

[2] Тимчишин М.В.. Одержання і дослідження електричних властивостей плівок CuAgSe. Матеріали для електронної техніки. Сер.Фізична. 1997. Вип.12. С.60–64.

[3] Васильченко Н.В., Борисов В.А., Кременчугский Л.С. Измерение параметров приемников оптического излучения. М., 1983.

[4] Приборы для теплофизических измерений: Каталог ИТТФ АН УССР. К., 1986.

[5] Миколайчук А.Г., Романишин Б.М., Тимчишин М.В. Термоэлектрические свойства сплавов на основе селенидов серебра и меди в тонких пленках // Термоэлектрические методы исследований и контроля состава и качества продукции черной и цветной металлургии: Материалы 2-й науч.-техн. конф. Магнитогорск, 1978. С.38–40.

[6] Timchishin M., Yavorsky B., Gotra O. Miniature gauges of a thermal flow on the basis of thin films of a system Ag-Cu-Se // 2-st International Symposium on Microelectronics Technologies and Microsystems. Lviv, 15–17 June 1998. P.55.

УДК 621.396.96

**Клепфер Є.<sup>1</sup>, Прудіус І.<sup>2</sup>, Синявський А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут

<sup>2</sup> ДУ “Львівська політехніка”, кафедра радіотехнічних пристроїв

## **ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ**

© Клепфер Є., Прудіус І., Синявський А., 2000

У статті запропоновано підхід до реконструкції радіолокаційних зображень, отриманих радіолокаційною системою з синтезованою апертурою. На основі розробленої моделі процесів формування зображення в таких системах, задачу реконструкції коректно представлено розв'язком двовимірного інтегрального рівняння. Охарактеризовано причину спотворень на радіолокаційних зображеннях. Досліджено залежність характеру цих спотворень від координат. На підставі введеного припущення про локальну інваріантність функції розсіювання точки представлено можливість ефективної реконструкції функції розсіюючої здатності за отриманим радіолокаційним зображенням.

The approach for reconstruction of radar images obtained by the synthetic aperture radar system is proposed in the paper. On basis of our elaborated model of image formation processes in the systems the reconstruction problem was correctly established as two-dimensional integral equation solving. The cause of distortions on the radar images was specified. The coordinate dependence of the distortions was investigated. The efficient restoration possibility of scattered ability from obtained radar image was presented taking into account of the assumption about local invariance of point spread function.

## Вступ

У космічній галузі та аеролокації найчастіше використовують активні багатопозиційні радіолокаційні системи (РЛС) побудови зображень з когерентною обробкою – синтезуванням апертури за рахунок переміщення носія РЛС [1-4]. У системах з синтезуванням апертури формування діаграми спрямованості (ДС) рознесене в часі внаслідок переміщення носія антени і забезпечується відповідною просторово-часовою обробкою прийнятих сигналів у системі. Синтезовані апертури дають можливість отримувати вузьку ДС, що значно покращує роздільну здатність, і, відповідно, якість отриманих зображень. У статті розглянуті системи (рис.1), в яких носій РЛС переміщується по прямолінійній траєкторії, внаслідок чого здійснюється просторово-часове сканування об'єктів дослідження. Математичне моделювання таких систем дає змогу ефективно проектувати, аналізувати та оптимізувати алгоритми обробки інформації.

