



## СИНТЕЗ МНОГОМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ РЛС НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОГО РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ В ПРИБЛИЖЕНИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

**А. Н. ЗУБАРЕВ**  
**А. А. ЛУЧИН**  
**А. К. СТРОЕВ**

*Институт проблемных  
исследований Российской  
академии естественных  
наук,  
г. Серпухов*

*e-mail:  
ipraes@online.stack.net  
la210594@yandex.ru  
ak.stroev@gmail.com*

На основе решения обратной задачи дифракции (ОЗД) в приближении физической оптики (ФО) проведен синтез двух- и трехмерных изображений в многопозиционной системе РЛС. Показано, что для практической реализации такого подхода достаточно одной пачки широкополосных сигналов при условии ее когерентной обработки.

Ключевые слова: синтез радиоизображений, обратная задача дифракции, многопозиционная система РЛС, томографирование.

Результат, полученный Н. Боярским [3], и известный как физико-оптическое тождество (ФОТ), содержит решение обратной задачи дифракции (ОЗД) в приближении физической оптики (ФО). ФОТ сводится к трехмерному преобразованию Фурье-функции от комплексного коэффициента рассеяния (ККР) в пространстве угло-частотных измерений. Эта функция содержит сумму ККР, измеренных в «диаметральных» направлениях, поэтому может быть получена лишь в «лабораторных» условиях.

В практических приложениях приходится рассматривать угло-частотное преобразование типа Фурье только от ККР, полученного в некоторой области этого пространства. Здесь, в сущности, имеет место обобщение ФОТ, поскольку изменяется вид и трактовка получаемых решений. Причем, их томографическая сущность сохраняется, т.е. трехмерные или двумерные изображения формируются как результат обратного проектирования соответствующих проекций меньшей размерности [1,2].

В частных случаях обобщенное ФОТ приводит к получению радиолокационных изображений (РИ) различного вида за счет сверхразрешения, которое физически определяется обращенным синтезом апертуры в полосе частот сигнала. Следует также отметить, что неполнота частотных измерений в радиолокации обычно соответствует отсутствию низкочастотных составляющих в спектре сигнала. По сути это эквивалентно дифференцированию РИ и имеет регуляризирующий характер, приводящий к получению изображений электродинамически сложных рассеивающих объектов в виде набора «блестящих точек». В этом смысле ФОТ является теоретической основой разнообразных методов получения РИ с позиций не только ФО, но и в рамках физической теории дифракции [1].

**Цель статьи состоит в синтезе многомерных изображений в многопозиционной системе РЛС на основе обобщенного решения обратной задачи дифракции в приближении физической оптики.**

При малых угловых (временных) интервалах измерений с использованием широкополосных сигналов появляется возможность получать двумерные картины. Увеличение угловых (временных) интервалов когерентных измерений на практике проблематично, поэтому целесообразен переход в трехмерное пространство на основе метода томографирования [1, 2].

В работах [4, 5] рассмотрены некоторые случаи решения ОЗД в приближении ФО и разнесенного приема-передачи в классической постановке Н.Боярского. Обобщая эти результаты, можно показать, что для разнесенного приема, когда обращенный синтез

апертуры с использованием одной пачки отраженных широкополосных сигналов производится как на приеме-передающей позиции, так и на приемной, можно реализовать получение трехмерных РИ. Этот результат распространяется на случай использования произвольного числа приемных (приемо-передающих) позиций.

В частности, при активно-пассивной локации существует возможность получить сразу два двумерных изображения в различных плоскостях в пространстве. В результате, создаются предпосылки для получения трехмерного изображения на основе томографирования (обратного проецирования) с использованием единственной пачки широкополосных сигналов в многопозиционной системе. В сущности, разнесенный прием сигналов дает принципиально новое качество, поскольку происходит увеличение размерности пространства, в котором синтезируется РИ.

Рассмотрим частный случай многопозиционной системы РЛС, включающий несколько приемных или приемо-передающих РЛС – двухпозиционную систему РЛС, состоящую из одной активной (приемо-передающей) позиции и одной пассивной (приемной) позиции, соответственно РЛС-А и РЛС-П (рис. 1).

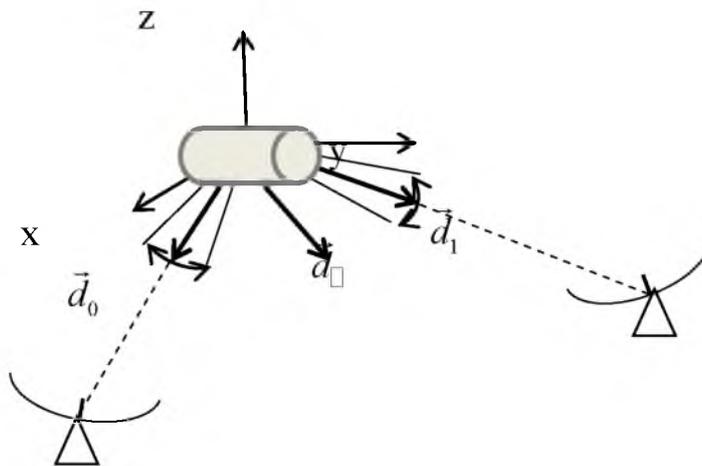


Рис. 1. Геометрические соотношения

Здесь  $\vec{d}_0$  – единичный вектор, направленный от цели на РЛС-А, а вектор  $\vec{d}_1$  – на РЛС-П. Характер изменения этих векторов будет определяться расположением позиций, а также параметрами движения и вращения объекта и, в общем случае, может быть достаточно сложным. На малых угловых (временных) интервалах обращенного синтеза апертуры может быть принят упрощенный вариант, когда можно считать изменения углов в плоскости получения изображений близкими клинейным.

