

С. С. ЖИЛА, Д. В. КОЛЕСНИКОВ

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Україна*

МЕТОД СТАТИЧНОГО СИНТЕЗУ АПЕРТУРИ В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ТА НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Предметом вивчення у статті є метод синтезу апертури для вирішення завдань, які пов'язані з відновленням зображень статичної сцени. *Метою* дослідження є розробка нового методу та обґрунтування його працездатності на одному з можливих режимів огляду поверхні при дистанційному зондуванні або неруйнівному контролі об'єктів дослідження. *Завдання*: обґрунтування методу статичного синтезу апертури; запропонувати новий метод огляду й можливостей підвищення точності відновлення досліджуваної сцени. *Методи*, що використовуються: всі закладені припущення та нові визначення отримані в межах теорії дифракції, теорем Кірхгофа і Релея-Зоммерфельда та принципу Гюйгенса-Френеля. Отримані такі *результати*. Використовуючи феноменологічний підхід, визначено поняття когерентного зображення поверхні, що поділяється на три складові: розсіяне поле в області спостереження, первинна та вторинна обробки розсіяного поля. Показані основні операції відновлення первинних когерентних зображень, операції фокусування антенної системи на кожну точку досліджуваної поверхні та можливості підвищення їх просторової роздільної здатності в радарях з синтезуванням апертури антени. Визначені апаратна та базисна функції, які визначають роздільну здатність відновлення когерентних зображень. Визначено структуру когерентного зображення при статичному синтезі апертури в зоні Фраунгофера. У якості режиму огляду поверхні було обрано телескопічний режим у припущенні, що огляд ділянки здійснюється хрестоподібним чином у двох взаємно-перпендикулярних напрямках (багатопрхідний або багатооглядовий режими). Досліджена роздільна здатність методу статичного синтезу апертури при огляді поверхні по траєкторії у вигляді хреста. Зазначено, що для такого огляду первинне та вторинне синтезоване зображення не мають необхідної роздільної здатності. Запропоновано вирішити цю проблему через знаходження перехресних членів з вузькими по обох координатах апаратними функціями, через формування та проведення математичних операцій з сигналами, що пропорційні інтенсивностям сумарного і різницевого когерентних зображень. *Висновки*. Показана можливість формування зображення розрідженими антенними решітками. У результаті дослідження доведено, що при хрестоподібному огляді структура зображення є ефективним перерізом розсіювання поверхні дослідження.

Ключові слова: статистичний синтез апертури; дистанційне зондування; формалізація математичного методу; структурна схема.

Вступ

Метод синтезування апертури бортових радарів відомий вже понад півстоліття. Значні здобутки у розвитку елементної бази високочастотних пристроїв дозволили реалізувати безліч модифікацій цієї технології та різні режими огляду простору. Сьогоднішні аерокосмічні радары з планарними фазованими антенними решітками досягли дециметрової просторової роздільної здатності. У той же час нові задачі і вимоги до систем радіобачення, що постійно зростають, вимагають подальшого підвищення точності оцінок параметрів і просторової роздільної здатності знімків підстильної поверхні.

Класичний режим огляду простору, який розглядають для опису технології синтезу апертури, це строго бічний маршрутний режим Strip-map [1]. Такий огляд дозволяє формувати радіолокаційні

зображення з фіксованою роздільною здатністю вибраної смуги захоплення вздовж траси польоту носія у поточному часі або після обробки сирих радіограм в центрі прийому та обробки інформації. Інші модифікації цього режиму огляду, такі як Spot-light [2], ScanSar [3], Tops [4], ITOPS [5], Wide Swath [6], також дозволяють отримувати або суцільну смугу огляду вздовж траси польоту з різними роздільними можливостями або переривчасті ділянки вздовж траси польоту з високою роздільною здатністю з можливістю заповнення прогалів за наступним проходом. Всі зазначені методи отримують зображення в процесі руху по траєкторії польоту літального апарату і можуть бути названі динамічними методами синтезування апертури. У той же час існують завдання, в яких необхідно отримати радіолокаційне зображення обраної статичної сцени при

багатопрохідному або багатопоглядовому огляді. Такі завдання актуальні в когерентній оптиці при медичних дослідженнях [7], радіолокаційному підповерхневому баченні при контролі речей, що переносяться, під одягом на митниці і при вході в закриті установи [8, 9], у неруйнівному радіолокаційному контролі при дослідженні об'єктів у транспортних контейнерах з радіопрозорого матеріалу [10, 11] тощо.

Для вирішення завдань відновлення зображень статичної сцени пропонується розвинути метод статичного синтезу апертури, який передбачає багатопрохідний режим огляду обраної області або багатопозиційний прийом із запам'ятовуванням комплексних амплітуд розсіяних сигналів і подальшою обробкою в цифровому процесорі. Передбачається, що цей метод за рахунок когерентної обробки та особливої геометрії розташування радіоприймачів дозволить отримувати високоточні радіозображення.

