

С. С. ЖИЛА, А. В. ПОПОВ, Д. І. КОВАЛЬЧУК, А. М. БУЛАЙ, Я. Д. СИДОРОВ

Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

## ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОЗОБРАЖЕНЬ В РАДАРАХ ІЗ СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ, ЩО ВИПРОМІНЮЮТЬ БЕЗПЕРЕРВНІ ЛЧМ-СИГНАЛИ

**Предметом** дослідження є принципи побудови та реалізації імітаційної моделі формування радіозображень у радарях із синтезованою апертурою (РСА). Особливу увагу приділено відтворенню фізичних процесів, що відбуваються при обробці відбитих сигналів, а також побудові просторового відображення радіолокаційної сцени. **Метою** є розроблення імітаційної моделі формування радіозображень в РСА, яка дозволяє наочно відтворювати та аналізувати основні етапи обробки сигналів, вивчати вплив різних факторів на якість отриманого зображення, а також забезпечити верифікацію алгоритмів формування зображень у складних умовах спостереження. **Завдання:** Провести аналіз фізичних і математичних принципів роботи РСА; Визначити основні компоненти моделі та побудувати відповідні математичні описання; Реалізувати імітаційну модель, яка включає модулі генерації сигналів, відображення сцени, моделювання руху платформи та обробки сигналів; Провести моделювання типових ситуацій радіолокаційного спостереження з урахуванням просторової конфігурації сцени; Оцінити результати та визначити переваги й обмеження розробленої моделі в порівнянні з аналітичними методами. **Методи:** у дослідженні використано сукупність аналітичних, чисельних і моделювальних методів. Зокрема, побудова математичної моделі базується на застосуванні рівнянь електродинаміки, принципу Гюйгенса-Френеля, стохастичних інтегралів Іто та апаратної функції як засобу просторової фільтрації. Імітаційне моделювання виконано в середовищі MATLAB з урахуванням характеристик когерентного прийому, спектральної обробки сигналів, компенсації руху платформи та просторового згортання з функцією невизначеності. Застосовано також статистичні підходи до опису шумових складових зображення (спекл-шуму) з метою достовірного відтворення природних підстильних поверхонь. **Результати:** у роботі представлено структурну схему імітаційної моделі формування зображень у РСА, яка реалізує всі ключові етапи — від генерації зондувальних імпульсів до обробки та формування двовимірного зображення сцени. Наведено приклади моделювання спостереження тестових об'єктів, зокрема точкових і протяжних цілей. Проаналізовано вплив параметрів зондувального сигналу, геометрії зйомки та характеристик сцени на точність позиціонування та роздільну здатність. Модель дозволяє ілюструвати фундаментальні ефекти, характерні для РСА, зокрема синтез апертури за рахунок руху платформи, а також формування бічних пелюсток. Отримані результати можуть бути використані для навчальних цілей, перевірки алгоритмів обробки сигналів та попередньої оцінки ефективності РСА в різних сценаріях.

**Ключові слова:** радар із синтезованою апертурою; імітаційне моделювання; формування зображень; обробка сигналів; радіолокація; роздільна здатність; просторове зображення; рухома платформа; точкова ціль; структурна модель.

### Вступ

**Мотивація.** Синтезування апертури антени бокового радару є високотехнологічним методом дистанційного зондування, який поєднує просторово-часову обробку сигналів з когерентним прийомом, що дозволяє досягти високої просторової роздільної здатності зображень незалежно від відстані до об'єкта. Основу функціонування радарів з синтезуванням апертури (РСА) складає накопичення та обробка відбитих сигналів, що здійснюються під час руху платформи-носія. При цьому радіозображення формуються у двовимірному просторі координат

азимут-дальність, що відповідає напрямку руху платформи та радіальній відстані до цілі відповідно. Принцип синтезу апертури дозволяє суттєво підвищити роздільну здатність за азимутом порівняно з традиційною радіолокацією. Існуючі РСА формують радіозображення з точністю, що співставна з оптичними зображеннями.

**Сучасний стан.** У сучасних РСА широко застосовується безперервний зондувальний сигнал із лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) [1, 2] або її різновидами [3], який має пилкоподібну форму. Після компресії та спектральної обробки такий сигнал забезпечує високу роздільну здатність за дальні-



стю. Основними алгоритмами обробки в PCA є двовимірні методи типу Омега-К [4, 5], RDA (Range-Doppler Algorithm) [6,7] та FSA (Frequency Scaling Algorithm) [8, 9] та модифікований FSA [10], які дозволяють ефективно відновлювати структуру розсіювальних властивостей поверхні із «сирих» даних. Особливу роль при цьому відіграють методи компенсації фазових зсувів [11], ефекту міграції дальності [12], а також точний облік траєкторії носія [13].

Незважаючи на значні успіхи у розвитку апаратних і алгоритмічних рішень для PCA, проблема достовірного моделювання формування радіолокаційного зображення залишається актуальною. Це обумовлено тим, що більшість поширених методів моделювання оперує абстрактними об'єктами — наприклад, точковими джерелами віддзеркалення — які не відображають складності реальної сцени з неоднорідною структурою поверхні. Таким чином, існує потреба у створенні імітаційної моделі, яка б дозволяла більш точно враховувати фізичну природу електромагнітного віддзеркалення, особливо в умовах природних або урбанізованих поверхонь.

У цьому контексті імітаційне моделювання формування радіозображень в PCA з урахуванням фізичних моделей розсіювання, ефектів руху платформи, спекл-шуму та впливу апаратної функції є важливим інструментом для аналізу та вдосконалення систем радіолокаційного спостереження. Такий підхід дозволяє як підтвердити ефективність існуючих алгоритмів обробки, так і сформулювати рекомендації щодо конструктивного та програмного покращення PCA.

**Мета та підхід.** Проблема підвищення інформативності та достовірності радіолокаційних зображень є одним із ключових завдань сучасної радіолокації, дистанційного зондування Землі та аерокосмічного моніторингу. Незважаючи на значний прогрес у розвитку алгоритмів фокусування та апаратного забезпечення, існує низка обмежень, пов'язаних з неоднорідністю віддзеркалення підстильних поверхонь, присутністю мультиплікативного шуму (спекл-шуму), флуктуаціями траєкторії руху носія, а також впливом апаратної функції на якість зображення.

З огляду на складність прямих електродинамічних розрахунків для реальних об'єктів, важливого значення набуває імітаційне моделювання як засіб апроксимації фізичних процесів, які відбуваються під час формування когерентних зображень. Побудова реалістичної моделі відбитого сигналу з урахуванням стохастичної природи віддзеркалення дозволяє сформулювати адекватні тестові сцени, що є критично важливими для оцінки ефективності існуючих та нових алгоритмів обробки.

Таким чином, мета даного дослідження полягає у створенні комплексної імітаційної моделі формування радіозображень в PCA, яка поєднує фізичні принципи віддзеркалення, апаратні характеристики системи, особливості когерентної обробки та вплив стохастичних факторів.

У роботі використано фундаментальні праці в галузі синтезованої апертурної радіолокації, зокрема роботи, присвячені алгоритмам Омега-К, RDA, FSA, а також методам компенсації руху платформи. Вагоме значення мають класичні дослідження з теорії обробки ЛЧМ сигналів (Stolt [2], Chun & Jacowitz [3], Cafforio et al. [4]), методи спектрального масштабування [8, 9], а також моделі руху платформи з компенсованими траєкторними відхиленнями (Zaugg & Long [7]). Крім того, для математичного формалізму використано узагальнені підходи до опису хвильових процесів (Кірхгоф [14], Гюйгенс-Френель [15], Релей-Зоммерфельд [16]) та сучасні підходи до опису випадкових процесів і стохастичних інтегралів (Іто, Вінерівський процес [17, 18]).

Таким чином, робота спирається як на перевірені теоретичні основи, так і на сучасні прикладні напрацювання, забезпечуючи міцне підґрунтя для розробки достовірної імітаційної моделі формування зображень у PCA.

Стаття має наступну структуру:

- 1) наведена теорія моделювання алгоритмів функціонування PCA,
- 2) розроблено приклад реалізації імітаційної моделі,
- 3) проаналізовані результати формування радіо-зображень земних поверхонь,
- 4) сформувані загальні висновки дослідження.