В соответствии с обобщенным тождеством Боярского, радиолокационное изображение, получаемое при зондировании и приеме сигналов РЛС-А может быть представлено в виде [1]:

$$I_0(\vec{x}) = C_0 \int_D W(\vec{k}) \cdot \dot{A}(\vec{k}) \cdot e^{j\vec{k} \cdot \vec{x}} d\vec{k}, \quad (1)$$

где  $\vec{k} = k\vec{d}_0 = \frac{2\omega}{c}\vec{d}_0 = \frac{4\pi f}{c}\vec{d}_0$ ,  $\vec{x} = (x, y, z)$  – вектор в пространстве координат объекта,

$\dot{A}(\vec{k})$  – комплексный коэффициент рассеяния,  $W(\vec{k})$  – весовая функция, которая в основном определяется спектром сигнала,  $D$  – область угло-частотных измерений,  $C_0$  – константа.

Соответственно приобращенном синтезе апертуры на РЛС-П РИ определяется соотношением



$$I_1(\vec{x}) = C_1 \int_{D_\Delta} W(\vec{k}_\Delta) \cdot \dot{A}(\vec{k}_\Delta) \cdot e^{j\vec{k}_\Delta \cdot \vec{x}} d\vec{k}_\Delta, \quad (2)$$

где  $\vec{k}_\Delta = \frac{\omega}{c}(\vec{d}_0 + \vec{d}_1)$ ,  $D_\Delta$  – область угло-частотных измерений,  $\vec{d}_\Delta = \vec{d}_0 + \vec{d}_1$  – «вектор локации» для двухпозиционной системы,  $W(\vec{k}_\Delta)$  – также весовая функция,  $C_1$  – константа.

Для малых угловых интервалов изменения вектора локации  $\vec{d}_0$  в случае, когда его изменение сводится к вращению в какой-либо одной плоскости, соотношение (1) можно записать как

$$I_0(\vec{x}'_0) = C_0 \int W(\omega) \cdot \dot{A}(\omega, \varphi) e^{j\frac{2\omega}{c}(x'_0 + y'_0 \cdot \varphi)} d\omega \cdot d\varphi, \quad (3)$$

где область интегрирования по частоте определяется шириной полосы сигнала, а область интегрирования по угловой координате – интервалом синтеза апертуры (длительностью пачки). Здесь введена новая связанная с объектом система координат. Ось  $x'$  этой системы в один из моментов времени совпадает с направлением вектора  $\vec{d}$ , ось  $y'$  направлена перпендикулярно ей в плоскости вращения  $\vec{d}$ . Тогда, при малых угловых интервалах верно

$$\vec{d} \cdot \vec{x} = x' \cos \varphi + y' \sin \varphi \approx x' + y' \varphi.$$

Аналогично соотношение (2) преобразуется к виду:

$$I_1(\vec{x}'_1) = C_1 \int W(\omega) \cdot \dot{A}(\omega, \psi) e^{j\frac{2\cos(\frac{\theta}{2})\omega}{c}(x'_1 + y'_1 \cdot \psi)} d\omega \cdot d\psi, \quad (4)$$

где  $\theta$  – угол между векторами  $\vec{d}_0$  и  $\vec{d}_1$  (бистатистический угол),  $\psi$  – угол, характеризующий изменение вектора  $\vec{d}_\Delta = \vec{d}_0 + \vec{d}_1$ .

