

УДК 624.184.466

## **Методика цифровой коррекции двумерных радиолокационных изображений космических объектов**

*Иванов А.И., студент  
кафедры «Технологии приборостроения»,  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Чепурнов И.А., к.т.н., доцент,  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)*

Одним из перспективных направлений расширения информационных возможностей современных радиолокационных станций (РЛС) обнаружения и распознавания космических объектов (КО) является радиовидение. РЛС радиовидения позволяют формировать двумерные радиолокационные изображения (РЛИ) объектов, находящихся в зоне облучения. Постановка натуральных экспериментов для описания вторичного излучения КО в интересах получения РЛИ достаточно сложна. Требуется получать многочисленные отклики различных типов и классов целей на разнообразные виды зондирующих сигналов. Между тем, необходимые результаты можно получить путем математического моделирования.

В РЛС радиовидения процесс анализа двумерных РЛИ КО наряду с автоматическим, может носить и интерактивный характер, заключающийся в возможности оператора-аналитика вмешиваться в процесс обработки и анализа. Интерактивный процесс анализа характеризуется требованием обеспечения высококачественной визуализации формируемых РЛИ КО.

При моделировании процесса формирования двумерных радиолокационных изображений КО в РЛС радиовидения важную роль играют алгоритмы восстановления этих изображений. Задача восстановления изображений заключается в том, чтобы по наблюдаемому двумерному массиву РЛИ найти более полные характеристики наблюдаемого объекта. Алгоритмы, реализующие классические методы цифровой обработки радиолокационной информации [1, 2, 3] зачастую рассчитаны на автоматический процесс анализа выходных данных и, соответственно, не обеспечивают высокое качество их визуализации. Предлагаемая методика позволяет учитывать в

алгоритмах восстановления влияние искажений, обусловленных особенностями цифровой обработки отраженных сигналов, ракурса наблюдения модельного объекта, фоновой обстановки, а также конструктивными особенностями РЛС радиовидения.

Продемонстрируем основные этапы предлагаемой методики, программно-реализованные в алгоритме восстановления РЛИ модельного КО, представленного системой из одиннадцати локальных центров рассеяния (ЛЦР). Основные этапы данного алгоритма представлены на рис. 1.



Рис. 1. Основные этапы алгоритма восстановления РЛИ модельного КО

Программная реализация производилась в системе MATLAB, обладающей хорошо развитыми графическими возможностями для визуализации данных и использующей математический аппарат, опирающийся на матричные вычисления. Изометрическое и картографическое представления двумерной характеристики рассеяния модельного объекта приведены на рис. 2.

Обобщения физико-оптического решения обратной задачи дифракции на тела негладкой формы [4] позволяют считать известным местоположение  $(x_n, y_n)$  ЛЦР и их количество  $N$ , поскольку они получаются в результате модельных разбиений. При этом широкополосный отклик объекта представляется суперпозицией откликов отдельных ЛЦР. Таким образом, обобщенную модель РЛИ КО можно описать следующим выражением:

$$G(x, y) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot \left( e^{j2k_{x0}(x-x_n)} \cdot \frac{L_x}{\pi} \cdot \text{sinc} \left( \frac{L_x}{\pi} (x-x_n) \right) \right) \left( e^{j2k_{y0}(y-y_n)} \cdot \frac{L_y}{\pi} \cdot \text{sinc} \left( \frac{L_y}{\pi} (y-y_n) \right) \right), \quad (1)$$

где  $A_n$  – амплитуды рассеяния ЛЦР объекта,  $k_x$  и  $k_y$  – пространственные частоты (проекция волнового вектора  $\vec{k}$  на оси  $x$  и  $y$ ),  $k_{y0}$  – центральная пространственная частота,  $L_x$  и  $L_y$  – размеры РЛИ по оси  $x$  и  $y$ . Как видно из выражения (1) каждый из откликов отдельных ЛЦР описывается одинаковой функцией типа  $\text{sinc } x = (\sin x) / x$ , определяемой параметрами зондирующего сигнала. Выбор зондирующего сигнала зависит и от ряда условий, определяемых особенностями получения двумерных (радиально-доплеровских) РЛИ. Одним из таких условий является необходимость высокой разрешающей способности по дальности и угловым координатам.