## 2. Теорія моделювання алгоритмів функціонування PCA задля формування радіозображень поверхонь

Згідно теорії оптимальної обробки сигналів в радіосистемах роздільна здатність радіовимірювача визначається апаратною функцією – функцією реакції радіовимірювача на точкове джерело випромінювання. Використовуючи цей підхід розробники представлених алгоритмів формування радіозображення при імітаційному моделюванні задають тестове зображення у вигляді однієї яскравої точки на темному фоні. Радіозображення представляє собою коефіцієнт віддзеркалення поверхні і зазвичай подається у вигляді градацій сірого кольору, де чорний колір відповідає нульовому віддзеркаленню, а білий – повному віддзеркаленню. Таким чином на рис. 1 показані тестові радіолокаційні зображення, що формуються PCA з обробкою ЛЧМ безперервних сигналів при наявності різних спотворень.

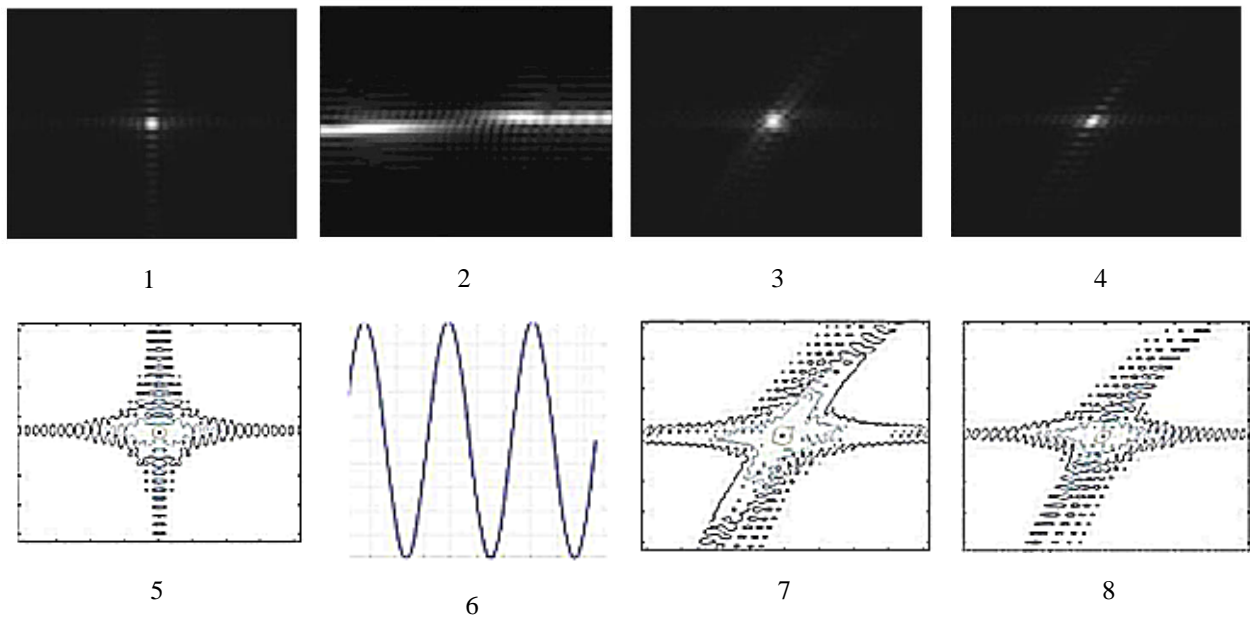


Рис. 1. Тестові радіолокаційні зображення точкового об'єкту віддзеркалення зі спотвореннями через флуктуації траєкторії руху носія:

1 – неспотворене радіолокаційне зображення; 5 – контурний графік неспотвореного радіолокаційного зображення; 6 – гармонійне відхилення траєкторії від прямолінійного руху; 2 – радіолокаційне зображення точкової цілі при відхиленні носія від прямолінійного руху за гармонійним законом; 3 – радіолокаційне зображення з корекцією руху згідно алгоритму FSA; 7 – контурний графік радіолокаційного зображення з корекцією руху згідно алгоритму FSA; 4 – радіолокаційне зображення з корекцією руху згідно алгоритму FSA-M; 8 – контурний графік радіолокаційного зображення з корекцією руху згідно алгоритму FSA-M (взято з [7])

Запропоновані у наведених роботах алгоритм формування радіолокаційних зображень є плідним з точки зору досліджень усунень різних спотворень в радіовимірюваннях. В той самий час точкове джерело випромінювання є нефізичною абстракцією і не може розкрити особливості формування реальних радіолокаційних зображень підстильних поверхонь. Для прикладу звуження головної пелюстки не завжди призводить до покращення якості радіолокаційного зображення. Натомість більш доцільно за рахунок застосування вагових вікон незначним чином розширити головну пелюстку і в декілька разів зменшити рівень бічних пелюсток, що маскують малопомітні за рівнем віддзеркалення об'єкти. Таким чином доцільно використовувати методіку атестації алгоритмів формування радіозображень в РСА, що включає формування наближених до реальних моделей віддзеркалення радіосигналів підстильними поверхнями.

Ні один з проаналізованих в літературі методів формування радіозображень в РСА з обробкою безперервних ЛЧМ сигналів не мав в своїй структурі моделі віддзеркалення поверхні і не враховував їх фізичний вміст. Розглянемо більш детально струк-

туру комплексного коефіцієнту віддзеркалення поверхні.

Опис радіозображення починається з визначення поля, що реєструється в області антени радару. Для визначення цього поля можна використовувати результати вирішення точних електродинамічних задач на основі формули Кірхгофа [14], теореми Гріна [14], теореми Гельмгольца-Кірхгофа [15], теореми Релея-Зоммерфельда [16] та інших. Застосування наведених математичних апаратів можливе для деяких тестових моделей, структур з чітко визначеними розмірами, об'єктів з простими геометричними формами. Майже неможливо вирішити задачі визначення поля, що розсіяне природними поверхнями – полями, лісами, урбанізованими територіями тощо. Наведені поверхні є типовими для аерокосмічних систем радіобачення. Інший підхід до опису прийнятих полів ґрунтується на принципі Гюйгенса-Френеля [17], згідно якого напруженості електричного поля підстильних поверхонь мають наступну модель:

$$\dot{E}(\vec{r}') = \int_D \dot{E}_F(\vec{r}) \frac{\exp(jkR)}{R} d\vec{r}, \quad (1)$$

де  $\dot{E}_F(\vec{r})$  – граничне поле поверхні елемента  $d\vec{r}$ ,  $\frac{\exp(jkR)}{R}$  – сферична хвиля. Таким чином, у точці спостереження  $\vec{r}'$  поле  $\dot{E}(\vec{r}')$  являє собою сумою сферичних хвиль, що розповсюджуються від точкових джерел на поверхні  $D$  в точках  $\vec{r}$  зі значеннями граничних умов у вигляді комплексних амплітуд  $\dot{E}_F(\vec{r})$ . Такий метод опису поля ще називають феноменологічним [18].

Зарєструвавши поле (1) в кожній точці антени необхідно виконати його обробку. В найбільш загальному випадку обробка полягає в вирішенні оберненої задачі визначення поля  $\dot{E}_F(\vec{r})$ , що знаходиться під інтегралом. Для початку введемо питомий коефіцієнт розсіювання електромагнітних коливань елементом  $d\vec{r}$

$$\dot{F}(\vec{r}) = \frac{\dot{E}_F(\vec{r})}{\dot{E}_{\text{пад}}(\vec{r})}, \quad (2)$$

як нормоване граничне поле на поверхні елемента до падаючого поля  $\dot{E}_{\text{пад}}(\vec{r})$ . Питомий коефіцієнт (2) будемо називати когерентним зображенням поверхні.

