

Построение изображения по голограмме

В сверхширокополосной импульсной георадиолокации отражающие объекты чаще всего имеют большие размеры по сравнению со средней длиной волны в среде: слой песка или глины, городские коммуникации, рудные месторождения, остатки фундаментов, курганы, туннели, скрытые подземные сооружения, газопроводы, нефтепроводы, и т.д. Отраженный радиосигнал формируется на пространственных размерах порядка длины волны, т.е. вблизи границы раздела таких протяженных сред, и поэтому сигналы несут информацию, в основном, о границах, что и определяет математические методы обработки получаемой информации.

В высокочастотной монохроматической радиоголографии цели или некоторые их габариты чаще всего соизмеримы с длиной волны: арматура и структура бетона, электрическая проводка, кирпичная кладка и т.д. По этой причине отраженный сигнал формируется всем объектом, а не только границей, и здесь удобнее рассматривать его как сумму элементарных источников-переизлучателей, находящихся в плавнонеоднородной среде.

Каждый переизлучатель будем считать точечным, а их распределение в пространстве будем рассматривать как изображение предмета. Такая постановка задачи соответствует принципу Гюйгенса и сводит процесс построения изображений к поиску пространственного распределения светимости источников, которые излучают сферические волны:

$$E_j = \frac{A_j}{R} \exp(ikR) \quad (1)$$

Каждый элементарный источник описывается пятью параметрами: комплекснозначной амплитудой A_j и тремя пространственными координатами x, y, z , которые связаны с радиус-вектором как $R = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$, где x_0, y_0, z_0 - координаты источника.

На рис. 3 показана расположение координатных осей, которым мы пользоваться на протяжении всего изложения.

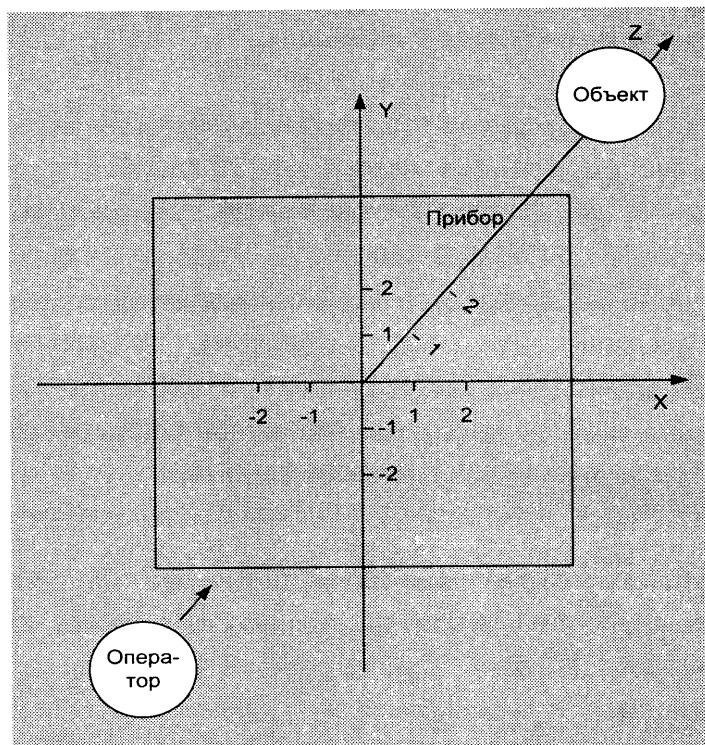


Рис. 3. Оси координатной сетки.

Метод Кирхгофа

Представление поля источника в виде (1) является основной метода Кирхгофа, который представляет собой одно из аналитических решений волнового уравнения.