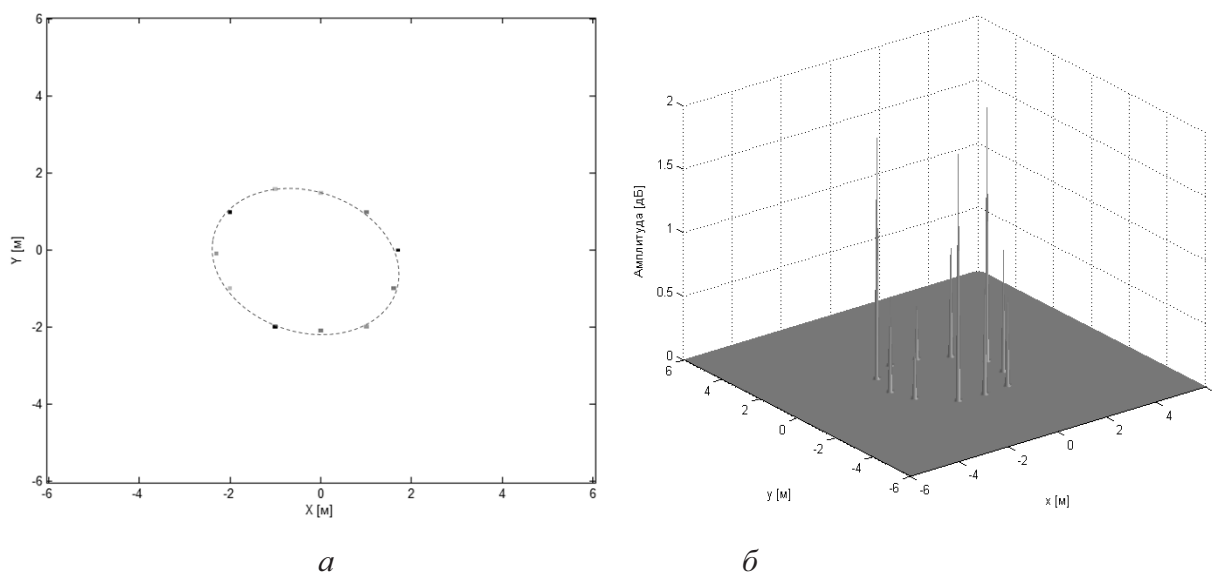


Рис. 2. Изометрическое (а) и картографическое (б) представления двумерной характеристики рассеяния модельного объекта

В РЛС радиовидения широкое применение в качестве зондирующих сигналов получили частотно-манипулированные когерентные сигналы со ступенчатым законом изменения частоты [5], позволяющие получать высококачественные двумерные РЛИ КО без существенного изменения структуры РЛС.

Двумерная функция рассеяния точки (ФРТ) системы восстановления РЛИ  $h(x,y)$  представляет собой отклик этой системы на сигнал отдельного ЛЦР. Двумерная ФРТ определяется выражением [6]:

$$h(x,y) = \left( e^{j2k_{x0} \cdot x} \cdot \frac{L_x}{\pi} \cdot \text{sinc} \left( \frac{L_x}{\pi} \cdot x \right) \right) \cdot \left( e^{j2k_{y0} \cdot y} \cdot \frac{L_y}{\pi} \cdot \text{sinc} \left( \frac{L_y}{\pi} \cdot y \right) \right). \quad (2)$$

На рис. 3, а изображено изометрическое представление двумерной ФРТ системы восстановления РЛИ модельного объекта. Для повышения контрастности формируемых

РЛИ алгоритм восстановления должен включать операцию взвешивания ФРТ с использованием весовой функции (окна). Такое взвешивание снижает уровень амплитуд боковых лепестков ФРТ и результирующее РЛИ выглядит более сглаженным и более локализованным. Наиболее практически значимым из всего многообразия классических весовых функций [7] является окно Чебышева. Данное окно, обеспечивает минимальную ширину главного лепестка ФРТ при заданном уровне боковых лепестков. На рис. 3, б изображено изометрическое представление взвешенной с использованием окна Чебышева двумерной ФРТ системы восстановления РЛИ модельного объекта.