Далі для формування оцінки  $\hat{F}(\vec{r})$  когерентного зображення  $\dot{F}(\vec{r})$  необхідно інтегрувати комплексні амплітуди прийнятого поля (1) з вагою  $\dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_1)$ , що забезпечує амплітудно-фазову компенсацію набігу сферичних хвиль в кожній точці антени радару. В результаті маємо:

$$\begin{aligned} \hat{F}(\vec{r}_1) &= \int_D \dot{F}(\vec{r}) \int_{D'} \dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_1) \frac{\exp(jkR(\vec{r}, \vec{r}'))}{R(\vec{r}, \vec{r}')} d\vec{r}' d\vec{r} = \\ &= \int_D \dot{F}(\vec{r}) \dot{\Psi}(\vec{r}_1, \vec{r}) d\vec{r}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\dot{\Psi}(\vec{r}_1, \vec{r}) = \int_{D'} \dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_1) \frac{\exp(jkR(\vec{r}, \vec{r}'))}{R(\vec{r}, \vec{r}')} d\vec{r}'$  – апаратна функція або функція невизначеності, що визначає роздільну здатність оцінки радіозображення  $\hat{F}(\vec{r}_1)$ . У випадку, коли  $\dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_1)$  підібрана найкращим чином і умови вимірювання дозволяють отримати  $\dot{\Psi}(\vec{r}_1, \vec{r}) = \delta(\vec{r}_1 - \vec{r})$ , то буде повне відновлення радіолокаційного зображення поверхні без спотворень.

Інтеграл (3) є інтегралом Рімана і може застосовуватись лише до функцій, які є неперервними (не мають розривів), монотонними (диференційованими на всьому проміжку) і обмеженими (область визначення функції обмежена як зверху, так і знизу). Функція під інтегралом  $\dot{F}(\vec{r})$  є складною і в більшості випадків не інтегрована за Ріманом. Для формального математичного розрахунку (3) необхідно переходити до інтегралів Стілтєса, Лебега, Іто і використовувати міру множини замість диференціалу  $d\vec{r}$ . Найбільш доцільнішим є використання стохастичних інтегралів Іто для опису випадково-неоднорідних зображень поверхонь, що підлягають відновленню в бортових РСА. При віддзеркаленні електромагнітних хвиль від рослинних покривів (трави, лісу), ріллі, листя дерев, трави, радіуси кореляції  $\dot{F}(\vec{r})$  стають менші за ефективну ширину апаратної функції  $\dot{\Psi}(\vec{r}_1, \vec{r})$  і площу диференціалу  $d\vec{r}$ . Ширина спектру  $\dot{F}(\vec{r})$  в такому випадку буде значно ширшою за спектри функції  $\dot{\Psi}(\vec{r}_1, \vec{r})$ . З огляду на зазначене, можна стверджувати, що  $\dot{F}(\vec{r})$  є просторовим випадковим процесом у вигляді білого просторового шуму зі спектральною щільністю потужності, яка постійна у межах іншої функції інтегралу (1). Введемо стохастичну міру інтегралу Іто:

$$d\dot{Q}(\vec{r}) = \dot{F}(\vec{r}) d\vec{r}. \quad (4)$$

Інтеграл Іто для випадку (3) має наступний вигляд:

$$\hat{F}(\vec{r}_1) = \int_D \dot{\Psi}(\vec{r}_1, \vec{r}) d\dot{Q}(\vec{r}) = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta\vec{r} \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^N \dot{\Psi}(\vec{r}_1, \vec{r}_i) \Delta Q(\vec{r}_i), \quad (5)$$

де  $\Delta\dot{Q}(\vec{r}_i) = \dot{Q}(\vec{r}_i) - \dot{Q}(\vec{r}_{i-1})$  – незалежні випадкові прирости комплексного вінерівського процесу:

$$\begin{aligned} \dot{Q}(\vec{r}) &= \int_0^{\vec{r}} \dot{F}(\vec{\rho}) d\vec{\rho}, \\ \Delta\dot{Q}(\vec{r}) &= \int_0^{\vec{r}+\Delta\vec{r}} \dot{F}(\vec{\rho}) d\vec{\rho} - \int_0^{\vec{r}} \dot{F}(\vec{\rho}) d\vec{\rho} = \\ &= \int_{\vec{r}}^{\vec{r}+\Delta\vec{r}} \dot{F}(\vec{\rho}) d\vec{\rho} \approx d\dot{Q}(\vec{r}) \quad (7) \\ \Delta\dot{Q}(\vec{r}_i) &= \int_{\vec{r}_i}^{\vec{r}_i+\Delta\vec{r}} \dot{F}(\vec{\rho}) d\vec{\rho} \rightarrow d\dot{Q}(\vec{r}) = \int_{\vec{r}}^{\vec{r}+d\vec{r}} \dot{F}(\vec{\rho}) d\vec{\rho}. \quad (8) \end{aligned}$$

Математичне очікування такого комплексного вінеровського процесу дорівнює нулю, а дисперсія:

$$\begin{aligned} \left\langle \left[ \int_{\vec{r}}^{\vec{r}+\Delta\vec{r}} \dot{\mathbf{F}}(\vec{\rho}) d\vec{\rho} \right]^2 \right\rangle &= \int_{\vec{r}}^{\vec{r}+\Delta\vec{r}} \int_{\vec{r}}^{\vec{r}+\Delta\vec{r}} \left\langle \dot{\mathbf{F}}(\vec{\rho}_1) \dot{\mathbf{F}}^*(\vec{\rho}_2) \right\rangle d\vec{\rho}_1 d\vec{\rho}_2 = \\ &= \int_{\vec{r}}^{\vec{r}+\Delta\vec{r}} \int_{\vec{r}}^{\vec{r}+\Delta\vec{r}} \left\langle \text{Re} \dot{\mathbf{F}}(\vec{\rho}_1) \text{Re} \dot{\mathbf{F}}^*(\vec{\rho}_2) \right\rangle + \\ &+ \left\langle \text{Im} \dot{\mathbf{F}}(\vec{\rho}_1) \text{Im} \dot{\mathbf{F}}^*(\vec{\rho}_2) \right\rangle d\vec{\rho}_1 d\vec{\rho}_2 = \\ &= \int_{\vec{r}}^{\vec{r}+\Delta\vec{r}} \int_{\vec{r}}^{\vec{r}+\Delta\vec{r}} \sigma^0(\rho_1) \delta(\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2) d\vec{\rho}_1 d\vec{\rho}_2 = \sigma^0(\rho) \Delta\vec{r}, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\delta(\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2)$  – дельта-функція.

Приймаючи до уваги представлений інтеграл Іто (5), наведені розрахунки і запропоновану модель  $\dot{\mathbf{F}}(\vec{r})$  у вигляді білого шуму, імітаційне моделювання когерентних зображень в комп'ютері доцільно проводити за інтегральною сумою Іто:

$$\hat{\mathbf{F}}(\vec{r}_k) = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta\vec{r} \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^N \dot{\mathbf{F}}(\vec{r}_i, \vec{r}_k) \Delta Q(\vec{r}_i), \quad (10)$$

де  $\Delta Q(\vec{r}_i) = \int_{\vec{r}_i}^{\vec{r}_i+\Delta\vec{r}} \dot{\mathbf{F}}(\vec{\rho}) d\vec{\rho}$  – статистично незалежні відліки дискретного білого гаусівського шуму. У цьому конкретному випадку сукупність дискретних відліків  $\Delta Q(\vec{r}_i)$  є статистично неоднорідною з дисперсією, що змінюється  $\sigma_{\Delta Q}^2(\vec{r}_i) = \sigma^0(\vec{r}_i) \Delta\vec{r}$  і є дискретизованим аналогом справжнього когерентного зображення  $\dot{\mathbf{F}}(\vec{r})$ , а дискретна сума Іто – дискретний аналог когерентного зображення, згладженого апаратною функцією, отриманого в деякій технічній системі його оцінки. Формула (10) є дискретною згортокою функції невизначеності і цифрового радіозображення. Комплексний процес  $\Delta Q(\vec{r}_i)$  складається з реальної  $\text{Re}\{\Delta Q(\vec{r}_i)\}$  і уявної частин  $\text{Im}\{\Delta Q(\vec{r}_i)\}$

$$\begin{aligned} \Delta Q(\vec{r}_i) &= \sqrt{\frac{\sigma^0(\vec{r}_i)}{2}} \dot{\xi}(\vec{r}_i) = \\ &= \sqrt{\frac{\sigma^0(\vec{r}_i)}{2}} \left[ \text{Re}\{\dot{\xi}(\vec{r}_i)\} + j \text{Im}\{\dot{\xi}(\vec{r}_i)\} \right], \end{aligned} \quad (11)$$

де  $\text{Re}\{\dot{\xi}(\vec{r})\}$  і  $\text{Im}\{\dot{\xi}(\vec{r})\}$  – просторові дельта-корельовані процеси з одиничною спектральною щільністю потужності.

