

УДК 621.396.96.095.4:528.8.04-047.27

*Тимощук О. М.*

### **РЕАЛІЗАЦІЙНІ ОСНОВИ МЕТОДУ ПРОСТОРОВОЇ ДЕКОРЕЛЯЦІЇ РАДІОМЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

*Розробляється метод підвищення розрізнявальної здатності й точності радіометричних зображень, отриманих системами, функції невизначеності яких характеризуються значним інтегральним рівнем бічних пелюсток. Такі функції невизначеності характерні для систем апертурного синтезу, де використовують просторово рознесені нееквідистантні багатоелементні антенні комплекси. В основу методу покладено операції, наближені до оптимальних, які передбачають просторову декореляцію радіозображень. Метод можна використовувати для декореляції зображень, які містять одночасно точкові та протяжні об'єкти.*

**Вступ.** Вирішення різноманітних завдань локації, астрономії, дистанційного зондування Землі потребує формування радіозображень досліджуваних об'єктів. Точність цих зображень, яка залежить від характеристик радіосистеми, суттєво впливає на показники якості завдання, що вирішується. Так розрізнявальна здатність зображення по просторових координатах залежить [1] від ширини головної пелюстки функції невизначеності системи. Тому під час проектування систем радіозору значну увагу приділяють вибору антенних систем та алгоритму обробки сигналів. Вочевидь, що для отримання оптимальних (за заданим критерієм) алгоритмів вирішують відповідні оптимізаційні завдання синтезу. При цьому, досить часто вказують, що технічна реалізація оптимальних алгоритмів складна, й переходять до оброблення згідно з «квазіоптимальними алгоритмами», які отримують в результаті допустимого ігнорування деяких оптимальних операцій.

У [2, 3] синтезовано алгоритми оптимального формування радіометричних зображень, які містять часові та просторові декорелювальні фільтри, практична реалізація яких є досить складною. Проте попередні дослідження вказують на те, що радіометричні зображення, отримані з використанням вузькоспрямованих радіосистем, зокрема й систем апертурного синтезу, можуть характеризуватися значними спотвореннями, спричиненими наявністю значного інтегрального рівня бічних пелюсток функції невизначеності. Зменшення інтегральних бічних пелюсток за допомогою корекції антенної системи часто є надскладним технічним завданням. У статті пропонується метод вирішення цього завдання за рахунок практичної реалізації наближених до оптимальних операцій просторової декореляції зображень. Метод прийнятний для декореляції зображень, які містять одночасно точкові й протяжні об'єкти спостереження.

**Алгоритм формування радіометричних зображень у радіометричних комплексах. Математичні основи методу.** В [4] синтезовано алгоритм оброблення просторово-часових сигналів у радіометричному комплексі з  $M$ -елементною антенною системою в такому вигляді:

$$\begin{aligned}
& \left\{ T^{-1} \sum_{i=1}^M \int_0^T u_{fd,i}^2(t) dt - P_{n\Sigma}(B) \right\}_1 + \\
& + \left\{ 2T^{-1} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \int_{-\infty}^{\infty} u_{sd,i}(t - (\mathcal{G} - \mathcal{G}_0) \Delta r'_{ij} c^{-1}) u_{sd,j}(t) dt - \right. \\
& \quad \left. - P_{nb}(B, \mathcal{G}' - \mathcal{G}_0) \right\}_2, \tag{1}
\end{aligned}$$

де  $u_{fd,i}(t)$  – спостереження на виході  $i$ -ї ( $i = 1..M$ ) додетекторної секції, яке пройшло декорелювальні фільтри (часове або спектральне оброблення) першого типу,  $u_{sd,i}(t)$  – спостереження на виході  $i$ -ї додетекторної секції, яке пройшло декорелювальні фільтри (часове або спектральне оброблення) другого типу,  $T$  – час накопичення (інтегрування),  $\Delta r'_{ij}$  – вектор, що поєднує фазові центри  $i$ -ї та  $j$ -ї антенн,  $c$  – швидкість поширення радіохвиль у вільному просторі,  $\mathcal{G}, \mathcal{G}_0$  – вектор напрямних косинусів та вектор, який характеризує напрям головної пелюстки функції невизначеності комплексу,  $P_{n\Sigma}(B)$  – сумарна потужність внутрішніх шумів комплексу,  $P_{nb}(B, \mathcal{G}' - \mathcal{G}_0)$  – кросканальний складник потужності шуму, яким можна знехтувати, якщо передбачити, що між каналами комплексу немає взаємозв'язку.

У [4] також обґрунтовується доцільність вилучення з алгоритму (1) складника, який вичленено дужками  $\{\cdot\}_1$ . Тому основне оброблення сигналів потрібно виконувати згідно з операціями, які містяться в дужках  $\{\cdot\}_2$ . Усереднення  $\{\cdot\}_2$  та знехтування складника  $P_{nb}(B, \mathcal{G}' - \mathcal{G}_0)$  відповідає згортці функції невизначеності  $\Psi_{\mathcal{Q}}(\mathcal{G})$  комплексу та істинного зображення  $I(\mathcal{G})$ , тобто формуванню первинного радіометричного зображення

$$I(\mathcal{G}) \otimes \Psi_{\mathcal{Q}}(\mathcal{G}). \tag{2}$$

Якщо (2) згорнути з функцією  $\Psi_{\mathcal{Q}}^{-1}(\mathcal{G})$ , яка задовольняє рівняння

$$\Psi_{\mathcal{Q}}(\mathcal{G}) \otimes \Psi_{\mathcal{Q}}^{-1}(\mathcal{G}) = \delta(\mathcal{G}), \tag{3}$$

то отримаємо істинне зображення

$$I(\mathcal{G}) \otimes \Psi_{\mathcal{Q}}(\mathcal{G}) \otimes \Psi_{\mathcal{Q}}^{-1}(\mathcal{G}) = I(\mathcal{G}). \tag{4}$$

Операція (4) відповідає просторовій декореляції первинного зображення (2).