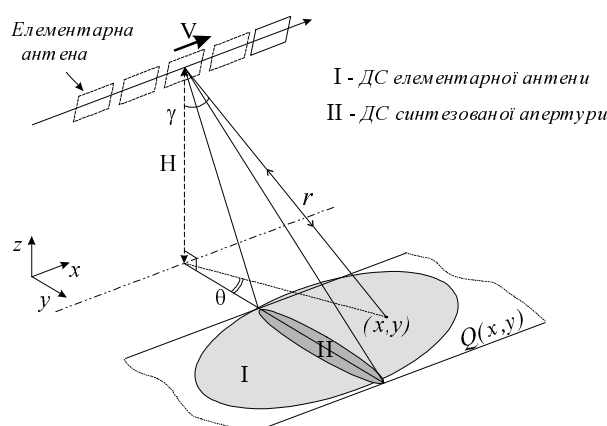
Особливість таких систем полягає у відмінності значення роздільної здатності між поздовжньою  $x$  та поперечною  $y$  координатами внаслідок різної природи процесів формування зображень у цих координатах. Межа роздільної здатності, яку потенційно можна досягнути в системах з синтезованою апертурою, визначається ефективною смугою пропускання просторово-часового тракту системи. За поздовжньою координатою  $x$  роздільна здатність визначається ефективною шириною синтезованої апертури, і потенційно може прямувати до нуля. У поперечній координаті  $y$  роздільна здатність обмежується ефективною шириною спектра зондуючого сигналу. Результати числового моделювання процесів побудови зображень радіолокаційними системами з синтезованою апертурою [4,5] свідчать про те, що методи когерентної погодженої обробки, які традиційно використовують в радіолокації [1, 2], не забезпечують отримання потенційно можливих значень роздільної здатності. Це пояснюється неоптимальністю методів обробки і призводить до втрати якості зображень та зменшення їх візуальної прийнятності. У статті пропонується підхід до покращання якості зображень, отриманих радіолокаційними системами з синтезованою апертурою.

Під час побудови радіолокаційних зображень присутні випадкові чинники, які спричиняють наявність шуму на отриманих зображеннях. Алгоритми зменшення рівня таких випадкових складових у межах статті не розглядаються.

### Лінійна модель процесів побудови зображень синтезованою апертурою.

#### Формулювання задачі реконструкції

З метою визначення спотворюючого впливу тракту системи на отримане зображення розроблено математичну модель процесів побудови радіолокаційних зображень системами з синтезованою апертурою. Таку модель представлено аналітичним взаємозв'язком між



**Рис.1.** Синтезування апертури в радіолокаційних системах побудови зображень.

функцією, що характеризує просторово розподілену розсіювальну здатність (РЗ)  $Q(x, y)$  об'єкта дослідження та результуючим необробленим зображенням  $I(x, y)$  (raw image).

Під час створення моделі здійснено припущення про площинний характер досліджуваного об'єкта, про ізотропність розсіювання елементів об'єкта, про відсутність ефекту вторинних перевідбиттів на поверхні об'єкта дослідження і взаємного впливу дискретних розсіювачів. Введення таких припущень дає змогу записати модель системи [6] у вигляді лінійного двовимірного інтегрального перетворення неперервної функції  $Q(\cdot, \cdot)$  з областю визначення  $(v_{\max}, v_{\min}, Y_{\max}, Y_{\min})$

$$I(X, Y) = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} Q((v - X), y) \cdot G_{\text{sar}}[v, y, Y] dy dv. \quad (1)$$

Ядро перетворення  $G_{\text{sar}}[\cdot, \cdot]$  визначається геометрією синтезування апертури – висотою  $H$ , швидкістю польоту  $V$ , кроком синтезування  $\Delta d$ , кількістю елементів у синтезованій апертурі  $(2M + 1)$ , а також параметрами радіолокаційної системи – формою зондуючого імпульсу  $s_{\text{зонд.}}(t)$ , несучою частотою  $\omega_0$  зондуючого сигналу, амплітудно-фазовими множниками при когерентній обробці  $\dot{C}_k$ , діаграмами спрямованості приймальної  $F_{\text{прийм.}}(\gamma, \theta)$  та передавальної антен  $F_{\text{перед.}}(\gamma, \theta)$ . Аналітично ядро перетворення можна записати у вигляді

