

О.О. Дробахин, В.Г. Короткая, Г.Г. Шерстюк
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ МНОГОЧАСТОТНЫХ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ПРИ ОБРАТНОМ СИНТЕЗИРОВАНИИ АПЕРТУРЫ
В ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЗОНЕ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Аннотация. Рассмотрен метод обратного синтезирования апертуры на основе обобщенного метода пространственной инверсной фильтрации. Для данных реального эксперимента, полученных с помощью измерительно-вычислительного комплекса, реализующего метод фурье-голографии для многочастотных сигналов, достигнуто повышение разрешающей способности в 1,6 – 4 раза в зависимости от расстояния между апертурой рупорной антенны и исследуемым объектом.

Ключевые слова: пространственное разрешение, обратное синтезирование апертуры, инверсная фильтрация, микроволновое изображение

Введение. Радиолокационные методы находят широкое применение в машиностроении и металлургической промышленности для решения ряда технологических вопросов в рамках соответствующих интеллектуальных информационно-управляющих систем [1]. Применение многочастотных широкополосных сигналов позволяет обеспечить высокое разрешение вдоль продольной координаты. При этом разрешение определяется шириной полосы частот. Повышение разрешения может быть достигнуто на основе применения методов цифрового параметрического спектрального анализа к данным измерений в частотной области [2]. Вместе с тем при решении многих задач обработки микроволновых изображений необходимо достичь высокое разрешение в поперечной плоскости. Традиционным является применение методов синтезирования апертуры [3-5]. Однако классическим является синтезирование апертуры при применении монохроматических сигналов. В ряде случаев экспериментально более удобным является применение обратного синтезирования апертуры, когда движется не антенна, а объект перед антенной. В ряде случаев объект

находится в промежуточной зоне излучения, что в совокупности с широкополосностью сигнала требует дополнительных исследований.

Постановка задачи. Целью данной статьи является получение оценок улучшения пространственного разрешения в поперечной плоскости при проведении измерений в частотной области в широкой полосе в промежуточной зоне излучения при использовании концепции обратного синтезирования апертуры.

Основная часть. Достижение поставленной цели осуществлено экспериментальным путем с использованием измерительного комплекса [6] в диапазоне 38-52 ГГц. В качестве излучателя была применена антенна в виде пирамидального рупора. Длина пирамидального рупора составляла 120 мм, а размеры апертуры – 46x46 мм. Отражение в горловине рупора было использовано в качестве опорного сигнала и позволило сохранить фазовую информацию на основе использования принципа фурье-голографии. После преобразования измеренной частотной зависимости с помощью дискретного преобразования Фурье во временную область были получены синтезированные импульсы. Ширина пика на уровне 3 дБ составляла ~ 70 пс, что соответствует пространственной протяженности ~ 20 мм. Флуктуации амплитуды пика составляли менее 2%. Хорошо известно, что для антенны с характерным размером апертуры D для длины волны λ граница дальней зоны R_2 определяется согласно $R_2 = 2D^2 / \lambda$, а для границы промежуточной зоны R_1 справедлива оценка $R_1 = 0.62\sqrt{D^3 / \lambda}$. Таким образом, R_1 и R_2 равны ~70 и ~535 мм для частоты 38 ГГц и ~130 и ~730 мм для частоты 52 ГГц, соответственно.

Традиционно при синтезировании апертуры используют преобразования Фурье и Френеля в зависимости от того, расположен ли объект в дальней или промежуточной зоне излучения. Однако проблема существенно усложняется при размещении объекта в ближней зоне излучения.

Для измерительного комплекса предпочтительным является проведение обратного синтезирования апертуры, когда сам комплекс неподвижен, а движется объект в поперечном направлении по отношению к оси излучения антенны. Первый этап измерений состоит собственно в измерении внесенного коэффициента отражения от исследуемого объекта на сетке частот. Такие измерения проводятся для каждого положения объекта, который смещался в поперечном на-

