РМЗ складається з наступних етапів:

- фільтрації отриманого зображення з метою зменшення його зашумленості при врахуванні апріорної інформації про граничну частоту ДСА;
- параметричної оцінки області можливих значень розв'язку;
- ітераційного розв'язку з врахуванням отриманих параметричних обмежень на розв'язок і адаптивною регуляризацією у відповідності з локальними особливостями зображення.

На основі запропонованого метода проведено дослідження основних метрологічних характеристик РМС (роздільної здатності, завадостійкості) на прикладі тестових РМЗ, а також порівняння отриманих резуль-

татів з даними обробки на основі найбільш поширених методів типу регуляризації Тихонова та фільтрації Вінера. Дослідження проводилося щодо розділення двох двомірних прямокутних імпульсів при використанні різноманітних антенних систем в умовах шумового впливу. В результаті моделювання встановлено можливе покращення роздільної здатності, яке становить 3,3 рази для відношення сигнал/шум q порядку 12 дБ, а для $q \geq 20$ дБ - 5 разів. При цьому існує оптимальна структура антенної системи, яка забезпечує найвищі метрологічні характеристики РМС в поєднанні з даним методом відновлення РМЗ шляхом додаткової мінімізації похибки формування РМЗ.

У третьому розділі **“Синтез антенних систем, узгоджених з розробленим методом відновлення зображень”** поставлено і розв’язано задачу синтезу цих антен. Розгляд такої задачі є особливо актуальним, оскільки ні її повної постановки, ні аналізу часткових випадків з конкретними числовими результатами та рекомендаціями в доступній літературі не виявлено.

Відповідно до цього сформульовано нові вимоги до антенних систем у складі РМС з нелінійною обробкою сигналів, що дозволило зменшити загальну кількість антенних елементів при забезпеченні заданих метрологічних характеристик, адаптувати антену до геометрії носія станції, зменшити масу антени та кількість приймальних каналів. Дослідження проведено на прикладі δ -імпульсного зображення (рівномірний спектр), що дозволило оцінити “стискання” ДСА у порівнянні з фізичною шириною ДСА. Результуючі дані зняті з розгину кривої швидкості мінімізації похибки відновлення зображення за 200 ітерацій. Найбільш характерні дані наведено на рис.2 для неперервних антен і рис.3 - для розріджених антенних решіток. На графіках наведено залежність похибки формування зображення δ_f^2 від розміру апертури $D=(2n+1)d$, де $n \in [2,10]$ і $d = \lambda/(M/2 + 1)\Delta\theta$ - розмір однієї підрешітки, а λ - довжина хвилі, M - формат зображення, $\Delta\theta$ - крок просторової дискретизації. Відстань між елементами решітки в підрешітках рівна $\lambda/2$, а M в даному випадку прийнято рівним 40, оскільки це відповідає ряду обмежень на технічно доцільний формат РМЗ в мобільних РМС і є достатнім для розпізнавання наземних об’єктів.

Для неперервної антени проведено моделювання впливу амплітудного розподілу поля в апертурі, яке задавалося формулою

$$\dot{\chi}(x, y) = \left((1-a) + a \cdot \left(\frac{2x}{D} \right)^2 \right) \cdot \left((1-a) + a \cdot \left(\frac{2y}{D} \right)^2 \right), \quad (4)$$

на результат відновлення зображення. Так, криві 9, 10, 11, 12 відповідають даним безпосередніх вимірювань без обробки з метою розв’язку

оберненої задачі для рівномірного розподілу поля $a=0,00$, косинусного розподілу, розподілу при $a=0,58$ та $a=0,80$, відповідно. Для цих же розподілів результат відновлення тестового РМЗ методом Тихонова поданий кривими 1, 2, 3, 4, а за допомогою запропонованого метода - кривими 5-8.

