

В.К. Волосюк, С.С. Жила, Н.А. Крипак

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
"Харьковский авиационный институт", Харьков

СИНТЕЗ КОГЕРЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ И МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Рассмотрены основные математические операции восстановления первичных и синтезированных когерентных изображений в зоне Френеля из электромагнитных полей, принятых многоканальными оптическими или радиотехническими системами. Выполнен анализ разрешающей способности первичных когерентных изображений и показаны возможные пути его повышения, основанные на вторичной многоканальной и многопозиционной обработке сигналов и методе синтеза апертуры. Показаны основные операции восстановления синтезированных изображений и проанализирована их разрешающая способность в случае веерного, однолучевого и прожекторного обзоров исследуемой поверхности.

Ключевые слова синтезированное изображение, ближняя зона Френеля, многопозиционная обработка.

Введение

Значительный класс современных систем радиолокации [1] и медицины требует построения изображений. Точность решения задач в этих системах определяется качеством формируемых изображений, которые можно условно разделить на когерентные и некогерентные. Некогерентные изображения показывают распределение суммарной интенсивности электромагнитных полей, а когерентные содержат информацию об амплитудах и фазах отраженных волн. Обычно последние обладают более высокой информативностью и возможностью дальнейшего повышения разрешающей способности в когерентных системах с синтезированной апертурой [2–5]. Первичная обработка сигналов в таких системах в большинстве случаев выполняется в дальней зоне Фраунгофера, что обусловлено простотой алгоритмов фокусировки области наблюдения. В то же время стремительно развиваются системы ближней радиолокации [6] и медицинские системы [7], работающие в непосредственной близости к объекту исследования. Анализ принятых электромагнитных полей в ближней зоне Френеля и разработка алгоритмов восстановления когерентных изображений в таких системах позволят повысить точность их работы.

Необходимо отметить, что последние достижения отечественных [8–10] и иностранных [11–12] ученых в большей мере доказывают практическую возможность создания многоканальных и многопозиционных систем формирования синтезированных когерентных изображений в зоне Френеля. Гораздо меньше внимания в этих работах уделено теоретическому анализу принятых полей, точности обра-

ботки и возможным дальнейшим направлениям развития таких систем.

Цель статьи – повышение разрешающей способности когерентных радиолокационных изображений в ближней зоне Френеля на основе многоканальной и многопозиционной обработки сигналов. Для достижения поставленной цели целесообразно решить следующие **задачи**: исследовать структуру поля в зоне Френеля, разработать основные процедуры восстановления первичных изображений, проанализировать возможные пути улучшения качества первичных изображений и разработать методы восстановления синтезированных изображений в случае многоканальной и многопозиционной обработки сигналов.

1. Восстановление первичного когерентного изображения

Для описания первичного когерентного изображения рассмотрим структуру принятого поля и основные операции над ним.

На рис. 1 показана геометрия зондирования поверхности, которая пригодна для описания как оптических, так и радиолокационных изображений. На этом рисунке поверхность D – это поверхность, на которой заданы граничные условия в виде коэффициента рассеяния $\hat{F}(\vec{r})$, D' – это область наблюдения и первичного описания в когерентном виде поля с учетом его амплитудных и фазовых зависимостей. В области D' находится область регистрации поля D'_p , размеры которой определяются размерами приемных поверхностей регистрирующих устройств рассеянных сигналов. В дальнейшем область наблюдения и область регистрации будем считать то-

жественными, указывая только их размеры. Каждая точка области D' характеризуется амплитудно-фазовым распределением приемной чувствительности (АФР), которое показывает способность регистрирующих элементов изменять амплитуду и фазу падающего поля. Коэффициент рассеяния $\hat{F}(\vec{r})$ будем считать идеальным когерентным изображением, которое учитывает в своей амплитудно-фазовой структуре влияние неоднородностей химического состава, градиента показателя преломления, а также неровностей рельефа подстилающей поверхности.

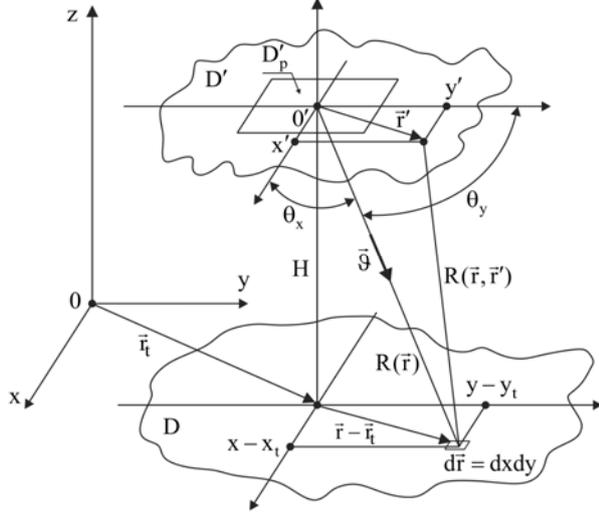


Рис. 1. Геометрия восстановления когерентных изображений поверхностей

В ближней зоне Френеля наблюдаемое поле в каждой точке приемной плоскости представим в следующем виде [1]:

$$\dot{E}(\vec{r}', \vec{r}_t) = \int_{-X/2}^{X/2} \int_{-Y/2}^{Y/2} \hat{F}_1(x, y) \times e^{-jk\{[x-(x_t+x')]^2 + [y-(y_t+y')]^2\}/2H} dx dy, \quad (1)$$