правления с шагом 1 мм. Затем осуществлялось преобразование Фурье частотных зависимостей для каждого положения объекта и выделение окном информативного фрагмента, соответствующего отражению собственно от объекта. Последняя процедура позволяет устранить отражения от окружающих объектов и отражений собственно в антенне. Временная ось расположена для всех преобразований параллельно оси излучения рупорной антенны. Единицы измерения вдоль указанной оси могут быть выбраны линейными согласно соотношению $y=ct/2$, где c – скорость света в вакууме, а t – временная переменная, полученная в результате преобразования Фурье. После этого для каждого значения оси y формируется массив данных, зависящих от значения поперечной координаты сканирования x . По аналогичной схеме проводится измерение эталонного объекта в виде медной вертикальной полосы шириной 10 или 5 мм. Синтезирование апертуры проводится посредством передаточной функции фильтра, которая формируется при помощи данных для медной полосы

$$H(y, f_x) = \frac{S_E(y, f_x)}{E(y, f_x) + \alpha}, \quad (1)$$

где $E(y, f_x)$ – фурье-преобразование пространственного образа эталонного объекта; $S_E(y, f_x)$ – фурье-преобразование пространственной зависимости от координаты x , полученной экспериментально для эталонного объекта при значении продольной пространственной координаты y ; α – параметр регуляризации. Предполагается, что пространственный образ эталонного объекта в виде медной полосы имеет вид прямоугольной функции пространственной координаты x с шириной, строго совпадающей с шириной медной полосы.

Спектр пространственного сигнала для случая синтеза апертуры для значения координаты y будем определять согласно методу среднегеометрической фильтрации [7], являющегося обобщением инверсной фильтрации

$$S_A(y, f_x) = \left[\frac{1}{H(y, f_x) + \alpha} \right]^Z \left[\frac{|H(y, f_x)|^2}{|H(y, f_x)|^2 + \alpha} \right]^V S(y, f_x), \quad (2)$$

где $S(y, f_x)$ – фурье-образ пространственной зависимости для значения y продольной координаты, Z и V – параметры регуляризации, кото-

рые лежат в пределах $[0,1]$. При проведении расчетов Z и V принимали значение, равное единице, f_x - пространственная частота для пространственной поперечной x -координаты.

После преобразования Фурье пространственная зависимость по координате x будет соответствовать результату синтеза апертуры. Предложенный подход в отличие от традиционного позволяет компенсировать не только фазовые, но и амплитудные искажения.

Измерения исследуемых объектов были проведены на расстояниях 20, 120 и 430 мм от плоскости апертуры рупора. В качестве тестового объекта была использована плоская структура в виде двух медных полосок, расположенных на расстоянии друг от друга. Расстояние между полосками в процессе исследований варьировалось.

Для расстояния от плоскости апертуры до исследуемого объекта в 20 мм раздельное формирование двух основных доминирующих пиков, соответствующих отражениям от двух медных полос, было достигнуто при расстоянии 25 мм между ними (рис. 1,в). Для необработанных данных при расстоянии между полосками менее 25 мм наблюдалась совокупность пиков, превышающая два, что обусловлено проявлением эффектов дифракции и интерференции. Для расстояния 15 мм после проведения обработки в соответствии с предложенной схемой было достигнуто наблюдение двух отдельных пиков (рис. 1,б). При этом не была достигнута корректная оценка расстояния между полосками.

Экспериментальные результаты, полученные при расположении объекта на расстоянии 120 мм, выявили некоторые интересные явления (рис. 2). Уровень боковых лепестков основных пиков был ниже, чем уровень лепестков при измерении на расстоянии 20 мм. Даже для расстояния между полосками 20 мм (в отличие от расстояния между апертурой и объектом 20 мм) наблюдались два отдельных пика, в то время как для расстояния между полосками 5 мм вместо двух отдельных пиков наблюдался только один общий пик (рис. 2,а, б). При этом для расстояния между полосками 30 мм наблюдался дополнительный третий пик между двумя основными пиками (рис. 2, в). Для всех случаев (рис. 2) предложенный метод обработки обеспечил раздельное наблюдение двух пиков и достаточно точную оценку расстояния между полосками.