Аналогічні залежності наведено на рис.3 для двох модельних антенних решіток (рис.3,а - 4 підрешітки, рис.3,б - 16 підрешіток), які склали групу з 10 антен базової геометрії. Так, без обробки похибка відновлення для двох антен має вигляд узагальненої кривої 7, тобто є непокрещуваною при збільшенні розмірів апертури, оскільки при цьому кількість антенних елементів залишається постійною. Застосування ж лінійної обробки дозволяє отримати залежності 1-3, які відповідають антенам з рис.3,а і рис.3,б при рівномірному розподілі поля в межах апертури та рис.3,б при $a=0,2$, відповідно. З рисунків видно, що існує чітка границя розміру антени $D=17d$ ($n=8$), перевищення якої обумовлює ріст похибки. Така залежність пояснюється неспроможністю лінійних методів одночасно розв'язувати задачу екстраполяції спектра за межі граничної частоти просторового спектра ДСА та його інтерполяції в межах смуги між сусідніми ненульовими ділянками спектра. Це і відрізняє специфіку задач відновлення РМЗ для неперервних антен і розріджених антенних решіток. Запропонований метод дозволяє усунути цей недолік, про що свідчать криві 4-6, які мають вигляд, аналогічний до випадку неперервних антен.

Таким чином, мінімальну похибку при $D \geq 7d$ ($n=3$) для неперервних розкривів забезпечує розподіл поля при $a=0,5 \div 0,6$, а при $D < 7d$ - рівномірний розподіл. При використанні розріджених решіток слід орієнтуватися на антени типу рис.3,б з розподілом поля при $a=0,2 \div 0,3$ для $D \geq 7d$, а для $D < 7d$ - вибирати рівномірний розподіл.

Найкращі результати притаманні так званим компаунд-інтерферометричним методам приймання (крива 9 - обробка методом Тихонова, крива 8 - запропонованим методом), тобто антенам із модуляцією прийнятих сигналів.

Зазначені особливості пояснюються існуванням збалансованого відношення між підйомом високочастотних компонент коло граничної частоти спектра ДСА і відповідним зменшенням в ділянці середніх частот. Тому вищезгадані антени можуть розглядатися як квазіоптимальні у порівнянні з компаунд-інтерферометричними антенами, еквівалентний спектр яких має вигляд ідеального фільтра низьких частот.

Запропоновано методику апроксимації функції спрямованості апертурних антен просторово-роздільними функціональними рядами, що суттєво зменшує час обчислень двомірних згорток, а також спрощує аналіз антен. Апроксимація базується на розкладі двомірної структури