Функцию распределения напряженности волнового поля (светимости) в трехмерном пространстве $E(x, y, z)$ можно связать с функцией величины поля $S(x, y)$ на двумерной поверхности (x, y) с помощью формулы Кирхгофа:

$$E(\vec{r}_i) = -\frac{1}{4\pi} \int_{\Sigma} \left\{ S(\vec{r}_{ii}) \frac{\partial}{\partial \vec{n}} \left(\frac{e^{-ikR}}{R} \right) - \frac{\partial S(\vec{r}_{ii})}{\partial \vec{n}} \frac{e^{-ikR}}{R} \right\} d\Sigma \quad (2)$$

Здесь указаны следующие величины:

$E(\vec{r}_i)$ - функция светимости в точке \vec{r}_i ,

$S(\vec{r}_{ii})$ - поле на поверхности Σ , охватывающей точку \vec{r}_i ,

\vec{n} - нормаль к Σ ,

$\vec{R} = \vec{r}_i - \vec{r}_{ii}$.

Формула (2) справедлива для замкнутой поверхности Σ , на которой должен выполняться закон сохранения потока энергии.

В нашем случае, когда функция голограммы $S(\vec{r}_{ii})$ определена только на плоскости приемной решетки площадью s , формула приобретет следующий вид:

$$E(\vec{r}_i) = \int_s S(r_{ii}) e^{-ikR} ds \quad (3)$$

Здесь учтено, что значение поля источника на приемной решетке пропорционально расстоянию до него как $1/R$, и для компенсации этой зависимости в (2) значение поля умножено на R .

Алгоритм вычисления изображения методом Кирхгофа имеет вид:

$$E(x, y, z) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S(m, n) \cdot \exp(-ikR_{mn}^m) \quad (4)$$

Здесь m и n - номера элементов антенной решетки.

Метод Кирхгофа для восстановления голографического изображения в силу своей волновой природы имеет разрешение порядка размера фокуса (каустики), которая определяется длиной волны. Для длины волны 3 см эта величина порядка 1 см. Обычно мы в методе Кирхгофа при вычислении функции светимости используем шаг в 1 см по всем координатам.

Метод вычитания

Приемная антенная решетка содержит 256 элементов, для каждой антенны измеряются две квадратурных компоненты, которые можно рассматривать как мнимую и действительную часть комплекснозначной напряженности поля. Каждая радиоголограмма, таким образом, имеет 512 независимых измерений.

Каждый элементарный источник – светящаяся точка – характеризуется пятью параметрами: тремя пространственными координатами, амплитудой и фазой. Измеренная голограмма может быть представлена суммой k источников

$$S(m, n) = \sum_k \frac{A_j}{R} \exp(ikR) \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет по 512 независимым измерениям найти параметры 102 независимых источников.

Решить уравнение можно итерационным путем, последовательно, одно за другим, вычитая поле источников из голограммы. Для оценки параметров точечных источников

на первом шаге мы используем метод Кирхгофа. Этот метод дает точность обнаружения координат максимума около одного сантиметра, что для метода вычитания недостаточно. При длине волны 3 см фаза осциллирующей функции на таком расстоянии меняется на 120 градусов, поэтому точность обнаружения координат источника должна быть значительно выше. В нашем алгоритме точность обнаружения максимума поля составляет 0.1 мм. Для достижения этого мы используем следующий прием.

Возле точки, обнаруженной методом Кирхгофа с точностью до сантиметра, начинается процесс вычитания из голограммы пробной функции при перемещении ее вдоль каждой координаты через 0.1 мм. На каждом шаге ищется мощность голограммы.

Поскольку голограмма является суммой всех сигналов, то совпадение положения реального источника и вычтенного пробного приведет к уменьшению ее общей дисперсии (мощности). Положение максимума определяется по минимуму мощности в процессе перемещения пробного сигнала для каждой координаты последовательно.

Найденные координаты используются для вычисления амплитуды и фазы источника методом Кирхгофа, а также для определения вычитаемой фазовой функции.

Параметры вычтенного источника запоминаются, далее методом Кирхгофа по измененной голограмме строится новое трехмерное изображение, по которому определяются координаты следующего источника с точностью 0.1 мм, проходя два описанных выше этапа.

Процесс повторяется многократно, теоретически он заканчивается тогда, когда мощность голограммы станет

равной нулю, т.е. когда все источники будут обнаружены и уравнение (5) решено. Для большинства практических задач обычно требуются сотни циклов.