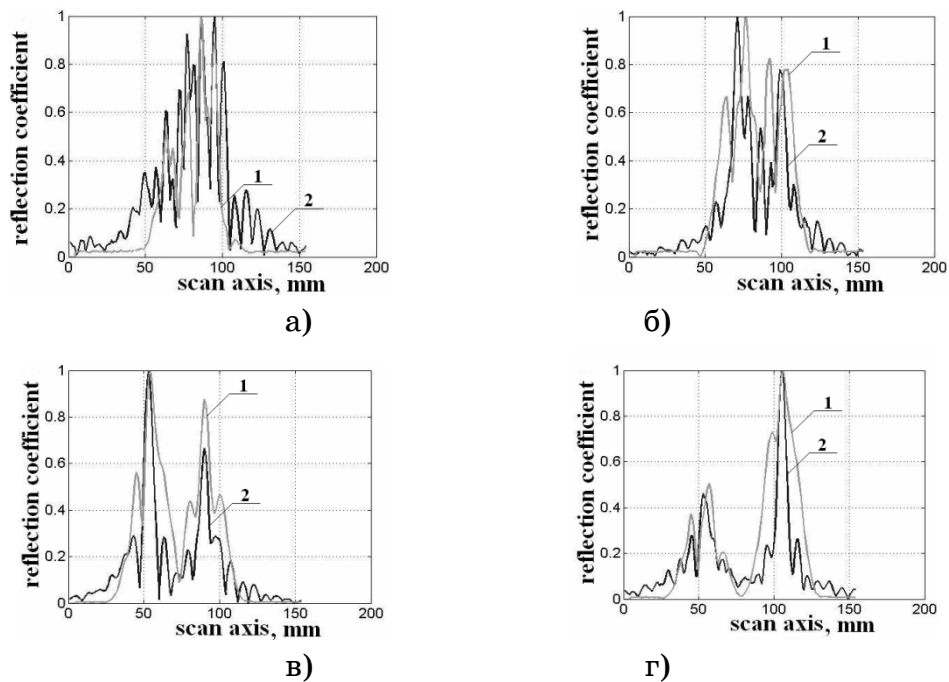


Рисунок 1 – Экспериментальные результаты для расстояния 20 мм от плоскости апертуры для значений расстояния между полосками 5 (а), 15(б), 25(в) и 40(г) мм: 1 – необработанные экспериментальные результаты, 2 – результаты обработки

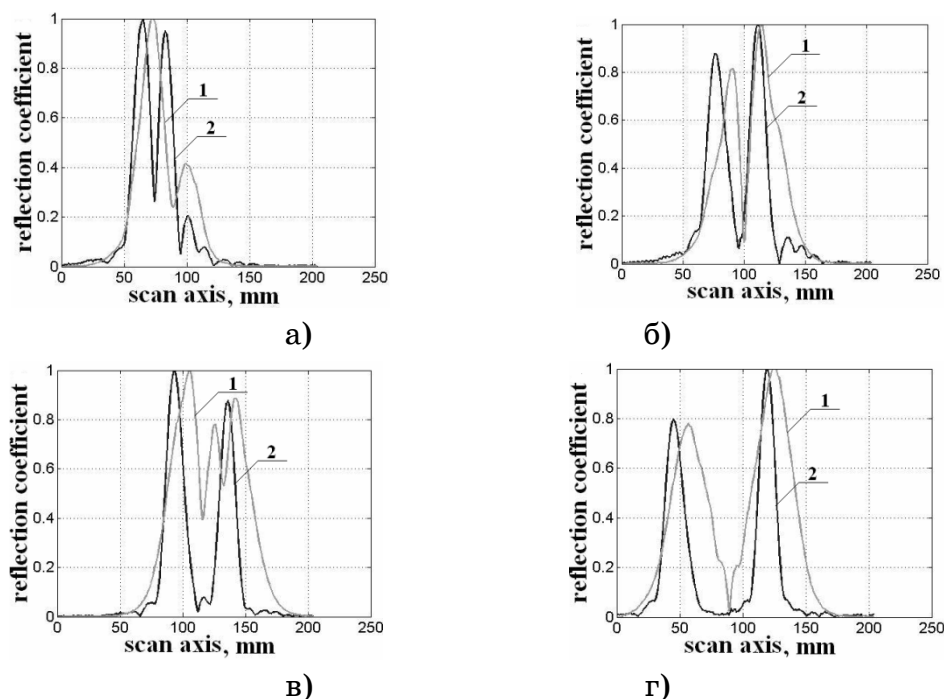


Рисунок 2 – Экспериментальные результаты для расстояния 120 мм от плоскости апертуры для значений расстояния между полосками 5 (а), 20(б), 30(в) и 60(г) мм: 1 – необработанные экспериментальные результаты, 2 – результаты обработки