где $\hat{F}_1(x, y) = \hat{F}(x, y)H^{-1} \exp(-jkH)$; H – высота зондирования; (x', y') – координаты приемной плоскости; (x, y) – координаты подстилающей поверхности; (x_t, y_t) – координаты центра фаз области D' ; k – волновое число; X, Y – линейные размеры области регистрации. Двойной интеграл в (1) – это преобразование Френеля функции $\hat{F}_1(x, y)$. Приближенное восстановление $\hat{F}_1(x, y)$ можно выполнить на конечной области D' применяя обратное преобразование Френеля [1]:

$$\begin{aligned} \hat{F}_1(\vec{r}_t, \vec{r}_t) &= \int_{-X'/2}^{X'/2} \int_{-Y'/2}^{Y'/2} \dot{E}(\vec{r}', \vec{r}_t) \times \\ &\times e^{jk\{[x_1-(x_t+x')]^2 + [y_1-(y_t+y')]^2\}/2H} dx' dy' = \\ &= \int_{-X/2}^{X/2} \int_{-Y/2}^{Y/2} \hat{F}_1(x, y) \psi(x, x_1, x_t, y, y_1, y_t) dx dy, \quad (2) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \psi(x, x_1, x_t, y, y_1, y_t) &= \\ &= \int_{-X'/2}^{X'/2} \int_{-Y'/2}^{Y'/2} \exp\left\{-j\frac{k}{2H}([x-(x_t+x')]^2 - [x_1-(x_t+x')]^2 + \right. \\ &\quad \left. + [y-(y_t+y')]^2 - [y_1-(y_t+y')]^2\right\} dx' dy' \quad (3) \end{aligned}$$

– аппаратная функция системы формирования оценки $\hat{F}_1(\vec{r}_t, \vec{r}_t)$.

Из анализа (2) следует, что радиолокационная или оптическая система формирует оценку когерентное изображения $\hat{F}_1(\vec{r}_t, \vec{r}_t)$ в виде свертки истинного изображения $\hat{F}_1(x, y)$ с функцией $\psi(\cdot)$. Эта функция определяет качество формирования когерентного изображения.

2. Анализ качества первичного когерентного изображения и возможные пути его повышения

Для анализа разрешающей способности вычислим двойной интеграл в (3) и перепишем $\psi(\cdot)$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \psi(x, x_1, x_t, y, y_1, y_t) &= \\ &= \phi(x, x_1, x_t, y, y_1, y_t) \Psi(x, x_1, y, y_1) = \\ &= e^{-j\frac{k}{2H}[(x-x_t)^2 - (x_1-x_t)^2 + (y-y_t)^2 - (y_1-y_t)^2]} \times \\ &\times X'Y' \text{sinc}(k(x-x_1)X'/2H) \text{sinc}(k(y-y_1)Y'/2H). \quad (4) \end{aligned}$$

Полученная функция $\psi(\cdot)$ содержит два множителя, при этом разрешающую способность восстановления когерентного изображения $\hat{F}_1(x, y)$ главным образом определяет аппаратная функция $\Psi(x, x_1, y, y_1)$.

Если разрешающую способность формируемого когерентного изображения определять шириной Δx и Δy функции $\Psi(x, x_1, y, y_1)$ на нулевом уровне, тогда

$$\Delta x = \lambda H / X', \quad \Delta y = \lambda H / Y'. \quad (5)$$

Полученная оценка $\hat{F}_1(\vec{r}_t)$ в (2) является результатом фокусировки приемной системы на соответствующие элементы поверхности с координатами \vec{r} . Перепишем (2) с учетом (4):

$$\hat{F}_1(\vec{r}_t, \vec{r}_t) = \int_D \hat{F}_1(\vec{r}) \phi(\vec{r}_t, \vec{r}_t, \vec{r}) \Psi(\vec{r} - \vec{r}_t) d\vec{r}. \quad (6)$$

Вид полученного выражения свидетельствует о том, что после первичной обработки полученные изображения остаются некоторыми спектральными преобразованиями функции $\hat{F}_1(\vec{r})$, так как содержат под знаками интегралов новые базисные экспоненциальные функции $\phi(\vec{r}_t, \vec{r}_t, \vec{r})$. Выполняя обратные преобразования с комплексно-сопряженными базисными функциями

$$\hat{I}_{\text{syn}}(\bar{r}_1, \bar{r}_t, \bar{r}_2) = \hat{\phi}^*(\bar{r}_1, \bar{r}_t, \bar{r}_2) \Psi^*(\bar{r}_2 - \bar{r}_1), \quad (7)$$

можно получить более качественные оценки этих изображений с большим разрешением, которые в дальнейшем будем называть синтезированными или вторичными (как результаты вторичной обработки). Алгоритмические или физические операции таких преобразований будем называть синтезированием апертуры, а полученные новые изображения – синтезированными. Этим операциям будут соответствовать определенные реальные области интегрирования, которые будем называть синтезированными апертурами, а функции $\hat{I}_{\text{syn}}(\bar{r}_1, \bar{r}_t, \bar{r}_2)$ – их АФР. Если аппаратная функция $\Psi(\bar{r} - \bar{r}_1)$ входит в выражение (6) как множитель весовой функции свертки, определяющий разрешающую способность первичного изображения, то максимальные размеры синтезированной апертуры будут определяться шириной этой функции по переменным $\bar{r} = (x, y) \in D$.