1. Поняття когерентного зображення у радарях з синтезованою апертурою антени

Для обґрунтування методу статичного синтезу апертури необхідно розглянути та визначити структуру когерентного зображення у бортових радарях. Для цього розділимо процес формування когерентного радіолокаційного зображення на три етапи: реєстрація розсіяного поля в області спостереження, первинна обробка та вторинна обробка зареєстрованих сигналів.

Для опису поля в області його реєстрації застосовують різні методи строгих математичних розрахунків хвильових рівнянь електродинаміки, формули Кірхгофа, Релея-Зоммерфельда, Стреттона-Чу та інші. Описати точними електродинамічними моделями можливо лише деякі ідеалізовані поверхні: плоскі поверхні, шаруваті поверхні з плоским розділом середовищ, дрібно-шорсткі поверхні, великошорсткі поверхні і їх комбінація в дуже обмежених умовах. Застосувати строгі математичні описи природних поверхонь (рілля, лісові масиви, міська забудова тощо) практично неможливо. Тому в багатьох випадках доводиться йти шляхом їхнього феноменологічного опису.

Порівнюючи між собою результати теорії дифракції [12, 13], теорії Релея-Зоммерфельда [14, 15], принципу Гюйгенса-Френеля [16, 17] та векторні формули Стреттона-Чу [18] можна відзначити, що всі розрахунки поля в області реєстрації зводяться до наступного виду:

$$\dot{E}(\vec{r}') = \int_D \dot{E}_{\text{пад}}(\vec{r}_D) \dot{F}(\vec{r}_D) \frac{\exp(jkR)}{R} d\vec{r}_D, \quad (1)$$

де $\dot{F}(\vec{r}_D)$ – коефіцієнт розсіювання або когерентне зображення поверхні, $\dot{E}_{\text{пад}}(\vec{r}_D)$ – комплексна амплітуда падаючого поля, $\frac{\exp(jkR)}{R}$ – сферична хвиля, створена точковим джерелом на умовній області поверхні D .

Формула (1) є основою феноменологічного опису поля в точці, що спостерігається з координатами \vec{r}' . Таким чином, феноменологічний метод ґрунтується на застосуванні найпростішого закону – принципу Гюйгенса-Френеля.

Просторово-часовий процес при радіолокаційному спостереженні має такий вигляд:

$$\dot{e}(t, \vec{r}') = E(\vec{r}') e^{j\omega t} \quad (2)$$

де

$$\dot{E}(\vec{r}') = \int_D \dot{F}(\vec{r}) \frac{\exp[-jkR(\vec{r}, \vec{r}')]]}{R(\vec{r}, \vec{r}')} d\vec{r} \quad (3)$$

– комплексна амплітуда поля в області спостереження $\vec{r}' \in D'$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число, координати \vec{r}_D точок поверхні D надалі позначені для простоти символом \vec{r} , $R(\vec{r}, \vec{r}')$ – відстань від точки \vec{r} до точки \vec{r}' , c – швидкість поширення хвиль.

Первинна обробка зареєстрованих сигналів та формування первинної оцінки $\hat{F}(\vec{r})$ когерентного зображення $\dot{F}(\vec{r})$ полягає у фокусуванні оптичної або антеної системи на кожну точку поверхні $\vec{r}_i \in D$. Математично ця операція виконується наступним шляхом

$$\begin{aligned} \dot{E}_A(\vec{r}_i) &= \hat{F}(\vec{r}) = \\ &= \int_{D'} \dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_i) \int_D \dot{F}(\vec{r}) \frac{\exp[-jkR(\vec{r}, \vec{r}')]]}{R(\vec{r}, \vec{r}')} d\vec{r} d\vec{r}'. \end{aligned} \quad (4)$$

В результаті математичних перетворень (4), первинне зображення запишемо так

$$\hat{F}(\vec{r}_1) = \int_D \dot{F}(\vec{r}) e^{j\phi(\vec{r}_1, \vec{r})} \Psi(\vec{r}_1, \vec{r}) d\vec{r}, \quad (5)$$

де $\Psi(\vec{r}_1, \vec{r})$ – первинна апаратна функція, ширина якої визначає роздільну здатність первинного відновлення функції $\dot{F}(\vec{r}_1)$. Функцію $e^{j\phi(\vec{r}_1, \vec{r})}$ називатимемо вторинною базисною функцією. Її застосування в комплексно-спряженій формі дозволяє суттєво підвищити роздільну здатність систем синтезування апертури.

Вторинна обробка з урахуванням базисної функції $e^{j\phi(\vec{r}_1, \vec{r})}$ дасть синтезоване зображення

$$\hat{F}_{\text{syn}}(\vec{r}_2) = \int_D \dot{F}(\vec{r}) e^{j\phi_{\text{syn}}(\vec{r}_2, \vec{r})} \Psi_{\text{syn}}(\vec{r}_2, \vec{r}) d\vec{r} \quad (6)$$

що має вищу роздільну здатність, тобто вужчу вторинну апаратну функцію $\Psi_{\text{syn}}(\vec{r}_2, \vec{r})$.