Аналітичне рішення (3) існує для досить обмеженого класу функцій. Тому доцільно розробити метод чисельного розрахунку функції  $\Psi_{\mathcal{Q}}^{-1}(\mathcal{G})$ , застосування якого забезпечить приблизне розв'язання рівняння (4).

Зважаючи на це, пропонується реалізувати таку практичну методику підвищення якості первинних радіозображень:

- визначити на первинному зображенні ділянку, яка відповідає реакції системи на точкове джерело, та виділити цю ділянку як оцінку функції невизначеності, тобто  $\hat{\Psi}_\rho(\mathbf{g})$ ;
- розв'язати рівняння (3) у спектральній ділянці так:

$$\hat{\Psi}_\rho^{-1}(\mathbf{g}) = F^{-1} \left\{ \frac{I}{\hat{\Psi}_\rho(\mathbf{g})} \right\}, \quad (5)$$

застосувавши, якщо виникне необхідність, один з методів регуляризації, зокрема, можна нульові значення функції  $\hat{\Psi}_\rho(\mathbf{g})$  замінити деяким малим числом  $\alpha$ ;

- розв'язати рівняння (4)

$$I(\mathbf{g}) \otimes \Psi_\rho(\mathbf{g}) \otimes \hat{\Psi}_\rho^{-1}(\mathbf{g}) \approx I(\mathbf{g}). \quad (6)$$

Достовірність пропонованого методу підтвердимо імітаційним моделюванням.

### Імітаційне моделювання формування радіометричного зображення та підвищення його якості

Використаємо тестове (еталонне, ідеальне) зображення, показане на рисунку 1, яке містить кілька характерних елементів (групи розміщених близько об'єктів, точкові об'єкти, текстурні ділянки).

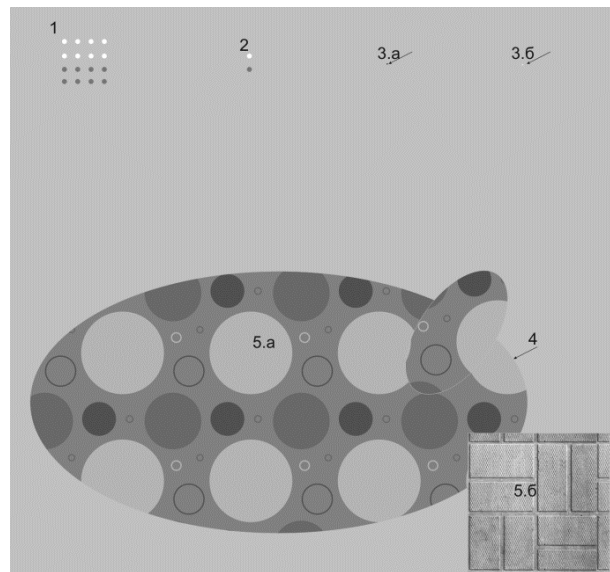


Рис. 1. Тестове зображення з характерними елементами: 1, 2 – групи об'єктів з різною інтенсивністю; 3.a і 3.b – малорозмірні (точкові) об'єкти (вказані стрілками); 4 – малоконтрастна границя об'єкта; 5.a і 5.b – текстурні ділянки зображення

Алгоритм формування радіометричних зображень наведено на рисунку 2. Тут введено такі скорочення: РМЗ – радіометричне зображення; ФН – функція невизначеності;  $\Delta F / f_0$  – відношення ширини смуги пропускання системи до центральної частоти налаштування приймача (важливо для формування функції невизначеності комплексу) (блоки до первинного РМЗ). Нижче буде показано, що первинне РМЗ спотворено «проникальною потужністю радіотеплового випромінювання об'єктів по бічних пелюстках». Методу підвищення якості радіометричного зображення відповідають блоки алгоритму, розташовані після «Первинне РМЗ». Наявність тестового (ідеального) зображення важлива для

розрахунку кількісних показників якості формування зображення. Наявність точкових об'єктів досить важлива, оскільки дасть можливість оцінити  $\hat{\Psi}_Q(\mathbf{g})$ , що необхідно для вирішення завдання підвищення якості радіометричного зображення.

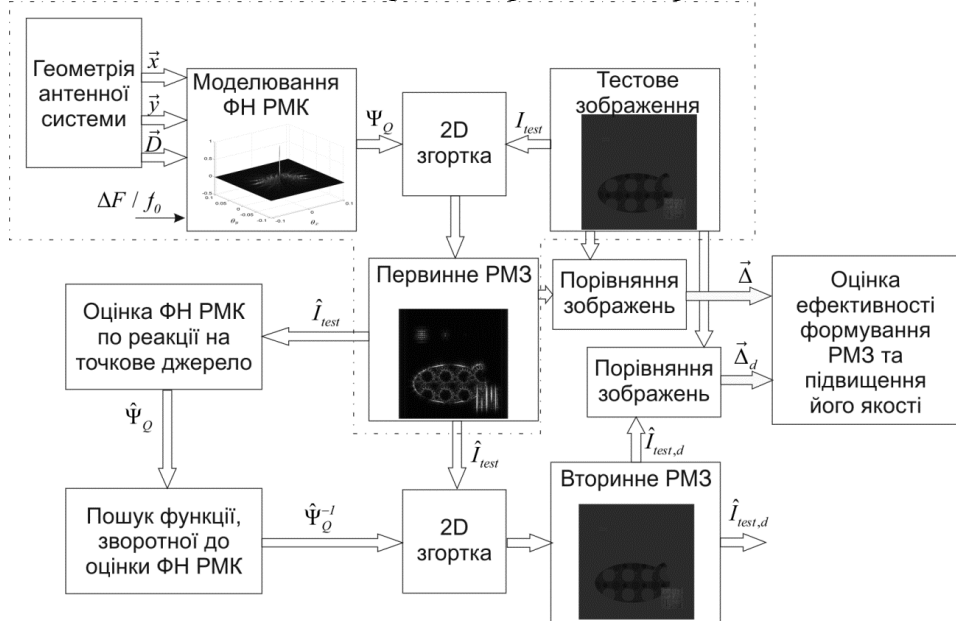


Рис. 2. Розширений алгоритм формування РМЗ, підвищення його якості та оцінки похибки формування РМЗ

