

## ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ ТА МЕТОДИ ФІЛЬТРАЦІЇ СПЕКЛ-ШУМУ НА РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

У статті проведений аналіз причин виникнення спекл-шуму на радіолокаційних зображеннях із застосуванням систем радіолокації зі змінною апертурою. Показані шляхи зменшення спекл-шуму, який в усіх скануючих системах з когерентним формуванням радіолокаційного зображення викликаний енергетичними перешкодами із-за без упорядкованого розподілення відбивачів сигналу, занадто дрібних для того, щоб їх могла відобразити система. Можливості зниження спекл-шуму на радіолокаційному зображенні шляхом некогерентного накопичення обмежені допустимим погіршенням просторового розрізнення до меж, коли втрачається інформація про об'єкт.

**Ключові слова:** спекл-шум, радіолокаційне зображення, радіолокаційний портрет.

### Вступ

Сучасні системи радіолокації з синтезуванням апертури антени (РСА) дозволяють отримувати радіолокаційні зображення з високим розрізненням незалежно від погодних умов і часу доби. Інформація, що міститься на радіолокаційному зображенні (РЛЗ), може бути використана для вирішення великого числа завдань в різних, сферах діяльності людини.

Відомо [1], що РЛЗ об'єктів радіолокації є набором яскравих відміток (блискучих точок) від локальних джерел на їх поверхні.

Зміни ракурсу спостереження приводять до порушення когерентності траєкторного сигналу, погіршення просторового розрізнення РЛЗ і зростанню флуктуацій [1-3].

При цьому, однією з головних проблем при отриманні РЛЗ, є наявність спекл-шуму, який в усіх системах, що сканують з когерентним формуванням РЛЗ, викликаний енергетичними перешкодами із-за хаотично розподілених відбивачів сигналу, занадто дрібних для того, щоб їх могла відобразити радіолокаційна система.

### Вирішення даної проблеми

Основне завдання технологій пригнічення таких перешкод, полягає у виділенні і фільтрації їх без втрати корисної інформації про структуру об'єкту. Наявність спекл-шуму призводить до погіршення дешифрування РЛЗ, радіометричного розрізнення і точності виміру компонентів радіолокаційного портрету (РЛП) об'єкту, а також підвищення вимог до каналу передачі даних і засобів відображення інформації.

**Метою даної роботи** є аналіз шляхів зменшення спекл-шуму.

Основним методом зменшення спекл-шуму вважається фільтрація сформованого в результаті синтезу амплітудного РЛЗ (АРЛЗ) або яскравісного РЛЗ по енергії (ЕРЛЗ), що відповідає квадрату амплітуди. Головна процедура такої фільтрації - некогерентне накопичення або усереднювання незалежних спостережень за площею вибраного вікна на РЛЗ.

Методи зниження спекл-шуму добре описані в роботі [4]. Проте авторами цієї статті пропонується при цифровому синтезі РЛЗ замість процедури швидкого перетворення Фур'є, застосувати алгоритм цифрового спектрального аналізу (ЦСА) що має високу розрізнявальну здатність за частотою (дальністю).

Прикладом такого алгоритму є алгоритм Кейпона [5], який володіє в К разів більш високою розрізненою здатністю за частотою (дальністю) у порівнянні з дискретним перетворенням Фур'є (ДПФ) [6].

При цьому платою за це має бути наявність високого відношення сигнал-шум рис.1.