Для исследования возможностей получения синтезированных изображений с более высоким разрешением возьмем вначале за основу формулу (2), переписанную в следующем виде:

$$\hat{F}_1(\bar{r}_1, \bar{r}_t) = \int_D \hat{F}_1(\bar{r}) \Psi(\bar{r} - \bar{r}_1) e^{-j \frac{k}{2HL} [|\bar{r} - \bar{r}_1|^2 - |\bar{r}_1 - \bar{r}_t|^2]} dx dy. \quad (8)$$

Получить синтезированное изображение можно путем технической реализации повторного интегрирования этой формулы по переменной \bar{r}_1 , или по переменной \bar{r}_t , после предварительного ее умножения на функцию (7):

$$\begin{aligned} \hat{F}_{\text{syn}}(\bar{r}_2) &= \int_{D_{\eta}} (\text{или } D_{\tau_1}) \hat{F}_1(\bar{r}_1, \bar{r}_t) \hat{\phi}^*(\bar{r}_1, \bar{r}_t, \bar{r}_2) \times \\ &\quad \times \Psi^*(\bar{r}_2 - \bar{r}_1) d\bar{r}_1 (\text{или } d\bar{r}_t) = \\ &= \int_D \hat{F}_1(\bar{r}) \int_{D_{\eta}} (\text{или } D_{\tau_1}) \hat{\phi}(\bar{r}_1, \bar{r}_t, \bar{r}) \Psi(\bar{r} - \bar{r}_1) \times \\ &\quad \times \hat{\phi}^*(\bar{r}_1, \bar{r}_t, \bar{r}_2) \Psi^*(\bar{r}_2 - \bar{r}_1) d\bar{r}_1 (\text{или } d\bar{r}_t) d\bar{r} = \\ &= \int_D \hat{F}_1(\bar{r}) \hat{\psi}_{\text{syn}}(\bar{r}, \bar{r}_2) d\bar{r}, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\hat{\psi}_{\text{syn}}(\bar{r}, \bar{r}_2) = \int_{D_{\eta}} (\text{или } D_{\tau_1}) \hat{\phi}(\bar{r}_1, \bar{r}_t, \bar{r}) \hat{\phi}^*(\bar{r}_1, \bar{r}_t, \bar{r}_2) \times \Psi(\bar{r} - \bar{r}_1) \Psi^*(\bar{r}_2 - \bar{r}_1) d\bar{r}_1 (\text{или } d\bar{r}_t) \quad (10)$$

– аппаратная функция системы с синтезом апертуры. Часто ее также называют функцией неопределенности или диаграммой направленности синтезированной апертуры.

Выбор переменной интегрирования в формулах (9) и (10) зависит от выбора вида обзора исследуемой поверхности. Правильный выбор переменной интегрирования в формуле (9) с требуемым индексом и непосредственно самой синтезированной апертуры, как области изменения этой переменной, требует определенной физической постановки и интерпретации

этой задачи. Рассмотрим на рис. 2 три характерных вида обзора исследуемой поверхности, иллюстрирующих возможности формирования в каждом из них синтезированных изображений. Первый вид на рис. 2, а назовем веерным обзором, второй на рис. 2, б – однолучевым обзором, а третий на рис. 2, в – прожекторным. Заметим, что во всех этих вариантах речь идет о возможности получения в результате синтеза апертуры новой аппаратной функции, ширина которой, по крайней мере, в несколько раз должна быть меньше ширины аппаратной функции $\Psi(\bar{r}_1 - \bar{r}_2)$, характеризующей разрешающую способность системы формирования первичного изображения.

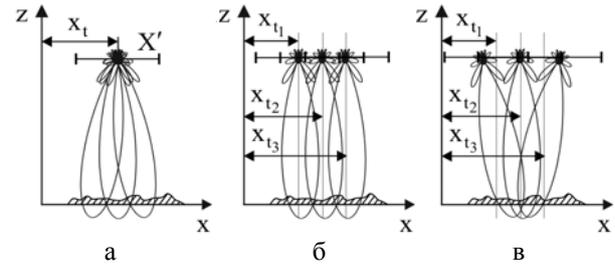


Рис. 2. Возможные варианты обзора местности

3. Восстановление синтезированного изображения в случае веерного обзора местности

Физика формирования первичного изображения в этом варианте заключается в том, что исследуемая поверхность покрывается веером независимых лучей. Этими лучами являются аппаратные функции $\Psi(\bar{r} - \bar{r}_1)$. В антенных решетках каждый такой луч или аппаратную функцию называют парциальной диаграммой направленности или множителем антенной решетки. Каждому лучу соответствует в области наблюдения свой отдельный выход и отдельный разрешаемый элемент изображения, поскольку разрешающая способность изображения определяется шириной аппаратной функции (луча).