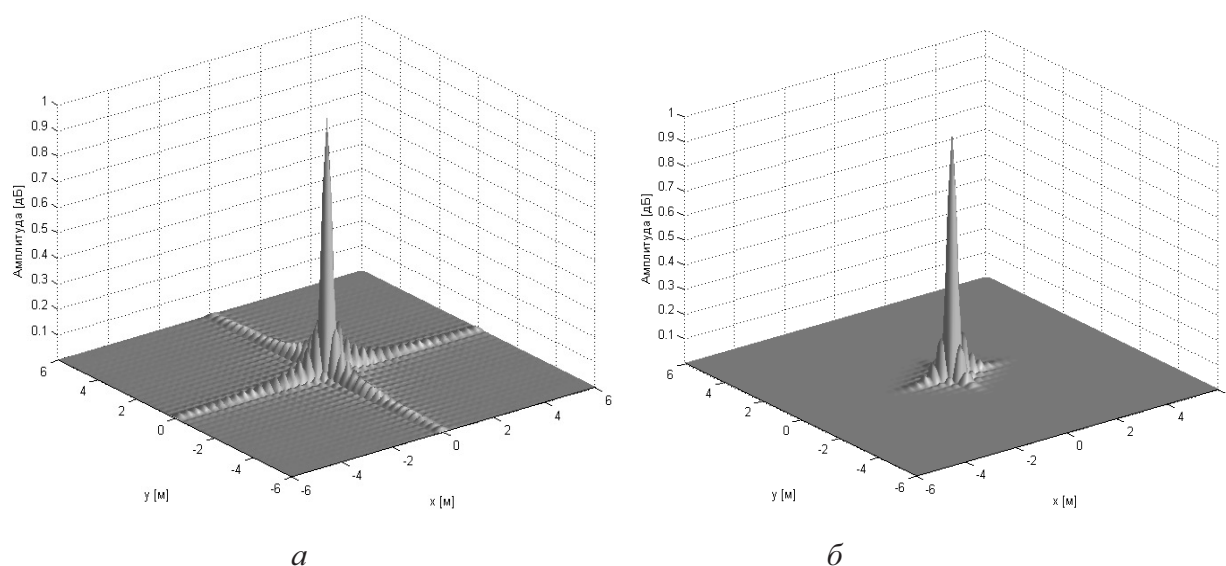


Рис. 3. Изометрические представления двумерной ФРТ системы формирования РЛИ модельного объекта: *а* – без взвешивания; *б* – с взвешиванием

Алгоритмы восстановления РЛИ в РЛС радиовидения представляют собой алгоритмы цифровой обработки сигналов. Поэтому радиолокационные сигналы, отраженные от элементов КО, предварительно преобразуются в цифровую форму.

После преобразования сигналов в цифровую форму к ним может быть применена операция дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Прямое ДПФ определяется следующим образом:

$$S[k] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] \cdot e^{-j2\pi \frac{k}{N} n}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

где  $s[n]$  и  $S[k]$  представляют собой сигналы во временной и частотной области соответственно. Каждый  $k$ -й элемент в уравнении (3) представляет приращение  $f_S$  по оси частот. Особенностью реализации ДПФ в алгоритмах восстановления двумерных РЛИ КО является расположение отсчетов спектра, соответствующих отрицательным частотам не