2. Математичне обґрунтування методу

Для обґрунтування методу статичного синтезу апертури розглянемо геометрію на рис. 1.

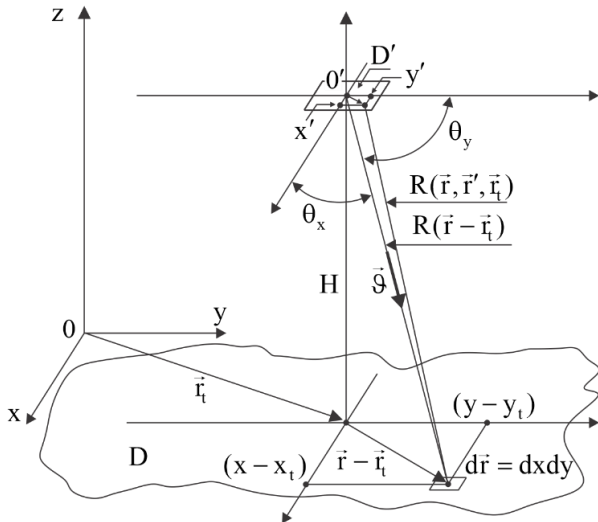


Рис. 1. Геометрія розташування областей визначення когерентного зображення та області реєстрації відображеного поля

У наведеній геометрії передбачається, що $X', Y' \ll H$, а розмір області D може бути довільним. Довільними можуть бути відповідно і кутові напрями первинних апаратних функцій на деякі елементи поверхні D . В області спостереження враховуються лише лінійні члени зміни відстані

$R(\vec{r}, \vec{r}', \vec{r}_1)$, що містять координати \vec{r}' (наближення Фраунгофера). В області визначення зображення D враховуються лінійні та квадратичні члени зміни відстані по змінній \vec{r} (наближення Френеля).

З урахуванням введених припущень відстань

$$\begin{aligned} R(\vec{r}, \vec{r}', \vec{r}_1) &= R(x, x', x_t, y, y', y_t) = \\ &= \sqrt{H^2 + (x - x_t - x')^2 + (y - y_t - y')^2} \approx \\ &\approx R(\vec{r} - \vec{r}_1) - \frac{(x - x_t)x' + (y - y_t)y'}{R(x - x_t, y - y_t)}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{де } R(\vec{r} - \vec{r}_1) = \sqrt{H^2 + |\vec{r} - \vec{r}_1|^2}.$$

Розсіяне поверхнею D поле має такий вигляд

$$\begin{aligned} \dot{E}(\vec{r}') &= \iint_{XY} \dot{F}_1(x, y, x_t, y_t) \times \\ &\times e^{-jk \left\{ R(x_1 - x_t, y_1 - y_t) - \frac{(x - x_t)x' + (y - y_t)y'}{R(x - x_t, y - y_t)} \right\}} dx dy, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{де } \dot{F}_1(x, y, x_t, y_t) = \frac{\dot{F}(x, y)}{R(x_1 - x_t, y_1 - y_t)}.$$

Для відновлення зображення поверхні $\dot{F}_1(x, y, x_t, y_t)$ необхідно в області реєстрації поля створити наступний амплітудний та фазовий розподіл

$$\begin{aligned} \dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_1, \vec{r}_1) &= e^{jk[R(x_1 - x_t, y_1 - y_t)]} \times \\ &\times e^{jk \left[\frac{(x_1 - x_t)x' + (y_1 - y_t)y'}{R(x_1 - x_t, y_1 - y_t)} \right]}. \end{aligned} \quad (9)$$

Оцінка когерентного зображення поверхні e наступним виразом

$$\begin{aligned} \hat{F}(\vec{r}_1, \vec{r}_1) &= \int_{D'} \dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_1, \vec{r}_1) \dot{E}(\vec{r}') d\vec{r}' = \\ &= \int_D \dot{F}_1(\vec{r}, \vec{r}_1) \int_{D'} \dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_1, \vec{r}_1) \dot{I}^*(\vec{r}', \vec{r}, \vec{r}_1) d\vec{r}' d\vec{r} = \\ &= \int_D \dot{F}_1(\vec{r}, \vec{r}_1) \phi(\vec{r}_1, \vec{r}, \vec{r}_1) \Psi(\vec{r}_1, \vec{r}, \vec{r}_1) d\vec{r}, \end{aligned} \quad (10)$$

де

$$\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}, \vec{r}_1) = \int_D e^{-jk \left[\frac{(\vec{r}_1 - \vec{r}_1)\vec{r}'}{R(\vec{r}_1 - \vec{r}_1)} \right]} e^{jk \left[\frac{(\vec{r} - \vec{r}_1)\vec{r}'}{R(\vec{r} - \vec{r}_1)} \right]} d\vec{r}' \quad (11)$$

– первинна апаратна функція, що визначає роздільну здатність системи відновлення первинного когерентного зображення,

$$\phi(\vec{r}_1, \vec{r}, \vec{r}_t) = \exp\{-jk\Delta R(\vec{r}, \vec{r}_1, \vec{r}_t)\} \quad (12)$$

– вторинна базисна функція $\Delta R(\vec{r}, \vec{r}_1, \vec{r}_t) = R(\vec{r} - \vec{r}_t) - R(\vec{r}_1 - \vec{r}_t)$.

