

В. К. Волосюк, С. С. Жила, А. И. Помазан

Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського "ХАІ", Харків, Україна

## СИНТЕЗ КОГЕРЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ МНОГОКАНАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ В ЗОНЕ ФРАУНГОФЕРА

Раскрыты основные этапы обработки электромагнитного поля в многоканальных оптических и радиотехнических системах формирования первичных когерентных изображений поверхностей в зоне Фраунгофера. Исследована точность восстановления первичных когерентных изображений и предложены варианты повышения разрешающей способности в пространственно-распределенных и многоканальных системах с синтезированной апертурой. Рассмотрены несколько вариантов вторичной обработки первичных когерентных изображений при веерном, последовательном и телескопическом обзорах подстилающей поверхности. Показано, что в дальней зоне Фраунгофера удается выполнить синтез апертуры и повысить разрешающую способность только в случае телескопического обзора.

**Ключевые слова:** синтезированное изображение, дальняя зона Фраунгофера, многопозиционная обработка.

### Введение

Восстановление радиолокационных [1] и оптических [2] изображений актуально при решении задач радиолокации, дистанционного зондирования Земли [3] и медицины. Формируемые при этом изображения условно можно разделить на два основных класса – когерентные и некогерентные. Под некогерентными изображениями понимают двумерные функции пространственного распределения суммарной интенсивности преобразованных полей. При построении когерентного изображения используют информацию о фазах волн, отраженных от исследуемого объекта. Наличие фазовой структуры в когерентных изображениях позволяет выполнять их вторичную обработку многоканальными пространственно-распределенными радиотехническими и оптико-электронными системами. В большинстве случаев [4-6] вторичную обработку выполняют в предположении работы таких систем в зоне Френеля. В тоже время не всегда условия проведения экспериментов и имеющиеся технические средства позволяют выполнить когерентное накопление сигналов с учетом квадратичного набега фаз принятого электромагнитного поля. В таком случае актуальными являются исследования возможности восстановления синтезированных когерентных изображений в дальней зоне Фраунгофера.

### 1. Первичная обработка принятого электромагнитного поля

Определим основные операции восстановления когерентных изображений в зоне Фраунгофера для геометрии на рис. 1. Здесь  $D'$  – многоканальная область регистрации излученных или переизлученных электромагнитных полей исследуемой поверхностью  $D$ . Будем полагать, что на поверхности  $D$  заданы граничные условия в виде коэффициента рассеяния  $\dot{F}(\vec{r})$ . Коэффициент рассеяния  $\dot{F}(\vec{r})$  будем считать идеальным когерентным изображением  $\dot{F}(\vec{r})$ , которое учитывает в своей амплитудно-фазовой структуре влияние неоднородностей химического состава, градиента показателя преломления,

а также неровностей рельефа подстилающей поверхности. Область регистрации  $D'$  описывается амплитудно-фазовым распределением приемной чувствительности (АФР).

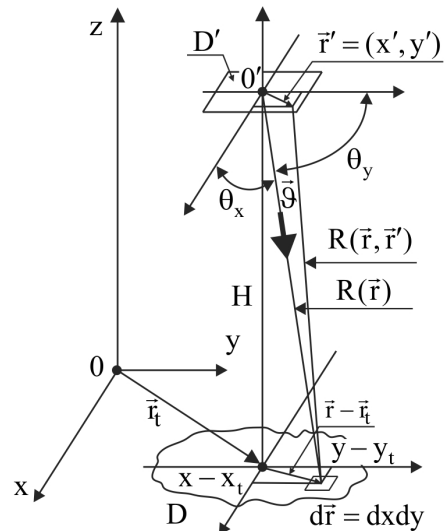


Рис. 1. Геометрия восстановления когерентных изображений поверхностей в зоне Фраунгофера

В дальней зоне Фраунгофера наблюдаемое поле в каждой точке  $D'$  представим таким образом [1]:

$$\dot{E}(\vec{r}', \vec{r}_t) = \int_D \dot{F}_1(\vec{r}, \vec{r}_t) e^{-jkR(\vec{r}, \vec{r}_t)} e^{-jk\vec{r}'\vec{\mathcal{Q}}(\vec{r}, \vec{r}_t)} d\vec{r}, \quad (1)$$