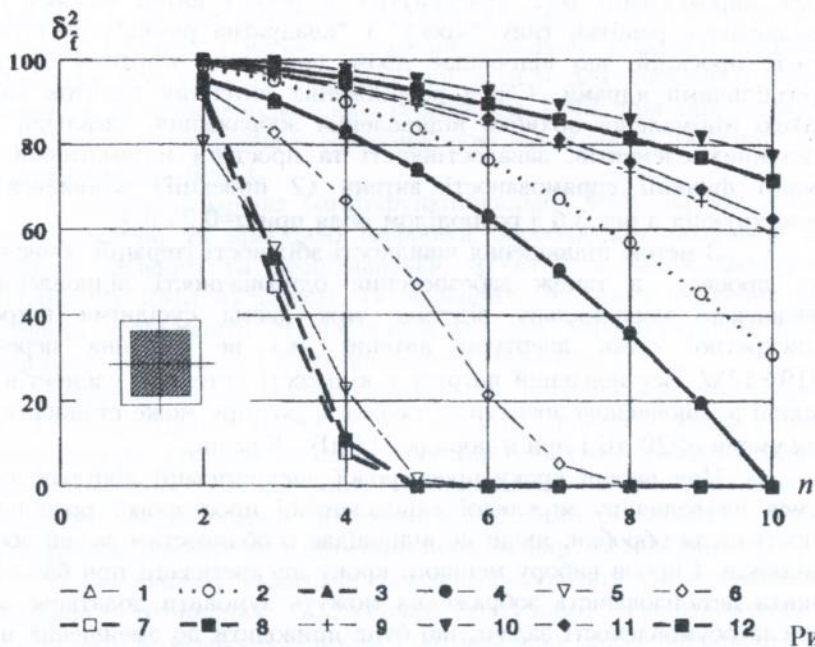


Рис.2

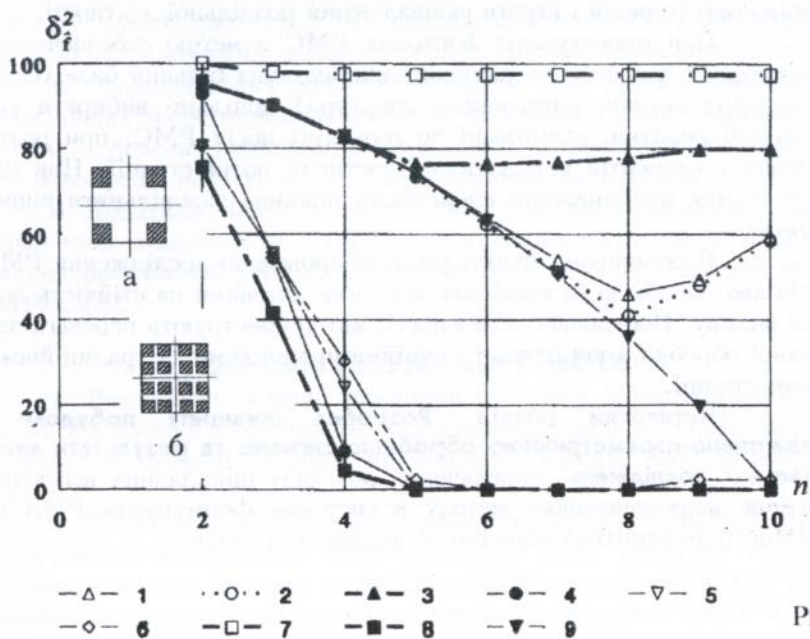


Рис.3

решітки на одновимірні осеві проєкції для розрахунку загальної ДСА шляхом послідовної згортки ДСА одновимірних проєкцій. Встановлено, що для апроксимації всіх розглянутих в роботі антен базової геометрії, включаючи решітки типу "хрест" і "квадратна рамка", достатньо чотирьох проєкцій, що відповідає двом двовимірним згорткам з просторово роздільними ядрами. Серед розріджених антенних решіток найкращою щодо мінімальної похибки відновлення зображення, загальної кількості антенних елементів, завадостійкості та простоти математичної апроксимації функції спрямованості антени (2 проєкції) виявилася антенна конструкція з рис.3,6 з розподілом поля при $a=0,2\div 0,3$.

З метою підвищення швидкості збіжності ітерацій обчислювального процесу, а також забезпечення однозначності відновлення РМЗ, визначено максимальну відстань між двома сусідніми підрешітками дискретної сітки апертури антени, яка не повинна перевищувати $(10\div 12)d$. Встановлений вигравш у кількості антенних елементів у порівнянні з заповненою апертурою такого ж розміру може становити 12 разів за умови $q>20$ дБ і при q порядку 14 дБ - 6 разів.

При виборі кроку просторової дискретизації доцільно орієнтуватися на величину можливої еквівалентної просторової роздільної здатності після обробки, якщо це відповідає особливостям задачі або теоремі відліків. Спроби вибору меншого кроку дискретизації при бажанні збільшити деталізованість зображення можуть зумовити додаткове зростання числа обумовленості задачі, що буде приводити до зменшення швидкості збіжності ітерацій і втрати еквівалентної роздільної здатності.

При проєктуванні бортових РМС з метою забезпечення високої роздільної здатності за рахунок використання більшої бази (еквівалентна апертура антени, синтезована апертура) доцільно вибирати розріджені антенні решітки, адаптовані до геометрії носія РМС, при розташуванні крайніх елементів у віддалених частинах носія станції. При цьому відстань між найближчими елементами повинна задовільняти вище згадану умову.

