

## МЕТОД ИНВЕРСНОГО СИНТЕЗИРОВАНИЯ ДВУМЕРНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ СОПРОВОЖДАЕМОГО ОБЪЕКТА В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

*С.В. Ковалев, С.М. Нестеров, И.А. Скородумов*

2 ЦНИИ МО РФ

Одним из путей решения задачи распознавания наблюдаемого радиолокационными средствами объекта является формирование методом инверсного синтезирования апертуры его двумерных радиолокационных изображений (РЛИ).

Существующие методы формирования РЛИ объектов путем инверсного синтезирования апертуры [1-2] применимы на практике только в условиях безэховых камер и специализированных измерительных комплексов и полигонов [3]. Для получения РЛИ в реальных условиях, когда принятие решения о типе объекта и необходимости его сопровождения имеет особую значимость, требуется их доработка в части определения угла локации и координат центра вращения объекта.

Целью данной работы является обеспечение возможности формирования двумерных РЛИ сопровождаемого объекта в реальных условиях.

Наложим на объект сверху в плане произвольную прямоугольную координатную сетку размером  $N \times M$  элементов и представим амплитуду  $E$  рассеянного объектом поля, получаемую в зависимости от длины волны  $\lambda$  и угла локации  $\theta$  и откалиброванную в значениях эффективной площади рассеяния (ЭПР), в виде суперпозиции амплитуд этих элементов:

$$E(\lambda, \theta) = \sqrt{\sigma(\lambda, \theta)} e^{j\varphi(\lambda, \theta)} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sqrt{\sigma_{nm}} e^{-j\varphi_{nm}} \quad (1)$$

где  $\sigma, \varphi$  - ЭПР и фаза рассеянного объектом сигнала;

$\sigma_{nm} = \sigma(x_n, y_m)$  - ЭПР элемента с координатами  $(x_n, y_m)$ ;

$\varphi_{nm} = 2(\bar{R}_{nm} \cdot \bar{k}_i) = 2\pi \left( \frac{2}{\lambda} x_n \cos \theta + \frac{2}{\lambda} y_m \sin \theta \right)$  - фаза этого элемента;

$\bar{R}_{nm}$  - радиус-вектор этого элемента в плоскости  $xOy$ ;  $\bar{k}_i = k_0 \bar{e}_i$ ;  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;

$\bar{e}_i = (\cos \theta, \sin \theta)$  - единичный вектор проекции направления локации в плоскости  $xOy$ .

Введем независимые переменные  $f_x = \frac{2}{\lambda} \cos \theta$ ,  $f_y = \frac{2}{\lambda} \sin \theta$ , понимая под ними условные пространственные частоты, и перепишем (1), выразив амплитуду  $E$  в зависимости от этих частот:

$$E(f_x, f_y) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sqrt{\sigma(x_n, y_m)} e^{-j2\pi(f_x x_n + f_y y_m)} \quad (2)$$

Выражение (2) является прямым преобразованием Фурье амплитуд поля в области размером  $N \times M$  элементов из пространства координат в пространство условных частот.

Выполнив обратное преобразование Фурье амплитуды рассеянного поля по условным частотам, получим амплитуду поля, выраженную относительно координат:

$$E(x_n, y_m) = \sum_{n_1=1}^N \sum_{m_1=1}^M E(f_{x_{n_1}}, f_{y_{m_1}}) e^{j2\pi(f_{x_{n_1}} x_n + f_{y_{m_1}} y_m)} \quad (3)$$

Множество амплитуд поля элементов с координатами  $(x_n, y_m)$ , вычисленных по выражению (3), представляет собой двумерное РЛИ объекта.

На практике амплитуду отраженного объектом сигнала регистрируют в зависимости от длины волны зондирующего сигнала и угла локации. Поэтому, чтобы получить двумерное изображение объекта по выражению (3), необходимо регистрировать отраженный сигнал для дискретных значений длины волны и угла локации, определяемых соотношениями

$$\lambda_{n_1 m_1} = \frac{2}{\sqrt{f_{x_{n_1}}^2 + f_{y_{m_1}}^2}}, \quad \theta_{n_1 m_1} = \arctg \frac{f_{y_{m_1}}}{f_{x_{n_1}}}. \quad (4)$$

С учетом (4) выражение (3) удобно переписать в виде

$$E(x_n, y_m) = \sum_{n_1=1}^N \sum_{m_1=1}^M E(\lambda_{n_1 m_1}, \theta_{n_1 m_1}) e^{j2\pi(f_{x_{n_1}} x_n + f_{y_{m_1}} y_m)} \quad (5)$$

Разрешающая способность получаемых двумерных РЛИ объекта по координатам  $x$  и  $y$

равна, соответственно,  $\Delta x = \frac{1}{\max f_x - \min f_x}$  и  $\Delta y = \frac{1}{\max f_y - \min f_y}$  и зависит от

диапазона реализованной перестройки частоты и интервала углов локации. При  $\Delta x = \Delta y$  и наблюдении объекта с носа необходимый диапазон углов наблюдения  $\pm \Delta \theta$  и отношение минимальной  $\lambda_{\min}$  и максимальной  $\lambda_{\max}$  длины волны диапазона

перестройки связаны уравнением  $\left[ \left( \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^2 + 4 \right] \cos^2 \Delta \theta - 2 \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \cos \Delta \theta - 3 = 0$ .

Потенциально достижимая разрешающая способность соответствует значениям

$\sin \theta = \pm 1$  и  $\cos \theta = \pm 1$  и равна  $\Delta x = \Delta y = \frac{\lambda_{\min}}{4}$ .