Проведемо імітаційне моделювання радіометричних зображень, отриманих з використанням радіометричних комплексів з різними антенними системами (параметри наведено під відповідними рисунками).

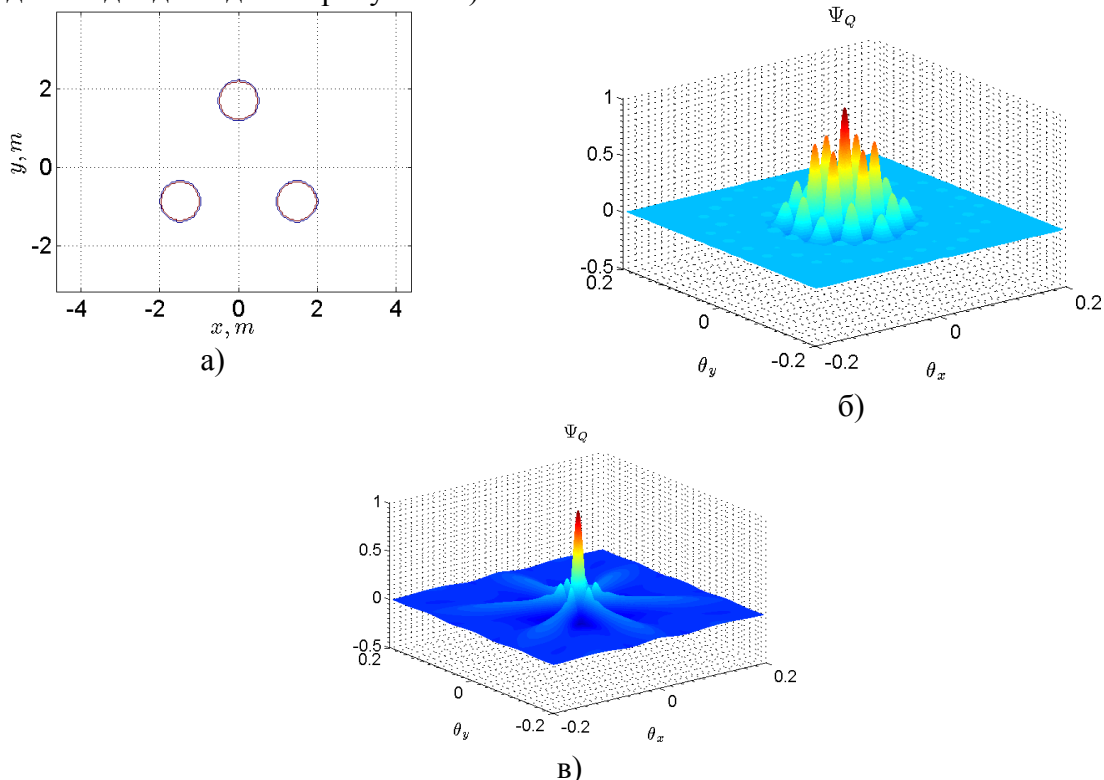


Рис. 3. Трьохелементна антенна система (а) та функції невизначеності радіометричного комплексу за  $\lambda = 0,1$  м,  $\Delta F / f_0 = 0,01$  (б),  $\Delta F / f_0 = 1,5$  (в). Діаметр кожної антени 0,5 м