$$G_{\text{sar}}[v, y, Y] = c^2 \cdot \sum_{k=-M}^M \dot{C}_k \cdot (F_{\text{перед.}}[\gamma, \theta] \otimes F_{\text{прийм.}}[\gamma, \theta]) \cdot \frac{D^2 + H^2}{D} \times \\ \times s_{\text{зонд.}} \left( \frac{2 \cdot Y}{c} - \frac{\sqrt{D^2 + H^2}}{c} \right) \cdot \exp \left\{ \frac{-j2 \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{D^2 - y^2} \cdot V}{c^2 \cdot \sqrt{D^2 + H^2}} \cdot \left( 2 \cdot Y - \sqrt{D^2 + H^2} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\text{де } \theta = \left( \arctg \left( \frac{\sqrt{D^2 - y^2}}{y} \right) \right), \quad \gamma = \left( \arccos \left( \frac{H}{\sqrt{D^2 + H^2}} \right) \right) \text{ та } D = \sqrt{(v + k \cdot \Delta d)^2 + y^2};$$

$\otimes$  – оператор згортки.

Рівняння спостереження (1), представлене інтегральним перетворенням не потребує переходу між різними системами координат, на відміну від моделей РЛС з синтезованою апертурою, отриманих згідно з перетворенням Радона [7]. Це дозволяє спростити числову реалізацію алгоритмів моделювання та обробки сигналів.

Задача реконструкції РЗ об'єкта дослідження  $Q(x, y)$  за отриманим зображенням  $I(x, y)$  може бути коректно сформульована на основі отриманого рівняння спостереження (1). Тоді реконструкція РЗ полягає у знаходженні оберненого оператора  $G_{\text{sar}}^{-1}$  або в розв'язанні двовимірного рівняння Фредгольма першого роду, яке в операторному вигляді записується виразом

$$\hat{Q} = G_{\text{sar}}^{-1} \cdot I. \quad (3)$$

Формулювання задачі в такій формі є типовим для відновлення оптичних зображень [8]. Але на відміну від класичних задач відновлення [8] особливість представленої задачі

полягає у неможливості використати швидкі алгоритми у зв'язку з тим, що перетворення (1) не належить до перетворень типу згортки. Безпосереднє числове знаходження оберненого оператора  $G_{\text{sar}}^{-1}$  для радіолокаційних зображень реальних розмірів вимагає значних часових затрат та обсягів пам'яті, що вказує на низьку ефективність та непридатність методу. Отже, синтез методу реконструкції розсіювальної здатності з швидким алгоритмом його реалізації повинен ґрунтуватися на вивченні властивостей ядра  $G_{\text{sar}}[\cdot, \cdot]$  перетворення (1).

Лінійність моделі РЛС побудови зображень з синтезованою апертурою дає змогу охарактеризувати спотворюючий вплив системи функцією розсіювання точки. Вона визначається як відгук системи на дельта-подібну вхідну дію і в цьому випадку представляє отримане радіолокаційне зображення одиничного розсіювача з заданими координатами. Проведене числове моделювання [4, 5] функцій розсіювання точки систем з синтезованою апертурою вказує на залежність її форми не тільки від параметрів системи, а також від координат розсіювача. Це свідчить про неінваріантність функції розсіювання точки до зсуву, тобто про відмінність спотворюючого впливу системи на різні ділянки зображення.