где  $\dot{F}_1(\vec{r}, \vec{r}_t) = \dot{F}(\vec{r})R^{-1}(\vec{r}, \vec{r}_t)$ ,

$$R(\vec{r}, \vec{r}_t) = H + (x - x_t)^2 / 2H + (y - y_t)^2 / 2H,$$

$H$  – высота,  $\vec{r}' = (x', y')$  – координаты области  $D'$ ,  $\vec{r} = (x, y)$  – координаты подстилающей поверхности,

$$\vec{\mathcal{Q}}(\vec{r}, \vec{r}_t) = (\mathcal{Q}(x, x_t) = \cos \theta(x, x_t) = (x - x_t)R^{-1}(\vec{r}, \vec{r}_t),$$

$$\mathcal{Q}(y, y_t) = \cos \theta(y, y_t) = (y - y_t)R^{-1}(\vec{r}, \vec{r}_t) -$$

вектор направляющих косинусов,  $\vec{r}_t = (x_t, y_t)$  – координаты центра фаз области  $D'$ ,  $k$  – волновое число,  $X, Y$  – линейные размеры области регист-

рации. Полученный интеграл (1) – преобразование Фурье функции  $\hat{F}_1(\vec{r}, \vec{r}_i)$ .

Приближенную оценку функции  $\hat{F}_1(\vec{r}, \vec{r}_i)$  находим, выполнив обратное преобразование Фурье в конечных пределах области  $D'$  с АФР

$$\begin{aligned} \hat{I}(\vec{r}', \vec{r}_i) &= \exp(jk R(\vec{r}_1, \vec{r}_i)) \exp(jk \vec{r}' \vec{\Theta}(\vec{r}_1, \vec{r}_i)) : \\ \hat{F}_1(\vec{r}_1, \vec{r}_i) &= \int_{-D'/2}^{D'/2} \hat{E}(\vec{r}', \vec{r}_i) e^{jk \vec{r}' \vec{\Theta}(\vec{r}_1, \vec{r}_i)} d\vec{r}' = \\ &= \int_{-D/2}^{D/2} \hat{F}_1(\vec{r}, \vec{r}_i) \psi(\vec{r}, \vec{r}_1, \vec{r}_i) d\vec{r}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\psi(\vec{r}, \vec{r}_1, \vec{r}_i) = \phi(\vec{r}, \vec{r}_1, \vec{r}_i) \Psi(\vec{r}, \vec{r}_i) -$  (3)

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

$$\begin{aligned} \phi(\vec{r}, \vec{r}_1, \vec{r}_i) &= \exp\{-jk[R(\vec{r}, \vec{r}_i) - R(\vec{r}_1, \vec{r}_i)]\} = \\ &= \exp\{-jk \vec{\Theta}(\vec{r}_1, \vec{r}_i)[\vec{r}_1 - \vec{r}]\} = \exp\{-jk \vec{\Theta}_1[\vec{r}_1 - \vec{r}]\}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Psi(\vec{r} - \vec{r}_i) &= \int_{-X'/2}^{X'/2} \int_{-Y'/2}^{Y'/2} e^{-jk[x'(x, y, \vec{r}_i) - y' \vec{\Theta}(x_1, y_1, \vec{r}_i)]} dx' dy' = \\ &= X' Y' \text{sinc} \left[ \frac{k(x - x_1) X'}{2R(\vec{r}, \vec{r}_i)} \right] \text{sinc} \left[ \frac{k(y - y_1) Y'}{2R(\vec{r}, \vec{r}_i)} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Оценку (2) теперь можно приближенно представить таким выражением

$$\hat{F}_1(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_i) = \int_D \hat{F}(\vec{r}) \Psi(\vec{r}_1 - \vec{r}) \exp\{-jk \vec{\Theta}_1[\vec{r}_1 - \vec{r}]\} d\vec{r}. \quad (6)$$

Такое преобразование назовем скользящим кратко масштабным преобразованием Фурье, свидетельствующим о том, что в ограниченных пределах интегрирования, заданных шириной функции  $\Psi(\vec{r}_1 - \vec{r})$ , выделяется спектр пространственных частот функции  $\hat{F}(\vec{r})$  в окрестности частоты

$$\vec{\omega} = \|\omega_x = 2\pi \cos \theta_x / \lambda, \omega_y = 2\pi \cos \theta_y / \lambda\|, \quad (7)$$