### 3. Приклад реалізації імітаційної моделі формування радіозображень

На рис. 2 показано алгоритм імітаційного моделювання істинного радіолокаційного зображення і його оцінки. Даний алгоритм повторює всі математичні викладки, що були наведені. Для достовірності формування  $\Delta Q(\vec{r}_i)$  розрахуємо його дисперсію:

$$\begin{aligned} \left\langle [\Delta Q(\vec{r}_i)]^2 \right\rangle &= \left\langle \left[ \sqrt{\frac{\sigma^0(\vec{r}_i)}{2}} \left[ \text{Re}\{\dot{\xi}(\vec{r}_i)\} + j \text{Im}\{\dot{\xi}(\vec{r}_i)\} \right] \right]^2 \right\rangle = \\ &= \frac{\sigma^0(\vec{r}_i)}{2} \left( \left\langle [\text{Re}\{\dot{\xi}(\vec{r}_i)\}]^2 \right\rangle + \left\langle [\text{Im}\{\dot{\xi}(\vec{r}_i)\}]^2 \right\rangle + \right. \\ &\quad \left. + 2j \left\langle \text{Re}\{\dot{\xi}(\vec{r}_i)\} \text{Im}\{\dot{\xi}(\vec{r}_i)\} \right\rangle \right) = \\ &= \frac{\sigma^0(\vec{r}_i)}{2} (\Delta r + \Delta r + 2j \times 0) = \sigma^0(\vec{r}_i) \Delta r. \end{aligned} \quad (12)$$

У виразі (12) отримана дисперсія така ж сама, як і у (9).

Структурна схема проведення імітаційного моделювання на рис. 2 дозволяє отримати вже готові радіолокаційні зображення. В той самий час наведені алгоритми у попередньому пункті моделюються на прикладі обробки «сирих» даних і запропонований підхід марний для перевірки їх працездатності. Але у всіх наведених виразах та алгоритмічних операція не вказано де саме знаходиться питомий комплексний коефіцієнт розсіювання і як його формувати. В більшості випадків  $\Delta Q(\vec{r}_i)$  необхідно підставляти у вигляді множника в прийнятий радаром сигнал:

1) для виразу:

$$\begin{aligned} \dot{S}(f_t, f_n) &= t_0 \sin c(\pi t_0(f_t - k_r \Delta t)) \exp(j\varphi(f_t, f_n)), \\ \dot{s}_0(t, n) &= \Delta Q(t, n) \exp\{j(2\pi f_0 \Delta t + 2\pi k_r t \Delta t)\}, \end{aligned}$$

2) для виразу:

$$\begin{aligned} \dot{s}_0(t, x) &= \exp\left\{j\left(2\pi f_0 \frac{2R(x)}{c} + 2\pi k_r t \frac{2R(x)}{c}\right)\right\} \times \\ &\quad \times \exp\left\{j \frac{4\pi k_r}{c^2} R^2(x)\right\} \\ \dot{s}_0(t, x) &= \Delta Q(t, x) \exp\left\{j\left(2\pi f_0 \frac{2R(x)}{c} + 2\pi k_r t \frac{2R(x)}{c}\right)\right\} \times \\ &\quad \times \exp\left\{j \frac{4\pi k_r}{c^2} R^2(x)\right\}. \end{aligned}$$

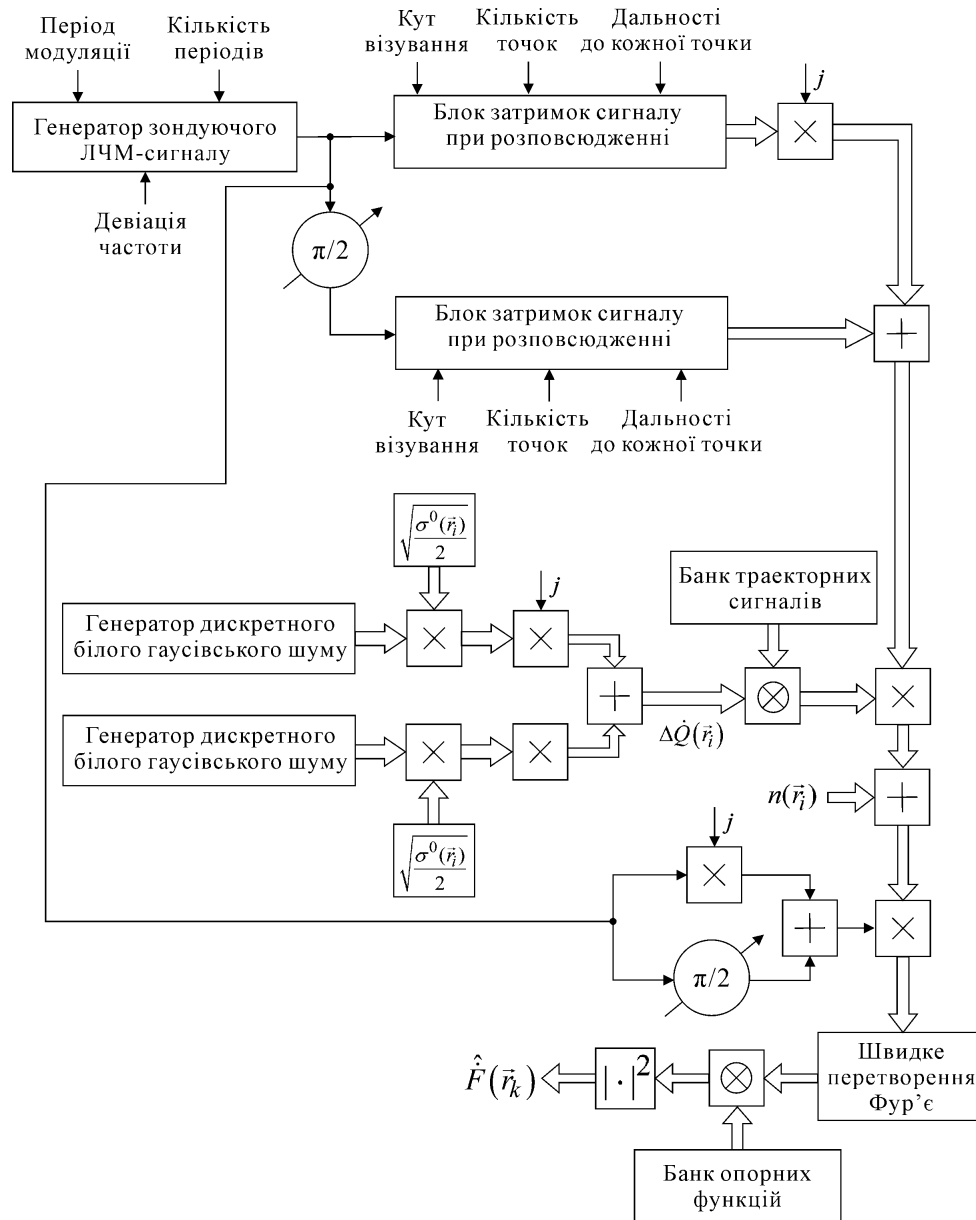


Рис. 2. Імітаційна модель формування моделі істинного радіолокаційного зображення поверхні і його оцінки

Імітаційне моделювання необхідно повторювати за алгоритмом на рис. 2 до операції згортки з функцією невизначеності. Також слід зазначити, що на практиці когерентні приймачі РСА реалізуються у двох каналах з обробкою квадратур [19, 20]. Кожний канал окремо обробляє  $\text{Re}\{\Delta\dot{Q}(\vec{r}_i)\}$  і  $\text{Im}\{\Delta\dot{Q}(\vec{r}_i)\}$  процеси і на кінцевому етапі типовим є формування квадрату модулю з отриманих вихідних ефектів шляхом додавання квадрату отриманих оцінок  $\text{Re}\{\hat{F}(\vec{r}_k)\}$  і  $\text{Im}\{\hat{F}(\vec{r}_k)\}$ . Наведемо приклад реалізації імітаційної моделі формування радіолокаційних зображень підстильних земних поверхонь існуючими методами в пакеті прикладних програм MatLab.