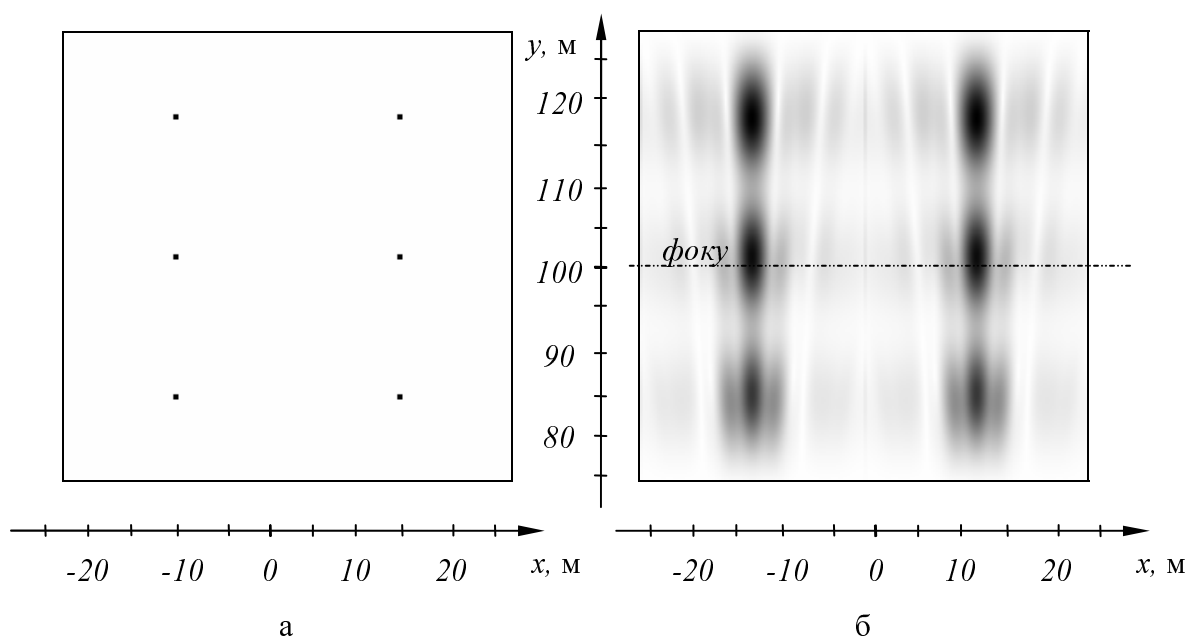
Результати дослідження показали [4, 5], що властивість неінваріантності до зсуву функції розсіювання характерна тільки для поперечної координати  $y$ , при цьому спотворюючий вплив системи є незмінним за поздовжньою координатою  $x$ . Проведений аналіз виразу (2) дав можливість визначити причину неінваріантності до зсуву функції розсіювання точки для РЛС побудови зображень з синтезованою апертурою. Згідно з результатами аналізу встановлено, що основною причиною неінваріантності до зсуву за координатою  $y$  є дефокусуєчі властивості синтезованої апертури.

Основним етапом синтезування апертури є когерентна обробка ехо-сигналів. Класично її здійснюють за допомогою векторного підсумовування прийнятих реалізацій з відповідними амплітудно-фазовими коефіцієнтами  $S_k$  та необхідними часовими затримками. Це дозволяє забезпечувати необхідну форму діаграми спрямованості синтезованої апертури та здійснювати фокусування апертури на визначену відстань. Саме це фокусування апертури є причиною неінваріантності до зсуву функції розсіювання точки в РЛС побудови зображень з синтезованою апертурою.

Збільшення ефективної ширини синтезованої апертури з метою отримання високої роздільної здатності та наявність об'єктів дослідження в проміжній зоні призводить до виникнення значного квадратичного набігання фаз по апертурі. Алгоритми обробки просторово-часових сигналів у системах з синтезованою апертурою [1–5] забезпечують компенсацію квадратичного набігання фази та часових затримок по апертурі, фокушуючи при цьому апертуру на визначену дальність. Для сигналів, розсіяних у межах цього діапазону дальностей, обробка є оптимальною і забезпечує високу роздільну здатність таких систем. Для сигналів, розсіяних об'єктами, які розташовані за межами діапазону фокусування, обробка є неоптимальною. Це призводить до неконтрольованих змін діаграми спрямованості синтезованої апертури та втрати роздільної здатності за поздовжньою координатою  $x$ . Тому спотворюєчі властивості радіолокаційної системи є сильно залежними від значення поперечної координати.

Для підтвердження властивості неінваріантності спотворюючої функції до зсуву вздовж координати  $y$ , на підставі розробленої моделі (1), проведене числове моделювання процесу формування радіолокаційного зображення. На рис.2,а представлено модель розсі-

ювальної здатності, у вигляді шести  $\delta$ -подібних розсіювачів, розташованих попарно на різних дальностях. Для моделювання вибрано радіолокаційну систему, що здійснює зондування тестової розсіювальної здатності сигналом з гауссівською огинаючою та довжиною хвилі  $\lambda = 1\text{ м}$ . Апертура синтезується вздовж осі  $x$  з 11-ти прийнятих реалізацій в дискретних позиціях з кроком  $\Delta d = 2\lambda$ . Параметри погодженої обробки забезпечують фокусування апертури на дальність 100 м. Модель отриманого радіолокаційного зображення зображено на рис.2,б.