Основной особенностью этого варианта является то, что область наблюдения и регистрации поля D' , расположенная над исследуемой поверхностью, одна и имеет фиксированное положение, т.е. координата $\bar{r}_t = \text{const}$ неизменна. Здесь единственной переменной интегрирования, по которой можно попытаться синтезировать вторичное изображение, является переменная \bar{r}_1 . Тогда интегрируя (9) по этой переменной синтезированное изображение $\hat{F}_{\text{syn},a}(\bar{r}_2, \bar{r}_t)$ можно представить таким выражением

$$\begin{aligned} \hat{F}_{\text{syn},a}(\bar{r}_2, \bar{r}_t) &= \int_{D_{\eta}} \hat{F}_1(\bar{r}_1, \bar{r}_t) \hat{\phi}^*(\bar{r}_1, \bar{r}_t, \bar{r}_2) \Psi(\bar{r}_2 - \bar{r}_1) d\bar{r} = \\ &= \int_D \hat{F}_1(\bar{r}) \int_{D_{\eta}} \Psi(\bar{r} - \bar{r}_1) \Psi^*(\bar{r}_2 - \bar{r}_1) \times \\ &\quad \times e^{-j \frac{k}{2HL} [|\bar{r} - \bar{r}_1|^2 - |\bar{r}_1 - \bar{r}_t|^2]} e^{j \frac{k}{2HL} [|\bar{r}_2 - \bar{r}_1|^2 - |\bar{r}_1 - \bar{r}_t|^2]} d\bar{r}_1 d\bar{r} = \end{aligned}$$

$$= \int_D \hat{F}_1(\vec{r}) \hat{\phi}_{\text{syn},a}(\vec{r}, \vec{r}_t, \vec{r}_2) \Psi_{\text{syn},a}(\vec{r} - \vec{r}_2) d\vec{r}, \quad (11)$$

где

$$\hat{\phi}_{\text{syn},a}(\vec{r}, \vec{r}_t, \vec{r}_2) = e^{-j \frac{k}{2H} [|\vec{r} - \vec{r}_t|^2 - |\vec{r}_2 - \vec{r}_t|^2]}, \quad (12)$$

$$\Psi_{\text{syn},a}(\vec{r} - \vec{r}_2) = \int_{D_{\vec{r}_1}} \Psi(\vec{r} - \vec{r}_1) \Psi^*(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) d\vec{r}_1, \quad (13)$$

$$|\hat{\phi}_{\text{syn},a}(\vec{r}, \vec{r}_t, \vec{r}_2) \Psi_{\text{syn},a}(\vec{r} - \vec{r}_2)| = |\Psi_{\text{syn},a}(\vec{r} - \vec{r}_2)|. \quad (14)$$

Полученное синтезированное изображение (11) по разрешающей способности мало чем отличается от изображения (9). Т.е. в этом случае не удастся синтезировать изображение путем интегрирования первичного изображения по переменной \vec{r}_1 . Однако такая обработка может существенно улучшить качество изображения при наличии аддитивных шумовых помех на первичном изображении.

4. Восстановление синтезированного изображения первичным лучом с произвольным наклоном

На рис. 2, б область D' перемещается вдоль оси x_t и сфокусирована только в одном направлении. В этом случае $\vec{r}_1 = \vec{r}_t$ и оценка $\hat{F}(\vec{r}_1, \vec{r}_t) = \hat{F}(\vec{r}_t)$. Можно выбрать один из скошенных боковых лучей (аналог переднего или заднего бокового обзора в радиолокационных станциях с синтезированной апертурой (РСА)). Тогда $\vec{r}_1 = \vec{r}_t + \vec{r}_{\Delta j}$, $\vec{r}_{\Delta j} = \text{const}$, где $|\vec{r}_{\Delta j}|$ – расстояние от точки пересечения оси вертикального луча с поверхностью D до точки пересечения направления максимума выбранного j -го бокового луча с этой поверхностью. Заметим, что здесь рассматривается зона Френеля, где $|\vec{r}_{\Delta j}| \ll H$ и, кроме того, очень малы угловые направления аппаратных функций.

Первичное изображение в этом варианте обзора поверхности получаем путем такого изменения переменной \vec{r}_t , в результате которого последовательно (путем перемещения области наблюдения и регистрации поля D') или параллельно (путем одновременного применения некоторого множества областей D') одним из выбранных лучей (строго боковым или скошенным) просматриваются все или заданное число координатных точек оцениваемого изображения. Тогда первичную оценку когерентного изображения (2) при континуальном изменении переменной \vec{r}_t можно представить таким выражением

$$\begin{aligned} & \hat{F}_1(\vec{r}_t + \vec{r}_{\Delta j}, \vec{r}_t) = \\ & = \int_D \hat{F}(\vec{r}) \Psi(\vec{r} - \vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j}) e^{-j \frac{k}{2H} [|\vec{r} - \vec{r}_t|^2 - |\vec{r}_{\Delta j}|^2]} d\vec{r}. \end{aligned} \quad (15)$$