#### 4. Результати і дискусія формування радіозображень земних поверхонь

Для початку сформуємо зонduючий сигнал в РСА з обробкою безперервних ЛЧМ сигналів. На рис. 3 показано приклад трьох періодів сигналу для центральної частоти 1 Гц, девіації частоти 100 МГц, періоду модуляції 30 мкс.

Центральна частота 1 Гц обрана для спрощення моделювання і наочності представлення ЛЧМ сигналу.

При імітаційному моделюванні також доцільно аналізувати спектр зонduючого сигналу, адже подальша обробка буде виконана в спектральній області.

Спектр зонduючого сигналу для наведеного прикладу вихідних параметрів показано на рис. 4.

На рис. 5 наведено розподіл дисперсії  $\sigma^0(\vec{r}_i)$ , що являє собою істинне некогерентне радіолокаційне зображення. Відповідно до алгоритму моделювання, на рис. 6 і 7 показано шумову складову радіолокаційного зображення і компоненти  $\text{Re}\{\Delta\dot{Q}(\vec{r}_i)\}$ ,  $\text{Im}\{\Delta\dot{Q}(\vec{r}_i)\}$ .

Отримані компоненти  $\text{Re}\{\Delta\dot{Q}(\vec{r}_i)\}$  і  $\text{Im}\{\Delta\dot{Q}(\vec{r}_i)\}$  виступають амплітудними множниками в прийнятих сигналах дома каналами обробки «сирих» даних. Слід зауважити, що шумові складові на рис. 6 при моделюванні повинні бути некорельованими.

Обравши геометрію зондування з борта БПЛА припустимо, що дальність до найближчої точки опромінення поверхні складає 1000 метрів, до самої дальньої – 3000 м, швидкість руху – 50 м/с, довжина хвилі – 3 см, ширина плями діаграми спрямованості на землі за азимутом фізичної антени – 30 м.

За наведеними вихідними даними було сформовано «сирі» дані, що підлягають подальшій обробці. Вихідна радіоголограма до обробки представлена на рис. 8. На представлену радіоголограму додатково накладається віддзеркалений ЛЧМ сигнал з часом затримки, що пропорційний дальності до кожної точки опроміненої поверхні. Обробка отриманих сигналів виконується за наведеними в попередньому розділі алгоритмами. Результат формування радіолокаційних зображень поверхні за Омега-К алгоритмом показано на рис. 9.

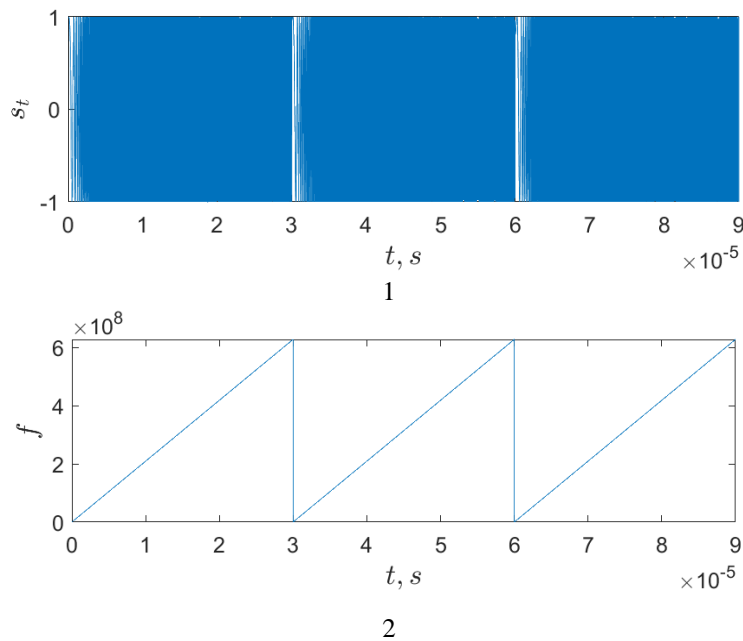


Рис. 3. Модель зонduючого сигналу: 1 – ЛЧМ сигнал; 2 – девіація частоти у часі

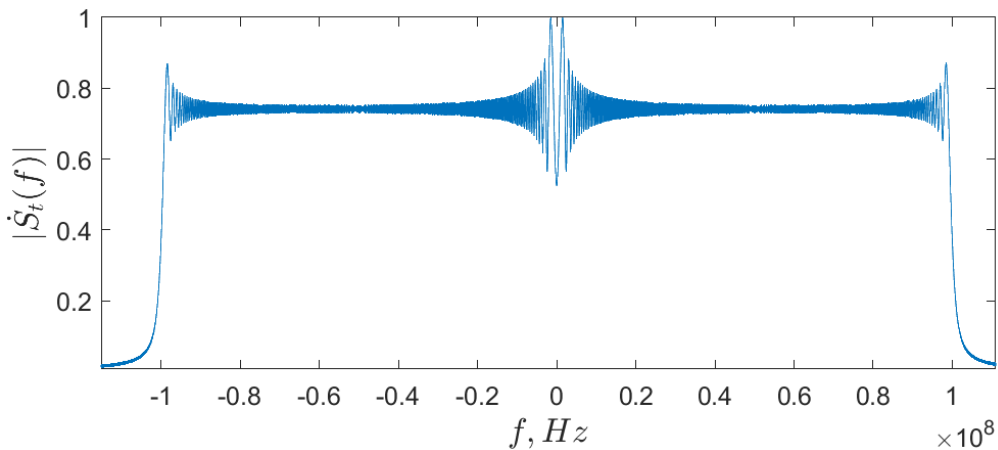


Рис. 4. Спектр зонduючого сигналу

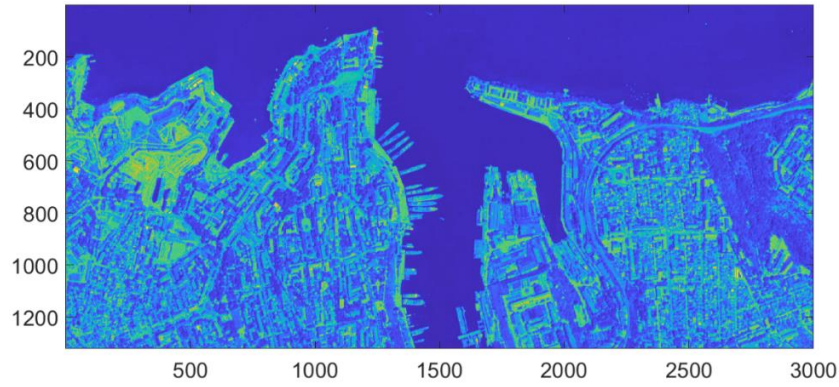
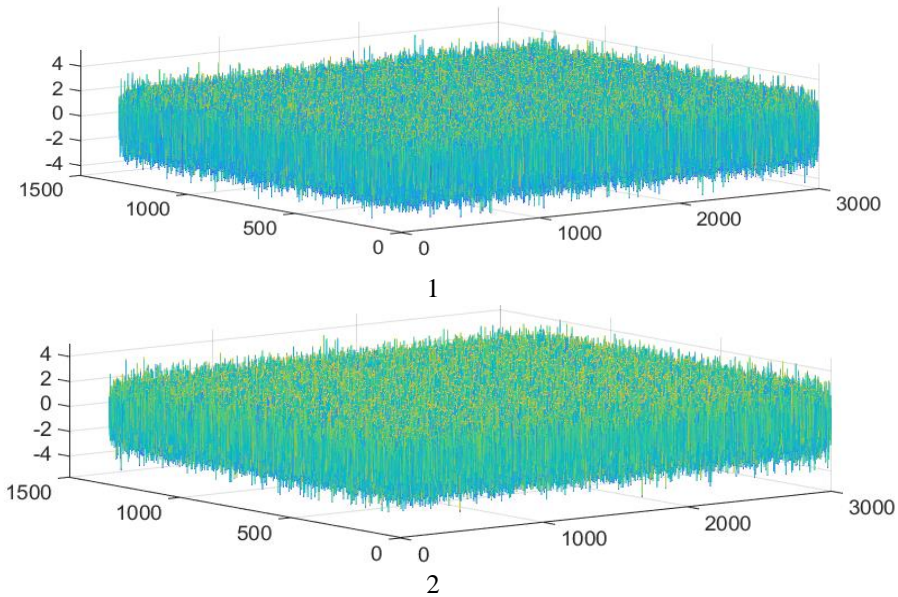
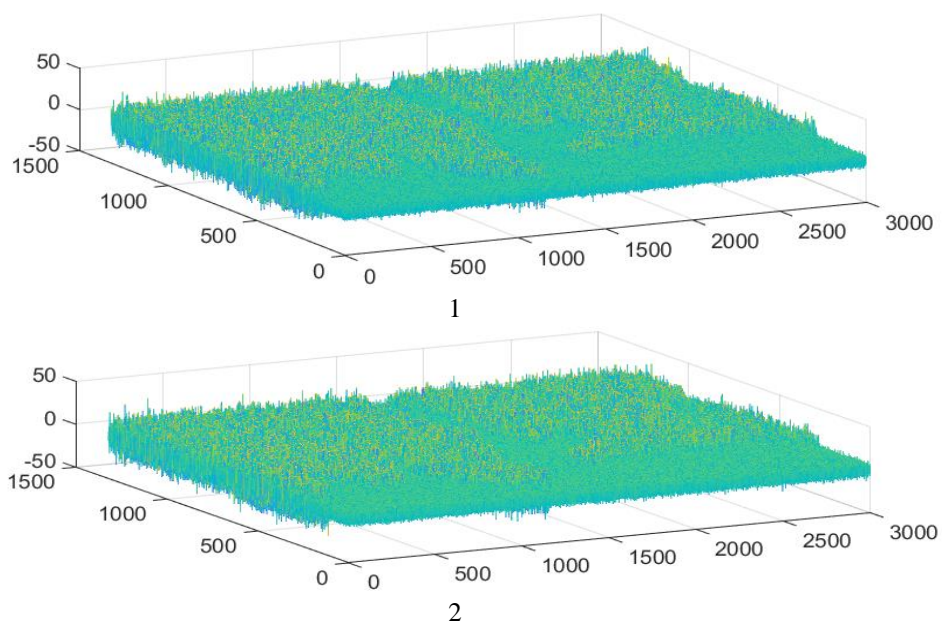