В останньому пункті розділу проведено дослідження РМС з нелінійною обробкою та квазіоптимальними антенами на стійкість до шумового впливу. Побудовано залежності, які демонструють переваги запропонованої обробки в порівнянні з лінійними методами та традиційною побудовою станції.

Четвертий розділ "**Розробка принципу побудови РМС з адаптивно-параметричною обробкою сигналів та результати експериментальних досліджень**" присвячений розгляду прикладних аспектів застосування запропонованого методу в системах формування РМЗ при вирішенні різноманітних народно-господарських задач.

При розробці пристрою оцінено загальні характеристики методу відновлення РМЗ щодо необхідної швидкодії процесора та оперативної пам'яті при цифровій реалізації системи. Проведено оптимізацію обчислювального процесу з метою зменшення загальної кількості операцій з урахуванням особливостей математичної моделі для вибраного формату зображення. Встановлено доцільну розмірність РМЗ, при якій запропонована оптимізована обробка є ефективнішою від обробки на основі швидкого перетворення Фур'є.

Розроблено варіант багатофункціональної РМС на базі спільної антенної системи та пристрою цифрової обробки для розв'язку завдання виявлення, селекції та розпізнавання об'єктів, а також формування високоякісних РМЗ місцевості. Це дозволило на основі спільних вихідних даних узагальнити та порівняти основні характеристики РМС традиційною побудовою і запропонованою обробкою.

Сформульовано основні вимоги та рекомендації до апаратури РМС з використанням розробленого методу. Проведено вибір серійного мікропроцесора для технічного відтворення системи. Наведено функціональну схему пристрою цифрової обробки РМЗ, яка реалізована шляхом імітаційного моделювання на комп'ютері ІВМ 386DX/387. Описано структуру програмного забезпечення, його функції та можливості.

В заключному параграфі наведено результати експериментальних досліджень, отриманих в умовах натурального експерименту, які демонструють можливості обробки при розв'язку задач підвищення просторової роздільної здатності РМС, покращення контрасту радіометричних сцен, а також спроможність систем забезпечити необхідні передумови для проведення розпізнавання об'єктів. Наведені дані підтвердили правильність основних теоретичних висновків та результатів комп'ютерного моделювання і довели принципову можливість підвищення еквівалентної просторової роздільної здатності РМС щонайменше в 3 рази.

В Додатках наведено допоміжні теоретичні викладки, роздруковані програми моделювання РМС і відновлення зображень, а також акти впровадження результатів роботи. Програмне забезпечення написано на мові Turbo Pascal 7.0.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Розроблено основні принципи побудови інформаційно-вимірних комплексів з нелінійною обробкою сигналів в умовах жорстких обмежень на фізичні розміри приймальної антени, час та апаратури обробки.

2. Розроблено та експериментально перевірено адаптивно-параметричний метод відновлення РМЗ об'єктів, який дозволяє підвищити роздільну здатність системи за просторовою координатою в 3÷5 разів порівнянні з системами на основі традиційної побудови станції, а тако-

ряд інших характеристик у порівнянні з РМС, де використовуються лінійні методи типу регуляризації Тихонова та фільтрації Вінера.

3. Запропоновано і розвинуто новий підхід до постановки та розв'язування задач синтезу оптимальних антенних систем, узгоджених з екстраполяційними/інтерполяційними можливостями метода відновлення зображень, що накладає ряд відмінних вимог до антен у порівнянні з системами на основі традиційних підходів.

4. У відповідності з запропонованим методом відновлення РМЗ у контексті згаданого підходу встановлено розподіл поля в апертурі антени, а також визначено геометрію розріджених антенних решіток, що дозволило зменшити загальну кількість антенних елементів в $6 \div 12$ разів у порівнянні з заповненими апертурами при забезпеченні заданих метрологічних характеристик системи і адаптувати антенну систему до носія станції.

5. Запропоновано ефективну методику подання функції спрямованості апертурних антен, яка підвищує можливості оперативного моделювання задач відновлення зображень. Зокрема, таке подання дозволяє скоротити загальну кількість операцій множення при обчисленні двомірних згорток з величини M^4 до $2M^3$.