Вторичную оценку, т.е. синтезированное изображение, находим путем интегрирования первичной оценки по переменной $\vec{r}_t = \vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j}$ с весом (7):

$$\begin{aligned} \hat{F}_{\text{syn},\delta}(\vec{r}_2) &= \int_{D_{\vec{r}_t}} \hat{F}_1(\vec{r}_t + \vec{r}_{\Delta j}, \vec{r}_t) \hat{\phi}^*(\vec{r}_t + \vec{r}_{\Delta j}, \vec{r}_t, \vec{r}_2) \times \\ & \times \Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j}) d\vec{r}_t = \int_D \hat{F}_1(\vec{r}) \hat{\psi}_{\text{syn},\delta}(\vec{r}, \vec{r}_2) d\vec{r}, \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \hat{\psi}_{\text{syn},\delta}(\vec{r}, \vec{r}_2) &= \int_{D_{\vec{r}_t}} \Psi(\vec{r} - \vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j}) \Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j}) \times \\ & \times e^{-j \frac{k}{2H} [|\vec{r} - \vec{r}_t|^2 - |\vec{r}_2 - \vec{r}_t|^2]} d\vec{r}_t d\vec{r}. \end{aligned} \quad (17)$$

Разрешающая способность синтезированного изображения определяется шириной модуля функции (17). Для простоты ее расчета выберем строго боковой обзор, т.е. $\vec{r}_{\Delta j} = 0$, и будем полагать, что аппаратная функция $\Psi(\vec{r} - \vec{r}_t)$ по переменной \vec{r} симметрична и имеет вид прямоугольника, ширина которого определяется соотношениями (5). Рассмотрим упрощенный одномерный вариант расчета функции $\hat{\psi}_{\text{syn},\delta}(x, x_2)$:

$$\begin{aligned} \hat{\psi}_{\text{syn},\delta}(x, x_2) &= \int_{D_{x_t}} \Psi(x - x_t) \Psi(x_2 - x_t) \times \\ & \times e^{-j \frac{k}{2H} [(x - x_t)^2 - (x_2 - x_t)^2]} dx_t = \\ & = \left| \begin{array}{l} x - x_t = \xi, x_2 - x_t = \xi - \eta, \\ x - x_2 = \eta, \xi \in (-0,5\Delta x, 0,5\Delta x) \end{array} \right| = \\ & = e^{j \frac{k}{2H} \eta^2} \int_{-0,5\Delta x + \eta}^{0,5\Delta x} e^{-j \frac{k}{H} \xi \eta} d\xi = \\ & = (\Delta x - \eta) \text{sinc}(k\eta(\Delta x - \eta)/2H) = \\ & \approx \left(1 - \frac{(x - x_2)}{\Delta x} \right) \Delta x \text{sinc} \left(\frac{k(x - x_2)}{2H} \Delta x \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Величиной $\eta/\Delta x$ в функции $\text{sinc}(\cdot)$ пренебрегли, так как ширина функции $|\hat{\phi}(x, x_2)|$ значительно меньше величины Δx . Вычисляя ширину функции $\hat{\psi}_{\text{syn},\delta}(x, x_2)$ по первым нулям, получим

$$\Delta x_{\text{syn},\delta} = \lambda H / \Delta x = X', \quad \Delta y_{\text{syn},\delta} = \lambda H / \Delta y = Y'. \quad (19)$$

Таким образом, получен важный вывод о том, что разрешающая способность синтезированного изображения по координате x равна размерам по этой координате той области наблюдения, которая участвовала при формировании первичного изображения. Как известно в РСА $\Delta x_{\text{syn},\delta}$ – это размер бортовой вдольфюзеляжной антенны, а Δx – это размер по координате x той области, которая облучена (“освещена”) диаграммой направленности этой антенны, т.е. функцией $\Psi(\vec{r} - \vec{r}_t)$. Первичное изображение, формируемое в этих радиолокационных станциях, называют траекторным сигналом или радиоголограммой.

5. Восстановление синтезированного изображения в случае прожекторного обзора

Рассмотрим теперь третий вариант возможной реализации синтезированной апертуры и синтезированного изображения с более высокой разрешающей способностью. Этот вариант иллюстрируется на рис. 2, в и называется вариантом прожекторного (телескопического) обзора исследуемой поверхности. В этом случае положение области регистрации D' (первичной апертуры) изменяется, т.е. изменяется переменная \bar{r}_t , но пространственное положение выбранного участка поверхности D , освещенного первичной апертурой, остается неизменным. Это достигается перефокусировкой первичной апертуры, путем изменения АФР при изменении положения области D' . В рамках рассматриваемой геометрии на рис. 2, в область изменений переменной \bar{r}_t , т.е. область определения синтезированной апертуры, выбрана сравнительно небольшой, чтобы удовлетворить приближению зоны Френеля. Однако размеры этой области должны превышать размеры освещенного участка поверхности хотя бы в несколько раз.