Після низки перетворень первинна апаратна функція для прямокутної області ресстрації набуде вигляду

$$\begin{aligned} \hat{\Psi}(\vec{r}_1, \vec{r}, \vec{r}_t) &\approx \Psi(\vec{r} - \vec{r}_1) = \\ &= X'Y' \operatorname{sinc} \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{\sin^2 \theta_{x1}}{R(x_1 - x_t)} (x - x_1) \right] X' \right\} \times \\ &\times \operatorname{sinc} \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{1}{R(x_1 - x_t)} (y - y_1) \right] Y' \right\}. \quad (13) \end{aligned}$$

Вторинну базисну функцію можна записати в такому вигляді

$$\phi(\vec{r}_1, \vec{r}, \vec{r}_t) = e^{-jk \left[\frac{(\vec{r} - \vec{r}_1)\vec{r}_\Delta}{R(\vec{r} - \vec{r}_t)} + \frac{|\vec{r} - \vec{r}_1|^2}{2R(\vec{r} - \vec{r}_t)} - \frac{[(\vec{r} - \vec{r}_1)\vec{r}_\Delta]^2}{2R^3(\vec{r} - \vec{r}_t)} \right]} \quad (14)$$

де $\vec{r}_\Delta = (x_\Delta, y_\Delta)$, $x_\Delta = x_1 - x_t$, $y_\Delta = y_1 - y_t$.

Комплексна експонента з такими показниками є базовою функцією Фур'є-Френеля, що містить як лінійні й квадратичні члени. Лінійні доданки в показнику експоненти (14) відповідають базисній функції перетворень Фур'є, квадратичні – Френеля.

Оцінка $\hat{F}(\vec{r}_1, \vec{r}_t)$ зображення $\hat{F}(\vec{r})$ залежить від двох змінних \vec{r}_1, \vec{r}_t . У підінтегральному виразі (10) змінна \vec{r} є змінною інтегрування. Змінна \vec{r}_1 характеризує положення первинної апаратної функції, а змінна \vec{r}_t характеризує положення системи формування променів у цілому. Для розвитку методу статичного синтезу апертури зафіксуємо змінну \vec{r}_1 на обраній статичній ділянці з центром у координаті \vec{r}_{10} , тобто $\hat{\Psi}(\vec{r} - \vec{r}_1) = \hat{\Psi}(\vec{r} - \vec{r}_{10})$. Вираз (10) переписемо так

$$\begin{aligned} \hat{F}(\vec{r}_1 = \vec{r}_{10}, \vec{r}_t) &= \\ &= \int_D \hat{F}_R(\vec{r}) \hat{\Psi}(\vec{r} - \vec{r}_{10}) \phi(\vec{r}_1 = \vec{r}_{10}, \vec{r}, \vec{r}_t) d\vec{r}, \quad (15) \end{aligned}$$

де $\hat{F}_R(\vec{r}) = \hat{F}_1(\vec{r}, \vec{r}_t)$ – когерентне зображення спотво-

рене коефіцієнтом $R(\vec{r} - \vec{r}_t)$.

Перенесемо початок системи координат (x, y, z) у точку \vec{r}_{10} , тобто у центр досліджуваної ділянки поверхні, що знаходиться у межах функції $\hat{\Psi}(\vec{r} - \vec{r}_{10})$. У цьому випадку у формулі (15) необхідно покласти що $\vec{r}_{10} = 0$, $\vec{r}_\Delta = \vec{r}_{10} - \vec{r}_t = -\vec{r}_t = (-x_t, -y_t)$. Тоді

$$\begin{aligned} \hat{F}(\vec{r}_t) &= \hat{F}(\vec{r}_{10} = 0, \vec{r}_t) = \\ &= \int_D \hat{F}_R(\vec{r}) \hat{\Psi}(\vec{r}) \phi(\vec{r}, \vec{r}_t) d\vec{r}, \quad (16) \end{aligned}$$

де

$$\phi(\vec{r}, \vec{r}_t) = e^{-jk \left[\frac{\vec{r}\vec{r}_t}{R(\vec{r} - \vec{r}_t)} + \frac{|\vec{r}|^2}{2R(\vec{r} - \vec{r}_t)} - \frac{(\vec{r}\vec{r}_t)^2}{2R^3(\vec{r} - \vec{r}_t)} \right]}. \quad (17)$$