6. Виходячи з ідеології комплексування РМС з методами відновлення зображень, сформульовано основні вимоги та практичні рекомендації до технічної реалізації цифрових пристроїв обробки РМЗ об'єктів.

7. Розроблено програмне забезпечення для моделювання РМС формування зображень об'єктів, а також розв'язку задач обробки зображень.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В ПРАЦЯХ:

1. Волошиновський С.В., Захарія Й.А., Миськів М.В., Прудіус І.Н., Сумик М.М. Просторове відокремлення радіосигналів на основі обробки вихідних даних приймальної антенної решітки //Збірник праць співробітників та випускників радіотехнічного факультету Львівського політехнічного інституту. - Львів, 1992. - с. 78-81.

2. Методи обробки зображень в системах побудови радіометричних зображень об'єктів /Волошиновський С.В.; Держ. ун-т "Львівська політехніка". - Львів, 1995. - 25 с. - Деп в ДНТБ України 02.11.95, №2344- Ук95.

3. Оцінка підвищення роздільної здатності радіометричної системи формування зображень з нелінійною обробкою сигналів /Волошиновський С.В.; Держ. ун-т "Львівська політехніка". - Львів, 1995. - 10 с. - Деп в ДНТБ України 02.11.95, №2343- Ук95.

4. Z. Grytskiy, B. Nitsovich, I. Prudius, S. Voloshynovskiy. Adaptive choice of regularization parameter in iterative methods of optical data processing // Proceedings

- of SPIE, International Conference on Holography and Correlation Optics, 15-19 May, 1995, Chernivtsy, Ukraine. vol. 2647. pp. 235-242.
5. Grytskiv Z., Voloshynovskiy S. Radiometry image processing for high resolution TV reproduction //Referat. Krajowe sympozjum TELEKOMUNIKACJI '95, Bydgoszcz, 6-8 Sept. 1995, vol. B. - pp. 521-526.
6. Z. Grytskiv and S.Voloshynovskiy. Radiometry imaging system with digital signal processing //Proceedings of 2nd Conference Telecommunication in Modern Satellite and Cable Services "TELSIKS'95", 10-12 October 1995, Nis, Yugoslavia. pp.186-189.
(також опублікована в збірнику університетських праць Університету Ніш)
Z. Grytskiv and S.Voloshynovskiy. Radiometry imaging system with digital signal processing //Facta Universitatis (Nis), series: Electronics and Energetics, Vol.8, №2, 1995, pp. 263-269.
7. I.Prudius, Z.Grytskiv, S.Voloshynovskiy. Radiometry image processing based on nonlinear iterative methods //Workshop on Design Methodologies for Signal Processing, 29-30 August, 1996, Zakopane, Poland, pp.21-27.
8. Волошиновский С.В., Грицкив З.Д. О возможности использования боковых лепестков диаграммы направленности антенны в радиометрических системах //Радиотехника и электроника, 1996, том 41, № 8. - с.1-3.
9. Z. Grytskiv, S.Voloshynovskiy. Spatial resolution enhancement of passive radar imaging systems with unfilled array // Proceedings of XI International Microwave Conference "MIKON'96", 27 - 30 May 1996, Warsaw, Poland. pp.505-508.
10. S. Voloshynovskiy. Antenna design for nonlinear methods of signal processing in radiometry imaging systems // XXV General Assembly of URSI, 28 August - 5 September, 1996, Lille, France, p. 665.
11. Грицьків З.Д., Прудіус І.Н., Сумик М.М., Волошиновський С.В. Просторова модель каналу формування радіометричних зображень об'єктів //Матеріали міжнародної конференції "Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки кадрів", Львів, 21-27 лютого 1994 р., - ч.1. - с. 75-77.
12. Грицьків З.Д., Прудіус І.Н., Захарія Й.А., Волошиновський С.В. Оцінка впливу флуктуацій джерел та діаграми спрямованості антенної решітки на відтворення сигналу //Матеріали міжнародної конференції "Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки кадрів", Львів, 21-27 лютого 1994 р., - ч.1. - с. 68-70.
13. Мыськив М.В., Волошиновский С.В. Нестандартный подход к построению системы радиолокационного распознавания объектов в составе радара с высокой разрешающей способностью по дальности //Научно - технический сборник международной конференции "Современная радиолокация", Киев, 1994. - с. 123-124.
14. Волошиновский С.В., Грицкив З.Д., Прудіус І.Н. Формирование радионизображений объектов на основе квазирешеток //Тезисы докладов