а разрешающая способность первичного когерентного изображения (6) определяется шириной  $\Delta x$  и  $\Delta y$  функции  $\Psi(x_1 - x, y_1 - y)$  на нулевом уровне

$$\Delta x = \lambda R(\vec{r}, \vec{r}_i) / X', \Delta y = \lambda R(\vec{r}, \vec{r}_i) / Y'. \quad (8)$$

Качество полученного первичного когерентного изображения можно повысить выполняя вторичную обработку в виде обратного спектрального преобразования с комплексно-сопряженными базисными функциями

$$\hat{I}_{syn}(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_1) = \hat{\phi}^*(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_1) \Psi^*(\vec{r}_2 - \vec{r}_1). \quad (9)$$

В дальнейшем изображения, полученные после вторичной обработки, будем называть синтезированными. Алгоритмические или физические операции таких преобразований будем называть синтезированием апертуры, а полученные новые изображения – синтезированными. Этим операциям будут соответствовать определенные реальные области интегриро-

вания, которые будем называть синтезированными апертурами, а функции  $\hat{I}_{syn}(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_1, \vec{r}_2)$  – их АФР. Максимальные размеры синтезированной апертуры определяются выражениями (8). Применяя обратное преобразование к  $\hat{F}(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_1)$  с использованием базисной функции (9) можно выполнить интегрирование по переменной  $\vec{r}_1$ , или по переменной  $\vec{r}_i$

$$\begin{aligned} \hat{F}_{syn}(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_2) &= \int_{D_{r_1}(\text{или } D_{r_i})} \hat{F}(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_1) \hat{\phi}^*(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_1, \vec{r}_2) \times \\ &\times \Psi^*(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) d\vec{r}_1 (\text{или } d\vec{r}_i) = \\ &= \int_D \hat{F}_1(\vec{r}) \int_{D_{r_1}(\text{или } D_{r_i})} \hat{\phi}(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_1, \vec{r}) \Psi(\vec{r} - \vec{r}_1) \times \\ &\times \hat{\phi}^*(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_1, \vec{r}_2) \Psi^*(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) d\vec{r}_1 (\text{или } d\vec{r}_i) d\vec{r} = \\ &= \int_D \hat{F}_1(\vec{r}) \Psi_{syn}(\vec{\Theta}_1, \vec{r}, \vec{r}_2) d\vec{r}, \end{aligned} \quad (10)$$

Выбор переменной интегрирования зависит от выбора вида обзора исследуемой поверхности. 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 – последовательным обзором, а третий на рис. 2, в – телескопическим. Заметим, что во всех этих вариантах речь идет о возможности получения в новой аппаратной функции, ширина которой, по крайней мере, в несколько раз должна быть меньше ширины аппаратной функции  $\Psi(\vec{r}_1 - \vec{r})$ , характеризующей разрешающую способность системы формирования первичного изображения.

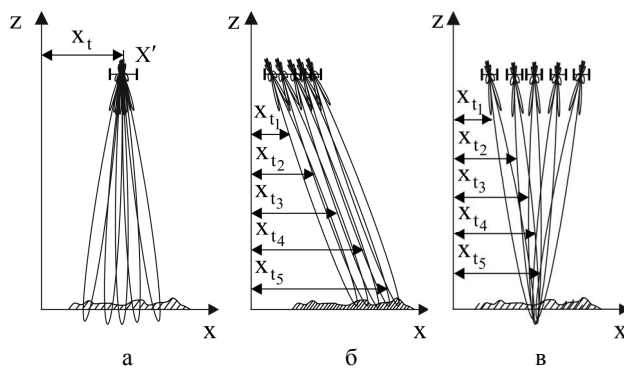


Рис. 2. Возможные варианты обзора местности

## 2. Вторичная обработка в случае веерного обзора

В случае геометрии, что показана на рис. 2, а, единственной переменной, по которой можно синтезировать вторичное изображение, является переменная  $\vec{r}_1$ . Тогда, умножая первичное изображение (6) на функцию (9) и интегрируя по переменной  $\vec{r}_1$ , находим синтезированное изображение