Синтезоване зображення знаходимо шляхом множення первинної оцінки $\hat{F}(\vec{r}_t)$ на опорну функцію $\hat{\Psi}^*(\vec{r}_2) \phi^*(\vec{r}_2, \vec{r}_t)$ та інтегрування за змінною \vec{r}

$$\hat{F}_{\text{syn}}(\vec{r}_2) = \int_D \hat{F}_R(\vec{r}) |\hat{\Psi}(\vec{r})|^2 \phi_{\text{syn}}(\vec{r}, \vec{r}_2) d\vec{r}, \quad (18)$$

де

$$\begin{aligned} \phi_{\text{syn}}(\vec{r}, \vec{r}_2) &= \int_D \phi(\vec{r}, \vec{r}_t) \phi^*(\vec{r}_2, \vec{r}_t) d\vec{r}_t = \\ &= \int_{D_t} e^{jk \left[\frac{(\vec{r} - \vec{r}_t)\Delta\vec{r}}{R(\vec{r} - \vec{r}_t)} - \frac{(\vec{r}_t)(\Delta\vec{r}_t)}{R^3(\vec{r} - \vec{r}_t)} + \frac{|\Delta\vec{r}|^2}{2R(\vec{r} - \vec{r}_t)} - \frac{(\Delta\vec{r}_t)^2}{2R^3(\vec{r} - \vec{r}_t)} \right]} d\vec{r}_t \quad (19) \end{aligned}$$

– вторинна апаратна функція, що значно вужче $\hat{\Psi}(\vec{r} - \vec{r}_1)$.

З отриманих виразів випливає, що для отримання високоточних радіолокаційних зображень поверхні при статичному синтезі апертури необхідно на первинному етапі сформуванню в області ресстрації поля амплітудний та фазовий розподіл згідно виразу (9). Після первинної обробки комплексні сигнали в приймачі піддаються вторинній обробці перетвореннями з оператором $\hat{\Psi}^*(\vec{r}_2) \phi^*(\vec{r}_2, \vec{r}_t)$, де $\hat{\Psi}^*(\vec{r}_2)$ є деяким просторовим вікном, а $\phi^*(\vec{r}_2, \vec{r}_t)$ – базисними функціями перетворення Фур'є-Френеля

являють собою некогерентні зображення з високою роздільною здатністю, що визначаються відповідними добутками апаратних функцій. Інтенсивності (середні потужності) сумарного та різницевого когерентних зображень можна уявити у такому вигляді

$$\begin{aligned} & \langle |\hat{F}_{\text{syn}\pm}(x_2, y_2)|^2 \rangle = \langle |\hat{F}_{\text{syn}1}(x_2, y_2) \pm \\ & \quad \pm \hat{F}_{\text{syn}2}(x_2, y_2)|^2 \rangle = \\ & = \langle |\hat{F}_{\text{syn}1}(x_2, y_2)|^2 \rangle + \langle |\hat{F}_{\text{syn}2}(x_2, y_2)|^2 \rangle \pm \\ & \quad \pm 2 \operatorname{Re} \langle \hat{F}_{\text{syn}1}(x_2, y_2) \hat{F}_{\text{syn}2}^*(x_2, y_2) \rangle, \end{aligned} \quad (25)$$

де $\langle \cdot \rangle$ – символ статистичного усереднення.

При відніманні сумарного та різницевого зображень одне з одного залишиться некогерентне

зображення $\operatorname{Re} \langle \hat{F}_{\text{syn}1}(x_2, y_2) \hat{F}_{\text{syn}2}^*(x_2, y_2) \rangle$, що відповідає перехресним членам. Це зображення має високу роздільну здатність, так як в ньому апаратні функції входять у вигляді добутку $\hat{\phi}_{\text{syn}1}(x, y, x_2, y_2)$ і $\hat{\phi}_{\text{syn}2}(x, y, x_2, y_2)$, яке є вузьким по обох координатах

$$\begin{aligned} \hat{F}_{\text{syn}\otimes}(x_2, y_2, x_{10}) = & \operatorname{Re} \int_{D_x} \int_{D_y} \sigma_F^0(x, y) |\hat{\Psi}(x, y)|^4 \times \\ & \times \hat{\phi}_{\text{syn}\otimes}(x, y, x_2, y_2) dx dy, \end{aligned} \quad (26)$$

де $\sigma_F^0(x, y)$ – ефективний переріз розсіювання, яке тут слід розглядати як ідеальне некогерентне (не згладжене апаратною функцією) зображення обраної ділянки поверхні,

$$\begin{aligned} R_F(x, y, x_3, y_3) = & \langle \hat{F}_2(x, y) \hat{F}_2^*(x_3, y_3) \rangle = \\ & = \sigma_F^0(x, y) \delta(x - x_3) \delta(y - y_3), \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_{\text{syn}\otimes}(x, y, x_2, y_2) = & \hat{\phi}_{\text{syn}1}(x, y, x_2, y_2) \times \\ & \times \hat{\phi}_{\text{syn}2}^*(x, y, x_2, y_2) \end{aligned}$$

– апаратна функція, вузька по обох координатах.