**Рис.2.** Моделювання побудови радіолокаційного зображення системою з синтезованою апертурою:

а – тестова розсіювальна здатність  $Q(x, y)$ ;

б – отримане радіолокаційне зображення  $I(x, y)$ .

Результати моделювання (рис.2, б) свідчать про зміну форми функції розсіювання точки тільки під час зміни поперечної координати  $y$ . Спотворюючі властивості системи є найменшими для розсіювачів, розташованих на дальності фокусування, для якої когерентна обробка є оптимальною. Поза межами діапазону фокусування спотворюючі властивості системи є суттєвими, що пояснюється неоптимальною когерентною обробкою прийнятих сигналів.

### **Реконструкція радіолокаційних зображень, отриманих синтезованою апертурою**

Наявні спотворення на радіолокаційних зображеннях, отриманих системою з синтезованою апертурою, не володіють властивістю сепарабельності за координатами. Тому реконструкція (3) таких зображень, з метою усунення спотворюючого впливу системи, повинна здійснюватися над двовимірним полем.

На відміну від задачі реконструкції дальнісних портретів [10], алгоритм реконструкції двовимірного зображення не можна побудувати на основі знаходження оберненого оператора до спотворюючого. У дискретній задачі реконструкції зображення розміром  $(W \times W)$  відліків необхідно знаходити обернену матрицю розміром  $(W^2 \times W^2)$ , що при реальних розмірах радіолокаційних зображень реалізувати практично неможливо.

Аналіз неінваріантності [4, 5] функції розсіювання точки, зумовленої дефокусуєчими властивостями апертури, у системи з синтезованою апертурою вказує на плавний характер її зміни вздовж координати  $y$ . Це свідчить про наявність близько розташованих ділянок на зображенні, спотворених подібними за формою системними функціями. Введення такого припущення дає змогу здійснювати реконструкцію двовимірних радіолокаційних зображень.