Метод вычитания относится к фазовым, поэтому ответить на вопрос, какое он имеет разрешение, нельзя однозначно, как в методе Кирхгофа. Определить положение источника по фазе можно до долей длины волны, а конкретное значение погрешности такого определения зависит, в основном, от соотношения сигнал/шум. При отсутствии шума координату источника можно определить с абсолютной точностью, чего в реальности, конечно, никогда не бывает. Напомним, что шаг координатной сетки в нашем алгоритме 0.1 мм, и это все, что мы можем сказать о точности описываемого алгоритма.

Покажем работу алгоритмов по натурной мишени - двум металлизированным шарикам диаметром 10 мм на расстоянии 20 см от приемной решетки. Расстояние между шариками 10 см.

На рис. 4 приведено изображение, полученное методом Кирхгофа в плоскости на расстоянии 20 см от приемной решетки.

На рис. 5-7 показаны проекции изображения, полученного методом вычитания за 4 цикла на фронтальную, горизонтальную и боковую плоскости.

С целью визуализации, координаты источников округлены до 1 см и профильтрованы трехмерным нерекурсивным низкочастотным фильтром длиной 5 элементов по каждой координате.

Функции окон

При увеличении дальности вдоль оси z алгоритм построения изображения по голограмме методом Кирхгофа асимптотически переходит в алгоритм формирования диаграммы направленности фазированной антенной решетки (ФАР). В дальней зоне падающие от источника лучи можно считать параллельными, а волну плоской.

Сканирование антенной решетки по углам обзора эквивалентно одномерному или двумерному преобразованию Фурье, где роль частоты (в данном случае пространственного волнового числа) выполняет функция

$$K_x = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \alpha$$

Здесь α - угол сканирования, λ - длина волны.

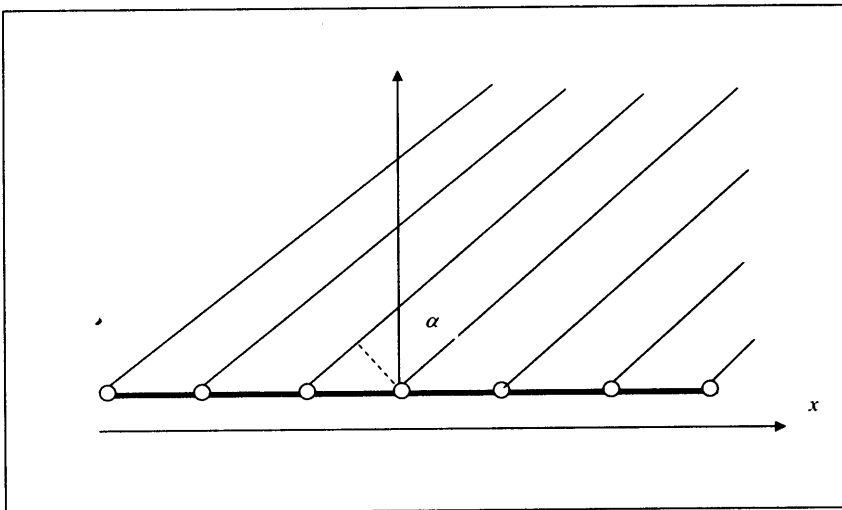


Рис. 8. Параллельное падение лучей на решетку.

В ФАР всегда используются функции окон для подавления боковых лепестков. Покажем действие окна на примере имитированной плоской волны.

Отсутствие окна обычно называют «использованием прямоугольного окна», это неявно свидетельствует о том, что в спектральном анализе обойтись без окон практически невозможно.

Прямоугольное окно имеет минимальную ширину основного лепестка и большой уровень боковых лепестков - 13 дБ

На рис. 9 мы различаем более 20 максимумов функции изображения.

В радиолокации каждый максимум интерпретируется как цель или объект, поэтому понятно, что такое количество ложных объектов в большинстве случаев недопустимо.

Введение функции окна уменьшает уровень боковых лепестков, но имеет и обратную сторону – расширяет основную максимум. Для окна Хэмминга уровень боковых лепестков – 46 дБ (рис. 10).