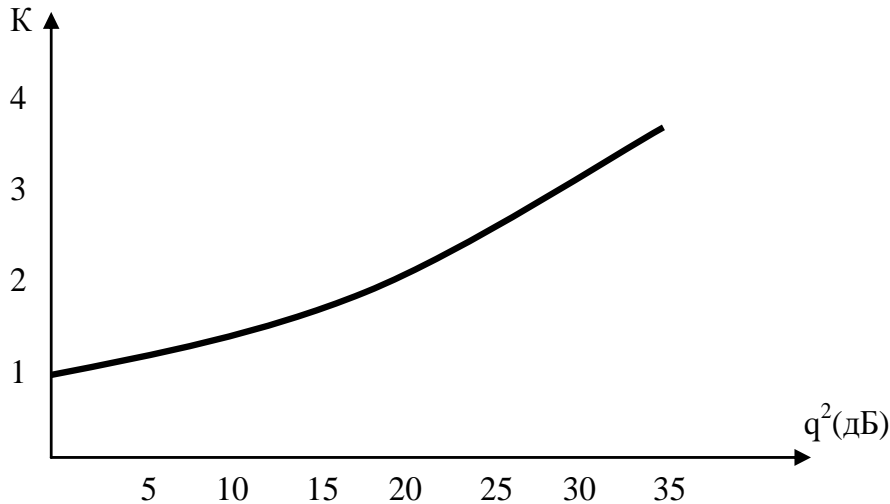


Рис. 1. Залежність коефіцієнта покращення розрізняювальної здатності  $K$  від відношення сигнал-шум для алгоритму Кейпона.

При цифровому синтезі РЛЗ реалізація внутрішньоелементного накопичення забезпечується шляхом розділення сигналу на субапертури, когерентної обробки, детектування і подальшого підсумовування парціальних РЛЗ.

Окрім розглянутого варіанту внутрішньоелементного некогерентного накопичення можливий, варіант міжелементного некогерентного накопичення, при якому спочатку отримують комплексні РЛЗ (КРЛЗ) з високим розрізненням по обох координатах, а потім після детектування проводять усереднювання за необхідним числом спостережень. Цей варіант вимагає підвищеної продуктивності процесора синтезу РЛЗ, але має ряд переваг:

- можливість адаптивного вибору розмірів і конфігурації усереднюючого вікна для застосування сучасних алгоритмів автоматичної сегментації РЛЗ, спектральної і нейронної обробки, вейвлет-фільтрації, фрактального аналізу;

- можливість отримання РЛЗ малорозмірних об'єктів для їх розпізнавання і класифікації;

- архівація РЛЗ і КРЛЗ для їх подальшого використання.

Вхідною інформацією є яскравіше РЛЗ (ЯРЛЗ) або КРЛЗ, після якого виконується детектування (як правило, квадратичне). Фільтрація спекл-шуму може включати як лінійні операції (згладжування у вікні), так і нелінійні (логарифмування, оцінка локальних параметрів, адаптивна порогова обробка та ін.).

Завдання пригнічення спекл-шуму можна розділити на наступні групи [7, 8]:

- *глобальні*, що передбачають дію на усі РЛЗ або основну її частину. До них, зокрема, відносяться алгоритми підсумовування незалежних РЛЗ з постійними параметрами в межах кадру;

- *локальні*, що ґрунтуються на оцінці локальної статистики. До них відносяться методи, що покращують дешифрування РЛЗ, але не зберігають вимірювальні властивості РЛЗ.

- *нелокальні способи фільтрації*, в яких на першому кроці виконують локальну обробку в невеликому блоці, аналізують статистику з виявленням і визначенням характеру аномалії. За цими даними шукають подібні утворення в сусідніх блоках фрагменту РЛЗ, а потім роблять адаптивну фільтрацію сукупності однорідних блоків.

Оскільки в усіх алгоритмах пригнічення спекл-шуму використовують елементи некогерентного накопичення РЛЗ, розглянемо основні особливості і варіанти виконання цієї процедури.

При аналізі методів некогерентного накопичення виходять з припущення, що на КРЛЗ спекл-шум, що створюється однорідною відзеркалювальною поверхнею, характеризується

дійсною і уявною складовими, кожна з яких є нормальним процесом гауса з нульовим, середнім і СКВ, пропорційним кореню квадратному з  $\sigma^0$  - питомій ефективній поверхні розсіяння цієї ділянки місцевості. Щільність ймовірності розподілу амплітуд підкорюється релеєвському закону. Щільність ймовірності потужності (квадрата амплітуди) відбитого сигналу або ЕПР в елементі розрізнення, що відтворює енергетичне РЛЗ (ЕРЛЗ), підкорюється експоненціальному закону розподілу, який є частковим випадком  $\chi_k^2$  - розподілом з  $k$  ступенями свободи ( $k=2$ ).