$$\begin{aligned} \hat{F}_{syn, a}(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_2) &= \\ &= \int_{D_{r_1}} \hat{F}(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_1) \hat{\phi}^*(\vec{\Theta}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_1) \Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) d\vec{r}_1 = \end{aligned}$$

$$= \int_D \dot{F}(\vec{r}) \int_{D_1} \Psi(\vec{r}-\vec{r}_1) \Psi(\vec{r}_2-\vec{r}_1) e^{jk\bar{\Theta}_1(\vec{r}-\vec{r}_1)} e^{-jk\bar{\Theta}_1(\vec{r}_2-\vec{r}_1)} d\vec{r}_1 d\vec{r} =$$

$$= \int_D \dot{F}(\vec{r}) \Psi_{\otimes}(\vec{r}-\vec{r}_2) e^{-jk\bar{\Theta}_1(\vec{r}-\vec{r}_2)} d\vec{r}, \quad (11)$$

где  $\phi^*(\bar{\Theta}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_1) = e^{-jk\bar{\Theta}_1(\vec{r}_2-\vec{r}_1)}$ ,

$$\Psi_{\otimes}(\vec{r}-\vec{r}_2) =$$

$$= \int_{D_1} \Psi(\vec{r}-\vec{r}_1) \Psi(\vec{r}_2-\vec{r}_1) e^{jk\bar{\Theta}_1(\vec{r}-\vec{r}_1)} e^{-jk\bar{\Theta}_1(\vec{r}_2-\vec{r}_1)} d\vec{r}_1. \quad (12)$$

В зоне Фраунгофера можно считать в пределах аппаратной функции  $\Psi_{\otimes}(\vec{r}-\vec{r}_2)$  все лучи параллельными и полагать  $\bar{\Theta}(\vec{r}) \approx \bar{\Theta}_1(\vec{r}_1) \approx \bar{\Theta}_2(\vec{r}_2)$ , тогда

$$\hat{F}_{syn,a}(\vec{r}_2) = \int_D \dot{F}(\vec{r}) \Psi_{\otimes}(\vec{r}-\vec{r}_2) \phi[\bar{\Theta}_2(\vec{r}_2), \vec{r}, \vec{r}_2] d\vec{r} =$$

$$= \int_D \dot{F}(\vec{r}) \Psi_{\otimes}(\vec{r}-\vec{r}_2) \exp\{-jk\bar{\Theta}_2(\vec{r}-\vec{r}_2)\} d\vec{r}. \quad (13)$$

Полученное синтезированное и первичное изображения по разрешающей способности практически не отличаются. Однако, операция вторичной корреляционной обработки  $\hat{F}(\bar{\Theta}_1, \vec{r}_1)$  путем его умножения на функцию  $\phi^*(\bar{\Theta}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_1)$  и интегрирования по переменной  $\vec{r}_1$  является оптимальной при восстановлении первичного изображения, наблюдаемого в смеси с белым шумом. Такая обработка более полно использует энергетику изображения и подавляет белый шум.

### 3. Вторичная обработка в случае последовательного обзора

При последовательном обзоре область  $D'$  сфокусирована на исследуемую поверхность только в одном  $j$ -м направлении, под углом  $\bar{\Theta}_j$ . В этом случае  $\vec{r}_1 = \vec{r}_t + \vec{r}_{\Delta j}$ ,  $\vec{r}_{\Delta j} = const$ ,  $\bar{\Theta}_j = const$ , где  $|\vec{r}_{\Delta j}|$  – расстояние от точки с координатами  $\vec{r}_t$  до точки пересечения оси  $j$ -го луча с поверхностью  $D$ . Первичное изображение получаем путем последовательного или параллельного покрытия выбранным лучом (единственным и с фиксированным угловым направлением его максимума) области определения оцениваемого изображения (в идеале всех его точек). Это достигается путем соответствующего изменения по переменной  $\vec{r}_t$  положения области наблюдения и регистрации  $D'$  и, соответственно, положения выбранного луча. Подставим в (4) значение  $\vec{r}_1 = \vec{r}_t + \vec{r}_{\Delta j}$

$$\phi(\vec{r}_t, \vec{r}, \vec{r}_1) =$$

$$= \phi(\bar{\Theta}_1, \vec{r}, \vec{r}_t + \vec{r}_{\Delta j}) = \exp[jk\bar{\Theta}_1(\vec{r}-\vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j})], \quad (14)$$