В общем случае, когда дальность до объекта соизмерима с размером антенной решеткой (для нашего прибора это менее 2 метров), падение лучей на нее уже нельзя считать параллельным, а необходимо учитывать их сферический характер падения.

Основное его отличие в том, что угловое расстояние между приемными антеннами меняется, что приводит к эквивалентной неэквидистантности отсчетов по отношению к параллельному. Это явление может вызвать увеличение боковых лепестков и их асимметрию при использовании

функций окон, которые хорошо исследованы в спектральном анализе и ФАР.

Покажем этот эффект на примере окна Хэмминга с близким положением имитированного смещенного источника с координатами $x=0.1$ $y=0$ $z=0.2$.

На рис. 11 наблюдается сильный асимметричный боковой лепесток.

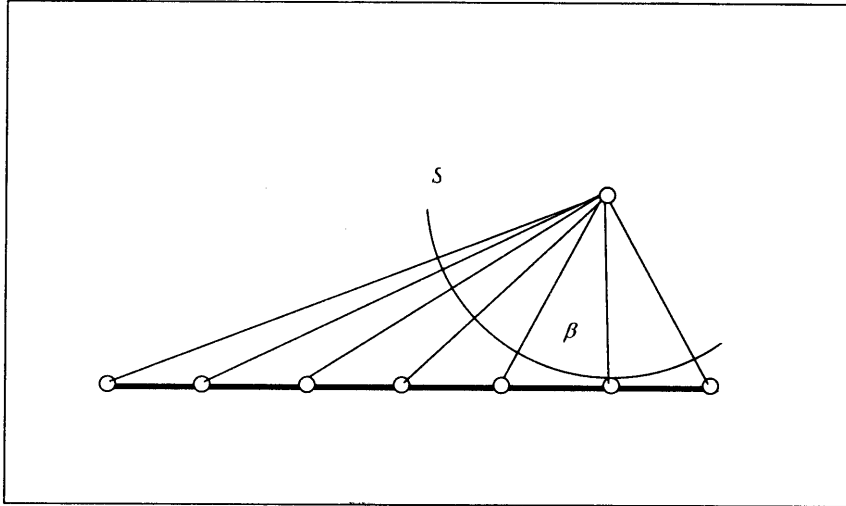


Рис. 12. Сферическое падение лучей на решетку.

Свести сферическое падение лучей (рис. 12) к параллельному (рис. 8) можно следующим образом.

Из точки фокуса проведем дугу s и по лучам спроецируем на нее виртуальные источники из реальных источников на решетке. Лучи из реальных источников на решетке и виртуальных на дуге дают одно и то же значение амплитуды в точке фокуса.

Но виртуальные источники на дуге расположены не эквидистантно, что определяет основное отличие между сферическим и параллельным падением лучей.

Скомпенсируем неравномерность их положения на дуге введением в обработку дополнительного амплитудного коэффициент L , пропорционального углу β .

$$L \sim \cos \beta$$

Здесь мы предполагаем, что каждый элементарный излучатель антенной решетки имеет в зоне обзора равномерную диаграмму направленности.

В результате этой операции получим адаптированную к голографии функцию окна на случай построения голографического изображения в ближней зоне методом Кирхгофа.

На рис. 13 боковой лепесток значительно подавлен.

Покажем результаты действия окон на экспериментальном материале.

На рис. 14 – 16 приведены фронтальные проекции изображений арматуры железобетона. Отметим, что бетон, содержащий в своем составе соизмеримый с длиной волны гравий и щебень, включает в себя множественные яркие отражатели. Это имеет и положительную сторону – объект дополнительно освещается из-за переотражения от них.

Приемная антенная решетка располагалась в 15 см от стены.

Из рисунков следует, что без функции окна (рис. 14) арматура практически не видна. Использование окна Хэмминга (рис. 15) улучшает ситуацию, а использование адаптированного окна Хэмминга (рис. 16) переводит изображение в еще более читаемое.

Практика показывает, что введение угловой поправки в функцию окна существенно на малых расстояниях. На расстояниях более 40 см ее влияние практически незаметно.