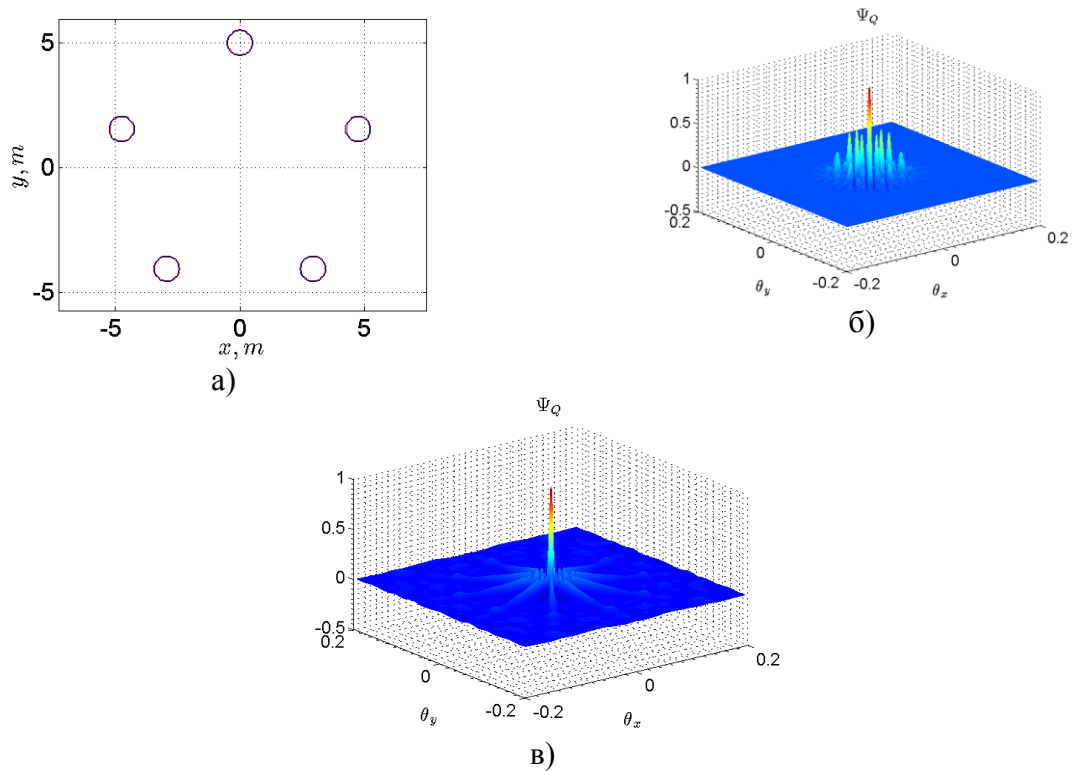


Рис. 4. П'ятиелементна антенна система (а) і функції невизначеності радіометричного комплексу за  $\lambda = 0,1$  м,  $\Delta F / f_0 = 0,01$  (б),  $\Delta F / f_0 = 1,5$  (в). Діаметр кожної антени 0,5 м

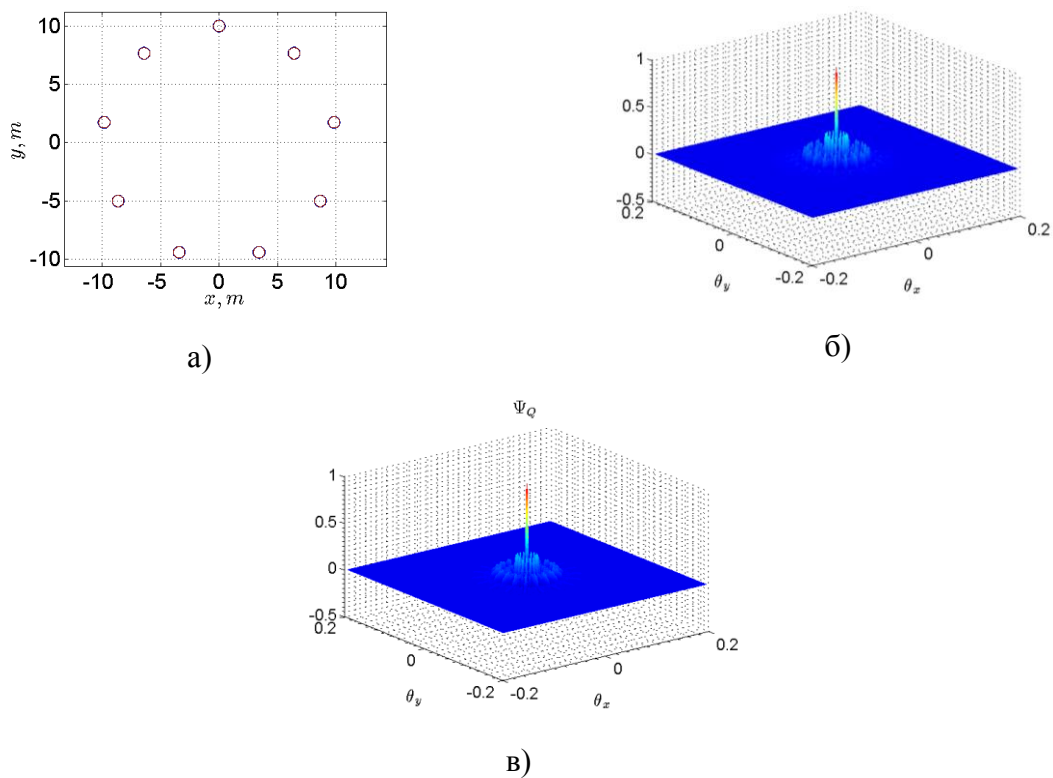


Рис. 5. Дев'ятиелементна антенна система (а) і функції невизначеності радіометричного комплексу за  $\lambda = 0,1$  м,  $\Delta F / f_0 = 0,02$  (б),  $\Delta F / f_0 = 0,3$  (в). Діаметр кожної антени 0,5 м

На рисунках 6–11 показано первинні радіометричні зображення (РМЗ), отримані з використанням функцій невизначеності (ФН), наведених на рисунках 3–5.

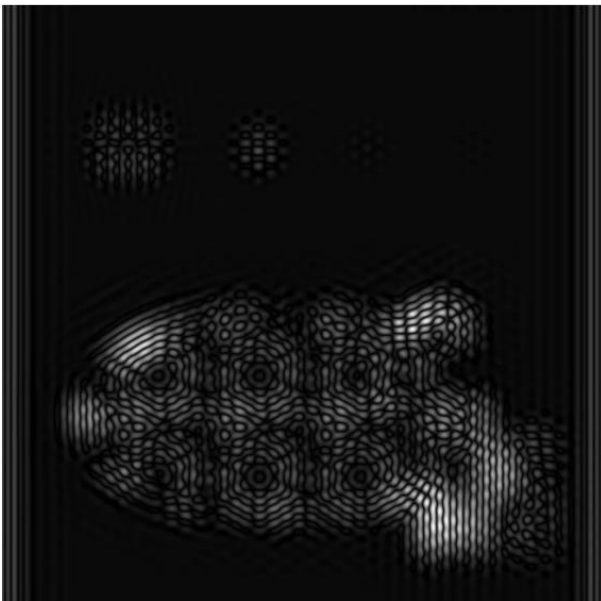


Рис. 6. Первинне РМЗ. Під час моделювання використано ФН, показану на рисунку 3.б