Тогда первичную оценку (6) когерентного изображения при континуальном изменении переменной  $\vec{r}_t$  запишем в виде

$$\hat{F}(\bar{\Theta}_1, \vec{r}_1) \Big|_{\vec{r}_1 = \vec{r}_t + \vec{r}_{\Delta j}} = \hat{F}(\bar{\Theta}_j, \vec{r}_t) =$$

$$= \int_D \dot{F}(\vec{r}) \Psi(\vec{r}-\vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j}) \exp[jk\bar{\Theta}_j(\vec{r}-\vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j})] d\vec{r}. \quad (15)$$

Умножая первичную оценку на комплексно сопряженный множитель при  $\dot{F}(\vec{r})$  и интегрируя по переменной  $\vec{r}_t$ , получим синтезированное изображение

$$\hat{F}_{syn,\sigma}(\vec{r}_2) =$$

$$= \int_{D_t} \hat{F}(\bar{\Theta}_j, \vec{r}_t) \Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j}) e^{-jk\bar{\Theta}_j(\vec{r}_2 - \vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j})} d\vec{r}_t =$$

$$= \int_D \dot{F}(\vec{r}) \int_{D_t} \Psi(\vec{r}-\vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j}) \Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j}) \times$$

$$\times e^{jk\bar{\Theta}_j(\vec{r}-\vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j})} e^{-jk\bar{\Theta}_j(\vec{r}_2 - \vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j})} d\vec{r}_t d\vec{r} =$$

$$= \int_D \dot{F}(\vec{r}) e^{jk\bar{\Theta}_j(\vec{r}-\vec{r}_2)} \int_D \left( \Psi(\vec{r}-\vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j}) \times \right.$$

$$\left. \times \Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_t - \vec{r}_{\Delta j}) \right) d\vec{r}_t d\vec{r}.$$

Окончательно получим

$$\hat{F}_{syn,\sigma}(\vec{r}_2) = \int_D \dot{F}(\vec{r}) \Psi_{\otimes}(\vec{r}-\vec{r}_2) e^{-jk\bar{\Theta}_j(\vec{r}-\vec{r}_2)} d\vec{r}. \quad (17)$$

В этом, как и в предыдущем случае, первичная и вторичная обработка по разрешающей способности также практически не отличаются, т.е. синтез апертуры отсутствует.

### 4. Синтез апертуры в зоне Фраунгофера в случае телескопического обзора

В случае телескопического обзора исследуемой поверхности, рис. 2, в, изменяется параметр  $\vec{r}_t$  и соответственно положение области наблюдения и регистрации поля  $D'$ . Но путем изменения АФР  $\hat{I}(\vec{r}', \vec{r}_t, \vec{r}_1)$  в области  $D'$  при различных ее положениях фиксируется пространственное положение функции  $\Psi(\vec{r}-\vec{r}_1) = \Psi(\vec{r}-\vec{r}_{10})$ , где  $\vec{r}_1 = \vec{r}_{10} = const$ . Пространственные размеры этой функции являются внешними размерами синтезируемого изображения, т.е. его областью определения. Будем полагать, что при перефокусировке функция  $\Psi(\vec{r}-\vec{r}_{10})$  меняет свой вид не существенно. Теоретически возможные размеры области изменения переменной  $\vec{r}_t$  (синтезированной апертуры) и области соответствующих изменений угловых положений участка поверхности, выделенного функцией  $\Psi(\vec{r}-\vec{r}_{10})$  относительно положения первичной апертуры  $D'$ , можно не ограничивать. Однако в этой задаче область изменения переменной  $\vec{r}_t$  выбираем сравнительно небольшой, чтобы выполнялось приближение дальней зоны Фраунгофера, т.е. учитывались только линейные члены разложения в ряд Тейлора расстояния как функции пространственных координат.