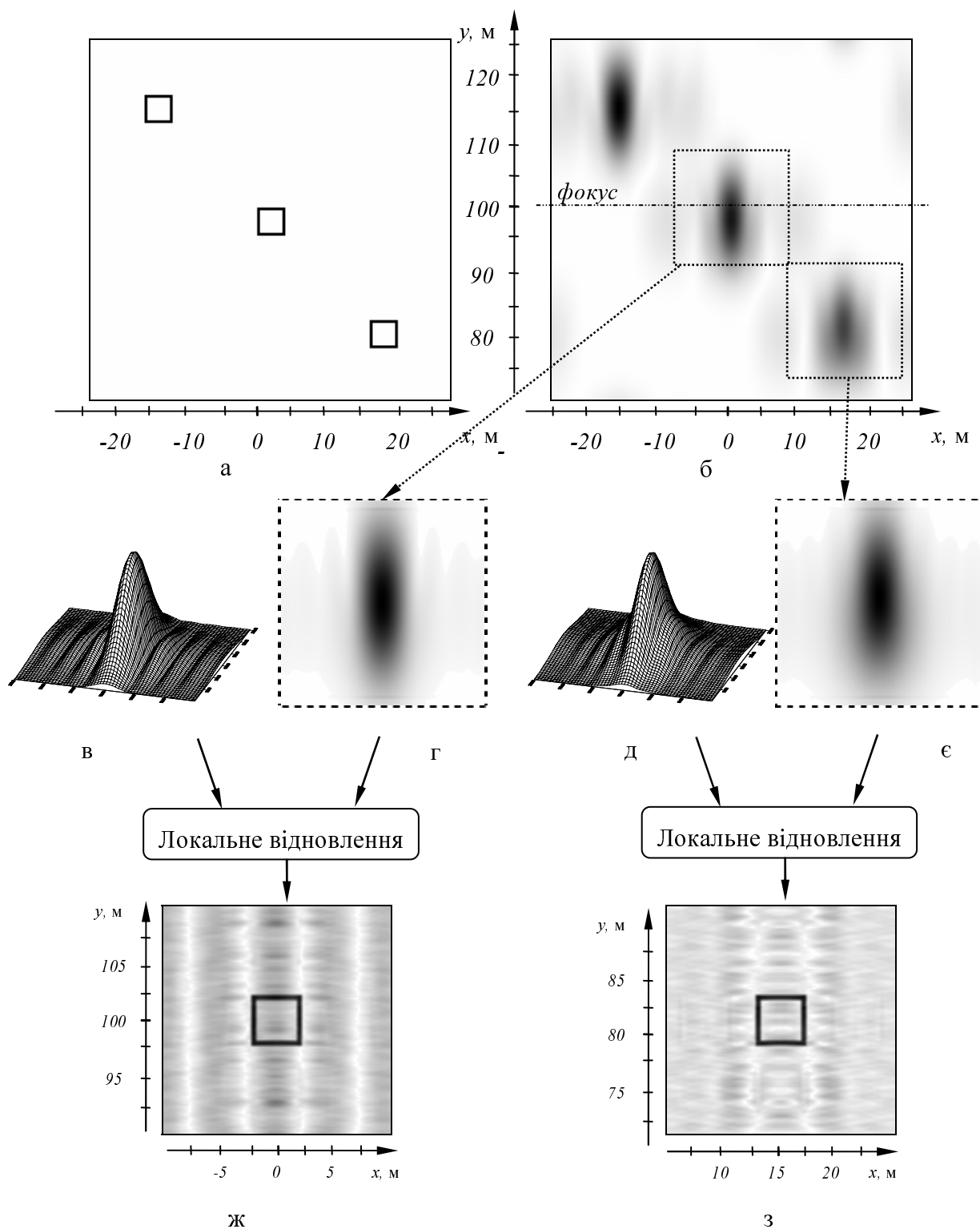
Запропонований алгоритм для реконструкції двовимірних зображень, спотворених неінваріантною до зсуву системною функцією полягає в

- виділенні ділянок локальної стаціонарності апаратної функції на зображенні;
- обчисленні функції розсіювання точки для кожної з виділених ділянок згідно з відомими параметрами РЛС з синтезованою апертурою;
- відновленні кожної з ділянок зображення на основі введеного припущення про локальну стаціонарність спотворень;
- компонуванні реконструйованого зображення з окремих відновлених ділянок.

Ефективність запропонованого алгоритму досліджена числовим моделюванням процесів формування радіолокаційного зображення та його реконструкції. На рис.3,а показано тестову розсіювальну здатність, яка характеризується наявністю протяжних елементів розсіювання. Модель радіолокаційного зображення отриманого РЛС з синтезованою апертурою (рис.3, б) вказує на значні спотворення та повну втрату візуальної адекватності отриманого зображення тестовому розподілу РЗ.

Для реконструкції розсіювальної здатності використано запропонований алгоритм на основі розробленої моделі РЛС з синтезованою апертурою (1) і (2). Як приклад, на моделі отриманого радіолокаційного зображення виділено дві ділянки локальної стаціонарності спотворюючої системної функції, які зображено на рис.3, г, е. Згідно з запропонованою моделлю РЛС (1) і (2) для координат кожної з цих ділянок обчислено апаратну функцію (рис.3, в, д), яка вважається сталою для цієї ділянки зображення. Локальна інваріантність [12] дає можливість реалізувати двовимірну фільтрацію на основі швидких алгоритмів перетворення Фур'є. Знайдено квазіобернені регуляризовані оператори, які дають можливість отримати стійкий до похибок розв'язок, використовуючи відомий прямий метод відновлення за Тихоновим [11]. Результат відновлення виділених ділянок зображення подано відповідно на рис.3, ж, з.