Некогерентне зображення (26) можна також отримати безпосереднім перемноженням когерент-

них зображень $\hat{F}_{\text{syn}1}(x_2, y_2)$ і $\hat{F}_{\text{syn}2}^*(x_2, y_2)$ та подальшим їх усередненням.

Висновки

Запропоновано новий метод синтезування аперттури в задачах дистанційного зондування та неруйнівного контролю. Даний метод передбачає формування радіолокаційного зображення обраної статичної сцени при багатопрохідному режимі огляду або багатопозиційному розташуванню радіоприймачів. Розглянуто траєкторію руху або розташування приймачів у вигляді хреста як конкретну реалізацію методу.

З аналізу отриманих результатів показана можливість формувати радіозображення розрідженими антенними решітками. Структуру самого зображення при хрестоподібному огляді є ефективним перетином розсіювання досліджуваної поверхні. Ці результати схожі з пасивними системами апертурного синтезу, такими як VLA, ALMA, Ryle Telescope, Allen Telescope Array та ін.

У подальших дослідженнях має сенс дослідити методи синтезу аперттури при русі по кругових, Г-, Т- та Y-подібних траєкторіях виходячи із подібності до вищенаведених пасивних систем.

Література

1. *Generation of Airborne Synthetic Aperture Radar Video from Stripmap and Spot mode images and Frame Rate Analysis [Text] / S. Manikandan, C. Nigam, S. Ramakrishnan, D. Seshagiri // 2020 IEEE India Geoscience and Remote Sensing Symposium (InGARSS), 01-04 December 2020. – Ahmedabad, 2020. – P. 142-145. DOI: 10.1109/InGARSS48198.2020.9358941.*
2. *Concurrent Imaging for TerraSAR-X: Wide-Area Imaging Paired With High-Resolution Capabilities [Text] / T. Kraus, J. P. T. Ribeiro, M. Bachmann, U. Steinbrecher, C. Grigorov // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2020. – Vol. 60. – P. 1-14. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3140290.*
3. *Phase Imbalance Estimation for Azimuth Multi-Channel ScanSAR System [Text] / J. Yang, X. Qiu, M. Shang, L. Zhong, C. Ding // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2021. – Vol. 14. – P. 3875-3886. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3069864.*
4. *A Partitioned Deceptive Jamming Method Against TOPSAR [Text] / T. Tian, F. Zhou, X. Bai, Z. Zhang, B. Zhao, W. Fan // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2020. – Vol. 56, No. 2. – P. 1538-1552. DOI: 10.1109/TAES.2019.2933958.*
5. *TerraSAR-X TOPSAR and ScanSAR comparison [Text] / A. Meta, P. Prats, U. Steinbrecher, J. Mittermayer, R. Scheiber // 7th European Conference on*

Synthetic Aperture Radar, 02-05 June 2008. – Friedrichshafen, 2008. – P. 1-4.

6. *Signal Modeling and Analysis for Elevation Frequency Scanning HRWS SAR [Text]* / L. Nan, G. Gai, T. Shiyang, Z. Linrang // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 58, No. 9. – P. 6434-6450. DOI: 10.1109/TGRS.2020.2976864.

7. *Monemian, M. A. New Texture-Based Segmentation Method for Optical Coherence Tomography Images [Text]* / M. Monemian, H. Rabbani // *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 23-27 July 2019*. – Berlin, 2019. – P. 4750-4753. DOI: 10.1109/EMBC.2019.8856610.

8. *THz Imaging Radar for Standoff Personnel Screening [Text]* / K. B. Cooper, R. J. Dengler, N. Llobart, B. Thomas, G. Chattopadhyay, P. H. Siegel // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 169-182. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159556.

9. *Optimization of a compact THz imaging radar for real-time operation [Text]* / F. Garcia-Rial et al. // *2016 Global Symposium on Millimeter Waves (GSMW) & ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications, 06-08 June 2016*. – Espoo, 2016. – P. 1-4. DOI: 10.1109/GSMW.2016.7500299.

10. *Daniels, D. J. Radar for non-destructive testing of materials [Text]* / D. J. Daniels // *IEE Colloquium on Measurements, Modelling and Imaging for Non-Destructive Testing, 27 March 1991*. – London, 1991. – P. 9/1-9/3.

11. *Non-Destructive Testing of the Rails Rolling Surface and Joints with Synthetic Aperture Radar [Text]* / M. Chizh, A. Zhuravlev, V. Razevig, S. Ivashov // *2020 21st International Radar Symposium (IRS), 05-08 October 2020*. – Warsaw, 2020. – P. 112-116. DOI: 10.23919/IRS48640.2020.9253797.

12. Гудмен, Дж. Введение в Фурье-оптику [Текст] : пер. с англ. / Дж. Гудмен. – М. : Мир, 1970. – 363 с.

13. Борн, М. Основы оптики [Текст] : пер. с англ. / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1973. – 721 с.

14. Зоммерфельд, А. Оптика [Текст] : пер. с нем. / А. Зоммерфельд. – М. : Издательство иностранной литературы, 1953. – 486 с.