Стосовно міжелементного некогерентного накопичення усереднювання РЛЗ проводять у вікні розміром  $N_Y \times N_X$ . Математична залежність відліків вихідного усередненого РЛЗ від вхідного має вигляд [4]:

- при усереднюванні ЕРЛЗ з подальшим перетворенням в амплітудне РЛЗ

$$A_N(m, n) = \sqrt{\frac{1}{N_Y N_X} \sum_{k=-N_Y/2+1}^{N_Y/2} \sum_{l=-N_X/2+1}^{N_X/2} A^2(m+k, n+l)} ; \quad (1)$$

- при усереднюванні за амплітудою

$$A_N(m, n) = \frac{1}{N_Y N_X} \sum_{k=-N_Y/2+1}^{N_Y/2} \sum_{l=-N_X/2+1}^{N_X/2} A^2(m+k, n+l) . \quad (2)$$

У ряді спеціальних випадків (для інтерферометричної обробки) усереднювання за амплітудою реалізують шляхом усереднювання окремо дійсною і уявною складовими

$$A_N(m, n) = \frac{1}{N_Y N_X} \left\{ \left( \sum_{k=-N_Y/2+1}^{N_Y/2} \sum_{l=-N_X/2+1}^{N_X/2} A(m+k, n+l) \cos \varphi(m+k, n+l) \right)^2 + \right. \\ \left. + \left( \sum_{k=-N_Y/2+1}^{N_Y/2} \sum_{l=-N_X/2+1}^{N_X/2} A(m+k, n+l) \sin \varphi(m+k, n+l) \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

Реальне число спостережень у вихідному знімку залежить від розмірів усереднюючого вікна і роздільної здатності початкового РЛЗ за координатами  $Y, X$ . Число спостережень обчислюється за наступною формулою

$$N = \frac{N_Y N_X M_Y M_X}{\rho_Y \rho_X} , \quad (4)$$

де  $N_Y, N_X$  - розміри вікна усереднювання в пікселях;  $M_Y, M_X$  - масштаби початкового РЛЗ (крок пікселів);  $\rho_Y, \rho_X$  - розрізнення початкового РЛЗ за координатами дальності і азимута відповідно.

Реальне число спостережень у згладженому РЛЗ характеризують параметром - еквівалентне число спостережень  $ENL$  (*Equivalent Number of Looks*), яке може бути знайдене за характеристиками вихідного РЛЗ на ділянках з однорідним відображенням. Воно дорівнює відношенню квадрату середнього значення до дисперсії флуктуацій або квадрату відношення середнього до стандартного відхилення (СКВ) відліків. Для АРЛЗ маємо [4]

$$ENL = \left\{ \frac{mean_A}{0,5228 \cdot std_A} \right\} = \frac{M_1(A_{m,n})^2}{0,5228^2 \{M_2(A_{m,n}) - M_1(A_{m,n})^2\}}, \quad (5)$$

де  $mean_A = M_1(A_{m,n})$  – перший момент (середнє) амплітудного розподілу;

$std_A = \sqrt{D(A_{m,n})} = \sqrt{M_2(A_{m,n}) - M_1(A_{m,n})^2}$  - СКВ флуктуацій;  $M_2$  та  $D$  – другий момент та дисперсія амплітудного розподілу; коефіцієнт у знаменнику враховує співвідношення СКВ до середнього для закону Релея.

Для енергетичного зображення ЕРЛЗ маємо за аналогією

$$ENL = \frac{mean_E^2}{std_E^2} = \frac{M_1(E_{m,n})}{M_2(E_{m,n}) - M_1(E_{m,n})^2} \quad (6)$$

При  $ENL > 10$  щільність ймовірності в обох випадках наближається до нормального закону. Реалізація цього методу без втрати просторового розрізнення можлива тільки за наявності запасу за незалежними спостереженнями і при використанні алгоритмів ЦСА що мають високу роздільну здатність.

У РСА високого розрізнення некогерентне накопичення без втрати просторового розрізнення забезпечується в прожекторному режимі зйомки шляхом збільшення часу спостереження [9-11].

Використовують два варіанти некогерентного накопичення підсумовування парціальних РЛЗ (внутрішньоелементне накопичення) або відліків детального РЛЗ (міжелементне накопичення) при його усереднюванні по площі вікна :

- підсумовування по амплітуді (АРЛЗ);
- підсумовування по яскравості (ЕРЛЗ) - квадрату амплітуди.