Запишем формулу (2) в таком виде

$$\hat{F}_1(\bar{r}_{t0}, \bar{r}_t) = \int_D \hat{F}_1(\bar{r}) \Psi(\bar{r} - \bar{r}_{t0}) e^{-j \frac{k}{2H} [|\bar{r} - \bar{r}_t|^2 - |\bar{r}_{t0} - \bar{r}_t|^2]} d\bar{r}, \quad (19)$$

где $\bar{r}_t = \bar{r}_{t0}$ – фиксированное пространственное положение максимума $\Psi(\bar{r} - \bar{r}_t) = \Psi(\bar{r} - \bar{r}_{t0})$.

Для получения синтезированного изображения необходимо умножить выражение (19) на базисную функцию

$$\hat{I}_{syn}(\bar{r}_{t0}, \bar{r}_t, \bar{r}_2) = \Psi(\bar{r}_2 - \bar{r}_{t0}) e^{j \frac{k}{2H} [|\bar{r}_2 - \bar{r}_t|^2 - |\bar{r}_{t0} - \bar{r}_t|^2]}, \quad (20)$$

а затем проинтегрировать полученное выражение по переменной \bar{r}_t . В результате получим

$$\begin{aligned} \hat{F}_{syn, в}(\bar{r}_2, \bar{r}_{t0}) &= \int_{D_{\bar{r}_t}} \hat{F}_1(\bar{r}_{t0}, \bar{r}_t) \Psi(\bar{r}_2 - \bar{r}_{t0}) \times \\ &\times e^{j \frac{k}{2H} [|\bar{r}_2 - \bar{r}_t|^2 - |\bar{r}_{t0} - \bar{r}_t|^2]} d\bar{r}_t = \\ &= \int_D \hat{F}_1(\bar{r}) \hat{\Psi}_{syn, в}(\bar{r}, \bar{r}_2, \bar{r}_{t0}) d\bar{r}, \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} \hat{\Psi}_{syn, в}(\bar{r}, \bar{r}_2, \bar{r}_{t0}) &= \Psi(\bar{r} - \bar{r}_{t0}) \Psi(\bar{r}_2 - \bar{r}_{t0}) \times \\ &\times \int_{D_{\bar{r}_t}} e^{j \frac{k}{2H} [|\bar{r} - \bar{r}_t|^2 - |\bar{r}_2 - \bar{r}_t|^2]} d\bar{r}_t \end{aligned} \quad (22)$$

– аппаратная функция, определяющая разрешающую способность синтезированного изображения в случае прожекторного обзора. Ширина этой функции, по крайней мере, в несколько раз должна быть

меньшей ширины освещенной области, заданной функцией $\Psi(\bar{r} - \bar{r}_{t0})$. Эта ширина зависит от размеров синтезированной апертуры $D_{\bar{r}_t}$. Для упрощения расчета (22) выберем область $\bar{r}_t \in D_{\bar{r}_t}$ в виде прямоугольника и предположим, что

$$\Psi(\bar{r} - \bar{r}_{t0}) \Psi(\bar{r}_2 - \bar{r}_{t0}) \approx |\Psi(\bar{r} - \bar{r}_{t0})|^2 \approx |\Psi(\bar{r}_2 - \bar{r}_{t0})|^2. \quad (23)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \hat{\Psi}_{syn, в}(\bar{r}, \bar{r}_2, \bar{r}_{t0}) &= |\Psi(\bar{r} - \bar{r}_{t0})|^2 \times \\ &\times \Psi_{syn, в}(\bar{r} - \bar{r}_2) \hat{\phi}_{syn, в}(\bar{r}, \bar{r}_2), \end{aligned} \quad (24)$$

где

$$\begin{aligned} \Psi_{syn, в}(\bar{r} - \bar{r}_2) &= X_t Y_t \text{sinc}(kX_t(x - x_2)/2H) \times \\ &\times \text{sinc}(kY_t(y - y_2)/2H), \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_{syn, в}(\bar{r}, \bar{r}_2) &= e^{-\frac{jk}{2H}(x^2 - x_2^2 + y^2 - y_2^2)} \times \\ &\times e^{j \frac{jk}{H}[x_{t0}(x - x_2) + y_{t0}(y - y_2)]}. \end{aligned} \quad (26)$$

Ширина полученной аппаратной функции (24) в основном определяется шириной $\Psi_{syn, в}(\bar{r} - \bar{r}_2)$, которая равна

$$\Delta x_{syn, в} = \lambda H / X_t, \quad \Delta y_{syn, в} = \lambda H / Y_t. \quad (27)$$

Заметим, что по внешнему виду формулы для первичных и синтезированных когерентных изображений мало чем отличаются. Однако у синтезированных изображений аппаратная функция является более узкой.

Выводы

Рассмотрена процедура восстановления когерентного изображения в зоне Френеля и определена разрешающая способность первичного когерентного изображения. Установлено, что после первичной обработки полученные изображения остаются некоторыми спектральными преобразованиями комплексного коэффициента рассеяния исследуемой поверхности. Показано, что можно получить более качественные изображения, так называемые синтезированные изображения, с большим разрешением за счет многоканальной и многопозиционной обработки сигналов. Предложено три возможных варианта восстановления синтезированных изображений при веерном, однолучевом и прожекторном обзорах. Анализ разрешающей способности алгоритмов восстановления показал, что при веерном обзоре не удастся повысить пространственное разрешение, но возможно снизить уровень шума на первичном изображении. В то же время при однолучевом вертикальном или боковом обзорах подстилающей поверхности полученное разрешение значительно улучшилось и соответствует размерам области наблюдения. Вариант прожекторного обзора позволяет достичь еще более высокой разрешающей спо-

собности, которая определяется размерам синтезированной апертуры. При этом максимальный размер ограничен условием проведения измерений в зоне Френеля.