Фиксируя функцию  $\Psi(\vec{r}-\vec{r}_1)$  в окрестности переменной  $\vec{r}_1 = \vec{r}_{10}$ , выразим подынтегральное вы-

ражение (6) с учетом (4) и (5) в виде явной зависимости от переменной  $\vec{r}_i$

$$\begin{aligned} \widehat{F}(\vec{r}_i, \vec{r}_{10}) &= \\ &= \int_D \dot{F}(\vec{r}) \Psi(\vec{r} - \vec{r}_{10}) e^{jk(\vec{r}_{10} - \vec{r})(\vec{r} - \vec{r}_{10})/H} d\vec{r}. \end{aligned} \quad (18)$$

Умножая это выражение на функцию  $\Psi(\vec{r} - \vec{r}_{10})$  и на комплексно сопряженный множитель (4), выраженный в виде функции переменной  $\vec{r}_i$

$$\varphi^*(\vec{r}_2, \vec{r}_{10}, \vec{r}_i) = e^{jk\vec{\Theta}(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10})} = e^{-jk(\vec{r}_{10} - \vec{r}_i)(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10})/H}, \quad (19)$$

и интегрируя по этой переменной, находим синтезированное изображение ( $\vec{r}_{10} = const$ )

$$\begin{aligned} \widehat{F}_{syn, \Theta}(\vec{r}_2, \vec{r}_{10}) &= \\ &= \int_{D_{\vec{r}_i}} \widehat{F}(\vec{r}_i, \vec{r}_{10}) \Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10}) \varphi^*(\vec{r}_2, \vec{r}_{10}, \vec{r}_i) d\vec{r}_i = \\ &= \int_D \dot{F}(\vec{r}) \Psi(\vec{r} - \vec{r}_{10}) \Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10}) \times \\ &\times \int_{D_{\vec{r}_i}} e^{jk(\vec{r}_{10} - \vec{r}_i)(\vec{r} - \vec{r}_{10})/H} e^{-jk(\vec{r}_{10} - \vec{r}_i)(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10})/H} d\vec{r}_i \quad (20) \\ &= \int_D \dot{F}(\vec{r}) \Psi(\vec{r} - \vec{r}_{10}) \Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10}) e^{jk\vec{r}_{10}(\vec{r} - \vec{r}_2)/H} \times \\ &\times \int_{D_{\vec{r}_i}} \exp\{-jk\vec{r}_i(\vec{r} - \vec{r}_2)/H\} d\vec{r}_i d\vec{r}, \end{aligned}$$

где  $\vec{r}_i \in D_{\vec{r}_i}$ ,  $x_i \in (-X_t/2 + x_{10}, X_t/2 + x_{10})$ ,

$$\begin{aligned} y_i &\in (-Y_t/2 + y_{10}, Y_t/2 + y_{10}) \\ &\int_{D_{\vec{r}_i}} \exp\{-jk\vec{r}_i(\vec{r} - \vec{r}_2)/H\} d\vec{r}_i = \\ &= \Psi_{syn}(\vec{r} - \vec{r}_2) \exp[jk\vec{\Theta}_{10}(\vec{r} - \vec{r}_2)], \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{syn}(\vec{r} - \vec{r}_2) &= X_t Y_t \text{sinc}\{0,5jkX_t(x - x_2)/H\} \times \\ &\times \text{sinc}\{0,5jkY_t(y - y_2)/H\}. \end{aligned} \quad (22)$$

При узкой аппаратной функции системы синтеза изображения

$$\begin{aligned} \Psi(\vec{r} - \vec{r}_{10}) \Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10}) &\approx \\ &\approx |\Psi(\vec{r} - \vec{r}_{10})|^2 \approx |\Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10})|^2. \end{aligned} \quad (23)$$

Тогда синтезированное изображение, полученное при телескопическом обзоре в зоне Фраунгофера в результате обработки первичного изображения можно представить таким выражением

$$\begin{aligned} \widehat{F}_{syn, \Theta}(\vec{r}_2, \vec{r}_{10}) &= \int_D \dot{F}(\vec{r}) |\Psi(\vec{r} - \vec{r}_{10})|^2 \times \\ &\times \Psi_{syn}(\vec{r} - \vec{r}_2) \exp[jk\vec{\Theta}_{10}(\vec{r} - \vec{r}_2)] d\vec{r} \approx \\ &\approx |\Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10})|^2 \times \\ &\times \int_D \dot{F}(\vec{r}) \Psi_{syn}(\vec{r} - \vec{r}_2) \exp[jk\vec{\Theta}_{10}(\vec{r} - \vec{r}_2)] d\vec{r}, \end{aligned} \quad (24)$$