слева от отсчетов для положительных частот как принято, а справа от них. Это обстоятельство и приводит к "зеркальной особенности", согласно которой начальные  $N/2$  отсчетов результирующей последовательности  $S[k]$  с номерами от 0 до  $N/2-1$  соответствуют значениям спектра на положительных частотах, а конечные отсчеты с номерами от  $N/2$  до  $N-1$  – значениям спектра на отрицательных частотах. Подставив  $(N-k)$  вместо  $k$  в уравнение (3), получим:

$$S[N-k] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] \cdot e^{-j2\pi \frac{(N-k)}{N} n} = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] e^{-j2\pi \frac{(-k)}{N} n} = S[-k].$$

Следовательно,  $S[N-k]$  идентично  $S[-k]$ . Поскольку отрицательные частоты следуют за положительными, их нужно поменять местами для того, чтобы корректно организовать ось частот.

При восстановлении РЛИ КО необработанные данные обычно получают по частотно-угловой оси и преобразовывают в диапазон области кросс-дальности (поперечной дальности). Рассматриваемая методика предусматривает коррекцию результирующего изображения путем перестановки местами отрицательного и положительного диапазонов дальности и кросс-дальности (рис. 4).

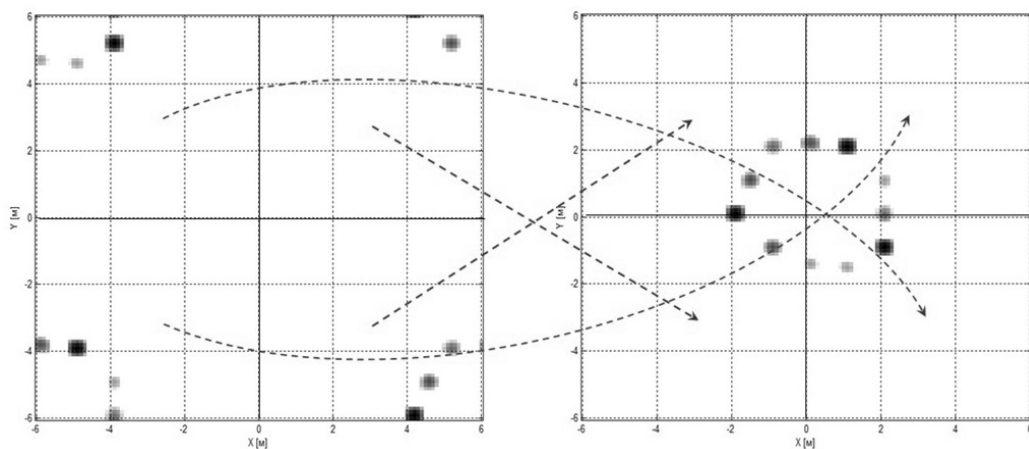


Рис. 4. Перестановка местами отрицательного и положительного диапазонов дальности и кросс-дальности результирующего РЛИ модельного объекта

Предложенная методика обладает относительной универсальностью, а также обеспечивает достаточную точность расчетов и относительную простоту задания исходных данных, что крайне важно в практике моделирования процесса формирования двумерных РЛИ сложных конструкций КО.

## Список литературы

1. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2007. 856 с.
2. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848 с.
3. Чепурнов И.А., Серов С.А., Воротнюк Ю.С. Военно-техническая подготовка. Введение в специальность. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 134 с.
4. Козлов Н.Н., Лучин А.А., Труфанов Е.Ю. Радиоинформационные системы. Математическое обеспечение проектирования, испытаний и функционирования. М.: Знание, 2011. 656 с.
5. Вертемягин С.А., Чепурнов И.А. Методика моделирования двумерных радиолокационных изображений космических объектов при зондировании сигналами с синтезом спектра // Инженерный вестник. 2013. №10. С. 5.
6. Ozdemir C. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms. New Jersey: Wiley, 2012. 387 p.
7. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е издание. СПб.: Питер, 2007. 751 с.