международной конференции "Теория и техника передачи, приема и обработки информации", Туапсе, 18-21 сентября 1995 г. - с. 66-67.

15. Волошиновский С.В. Обработка радиометрических изображений объектов с помощью итерационных методов с ограничениями на решение и параметрической регуляризацией //Тезисы докладов международной конференции "Теория и техника передачи, приема и обработки информации", Туапсе, 18-21 сентября 1995 г. - с. 68-69.

16. Прудіус І.Н., Волошиновський С.В. Моделювання інтерферометричних систем із постійною базою при використанні метода Фіснупа //Тези доповідей науково-технічної конференції "Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР мікроелектроніки", Львів, 20-26 лютого 1995р., -ч.2. - с. 182.

17. Волошиновський С.В., Грицьків З.Д., Прудіус І.Н., Гоблик В.В., Миськів М.В. Моделювання радіометричних систем із слабонапрявленою антеною при розв'язку задач підвищення просторової роздільної здатності //Тези доповідей науково-технічної конференції "Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР мікроелектроніки", Львів, 20-26 лютого 1995 р., -ч.2. - с. 124.

18. Волошиновський С.В., Грицьків З.Д., Прудіус І.Н. Узгодження характеристик антенних систем з методами вторинної обробки сигналів //Тези міжнародної конференції "Теорія і техніка антен", Харків, 17-20 вересня 1995 р. - с. 75.

19. Грицьків З.Д., Волошиновський С.В. Синтез антенних решіток для радіометричних систем формування зображень //Матеріали міжнародної конференції "Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів", Львів, 27лютого - 3 березня 1996 р., - ч.1. - с. 116.

20. Прудіус І.Н., Волошиновський С.В. Конструктивна апроксимація апертурних антен в задачах обробки радіометричних зображень //Матеріали міжнародної конференції "Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів", Львів, 27лютого - 3 березня 1996 р., - ч.1. - с. 117-118.

Волошиновский С.В. Формирование радиометрических изображений объектов в системах с адаптивно-параметрической обработкой сигналов.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 - радиотехнические и телевизионные системы и устройства, Государственный университет "Львівська політехніка", Львів, 1996.

Защищается 20 научных работ, которые содержат результаты теоретического и экспериментального исследования радиометрических систем построения изображений с нелинейной обработкой сигналов. Предложен метод восстановления изображений, а также новый подход к синтезу антенных устройств, согласованных с экстраполяционными возможностями метода восстановления. Разработанные алгоритмы реализованы в комплексе программных средств для моделирования радиометрических систем формирования изображений.

Voloshynovskiy S.V. Radiometry imaging system with adaptive-parametric signal processing.

Thesis for a Candidate of Science (Engineering) degree in speciality 05.12.17 - radio engineering and television systems and devices, State University "Lvivska Polytechnika", Lviv, 1996.

The theoretical and experimental results of radiometry imaging system development with nonlinear signal processing are presented in 20 scientific publications. The image restoration method and new approach for design of antennas matched with the method bandlimited extrapolation abilities are proposed. The developed algorithms are realized in radiometry imaging system modeling and simulation software.

Ключові слова: радіометрична система, радіометричне зображення, відновлення зображень, роздільна здатність, синтез антен, антенна решітка, ітераційний метод.

0111082

Підписано до друку 2.10.1996 р. Формат 60x84/16.
 Ум. друк. арк. 1. Зам. 058. Тираж 100 прим.
 Відруковано з оригінал - макету в МП "ВМС".