Список литературы

1. Волосюк В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации [Текст] / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко; под общ. ред. В.Ф. Кравченко. – М.: Физматлит, 2008. – 740 с.
2. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
3. Антипов В.Н. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны [Текст] / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов [и др.]. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
4. Volosyuk V.K. Optimal radar cross section estimation in synthetic aperture radar [Text] / V.K. Volosyuk, S.S. Zhyla // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON): Materials of the conf., May 29 – June 2 2017. – Kiev, 2017. – P. 189-193.
5. Optimal acquisition mode and signal processing algorithm in synthetic aperture radar [Text] / V.K. Volosyuk, S.S. Zhyla, M.O. Antonov, O.A. Khaleev // 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Materials of the intern. conf., 18-20 April 2017. – Kiev, 2017. – P. 511-516.
6. UWB Array-Based Sensor for Near-Field Imaging [Text] / A.G. Yarovoy, T.G. Savelyev, P.J. Aubry, P.E. Lys, L.P. Lighthart // Journ. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2007. – Vol. 55, № 6. – P. 1288-1295.
7. Optical Coherence Tomography imaging with a planar broadband light beam [Text] / P. Hunziker, O.V. Morozov, O.V. Volosyuk, V.K. Volosyuk, S.S. Zhyla // 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW): Materials of the intern. symp., 20-24 June 2016. – Kharkiv, 2016. – P. 1-4.
8. Получение радиолокационных портретов образцов военной техники с помощью наземного шумового радара с синтезированной апертурой [Текст] / К.А. Лукин, К.С. Васюта, Ф.Ф. Зоц, П.Л. Выплавин, В.В. Кудряшев, С.В. Озеров, В.П. Паламарчук, П.Г. Сущенко, С.К. Лукин // Системи озброєння і військова техніка. – 2013. – № 4(36). – С. 87-92.
9. Lukin K. Millimeter-wave noise radar tomography [Text] / K. Lukin // 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW): Materials of the intern. symp., 20-24 June 2016. – Kharkiv, 2016. – P. 1-6.
10. Titar V.P. Application of lasers in ophthalmology [Text] / V.P. Titar, Y.V. Ielchishcheva // 2016 IEEE 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL): Materials of the intern. conf., 12-15 September 2016. – Odessa, 2016. – P. 115-116.
11. A Through-dielectric Radar Imaging System [Text] / G. Charvat, L. Kempel, E. Rothwell, C. Coleman, E. Mokole // Journ. Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58, № 8. – P. 2594-2603.
12. Autocorrelation artifacts in optical coherence tomography and interferometric synthetic aperture microscopy [Text] / B.J. Davis, T.S. Ralston, D.L. Marks, S.A. Boppart, P.S. Carney // Journ. Optics Letters. – 2007. – Vol. 32, № 11. – P. 1441-1443.

References

1. Volosyuk, V.K. and Kravchenko, V.F. (2008), “*Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya i radiolokatsii*” [Statistical theory of radio engineering systems of remote sensing and radar], Fizmatlit Publ., Moscow, 740 p.
2. Verba, V.S., Neronskiy, L.B., Osipov, I.G. and Turuk, V.E. (2010), “*Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya*” [Space-borne Earth surveillance radar systems], Radiotekhnika Publ., Moscow, 680 p.
3. Antipov, V.N., Goriainov, V.T., Kulin, A.N., Mansurov, V.V. and Okhonskii, A.G. (1988), “*Radiolokatsionnyye stantsii s tsifrovym sintezirovaniyem apertury anteny*” [Synthetic aperture radar stations with digital processing], Radio i Sviaz' Publ., Moscow, 304 p.
4. Volosyuk, V.K. and Zhyla, S.S. (2017), Optimal radar cross section estimation in synthetic aperture radar, *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 29 May – 2 June 2017, Kyiv, pp. 189-193.
5. Volosyuk, V.K., Zhyla, S.S., Antonov, M.O. and Khaleev, O.A. (2017), Optimal acquisition mode and signal processing algorithm in synthetic aperture radar, *2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 18-20 April 2017, Kyiv, pp. 511-516.
6. Yarovoy, A.G., Savelyev, T.G., Aubry, P.J., Lys, P.E. and Lighthart, L.P. (2017), UWB Array-Based Sensor for Near-Field Imaging, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 55, No. 6, pp. 1288-1295.
7. Hunziker, P., Morozov, O.V., Volosyuk, O.V., Volosyuk, V.K. and Zhyla, S.S. (2016), Optical Coherence Tomography imaging with a planar broadband light beam, *2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, 20-24 June, Kharkiv, pp. 1-4.
8. Lukin, K.A., Vasjuta, K.S., Zoc, F.F., Vyplavin, P.L., Kudryashev, V.V., Ozerov, S.V., Palamarchuk, V.P., Sushhenko, P.G. and Lukin, S.K. (2013), “Poluchenie radiolokatsionnykh portretov obrazcov voennoj tehniky s pomoshh'ju nazemnogo shumovogo radara s sintezirovannoj aperturoj” [Radar imaging of the military equipment using ground-based noise radar with synthetic aperture], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 4(36), pp. 87-92.
9. Lukin, K. (2016), Millimeter-wave noise radar tomography, *2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, 20-24 June 2016, Kharkiv, pp. 1-6.