15. Зубкович, С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности [Текст] / С. Г. Зубкович. – М. : Советское радио, 1968. – 224 с.

16. Рытов, С. М. Введение в статистическую радиофизику [Текст] / С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский ; под общ. ред. С. М. Рытова. – М. : Наука, 1978. – 463 с.

17. Волосяк, В. К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зонди-

рования и радиолокации [Текст] / В. К. Волосяк, В. Ф. Кравченко ; под ред. В. Ф. Кравченко. – М. : Физматлит, 2008. – 704 с.

18. Фрадин, А. З. Антенны сверхвысоких частот [Текст] / А. З. Фрадин. – М. : Советское радио, 1957. – 652 с.

References

1. Manikandan, S., Nigam, C., Ramakrishnan, S., Seshagiri, D. Generation of Airborne Synthetic Aperture Radar Video from Stripmap and Spot mode images and Frame Rate Analysis. *2020 IEEE India Geoscience and Remote Sensing Symposium (InGARSS)*. Ahmedabad, 2020, pp. 142-145. DOI: 10.1109/InGARSS48198.2020.9358941.

2. Kraus, T., Ribeiro, J. P. T., Bachmann, M., Steinbrecher, U., Grigorov, C. Concurrent Imaging for TerraSAR-X: Wide-Area Imaging Paired With High-Resolution Capabilities. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, vol. 60, pp. 1-14. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3140290.

3. Yang, J., Qiu, X., Shang, M., Zhong, L., Ding, C. Phase Imbalance Estimation for Azimuth Multi-Channel ScanSAR System. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, vol. 14, pp. 3875-3886. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3069864.

4. Tian, T., Zhou, F., Bai, X., Zhang, Z., Zhao, B., Fan, W. A Partitioned Deceptive Jamming Method Against TOPSAR. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 1538-1552. DOI: 10.1109/TAES.2019.2933958.

5. Meta, A., Prats, P., Steinbrecher, U., Mittermayer, J., Scheiber, R. TerraSAR-X TOPSAR and ScanSAR comparison. *7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, 2008*, pp. 1-4.

6. Nan, L., Gai, G., Shiyang, T., Linrang, Z. Signal Modeling and Analysis for Elevation Frequency Scanning HRWS SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, vol. 58, no. 9, pp. 6434-6450. DOI: 10.1109/TGRS.2020.2976864.

7. Monemian, M., Rabbani, H. A New Texture-Based Segmentation Method for Optical Coherence Tomography Images. *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. Berlin, 2019, pp. 4750-4753, DOI: 10.1109/EMBC.2019.8856610.

8. Cooper, K. B., Dengler, R. J., Llobart, N., Thomas, B., Chattopadhyay, G., Siegel, P. H. THz Imaging Radar for Standoff Personnel Screening. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 169-182. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159556.

9. García-Rial, F., Úbeda-Medina, L., Grajal, J., Badolato, A., Rubio-Cidre, G., García-Pino, A., González-Valdes, B., Rubiños, O. Optimization of a compact THz imaging radar for real-time operation. *2016 Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM) & ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications*. Espoo, 2016, pp. 1-4, DOI: 10.1109/GSMM.2016.7500299.
10. Daniels, D. J. Radar for non destructive testing of materials. *IEE Colloquium on Measurements, Modeling and Imaging for Non-Destructive Testing*. London, 1991, pp. 9/1-9/3.
11. Chizh, M., Zhuravlev, A., Razevig, V., Ivashov, S. Non-Destructive Testing of the Rails Rolling Surface and Joints with Synthetic Aperture Radar. *2020 21st International Radar Symposium (IRS)*. Warsaw, 2020, pp. 112-116. DOI: 10.23919/IRS48640.2020.9253797.
12. Goodman, J. W. *Introduction to Fourier optics*. McGraw-Hill Book Company, 1968. 287 p. (Russ. ed.: Gudmen, Dzh. *Vvedenie v Fur'e-optiku*. Moscow, Mir Publ., 1970. 363 p.).
13. Born, M., Wolf, E. *Principles of Optics*. Pergamon Press, 1968. (Russ. ed.: Born, M., Vol'f, E. *Osnovy optiki*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 721 p.).
14. Sommerfeld, A. *Vorlesungen über Theoretische Physik, Band IV: Optik*. Wiesbaden, 1950. 389 p. (Russ. ed.: Zommerfel'd, A. *Optika*. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoi literatury Publ., 1953. 486 p.).
15. Zubkovich, S. G. *Statisticheskie kharakteristiki radiosignalov, otrazhennykh ot zemnoi poverkhnosti* [Statistical characteristics of radio signals reflected from the earth's surface]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1968. 224 p.
16. Rytov, S. M., Kravtsov, Yu. A., Tatarskii, V. I. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku* [Introduction to statistical radiophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 463 p.
17. Volosyuk, V. K., Kravchenko, V. F. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya i radiolokatsii* [Statistical theory of radio-engineering systems of remote sensing and radar]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 704 p.
18. Fradin, A. Z. *Antenny sverkhvysokikh chastot* [Ultrahigh frequency antennas]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1957. 652 p.