У другому випадку зазвичай після підсумовування парціальних ЕРЛЗ роблять зворотний перехід до амплітуди шляхом витягання квадратного кореня з суми відліків яркостей.

Після проведеного усереднювання згладжене АРЛЗ зазвичай проріджують (децимують) в число разів, рівне або менше  $N_Y$  і  $N_X$  по відповідних координатах з інтерполяцією для отримання рівномасштабного РЛЗ в плановій проекції.

Розглянуті вище варіанти відносяться до ситуації, коли є запас за часом спостереження, який використовують для некогерентного накопичення. Типовіша інша ситуація (маршрутні режими сканування) [9-11], коли такий запас відсутній, некогерентне накопичення реалізують за рахунок погіршення просторового розрізнення.

Варіант поліпшеного просторового розрізнення можна використати для формування банку РЛП об'єктів, а поліпшене радіометричне розрізнення РЛЗ - для загальних моніторингових завдань і виявлення групових об'єктів.

Взагалі кажучи, можливості зниження спекл-шуму на РЛЗ шляхом некогерентного накопичення обмежені допустимим погіршенням просторового розрізнення до меж, коли втрачається інформація про об'єкт.

Це пов'язано з тим, що спекл-шум, викликаний інтерференцією сигналів від елементів групового або розподіленого об'єкту, є породженням сукупного відображення радіохвиль від цього об'єкту або ділянки місцевості, в якій міститься інформація про середнє (по ансамблю) значення питомої ЕПР в усереднюваному майданчику розрізнення.

У реальних умовах дешифрування радіолокаційних зображень доводиться шукати компроміс між поліпшенням радіометричного і погіршенням просторового розрізнення.

### Висновки

Таким чином у даній статті розглянуті основні причини виникнення спекл-шумів, проведений аналіз можливих методів їх фільтрації.

Запропоновано з метою зменшення спекл-шумів використання сучасного алгоритму спектрального аналізу – алгоритму Кейпона.

Показано, що використання даного алгоритму дозволить значно збільшити розрізнявальну здатність радіолокаційних зображень об'єктів радіомоніторингу.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Ширман Я.Д., Горшков С.А., Лещенко С.П., Братченко Г.Д., Орленко В.М. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование // Зарубежная радиоэлектроника. - 1996.-№11.-С. 3-63.
2. Кудряшов В.С., Наконечный В.С., Побережный А.А. Анализ влияния движения летательных аппаратов на качество измерения их радиолокационных дальностных портретов в спектральной области. Збірник наукових праць. – Х.:ХУ ПС, 2006. – Вип. 3(9). – С. 91–93.,
3. Наконечный В.С. Экспериментальный анализ необходимой количества эталонных радиолокационных дальностных портретов повітряних цілей, що закладаються в довгострокову пам'ять систем розпізнавання. Збірник наукових праць.– К.:ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2008. – Вип. 19. – С. 83-89.].
4. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. - М.: Радиотехника, 2010. - 680 е.: ил.
5. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990.-584 с.
6. Голованов В.П., Кудряшев В.Е., Наконечный В.С., Побережный А.А., Экспериментальная оценка показателя улучшения разрешающей способности алгоритмов цифрового спектрального анализа от отношения сигнал/шум при ограниченном объеме выборки. Збірник наукових праць ХВУ. Выпуск 1(23)-,1999. с43-49.
7. Ахметьянов В.Р., Пасмуров А.Я. // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. №1.,
8. Белокуров А.А. Методы сглаживания спекл-шума на радиолокационных изображениях земной поверхности // Зарубежная радиоэлектроника. 1990. № 6. С.26-35.
9. Виноградов М. Возможности современных РЛС с синтезированием апертуры антенны // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 2. С. 52–56.
10. <http://podpricelom.net/vozdushno-kosmicheskaya-oborona/kosmicheskaya-razvedka-ka-dzz-chast-1>.
11. Алдымбаева Л.Н. Основные режимы радиолокационного обзора в космических РСА. Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 2012, №2, с. 34–39.

Надійшла: 19.02.2014 р

Рецензент: д.т.н., проф. Вишнівський В.В.