10. Titar, V.P. and Ielchishcheva, Y.V. (2016), Application of lasers in ophthalmology, *2016 IEEE 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*, 12-15 September 2016, Odessa, pp. 115-116.
11. Charvat, G., Kempel, L., Rothwell, E., Coleman, C. and Mokole, E. (2010), A Through-dielectric Radar Imaging System, *Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 58, No. 36, pp. 2594-2603.
12. Davis, B.J., Ralston, T.S., Marks, D.L., Boppart, S.A. and Carney, P.S. (2007), Autocorrelation artifacts in optical coherence tomography and interferometric synthetic aperture microscopy, *Optics Letters*, Vol. 32, No. 11, pp. 1441-1443.

Поступила в редколлегию 12.07.2018

Одобрена к печати 14.08.2018

Відомості про авторів:

Волосяк Валерій Костянтинович

доктор технічних наук
професор Національного аерокосмічного
університету ім. М.С. Жуковського «ХАІ»,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1442-6235>

Жила Семен Сергійович

кандидат технічних наук
докторант Національного аерокосмічного
університету ім. М.С. Жуковського «ХАІ»,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2989-8988>

Кріпак Микола Андрійович

студент Національного аерокосмічного
університету ім. М.С. Жуковського «ХАІ»,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0641-8972>

Information about the authors:

Valerii Volosyuk

Doctor of Technical Sciences
Professor of Zhukovsky National
Aerospace University "KhAI",
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1442-6235>

Semen Zhyla

Candidate of Technical Sciences
Doctoral Candidate of Zhukovsky
National Aerospace University "KhAI",
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2989-8988>

Mykola Kripak

Student of Zhukovsky National Aerospace
University "KhAI",
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0641-8972>

СИНТЕЗ КОГЕРЕНТНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПОВЕРХОНЬ В ЗОНІ ФРЕНЕЛЯ НА ОСНОВІ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ І БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

В.К. Волосяк, С.С. Жила, М.А. Кріпак

Розглянуто основні математичні операції відновлення первинних і синтезованих когерентних зображень в зоні Френеля з електромагнітних полів, що прийняті багатоканальними оптичними або радіотехнічними системами. Виконано аналіз роздільної здатності первинних когерентних зображень і показані можливі шляхи його підвищення, які засновані на вторинній багатоканальній і багатопозиційній обробці сигналів і методи синтезування апертури. Показані основні операції відновлення синтезованих зображень і проаналізована їх роздільна здатність у разі віялового, однопроменевого та прожекторного методів огляду поверхні.

Ключові слова: синтезоване зображення, ближня зона Френеля, багатопозиційна обробка.

SYNTHESIS OF SURFACES COHERENT IMAGES IN THE FRESNEL REGION BASED ON MULTICHANNEL AND MULTIPosition SIGNAL PROCESSING

V. Volosyuk, S. Zhyla, M. Kripak

In the paper the process of high-resolution coherent images restoration is divided into two stages. Firstly the primary image should be recovered in the fixed multichannel antenna array and then taking into account different position and viewing angles the synthesized images can be obtained. For developing primary signal processing algorithm the geometry of remote sensing in the near-field Fresnel region is proposed and analytical expressions for the observed field at each point of the receiving area are specified. Having analyzed these expressions, basic mathematical operations of the primary coherent images restoration in multi-channel optical or radio engineering systems were developed. Resolution of these images is investigated and possible ways of its increase at the stage of the secondary processing are shown. Mainly they consist in variation the coordinates of position or viewing angles. The images obtained after the secondary processing are suggested to be called synthesized coherent images and the algorithmic or physical operations of such processing are called aperture synthesis. To study the possibilities of obtaining synthesized images, several surface remote sensing geometries have been proposed. Methods of observation according to these geometries are called multi-look mode, strip mapping mode and spotlight mode. In all these cases, it is a question of the possibility of obtaining as a result of the synthesis of aperture a new ambiguity function. Width of this function must be at least several times smaller than the width of the ambiguity function characterizing the resolution of the primary imaging system. For proposed methods of observation the basic principles of synthesized images reconstruction are developed and their resolution is analyzed. Researches show that it is not possible to increase the spatial resolution in the case of multi-look mode. Strip mapping mode allows to obtain improved resolution, that corresponds to the dimensions of the observation area. The spotlight mode have the highest resolution which is determined by the dimensions of the synthesized aperture.

Keywords: synthesized image, near-field Fresnel region, multiposition processing.