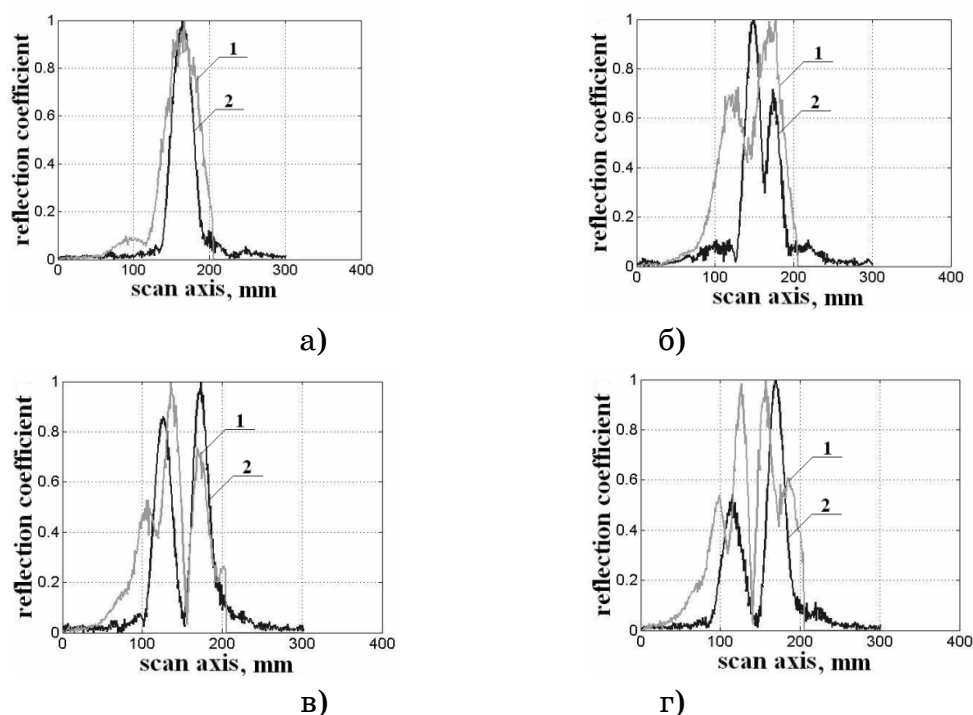


Рисунок 3 – Экспериментальные результаты для расстояния 430 мм от плоскости апертуры для значений расстояния между полосками 5 (а), 15(б), 35(в) и 45(г) мм: 1 – необработанные экспериментальные результаты, 2 – результаты обработки

При проведении измерений на расстоянии от апертуры 430 мм разделение сигналов, соответствующих отражениям от двух медных полос, было достигнуто при расстоянии 35 мм между ними (рис. 3,в). Для расстояния между полосками 15 мм после обработки было достигнуто разделение (рис. 3,б). Были получены достаточно точные оценки расстояния. Для расстояния 45 мм в необработанных экспериментальных данных были обнаружены 4 пика, но после обработки был получен правильный результат с двумя пиками (рис. 3,г). Неравенство амплитуд пиков от одинаковых полосок, по всей видимости, обусловлено непараллельностью плоскости сканирования объекта по отношению к плоскости апертуры рупорной антенны.

Выводы. Для реальных экспериментальных данных метод обратного синтезирования апертуры был практически реализован на основе применения среднегеометрической фильтрации как регуляризованного обобщенного варианта инверсной фильтрации. При этом измерение опорного сигнала для одиночной полоски позволило получить результаты в отсутствие математических моделей для зависимости амплитудных и фазовых характеристик от пространственных ко-

ординат. При применении предложенного подхода обработки экспериментальных данных было достигнуто улучшение разрешения изображения в поперечном направлении по сравнению с необработанными экспериментальными данными в 1,6–4 раза в зависимости от расстояния между апертурой рупора и плоскостью размещения объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиолокационный контроль металлургических процессов [Текст] / В.И. Головкин, О.Н. Кукушкин, Н.В. Михайловский и др. – Днепропетровск: Журфонд, 2010. – 428 с.
2. Дробахин, О.О. Применение метода Проуни для толщинометрии слоистых диэлектрических структур [Текст] / О.О. Дробахин, В.Г. Короткая // Дефектоскопия. – 1987. – № 5. – С. 19-31.
3. Osumi, N. Microwave Holographic Imaging Method with Improved Resolution [Text] / N.Osumi, K. Ueno // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1984. – Vol. AP-32. – №. 10. – P. 1018-1026.
4. Sabry, R. Advanced Polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) and Electro-Optical (Eo) Data Fusion Through Unified Coherent Formulation of the Scattered EM Field [Text] / R.Sabry, P.W. Vachon // Progress In Electromagnetics Research. – 2008. – Vol. 84. – P. 189-203.
5. El Assad, S. Compression of Polarimetric Synthetic Aperture Radar Data [Text] / S. El Assad, X. Morin, D. Barba, V. Slavova // Progress In Electromagnetics Research. – 2012. – Vol. 122. – P. 269-292.
6. Alekseev, V. Microwave introscopy using multifrequency measurements and transversal scan [Text] / V. Alekseev, O. Drobakhin, Ye. Kondrat'yev, D. Saltykov // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2006. - Vol. 21. – №. 2. – P. 24-26.
7. Василенко, Г.И. Восстановление изображений [Текст] / Г.И. Василенко, А.М. Тараторин. - М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.