Надійшла до редакції 4.01.2022, розглянута на редколегії 16.05.2022

METHOD OF STATIC SYNTHESIS OF APERTURE IN TASKS OF REMOTE SENSING AND NON-DESTRUCTIVE TESTING

Simeon Zhyla, Denys Kolesnikov

The subject matter of the article is the method of synthesis of aperture for solving problems related to the restoration of images of a static scene. The goal is to develop a new method and substantiate its operability in one of the possible surface survey modes for remote sensing or non-destructive testing of objects. The tasks to be solved include substantiation of the method of static synthesis of aperture; to proposing a new method of view and opportunities to improve the accuracy of restoring the scene under study. The methods used are all the underlying assumptions and new definitions were obtained within the theory of diffraction, the Kirchhoff and Rayleigh-Sommerfeld theorems, and the Huygens-Fresnel principle. The following results were obtained. Using a phenomenological approach, the concept of a coherent image of a surface is defined, which is divided into three components: the scattered field in the observation area, primary and secondary processing of the scattered field. The main operations of restoring primary coherent images, the operations of focusing the antenna system on each point of the surface under study, and the possibility of increasing their spatial resolution in synthetic aperture radars are shown. The spread and basis functions are defined, which determine the resolution of the restoration of coherent images. The structure of the coherent image in the static synthesis of the aperture in the Fraunhofer zone is determined. The telescopic mode was chosen as the surface survey mode, assuming that the area is surveyed crosswise in two mutually perpendicular directions (multi-pass or multi-look modes). The resolution of the method of static synthesis of the aperture is studied when the surface is viewed along a trajectory in the form of a cross. For such a view, the primary and secondary synthesized images do not have the required resolution. It is proposed to solve this problem by finding cross terms with spread functions narrow in both coordinates, by forming signals proportional to the intensities of the total and difference coherent images and performing mathematical operations on them. Conclusions. The possibility of image formation by sparse antenna arrays is shown. Because of the study, it was proved that with a cross-shaped view, the image structure is the scattering cross-section of the surface under study.

Keywords: statistical synthesis of aperture; remote sensing; mathematical method formalization; block diagram.

МЕТОД СТАТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА АПЕРТУРЫ В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

С. С. Жила, Д. В. Колесников

Предметом изучения в статье является метод синтеза апертуры для решения задач, связанных с восстановлением изображений статической сцены. **Целью** исследования является разработка нового метода и обоснование его работоспособности на одном из возможных режимов обзора поверхности при дистанционном зондировании или неразрушающем контроле объектов. **Задачи:** обоснование метода статического синтеза апертуры; предложить новый метод обзора и возможностей повышения точности восстановления исследуемой сцены. Используемые **методы:** все заложенные предположения и новые определения получены в рамках теории дифракции, теорем Кирхгофа и Релея-Зоммерфельда и принципа Гюйгенса-Френеля. Получены следующие **результаты.** Используя феноменологический подход, определено понятие когерентного изображения поверхности, делящейся на три составляющие: рассеянное поле в области наблюдения, первичная и вторичная обработки рассеянного поля. Показаны основные операции восстановления первичных когерентных изображений, операции фокусировки антенной системы на каждую точку исследуемой поверхности и возможности повышения их пространственного разрешения в радарх с синтезированием апертуры антенны. Определены аппаратная и базисная функции, определяющие разрешающую способность восстановления когерентных изображений. Определена структура когерентного изображения при статическом синтезе апертуры в зоне Фраунгофера. В качестве режима обзора поверхности был выбран телескопический режим в предположении, что обзор участка осуществляется крестообразным образом в двух взаимно-перпендикулярных направлениях (многопроходный или многообзорный режимы). Исследована разрешающая способность метода статического синтеза апертуры при обзоре поверхности по траектории в виде креста. Отмечено, что для такого обзора первичное и вторичное синтезированные изображения не имеют необходимого разрешения. Предложено решить эту проблему через нахождение перекрестных членов с узкими по обеим координатам аппаратными функциями, через формирование и проведение математических операций с сигналами, пропорциональными интенсивностям суммарного и разностного когерентных изображений. **Выводы.** Показана возможность формирования изображения разреженными антенными решетками. В результате исследования доказано, что при крестообразном обзоре структура изображения является эффективным сечением рассеяния поверхности исследования.

Ключевые слова: статистический синтез апертуры; дистанционное зондирование; формализация математического метода; структурная схема.

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

Колесніков Денис Вікторович – асист. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Simeon Zhyla – DSc in Radioengineering, Professor, Head of Department of Aerospace Radio-electronic Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.zhyla@khai.edu, ORCID: 0000-0003-2989-8988.

Denys Kolesnikov – Assistant of Department of Aerospace Radio-electronic Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: d.kolesnikov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-0135-2695.