Рис. 5. Дисперсія радіолокаційного зображення

Рис. 6. Шумові складові цифрової моделі радіолокаційного зображення: 1 –  $\text{Re}\{\dot{\xi}(\vec{r})\}$ ; 2 –  $\text{Im}\{\dot{\xi}(\vec{r})\}$ Рис. 7. Модель радіолокаційного зображення: 1 –  $\text{Re}\{\Delta\dot{Q}(\vec{r})\}$ ; 2 –  $\text{Im}\{\Delta\dot{Q}(\vec{r})\}$



Збільшена ділянка радіолокаційного зображення на рис. 10 показує, що отриманий результат має основний атрибут всіх радіолокаційних зображень – мультиплікативний шум або спекл-шум [8, 9]. Виникає цей мультиплікативний шум через випадковість віддзеркалення електромагнітних хвиль реальними поверхнями і їх когерентне оброблення в РСА. Розмір спеклу

дорівнює ширині апаратної функції системи. Для прикладу, за азимутом апаратна функція розширюється вдвічі, якщо інтервал синтезування за азимутом зменшити в два рази. Результат формування радіолокаційного зображення при зменшенні інтервалу синтезування апертури антени в два рази показано на рис. 11.

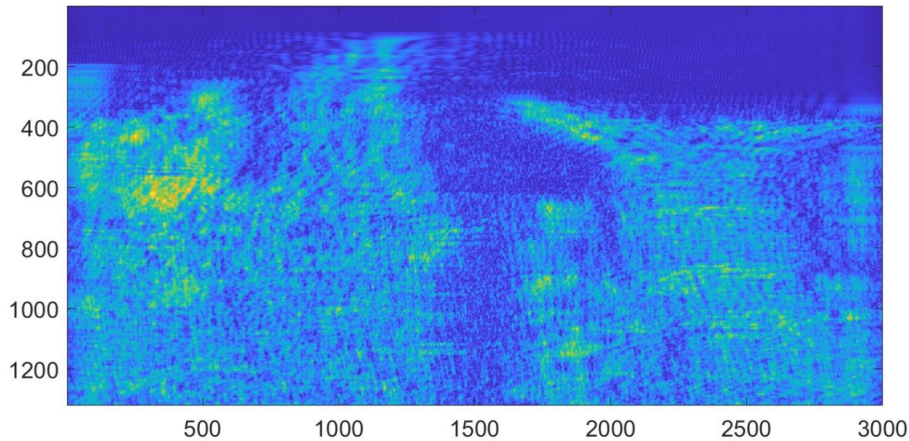


Рис. 8. Сирі данні, що підлягають обробці в РСА

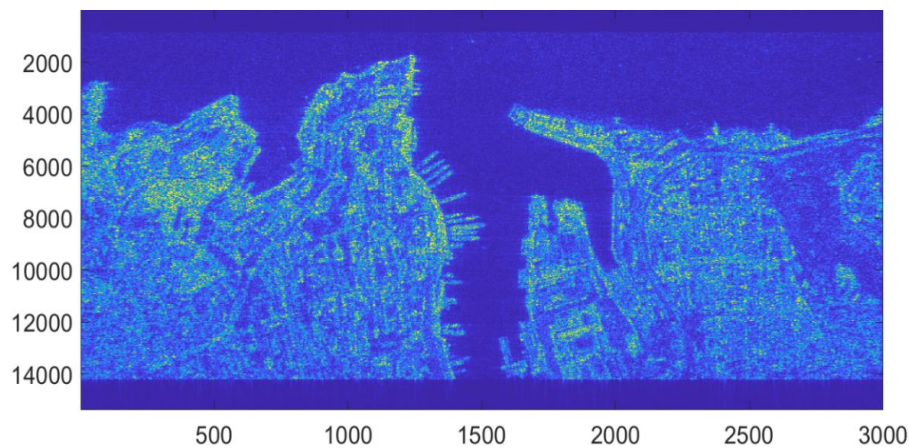


Рис. 9. Радіолокаційне зображення поверхні, що отримане Омега-К алгоритмом

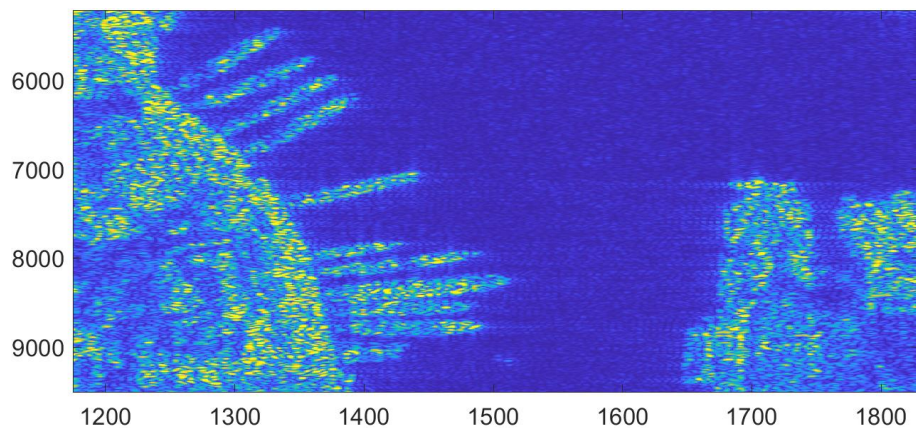


Рис. 10. Збільшена ділянка радіолокаційного зображення з явною присутністю мультиплікативного шуму

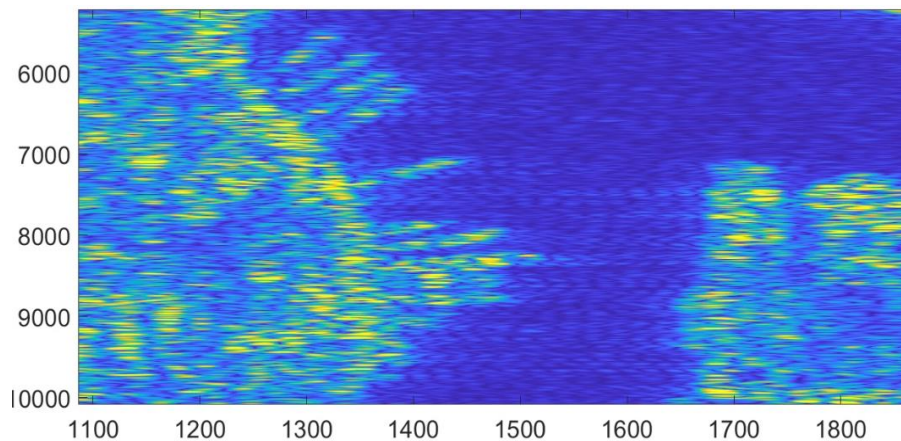


Рис. 11. Збільшена ділянка радіолокаційного зображення при зменшенні інтервалу синтезування і розширенні розмірів спеклів за координатою азимута

### Висновки

У статті обґрунтовано необхідність застосування імітаційного моделювання для дослідження процесів формування радіозображень у радарів із синтезованою апертурою (РСА). Доведено, що класичні методи на основі тестових точкових джерел не відображають повною мірою складність реального розсіювання від підстильних поверхонь.