Отримані результати вказують на можливість ефективної реконструкції розсіювальної здатності досліджуваних об'єктів за отриманим зображенням РЛС з синтезованою апертурою за допомогою вторинної обробки.



**Рис.3.** Реконструкція радіолокаційного зображення отриманого РЛС з синтезованою апертурою:  
 а – тестова розсіювальна здатність  $Q(x, y)$ ; б – отримане зображення  $I(x, y)$ ;  
 в, д – функції розсіювання точки; г, е – ділянки отриманого зображення, на яких вводиться  
 припущення про локальну стаціонарність функції розсіювання точки;  
 ж, з – відновлене зображення на вибраних ділянках.

### Висновок

Результати проведеного моделювання вказують на значні спотворення, що вносить РЛС з синтезованою апертурою в отримане радіолокаційне зображення. Створена лінійна модель системи (1) і (2) дозволила коректно представити задачу реконструкції розсіювальної здатності за отриманим системою радіолокаційним зображенням.

Дослідження характеру спотворень виявило їх неінваріантний характер до зсуву вздовж поперечної координати. Така особливість лінійної моделі зумовила необхідність пошуку швидкого алгоритму реконструкції. Детальне вивчення причин та особливостей неінваріантності спотворень, що вносить у зображення радіолокаційна система з синтезованою апертурою, дало змогу розробити алгоритм реконструкції зображень.

Проведено числове моделювання обробки запропонованим методом радіолокаційних зображень, отриманих синтезованою апертурою. Результати вказують на можливість ефективної реконструкції таких зображень з метою підвищення їх якості та візуальної адекватності розсіювальної здатності.

Висока роздільна здатність зображень після обробки пояснюється потенційно великою шириною смуги пропускання просторового тракту в радіолокаційних систем з синтезованою апертурою. Запропонований алгоритм обробки радіолокаційних зображень дозволяє не тільки зменшувати рівень спотворень, спричинених розмиваючими властивостями діаграми спрямованості та зондуючого імпульсу під час просторово-часового сканування, а й здійснювати компенсацію руху носія РЛС та уникати ефекту дефокусування апертури. Регуляризація, використана в запропонованому алгоритмі реконструкції, забезпечує стійкість розв'язку до наявних випадкових складових.

[1] Буренин Н.И. Радиолокационные станции с синтезированной антенной. М., 1972.

[2] Караваев В.В., Сазонов В.В. Основы теории синтезированных антенн. М., 1974.

[3] Реутов А.П., Михайлов Б.А., Кондратенко Г.С. и др. Радиолокационные станции бокового обзора. М., 1970.

[4] Прудюс І.Н., Синявський А.Т., Остап В.С. Simulation spatial-temporal signal processing in imaging systems with synthetic aperture // Матеріали 3-ї міжнар. конф. по теорії та техніці антен (МКТТА'99). Севастополь, 1999.

[5] Прудюс І.Н., Синявський А.Т., Остап В.С. Моделювання процесу формування радіолокаційних зображень в системах з синтезованою апертурою // Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці (ММЕлектро'99): Матеріали 3-ї міжнар. наук.-техн. конф. Львів, 25-30 жовтня 1999.

[6] Sumyk M.M., Synyavskyy A.T., Ostap V.S. The approach for SAR images restoration based on linear shift-variant model of the process formation" // Матеріали конф. TCSET'2000. Feb. 2000.

[7] Lindberg M. Radar Image Processing with the Radon Transform. NO 1997-05/ISSN 0347-2809.

[8] Василенко Г.И., Татаринев А.М. Восстановление изображений. М., 1986.

[9] Desai M.D., Jenins W.K. Convolution Backprojection Image Reconstruction for Spotlight Mode Synthetic Aperture Radar // IEEE Trans. on Image Processing. 1992.

[10] Guglielmi V., Castanie F., Piau P. Application de methodes super-resolvantes au traitement des donnees d'un radar a synthese d'ouverture // Proc. of GRETSI'95. 1995.

[11] Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М., 1979.

[12] James G. Nagy, Diannne P. O'Leary. Fast iterative image restoration with a spatially-Varying PSF.