где множитель  $\exp[jk\vec{\Theta}_{10}(\vec{r} - \vec{r}_2)]$  существенного значения не имеет при симметричном расположении областей  $D'$  относительно области определения изо-

бражения  $|\Psi(\vec{r} - \vec{r}_{10})|^2$ . В связи с этим можно перенести начало координат в точку  $\vec{r}_{10}$ , т.е. считать, что  $\vec{r}_{10} = 0$  и  $\exp[jk\vec{\Theta}_{10}(\vec{r} - \vec{r}_2)] = 1$ . Разрешающая способность синтезированного изображения в случае телескопического обзора выше чем у первичного и равна ширине функции (22) по первым нулям

$$\Delta x_{syn, \Theta} = \lambda H / X_t, \quad \Delta y_{syn, \Theta} = \lambda H / Y_t. \quad (25)$$

Относительно вертикального направления вместо координат  $\vec{r}_i$  можно перейти к координатам в виде направляющих косинусов

$$(\vec{r}_{10} - \vec{r}_i) / H \approx \vec{\Theta}, \quad (26)$$

указывающих направления на точку  $\vec{r}_{10}$  от начал координат областей  $D'$  в различных их положениях в плоскости наблюдения. Тогда

$$\varphi^*(\vec{r}_2, \vec{r}_{10}, \vec{r}_i) \approx \exp[-jk\vec{\Theta}(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10})], \quad (27)$$

и можно синтезировать изображение путем интегрирования по направляющим косинусам  $\vec{\Theta}$

$$\begin{aligned} \widehat{F}_{syn}(\vec{r}_2, \vec{r}_{10}) &= \int_{\Theta} \widehat{F}(\vec{\Theta}, \vec{r}_{10}) \varphi^*(\vec{r}_2, \vec{r}_{10}, \vec{\Theta}) d\vec{\Theta} = \\ &= \int_D \dot{F}(\vec{r}) \Psi(\vec{r} - \vec{r}_{10}) \Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10}) \times \\ &\times \int_{\Theta} \exp[jk\vec{\Theta}(\vec{r} - \vec{r}_{10})] \exp[-jk\vec{\Theta}(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10})] d\vec{\Theta} d\vec{r} \approx \\ &\approx |\Psi(\vec{r}_2 - \vec{r}_{10})|^2 \int_D \dot{F}(\vec{r}) \int_{\Theta} \exp[jk\vec{\Theta}(\vec{r} - \vec{r}_2)] d\vec{\Theta} d\vec{r}, \end{aligned} \quad (28)$$

где  $\Psi_{syn}(\vec{r} - \vec{r}_2) = \int_{\Theta} \exp[jk\vec{\Theta}(\vec{r} - \vec{r}_2)] d\vec{\Theta}$ . (29)

Полученные алгоритмические операции интегрирования по направляющим косинусам и соответствующие им аппаратные функции требуют более детального исследования, которое выходит за рамки данной работы.

## Выводы

Рассмотрены основные операции обработки сигналов в оптических и радиолокационных системах восстановления когерентных изображений в зоне Фраунгофера. Показано, что первичные когерентные изображения являются скользящим кратко масштабным преобразованием Фурье истинных изображений поверхности. Предложено выполнять вторичную обработку, формировать так называемые синтезированные изображения, с учетом пространственно-временной обработки сигналов в пространственно-распределенных системах. Раскрыты алгоритмы вторичной обработки в случае веерного, последовательного и телескопического обзоров подстилающих поверхностей. Исследования точности синтезированных когерентных изображений поверхности показывают, что при веерном и последовательном обзоре разрешающая способность по пространственным координатам не увеличивается. В тоже время при телескопическом обзоре пространственное разрешение повысилось пропорционально размеру области синтеза.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Волосюк В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко. Под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: Физматлит, 2008. – 740 с.
2. Hunziker, O. V. Morozov, O. V. Volosyuk, V. K. Volosyuk and S. S. Zhyla, "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), Kharkiv, 2016, pp. 1-4. doi: 10.1109/MSMW.2016.7538007
3. Верба В. С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
4. Антипов В. Н. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов, В. Т. Горяинов [и др.]. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
5. V. K. Volosyuk and S. S. Zhyla, "Optimal radar cross section estimation in synthetic aperture radar," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 189-193.
6. V. K. Volosyuk, S. S. Zhyla, M. O. Antonov and O. A. Khaleev, "Optimal acquisition mode and signal processing algorithm in synthetic aperture radar," 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kiev, 2017, pp. 511-516. doi: 10.1109/ELNANO.2017.7939804