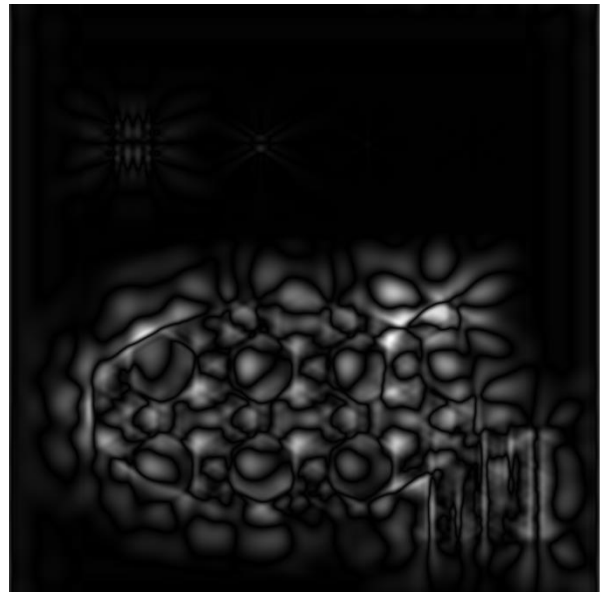


Рис. 7. Первинне РМЗ. Під час моделювання використано ФН, показану на рисунку 3.в

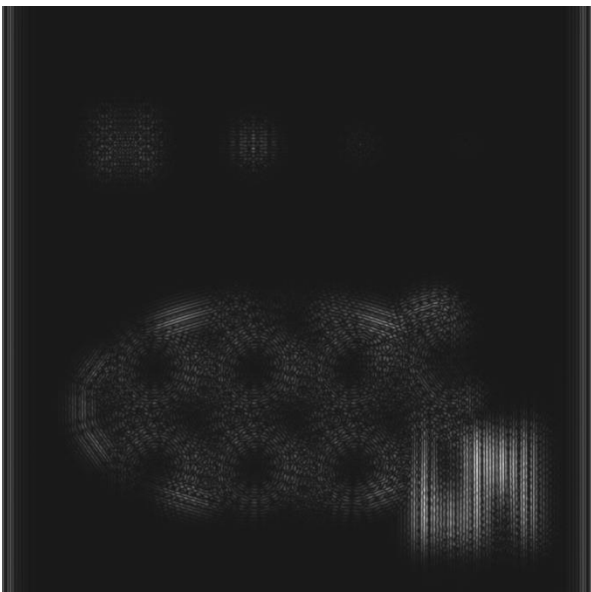


Рис. 8. Первинне РМЗ. Під час моделювання використано ФН, показану на рисунку 4.б

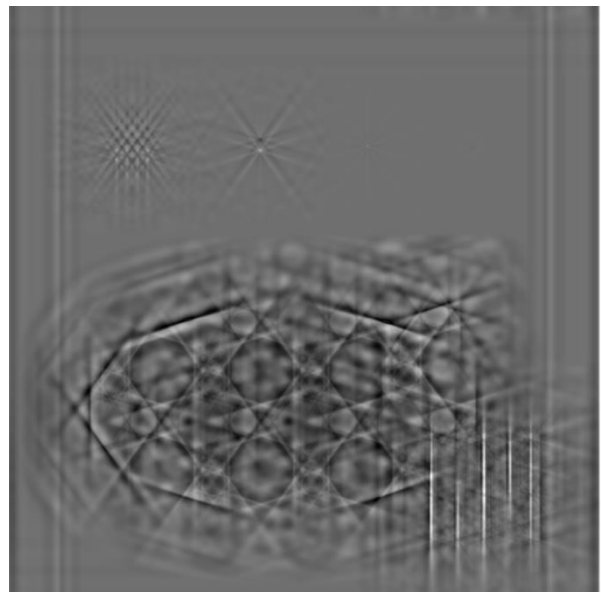


Рис. 9. Первинне РМЗ. Під час моделювання використано ФН, показану на рисунку 4.б

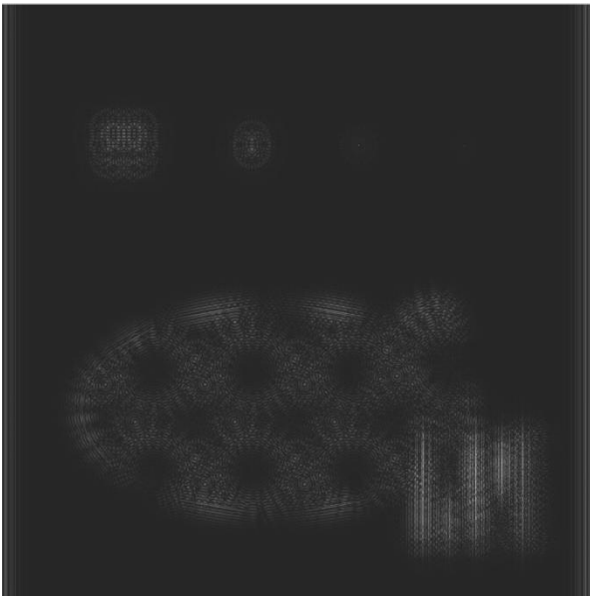


Рис. 10. Первинне РМЗ. Під час моделювання використано ФН, показану на рисунку 5.6