Из (5) следует, что для получения двумерного РЛИ объекта необходимо измерить амплитуду отраженного от него поля для  $N \times M$  значений длин волн и такого же количества углов локации, определенных формулами (4). Это обеспечивается при наличии необходимой приемопередающей аппаратуры и системы жесткого крепления исследуемого объекта, т.е. в лабораторных условиях. Для получения двумерных РЛИ в условиях полета предлагается следующая последовательность действий.

На первом этапе проводится радиолокационное наблюдение объекта в свободном пространстве с помощью линейно частотно-модулированного сигнала и использования инверсного синтезирования апертуры. Одновременно с регистрацией отраженных сигналов формируется множество из  $K$  дальностных РЛИ объекта [1], при этом период повторения зондирующего сигнала выбирается так, чтобы от зондирования к зондированию изменение разности фаз характерных откликов получаемых изображений не превышало  $2\pi$ .

Дальностные изображения формируются вдоль оси  $Oy$  за счет линейной перестройки частоты в полосе  $\Delta f = \frac{1}{\Delta \tau} = \frac{c}{2 \Delta y}$ , где  $\Delta \tau$  и  $\Delta y$  - разрешающие способности по времени и дальности,  $c$  - скорость света.

Учитывая незначительные изменения характеристик дальностных откликов объекта, измеренный сигнал приводится к одинаковой дальности с помощью значений фазы любой выбранной точки (опорной точки), устойчиво наблюдаемой во всех РЛИ.

На втором этапе вычисляем углы локации  $\theta_k$  каждого из сфокусированных дальностных изображений, для чего определяем значения фаз двух устойчивых откликов, расположенных на возможно большом удалении друг от друга.

На третьем этапе среди полученных значений  $\theta_k$  выбираются значения углов  $\theta_{n_1 m_1}$ , которые, вместе с формируемыми в диапазоне перестройки зондирующего сигнала значениями длины волны  $\lambda_{n_1 m_1}$ , требуются в соответствии с (4) для привязки отраженного сигнала к условным частотам  $f_{x_{n_1}}$  и  $f_{y_{m_1}}$ .

Результаты формирования предложенным методом двумерного изображения самолета в условиях полета, полученные путем математического моделирования, приведены на рисунке 1.

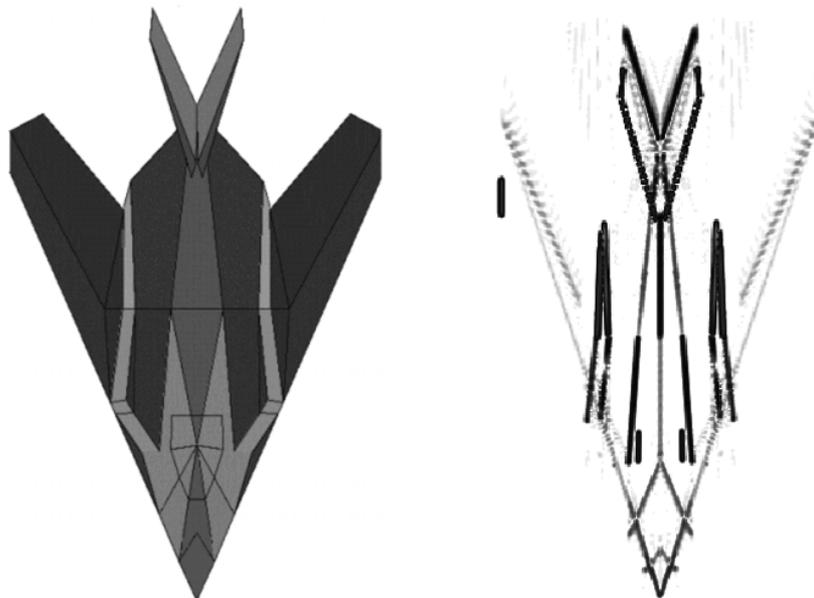


Рисунок 1

При моделировании заданы зондирующий линейно частотно-модулированный сигнал сантиметрового диапазона длин волн с 30% перестройкой частоты и траектория полета самолета, обеспечивающая его радиолокационное наблюдение в секторе углов  $0^\circ \pm 8^\circ$  с носа.

Отраженный от самолета сигнал рассчитывался по разработанному фацетному представлению его планера с помощью соотношений из работы [4]. В левой половине

рисунка изображена проекция в плане использованного при расчете отраженных сигналов фацетного представления поверхности планера, в правой половине рисунка – его РЛИ, полученное в соответствии с предложенным методом. Их сравнение показывает, что наложение получаемых изображений на имеющиеся фотографии позволяет идентифицировать наблюдаемый объект.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нестеров С.М., Силкин А.Т., Скородумов И.А., Ягольников С.В. Особенности формирования двумерных радиолокационных изображений объектов ступенчатыми ЛЧМ-сигналами. - «Радиотехника» (журнал в журнале), 2001, №5.
2. Ковалев С.В., Нестеров С.М., Скородумов И.А., Ягольников С.В. Формирование радиолокационных изображений объектов при многочастотном импульсном зондировании. - «Радиотехника» (журнал в журнале), 2007, №6.
3. Эталонный радиолокационный измерительный комплекс «ЭРИК-1». Оружие и технологии России. Энциклопедия 21 век. Том IX. Противовоздушная и противоракетная оборона. – М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2005.
4. Ковалев С.В., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Расчет радиолокационных характеристик объектов с учетом влияния поверхностных волн и щелевых образований. - «Радиотехника и электроника», 1998, т.43, №1.