Запропонована імітаційна модель враховує фізичну природу відбитого електромагнітного поля, використовуючи принципи Гюйгенса-Френеля, стохастичні інтеграли Іто та апаратну функцію для опису просторової роздільної здатності. Таке поєднання дозволяє моделювати як когерентні, так і некогерентні складові радіозображення. Розроблена модель

реалізує повний ланцюг обробки сигналів в РСА — від формування зондуючого ЛЧМ сигналу, моделювання руху платформи та віддзеркалення, до отримання цифрового радіозображення з урахуванням мультиплікативного шуму.

В результаті моделювання підтверджено, що просторові спотворення, похибки траєкторії платформи, рівень бокових пелюсток та спектральні характеристики апаратної функції істотно впливають на якість радіолокаційного зображення. Виявлено доцільність адаптивного підбору вагових вікон, що дозволяє покращити співвідношення сигнал/шум без суттєвого зниження роздільної здатності. Представлений алгоритм моделювання в середовищі MATLAB дозволяє генерувати тестові сцени для перевірки алгоритмів фокусування, дослідження впливу шумів та апробації нових методів обробки даних.

Модель має практичну цінність для навчання, попереднього проєктування РСА та аналізу їхніх технічних характеристик. Запропонований підхід

може бути розширений для врахування складніших типів поверхонь, тривимірної геометрії, поляризаційних ефектів і рухомих цілей, що відкриває перспективи подальших досліджень у галузі синтезованої апертурної радіолокації.

### Напрями майбутніх досліджень

Подальші дослідження передбачають розширення імітаційної моделі на випадки тривимірної геометрії дослідження та моделювання віддзеркалення від рухомих об'єктів. Перспективним є також інтегрування моделі з алгоритмами штучного інтелекту для автоматизованого аналізу зображень і підвищення завадозахищеності систем РСА у складних умовах спостереження.

### Внесок авторів:

Формулювання проблеми, оцінка результатів — **А. В. Попов**; огляд та аналіз інформаційних джерел — **Я. Д. Сидоров, А. М. Булай**; виведення формул, дослідження структури та візуалізація результатів — **С. С. Жила, Д. І. Ковальчук**.

### Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті

### Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

### Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

### Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

### Література

1. Cumming, I. G. Interpretations of the omega-K algorithm and comparisons with other algorithms [Text] / I. G. Cumming, Y. L. Neo, & F. H. Wong // IGARSS 2003. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477). – Toulouse, France, 2003. – P. 1455–1458. DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1294142.

2. Stolt, R. H. Migration by Transform [Text] / R. H. Stolt // Geophysics. – 1978. – Vol. 43, no. 1. – P. 23–48.

3. Chun, J. H. Fundamentals of Frequency Domain Migration [Текст] / J. H. Chun, C. A. Jacowitz // Geophysics. – 1981. – Vol. 46. – P. 717–733.

4. Cafforio, C. SAR Data Focusing Using Seismic Migration Techniques [Текст] / C. Cafforio, C. Prati, F. Rocca // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1991. – Vol. 27, no. 2. – P. 194–207.

5. Subiza, B. An approach to SAR imaging by means of non-uniform FFTs [Текст] / B. Subiza, E. Gimeno-Nieves, J. M. Lopez-Sanchez, J. Fortuny-Guasch // IGARSS 2003. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477). – Toulouse, France, 2003. – P. 4089–4091, vol. 6. DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1295371.

6. Guo, S. Modified Omega-K algorithm for ground-based FMCW SAR imaging [Text] / S. Guo, & X. Dong // IEEE 13th International Conference on Signal Processing (ICSP). – Chengdu, China, 2016. – P. 1647–1650. DOI: 10.1109/ICSP.2016.7878107.

7. Zaugg, E. C. Theory and Application of Motion Compensation for LFM-CW SAR [Text] / E. C. Zaugg, & D. G. Long // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2008. – Vol. 46, no. 10. – P. 2990–2998. DOI: 10.1109/TGRS.2008.921958.

8. Mittermayer, J. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm [Text] / J. Mittermayer, A. Moreira, & O. Loffeld // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1999. – Vol. 37, no. 5. – P. 2198–2214.

9. Mittermayer, J. The Frequency Scaling Algorithm and interferometric Spotlight SAR processing [Text] / J. Mittermayer // Aerospace Science and Technology. – 2002. – Vol. 6, no. 2. – P. 147–158. DOI: 10.1016/S1270-9638(02)01149-5.

10. A Modified Range Doppler Algorithm for High-Squint SAR Data Imaging [Text] / Y. Guo, P. Wang, Z. Men, J. Chen, X. Zhou, T. He, & L. Cui // Re-

mote Sensing. – 2023. – Vol. 15, no. 17. – Article no. 4200. DOI: 10.3390/rs15174200.

11. Precision SAR processing using chirp scaling [Text] / R. K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. G. Cumming, & F. H. Wong // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1994. – Vol. 32, no. 4. – P. 786–799. DOI: 10.1109/36.298008.

12. Modified Frequency Scaling Algorithm for FMCW SAR Data Processing [Text] / Z. Jiang, F. Huang, J. Wan, & Z. Cheng // Chinese Journal of Aeronautics. – 2007. – Vol. 20, no. 4. – P. 339–345. DOI: 10.1016/S1000-9361(07)60053-3.

13. Zheng, J. A Modified Frequency Scaling Algorithm for Missile-Borne SAR Imaging [Text] / J. Zheng, J.-y. Cheng, & C.-h. Chen // International Symposium on Intelligent Information Technology Application. – Shanghai, China, 2008. – P. 337–341. DOI: 10.1109/ИТА.2008.315.

14. Гудман, Дж. В. Вступ до чотиривимірної оптики [Текст] / Дж. В. Гудман. – М. : Мир, 1970.

15. Борн, М. Основи оптики [Текст] / М. Борн. – М. : Наука, 1973.

16. Зоммерфельд, А. Оптика [Текст] / А. Зоммерфельд. – М. : Видавництво іноземної літератури, 1953.

17. Волосяк, В. К. Феноменологічний опис електромагнітного поля та когерентних зображень у радіотехніці та оптиці [Текст] / В. К. Волосяк, В. В. Павліков, & С. С. Жила // Матеріали 17-ї Міжнародної конференції IEEE з математичних методів в електромагнітній теорії (ММЕТ-2018). – Київ, 2018. – С. 302–305.

18. Волосяк, В. К. Феноменологічний опис когерентних радіолокаційних зображень на основі понять міри множини та стохастичного інтегралу [Текст] / В. К. Волосяк, С. С. Жила, & Д. В. Колесніков // Телекомунікації та радіотехніка. – 2019. – Том 78, № 1. – С. 19–30. DOI: 10.1615/telecomradeng.v78.i1.30.

19. Ruan, W. Long Coherent Processing Intervals for ISAR Imaging: Combined Complex Signal Kurtosis and Data Resampling [Text] / W. Ruan, & C. Liu // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, no. 24. – Article no. 4758. DOI: 10.3390/rs16244758.

20. An Efficient SAR Raw Signal Simulator Accounting for Large Trajectory Deviation [Text] / S. Dai, H. Zhang, C. Wang, Z. Lin, Y. Zhang, & J. Ran // Sensors. – 2025. – Vol. 25, no. 14. – Article no. 4260. DOI: 10.3390/s25144260.