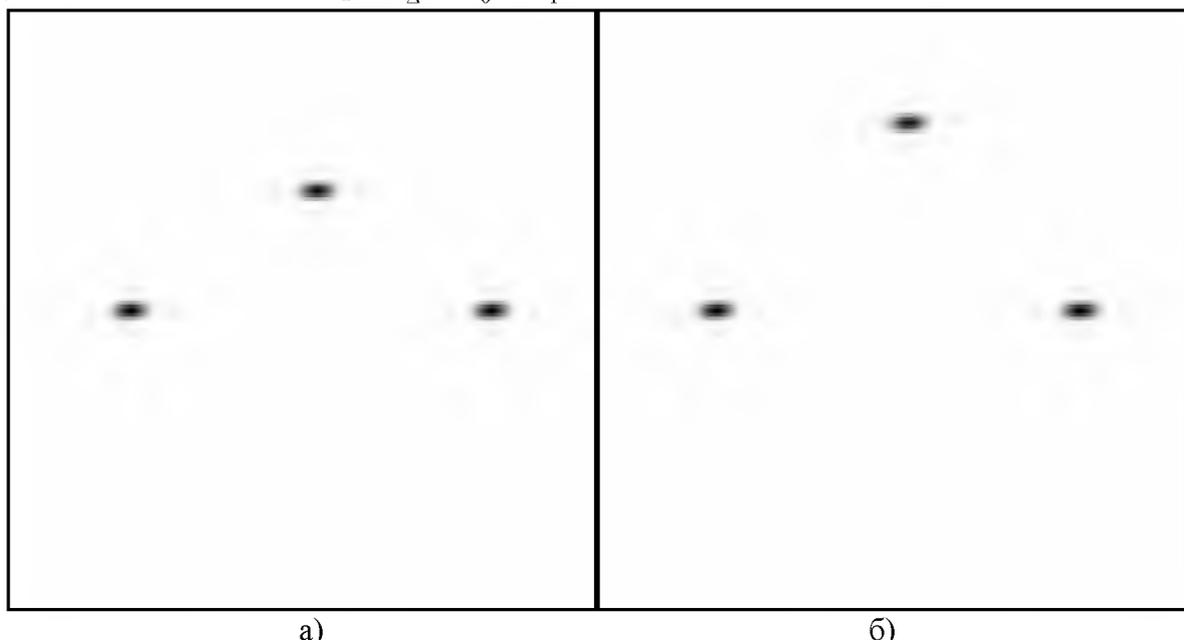


Рис. 2. Двумерные радиолокационные изображения трехточечной цели, полученные на РЛС-А (рис. 2а) и РЛС-П (рис. 2б) (полоса частот сигнала составила 300 МГц при несущей частоте 10 ГГц и изменении ракурса 0,1 рад.)



Трехмерное изображение получается методом томографирования (обратного проецирования) в пространстве, причем в качестве проекций выступают двумерные изображения полученные в двух различных плоскостях. Условие, при котором восстанавливается трехмерное РИ в сущности соответствует уравнению «перпендикуляра» к парциальному (меньшей размерности) изображению и, как следует из (1), (2) есть  $\vec{\delta} \cdot \vec{d} = const$ . Затем комплексные значения парциальных изображений суммируются в трехмерном пространстве в области реального расположения цели.

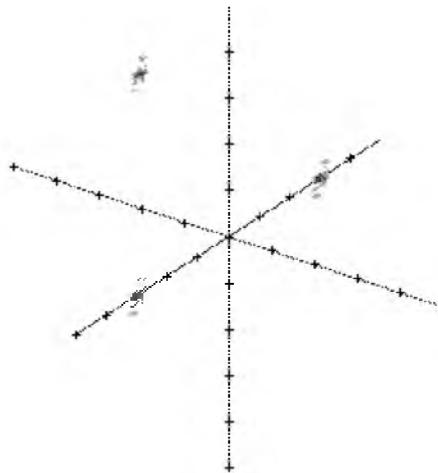


Рис. 3. Трехмерное РИ трехточечной цели, восстановленное из проекций, приведенных на рис. 2, цена деления по осям координат 1 м

Таким образом, проведен синтез многомерных изображений многопозиционной системе РЛС на основе обобщенного решения обратной задачи дифракции в приближении физической оптики. Практически для этого достаточно реализовать зондирование, когерентный прием и обработку сигналов одной пачки широкополосных сигналов на разных позициях.

#### Литература

1. А.А. Лучин Методы приближенного решения обратной задачи дифракции в радиолокации. Зарубежная радиоэлектроника, 1999, №8, с.30-44.
2. W.M. Boerner, C.M. Ho, B.Y. Foo Use of Radon's projection theory in electromagnetic inverse scattering. IEEE Trans., 1981, v.AP-29, no. 2, pp.336-341.
3. N. Bojarski. A survey of the physical optics inverse scattering identity. IEEE Trans., 1982, VAP-30, no. 5, pp. 980-989.
4. C.K. Chan, N.H. Farhat. Frequency swept tomographic imaging of three-dimensional perfectly conducting objects. IEEE Trans., 1981, v.AP-29, no. 2, pp.312-319.
5. S. Rosenbaum-Raz. On scatterer reconstruction from far-field data. IEEE Trans., 1976, v.AP-24, no.1, pp.66-70.

### SYNTHESIS OF MULTIDIMENSIONAL IMAGES IN MULTIPosition RADAR SYSTEMS BASED ON GENERALIZED SOLUTION OF INVERSE DIFFRACTION PROBLEM IN PHYSICAL OPTICS APPROXIMATION

**A.N. ZUBAREV**  
**AA LUCHIN**  
**A.K. STROEV**

*Institute of problem research,  
Serpukhov*  
e-mail:  
la210594@yandex.ru  
ak.stroev@gmail.com

Based on solving of inverse diffraction problem in physical optics approximation, two- and three-dimensional images synthesis in multiposition radar system is performed. It is shown, that for practical realization of that approach one pack of signals is enough provided its coherent processing.

Key words: radar images synthesis, inverse diffraction problem, multiposition radar system, tomography.