## REFERENCES

1. Volosyuk, V. K., Kravchenko, V. F. (2008), Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya i radiolokatsii [Statistical theory of radio engineering systems of remote sensing and radar], Fizmatlit, Moscow, 740 p.
2. Hunziker P., Morozov O. V., Volosyuk O. V., Volosyuk V. K., Zhyla S. S. "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), Kharkiv, 2016, pp. 1-4. doi: 10.1109/MSMW.2016.7538007
3. Verba V. S., Neronskiy L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. (2010), Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya [Space-borne Earth surveillance radar systems], Radiotekhnika, Moscow, 680 pp.
4. Antipov V. N., Goriainov V. T., Kulin A. N., Mansurov V.V., Okhonskii A.G. (1988), Radiolokatsionnyye stantsii s tsifrovym sintezirovaniyem apertury anteny [Synthetic aperture radar stations with digital processing], Radio i Sviaz', Moscow, 304 p.
5. Volosyuk, V.K., Zhyla, S.S. Optimal radar cross section estimation in synthetic aperture radar, 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017, Kiev, pp. 189-193. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100471
6. Volosyuk V. K., Zhyla S. S., Antonov M. O., Khaleev O. A. "Optimal acquisition mode and signal processing algorithm in synthetic aperture radar," 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kiev, 2017, pp. 511-516. doi: 10.1109/ELNANO.2017.7939804/

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л. Ф. Купченко,

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

Received (Надійшла) 26.05.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.07.2018

### Синтез когерентних зображень поверхонь просторово-розподіленими багатоканальними системами в зоні Фраунгофера

В.К. Волосюк, С.С. Жила, А. І. Помазан

Розкрито основні етапи обробки електромагнітного поля в багатоканальних оптичних і радіотехнічних системах формування первинних когерентних зображень поверхонь в зоні Фраунгофера. Досліджено точність відновлення первинних когерентних зображень та запропоновані варіанти підвищення роздільної здатності в просторово-розподілених і багатоканальних системах з синтезом апертури. Розглянуто кілька варіантів вторинної обробки первинних когерентних зображень при виявленні, послідовного та телескопічного оглядів підстильної поверхні. Показано, що в далекій зоні Фраунгофера вдається виконати синтез апертури і підвищити роздільну здатність тільки у разі телескопічного огляду.

**Ключові слова:** синтезоване зображення, дальня зона Фраунгофера, багатопозиційна обробка.

### Synthesis of surfaces coherent images by spatially distributed multichannel systems in the Fraunhofer region

V. Volosyuk, S. Zhyla, A. Pomazan

The geometry of remote sensing problem in the far field Fraunhofer region is proposed and analytical expressions for the observed field in every point of the receiving area are obtained. The conception of primary images recovering is proposed. It is based on application of the integral transformation with the kernel of inverse Fourier transform. It is shown that the primary coherent images are sliding short-scale Fourier transformation of the ideal surface images. This result corresponds to the classical theory of resonant scattering. The main mathematical operations of the received electromagnetic field processing in multichannel optical and radio engineering systems are developed. The resolution of the primary coherent images is analyzed and possible ways of its enhancement based on secondary multi-channel and multi-position signal processing and aperture synthesis method are shown. It is suggested to call images obtained after secondary processing the synthesized coherent images, and algorithmic or physical operations of such processing to call aperture synthesis. To restore synthesized coherent images it is proposed to apply inverse short-scale Fourier transformation to the primary coherent images. To study the possibilities synthesized coherent images recovering, several geometries for surface remote sensing are proposed in the Fraunhofer region. Observation methods in accordance with these geometries are called the fan mode, serial mode and spotlight mode. Several algorithmic operations for recovering synthesized images were developed according to these modes. Studies of the obtained results show that in the far-field Fraunhofer region it is possible to perform aperture synthesis and to increase the spatial resolution only in the case of spotlight mode.

**Keywords:** synthesized image, far-field Fraunhofer region, multiposition processing.