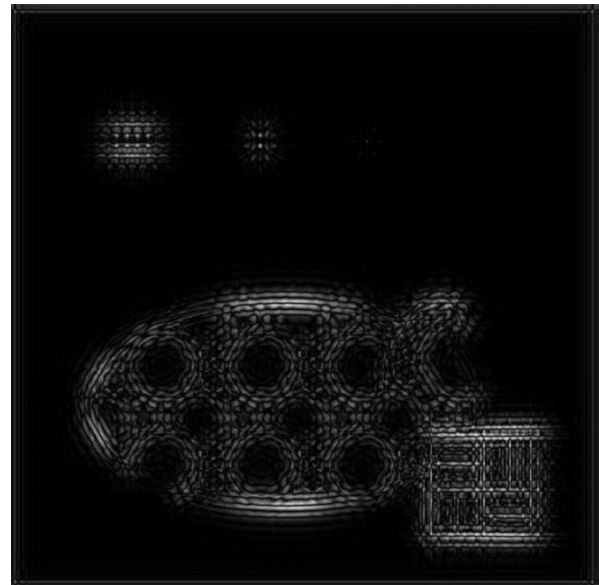


Рис. 11. Первинне РМЗ. Під час моделювання використано ФН, показану на рисунку 5.6

З візуального аналізу рисунків 6–11 випливає, що первинні радіометричні зображення містять спотворену інформацію, яка має місце на тестовому зображенні. Такі спотворення зумовлені насамперед значним інтегральним значенням бічних пелюсток.

Застосуємо до цих первинних радіометричних зображень запропонований метод (див. частину алгоритму моделювання, яка міститься поза межами штрихпунктирної лінії на рисунку 2).

На рисунку 12 наведено вторинне радіометричне зображення, отримане згідно з запропонованою методикою з первинних, які показано на рисунках 6–11. Треба зазначити, що високий ступінь відновлення зображень забезпечив майже повне відтворення істинної структури тестової інтенсивності для всіх первинних радіометричних зображень.

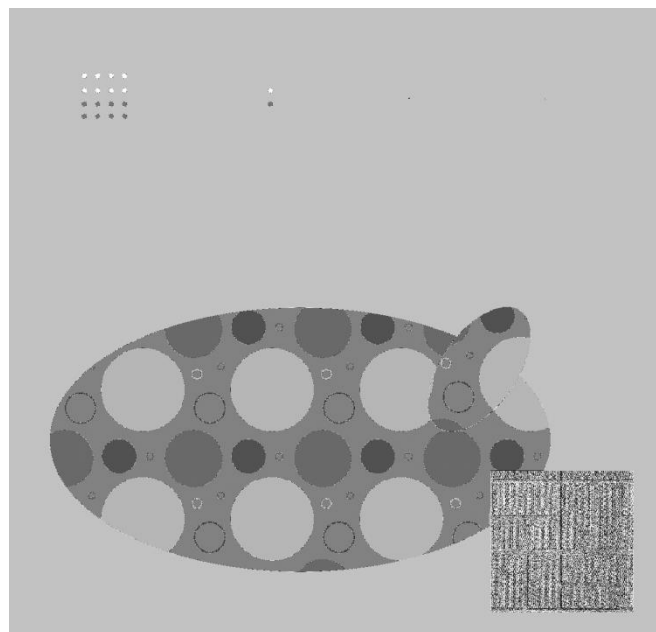


Рис. 12. Вторинне РМЗ (характерне для всіх первинних РМЗ, показаних на рисунках 6–11)

Чисельне значення подібності первинних, вторинних РМЗ і тестового дамо з використанням вектора параметрів

$$\begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \mathbf{r} \\ \Delta_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_1 & \Delta_2 \\ \Delta_{d1} & \Delta_{d2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} SSIM & DSSIM \\ SSIM_d & DSSIM_d \end{pmatrix},$$

де індекс  $d$  вказує на те, що порівнюються вторинне і тестове зображення, SSIM, DSSIM – відповідно індекси структурної подібності й відмінності [5].

Результати числового моделювання наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Результати числового моделювання оцінки якості формування первинних РМЗ і відновлення істинної структури запропонованою методикою (вторинні РМЗ)**

SSIM metric $\Delta_1$ , між тестовим зображенням і первинним РМЗ	SSIM metric $\Delta_{d1}$ , між тестовим зображенням і вторинним РМЗ	DSSIM metric $\Delta_2$ , між тестовим зображенням і первинним РМЗ	DSSIM metric $\Delta_{d2}$ , між тестовим зображенням і вторинним РМЗ
-0.0995	0.9562	0.5498	0.0219
-0.0035	0.9464	0.5017	0.0268
-0.0014	0.9486	0.5007	0.0257
0.8141	0.8706	0.0929	0.0647
0.0040	0.9562	0.4980	0.0219
0.1513	0.9561	0.4244	0.0218

Зіставлення результатів моделювання первинних радіометричних зображень, наведених на рисунках 6–11, і чисельних значень  $\vec{\Delta}$  (див. табл. 1) засвідчує, що ці метрики (як і більшість відомих на сьогодні) не дають можливості об'єктивно оцінити числове значення якості радіометричних зображень. Тому важливо доповнити  $\vec{\Delta}$  візуальним аналізом експерта, що внесе суб'єктивізм у процес оцінювання.

Водночас вторинні радіометричні зображення, отримані застосуванням нової методики оброблення сигналів до первинних, досить близькі до істинного значення інтенсивності як функції просторових координат. При цьому числові значення алгебраїчного вектора  $\vec{\Delta}_d$  і візуальний аналіз вторинних зображення добре збігаються.

Можна дійти висновку, що для достатньо близьких за наповненням зображень (коли SSIM і DSSIM наближаються відповідно до 1 і 0), числові значення якості мають фізичний сенс. У той час, коли вказане не виконується, оцінки SSIM і DSSIM не відображають реальної подібності зображень. При цьому, для оцінювання ефективності функціонування РМК на етапі його розроблення необхідне втручання експерта для візуального аналізу зображень.

**Узагальнена структурна схема радіометричного комплексу з первинною і вторинною обробкою сигналів**

Відповідно до проведених досліджень попереднього та поточного розділів запропоновано узагальнену структурну схему радіометричного комплексу (рис. 13), яка виконує первинну обробку сигналів і вторинну обробку зображень.