### References

1. Cumming, I. G., Neo, Y. L., & Wong, F. H. Interpretations of the omega-K algorithm and comparisons with other algorithms. In: IGARSS 2003. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, France, 2003, pp. 1455–1458. DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1294142.

2. Stolt, R. H. Migration by Transform. Geophysics, 1978, vol. 43, no. 1, pp. 23–48.

3. Chun, J. H., & Jacowitz, C. A. Fundamentals of Frequency Domain Migration. *Geophysics*, 1981, vol. 46, pp. 717–733.
4. Cafforio, C., Prati, C., & Rocca, F. SAR Data Focusing Using Seismic Migration Techniques. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, vol. 27, no. 2, pp. 194–207.
5. Subiza, B., Gimeno-Nieves, E., Lopez-Sanchez, J. M., & Fortuny-Guasch, J. An approach to SAR imaging by means of non-uniform FFTs. In: *IGARSS 2003. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Toulouse, France, 2003, vol. 6, pp. 4089–4091. DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1295371.
6. Guo, S., & Dong, X. Modified Omega-K algorithm for ground-based FMCW SAR imaging. *2016 IEEE 13th International Conference on Signal Processing (ICSP)*, Chengdu, China, 2016, pp. 1647–1650. DOI: 10.1109/ICSP.2016.7878107.
7. Zaugg, E. C., & Long, D. G. Theory and Application of Motion Compensation for LFM-CW SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, vol. 46, no. 10, pp. 2990–2998. DOI: 10.1109/TGRS.2008.921958.
8. Mittermayer, J., Moreira, A., & Loffeld, O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, vol. 37, no. 5, pp. 2198–2214.
9. Mittermayer, J. The Frequency Scaling Algorithm and interferometric Spotlight SAR processing. *Aerospace Science and Technology*, 2002, vol. 6, no. 2, pp. 147–158. DOI: 10.1016/S1270-9638(02)01149-5.
10. Guo, Y., Wang, P., Men, Z., Chen, J., Zhou, X., He, T., & Cui, L. A Modified Range Doppler Algorithm for High-Squint SAR Data Imaging. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, no. 17, p. 4200. DOI: 10.3390/rs15174200.
11. Raney, R. K., Runge, H., Bamler, R., Cumming, I. G., & Wong, F. H. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, vol. 32, no. 4, pp. 786–799. DOI: 10.1109/36.298008.
12. Jiang, Z., Huang, F., Wan, J., & Cheng, Z. Modified Frequency Scaling Algorithm for FMCW SAR Data Processing. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, vol. 20, no. 4, pp. 339–345. DOI: 10.1016/S1000-9361(07)60053-3.
13. Zheng, J., Cheng, J.-y., & Chen, C.-h. A Modified Frequency Scaling Algorithm for Missile-Borne SAR Imaging. In: *International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, Shanghai, China, 2008, pp. 337–341. DOI: 10.1109/IITA.2008.315.
14. Goodman, J. W. *Vstup do chotyryvymirnoi optyky* [Introduction to Four-Dimensional Optics]. Moscow: Mir, 1970. (In Russian).
15. Born, M. *Osnovy optyky* [Fundamentals of Optics]. Moscow: Nauka, 1973. (In Russian).
16. Sommerfeld, A. *Optika* [Optics]. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1953. (In Russian).
17. Volosyuk, V. K., Pavlikov, V. V., & Zhyla, S. S. Fenomenolohichnyy opys elektromahnitnoho polya ta koherentnykh zobrazhen' u radiotekhnitsi ta optytsi [Phenomenological description of the electromagnetic field and coherent images in radio engineering and optics]. In: *Proc. 17th IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2018)*, Kyiv, 2018, pp. 302–305. (In Ukrainian).
18. Volosyuk, V. K., Zhyla, S. S., & Kolesnikov, D. V. Fenomenolohichnyy opys koherentnykh radiolokatsiy-nykh zobrazhen' na osnovi ponyat' miry mnozhyny ta stokhastychnoho intehral [Phenomenological description of coherent radar images based on the concepts of set measure and stochastic integral]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, vol. 78, iss. 1, pp. 19–30. DOI: 10.1615/telecomradeng.v78.i1.30. (In Ukrainian).
19. Ruan, W., & Liu, C. Long Coherent Processing Intervals for ISAR Imaging: Combined Complex Signal Kurtosis and Data Resampling. *Remote Sensing*, 2024, vol. 16, no. 24, p. 4758. DOI: 10.3390/rs16244758.
20. Dai, S., Zhang, H., Wang, C., Lin, Z., Zhang, Y., & Ran, J. An Efficient SAR Raw Signal Simulator Accounting for Large Trajectory Deviation. *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 14, p. 4260. DOI: 10.3390/s25144260.

Надійшла до редакції 16.05.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

## PRINCIPLES OF MODELING AND A SIMULATION MODEL FOR IMAGE FORMATION IN SYNTHETIC APERTURE RADARS

*Semen Zhyla, Anatoliy Popov, Danyil Kovalchuk, Andriy Bulay, Yaroslav Sydorov*

This study focuses on the principles of the construction and implementation of a simulation model for image formation in synthetic aperture radars (SAR). Particular attention is given to the reproduction of the physical processes occurring during the processing of reflected signals and the construction of a spatial representation of the radar scene. This study aims to develop a simulation model of image formation in SAR that enables a visual representation and analysis of the main stages of signal processing, the study of various factors affecting image quality, and the verification of image formation algorithms under complex observation conditions. **Objectives:** The physical and mathematical principles of SAR operation are analyzed. The main components of the model are identified and corresponding mathematical descriptions are constructed. A simulation model including modules for signal genera-

tion, scene reflection, platform motion modeling, and signal processing is implemented. Typical radar observation scenarios are simulated considering the spatial configuration of the scene. The results are evaluated and the advantages and limitations of the developed model are determined compared to analytical methods. **Methods:** The study employs a combination of analytical, numerical, and simulation methods. The construction of the mathematical model is based on the application of electrodynamics equations, the Huygens-Fresnel principle, Ito stochastic integrals, and the system's point spread function as a means of spatial filtering. Simulation modeling was performed in the MATLAB environment, considering the characteristics of coherent reception, spectral signal processing, platform motion compensation, and spatial convolution with the ambiguity function. Statistical approaches were also used to describe image noise components (speckle noise) for reliable modeling of natural underlying surfaces. **Results:** The study presents a structural scheme of the SAR image formation simulation model, which implements all key stages – from probing pulse generation to two-dimensional scene image processing and formation. Examples of simulated observation of test objects, including point and extended targets, are provided. The influence of probing signal parameters, imaging geometry, and scene characteristics on positioning accuracy and resolution was analyzed. The model demonstrates fundamental effects typical for SAR, particularly aperture synthesis due to platform motion and sidelobe formation. The obtained results can be used for educational purposes, algorithm verification, and preliminary SAR system performance evaluation under various scenarios.

**Keywords:** synthetic aperture radar; simulation modeling; image formation; signal processing; radar imaging; resolution; spatial image; moving platform; point target; structural model.

**Жила Семен Сергійович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Попов Анатолій Владиславович** – д-р техн. наук, доц., проф. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Ковальчук Даниїл Іванович** – ас. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Булай Андрій Миколайович** – канд. техн. наук, старш. наук. співроб. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Сидоров Ярослав Дмитрович** – інж. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Semen Zhyla** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Aerospace Radioelectronic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.zhyla@khai.edu, ORCID: 0000-0003-2989-8988.

**Anatoliy Popov** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Aerospace Radioelectronic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.v.popov@khai.edu, ORCID: 0000-0003-0715-3870.

**Danyil Kovalchuk** – Assistant Professor at the Department of Aerospace Radioelectronic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: d.i.kovalchuk@khai.edu, ORCID: 0009-0007-6847-6610.

**Andriy Bulay** –Candidate of Technical Science, Senior Researcher at the Department of Aerospace Radioelectronic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.bulay@khai.edu, ORCID: 0000-0003-4584-1922.

**Yaroslav Sydorov** – Engineer at the Department of Aerospace Radioelectronic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: y.d.sydorov@khai.edu, ORCID: 0009-0002-4088-2127.