Структурна схема (див. виділене штриховою лінією на рисунку 13), яка реалізує первинну обробку просторово-часових радіометричних сигналів, розраховує кроскореляційні



функції (перемножувачі та інтегратори) між сигналами, на виходах додетекторних секцій (позначено «Вх. тракт») кожного з каналів. Перед розрахуванням кроскореляції необхідно вирівняти затримки між каналами, що реалізується у частотно-незалежних фазообертачах (ЧНФ). Результатом первинної обробки є первинне РМЗ  $\hat{I}_{Q\sim}(\vec{\vartheta})$ , яке, як показано вище, може бути значно спотворене проникненням сигналів по бічних пелюстках функції невизначеності радіометричного комплексу.

Таке зображення необхідно піддати вторинній обробці (див. виділене пунктирною лінією на рисунку 13), реалізація якої потребує відомостей щодо точної форми функції невизначеності  $\Psi_{\varrho}$ . Інформації про  $\Psi_{\varrho}$  може не бути, тому необхідно її оцінити. Для цього необхідно побудувати зображення точкового джерела (фізичне наближення просторової дельта-функції), реакцією системи на яку буде оцінка функції невизначеності  $\hat{\Psi}_{\varrho}$ . Після цього (див. методику) розраховують  $\hat{\Psi}_{\varrho}^{-1}$  і розв'язують задачу підвищення якості первинного радіометричного зображення – перехід до вторинного зображення  $\hat{I}_{Q\sim}(\vec{\vartheta})$ .

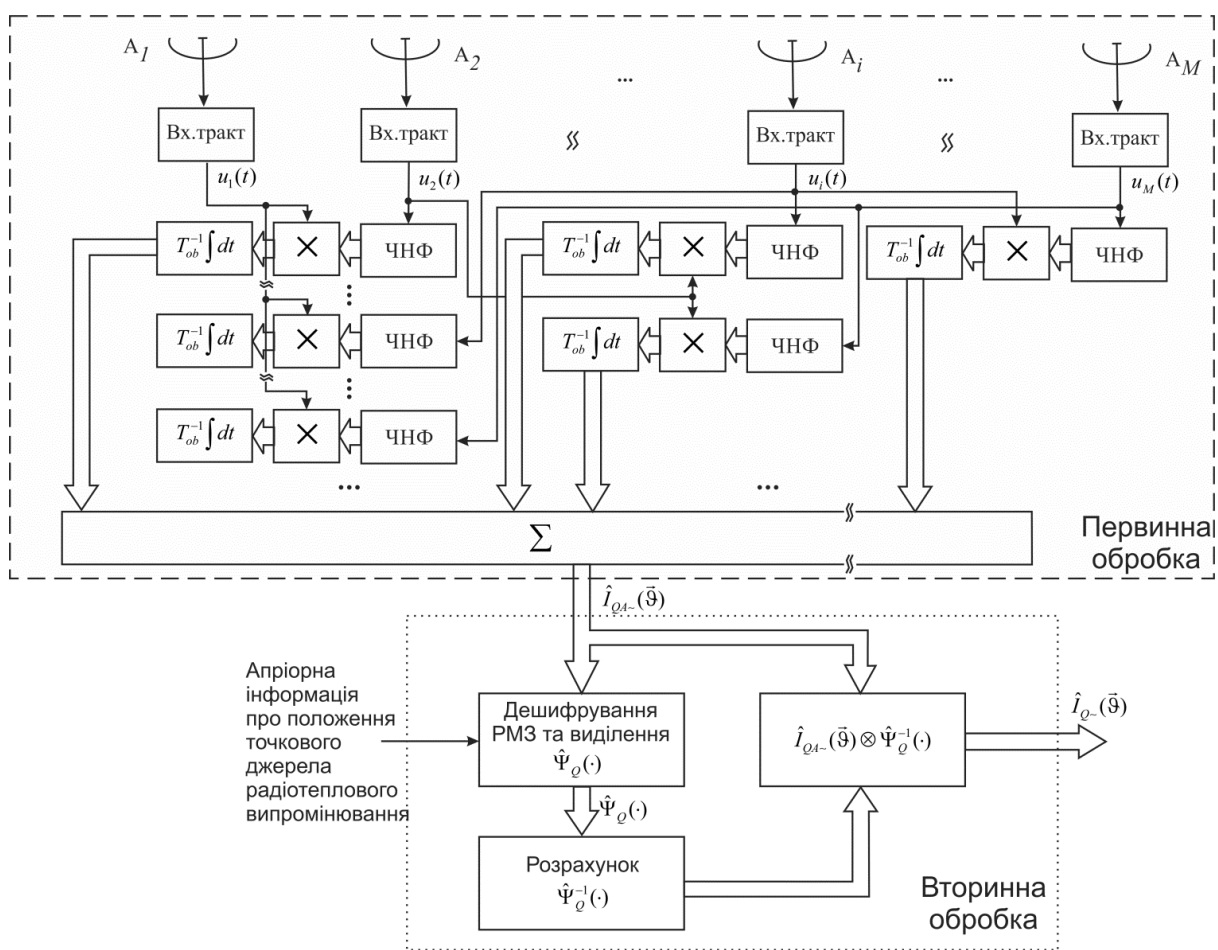


Рис. 13. Узагальнена структура радіометричного комплексу з первинною обробкою сигналів (обмежено штриховою лінією) та вторинною обробкою радіометричного зображення (обмежено пунктирною лінією)

### Висновки

Розроблено метод підвищення розрізняювальної здатності й точності радіометричних зображень, отриманих системами, функції невизначеності яких характеризуються значним інтегральним рівнем бічних пелюсток. Такі функції невизначеності характерні для систем апертурного синтезу, де використовують просторово рознесені нееквідистантні

---

---

багатоелементні антенні комплекси. В основу методу покладено операції, наближені до оптимальних, які передбачають просторову декореляцію радіозображень. Треба зазначити, що метод безпосередньо впливає з аналізу фізичної сутності радіометричного зображення та, як засвідчують розрахунки, дозволяє суттєво підвищити якість первинного зображення (індекси структурної подібності SSIM і структурної відмінності DSSIM змінюються майже на порядок).

Розроблено узагальнену структурну схему «наскрізної» обробки сигналів для побудови радіометричних зображень і підвищення їх якості.

Метод можна використовувати для декореляції зображень, які містять одночасно точкові та протяжні об'єкти.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Волосяк В. К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации : Монография / В. К. Волосяк, В. Ф. Кравченко ; под ред. В. Ф. Кравченко. – М. : Физматлит, 2008. – 704 с.
2. Pavlikov V.V. Optimal algorithm for estimation of radio brightness of an extended source of radio thermal radiation in the ultra-wideband radiometric complex with a three-element-antenna system / V. V. Pavlikov, Kiem Nguyen Van // 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. 236–239.
3. Statistical Synthesis of Multiantenna Ultrawideband Radiometric Complexes / V. K. Volosyuk, V.F. Kravchenko, V.V. Pavlikov, V.I. Pustovoi // Doklady Physics, 2016, Vol. 61, No. 4, pp. 179–183.
4. 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.
5. T. Richter "SSIM as global quality metric: A differential geometry view," *Quality of Multimedia Experience (QoMEX), 2011 Third International Workshop on*, Mechelen, 2011, pp. 189-194. doi: 10.1109/QoMEX.2011.6065701

#### РЕАЛИЗАЦИОННЫЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДЕКОРРЕЛЯЦИИ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**Тимошук О. М.**

*Разрабатывается метод повышения разрешающей способности и точности радиометрических изображений, полученных системами, функции неопределенности которых характеризуются значительным интегральным уровнем боковых лепестков. Такие функции неопределенности характерны для систем апертурного синтеза, где используются пространственно разнесенные неэквидистантные многоэлементные антенные комплексы. В основу метода положены операции, приближенные к оптимальным, которые предусматривают пространственную декореляцию радиоизображений. Метод может использоваться для декореляции изображений, которые содержат одновременно точечные и протяженные объекты.*

#### REALIZATION BASES FOR THE METHOD OF RADIOMETRIC IMAGES SPATIAL DECORRELATION

**Tumochuk O.**

*The method for radiometric images resolution and accuracy increasing is developed. These images are obtained with systems which ambiguity functions have substantial integral level of side lobes. Such ambiguity functions are typical for aperture synthesis systems where spatially separated non-equidistant multielement antenna complexes are used. The basis for proposed method is operations close to optimal, which envisage spatial decorrelation of radar images.*

---

---

*Developing method can be used for images decorrelation which contain point and extended objects at the same time.*

УДК 629.5.016

*Богом'я В. І., Черепков С. Т.*

## **ОРГАНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ АГРЕГАТИВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

*Розроблено формалізований опис процесу технічного обслуговування й ремонту об'єктів суднових комплексів та їх складників у вигляді регенерувального процесу відновлення.*

*На підставі формалізації розроблено метод обґрунтування організації процесу відновлення агрегатів водних транспортних засобів, що дає можливість отримати кінцеві аналітичні вирази для розрахунків необхідних показників ефективності досліджуваного процесу.*

*Ключові слова: водний транспортний засіб, експлуатація, відновлення.*

**Вступ.** Ефективність експлуатації суден залежить від багатьох факторів, що пов'язані з технічними та експлуатаційними характеристиками суден, прийнятою стратегією його технічного обслуговування (ТО) і ремонту (Р), виробничо-технічною базою ремонтних підприємств та ремонтних цехів експлуатанта, чисельністю і кваліфікацією технічного складу, принципами застосування транспортного засобу в сучасних умовах.

Висока вартість усіх складників сучасної системи експлуатації суден змушує, особливо в умовах обмеженого фінансування, шукати шляхи щодо скорочення експлуатаційних витрат за незмінних вимог до рівня готовності суден виконувати свої функціональні завдання. Підтримання високої готовності агрегатів транспортного засобу до виконання завдань – надзвичайно важливе завдання, в якому питання щодо відновлення бортового обладнання є лише одним зі складників.

Аналіз літератури [1–7] й практики експлуатації транспортних засобів засвідчує, що однією з найбільш актуальних задач є задача забезпечення постійної готовності транспортного засобу до виконання завдань за призначенням. Таким чином, актуальним є проведення аналізу особливостей організації системи відновлення агрегатів транспортних засобів у сучасних умовах.

**Основна частина.** Готовність суден залежить від великої кількості чинників. Основні з них можуть бути об'єднані в п'ять груп: експлуатаційні властивості агрегатів транспортних засобів, стан інженерного забезпечення, організація експлуатації, стан матеріально-технічного забезпечення, умови застосування агрегатів транспортних засобів [2].

Аналіз системи засобів експлуатаційного контролю. В цей час для контролю агрегатів транспортних засобів використовують такі засоби [3]: бортові автоматизовані засоби контролю (БАЗК); вбудовані засоби контролю (ВЗК) окремих систем; автоматизовані системи контролю агрегатів транспортних засобів (АСК<sub>1</sub>); автоматизовані системи контролю демонтованого устаткування (АСК<sub>2</sub>); портово-бортові засоби контролю (ПБЗК); контрольно-перевіркова апаратура (КПА).

Крім того, останнім часом отримали інтенсивний розвиток системи штучного інтелекту та як один із їхніх напрямків – експертні системи, які широко впроваджуються в нині [4–7].