

09;12

Метод наклонной фокусировки в подповерхностной радиолокации

© Д.Я. Суханов, В.П. Якубов

Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия

e-mail: sdysdy@mail.ru; yvlp@mail.tsu.ru

(Поступило в Редакцию 6 сентября 2005 г.)

Предложена методика наклонного сканирования среды в подповерхностной радиотомографии для восстановления трехмерного распределения неоднородностей и обнаружения негоризонтальных участков рассеивающих объектов, скрытых под плоской границей раздела сред. Методика основана на использовании технологии радара с синтезированной апертурой и данных многопозиционного зондирования ненаправленными антеннами, поднятыми над поверхностью земли. Фокусировка радара с синтезированной апертурой реализуется на основе быстрого преобразования Фурье, благодаря чему алгоритм восстановления распределения неоднородностей имеет высокое быстродействие. Метод проверен численным моделированием и результатами экспериментов.

PACS: 41.20.Jb

Введение

В настоящее время интенсивно развиваются радиоволновые методы обнаружения и исследования объектов, скрытых под поверхностью земли, которые находят применение в археологии, геологии, а также при поиске пластиковых противопехотных мин. Потребность в такой методике совершенно очевидна и обусловлена, прежде всего, необходимостью создания быстродействующих, простых и надежных приборов геолокации для поиска разрушений на нефтепроводах и газопроводах, при поиске исторических ценностей в археологии, при поиске людей в завалах. Особенно важна возможность применения разработанной методики для дистанционного обнаружения противопехотных мин. Изначально чисто военная проблема разминирования в настоящее время стала гуманитарной. В ходе локальных конфликтов последних лет заградительному минированию подвергались обширные населенные территории, которые до сих пор не удалось очистить полностью.

В задаче обнаружения противопехотных мин одним из главных условий является бесконтактное исследование объектов в земле. Наиболее удобно для зондирования среды применять технологию радара с синтезированной апертурой (РСА). Измерения проводятся путем последовательного перемещения с фиксированным шагом системы приемной и передающей антенн в горизонтальной плоскости на некоторой высоте над поверхностью земли. При этом в каждой точке положения системы антенн производится зондирование среды сверхширокополосным излучением и измерение рассеянного поля. Для такой геометрии измерений возможно построение достаточно простых алгоритмов решения обратной задачи восстановления распределения неоднородностей по результатам измерения рассеянного поля.

В литературе встречается множество методик и подходов для решения восстановления распределения неоднородностей на основе данных о рассеянном излучении.

Основная идея этих подходов сводится в фокусировке рассеянного излучения в исследуемую точку среды. В работе [1] рассмотрена методика фокусировки в каждую точку среды с учетом преломления радиоволн на границе воздух–земля. Фокусировка проводится для конечного набора частот с шагом, определяемым глубиной исследования среды в диапазоне 0.5–2 СHz. Недостатком такого подхода является требование априорной информации о показателе преломления среды, а также высокие требования к вычислительным ресурсам из-за необходимости фокусировки во всем объеме среды.

В работе [2] рассмотрены методы фокусировки в объеме среды во временной области, в том числе различные упрощенные алгоритмы, позволяющие значительно сократить время решения обратной задачи. Тем не менее требования больших вычислительных ресурсов и априорной информации о среднем показателе преломления среды остаются.

В работе [3] описана методика восстановления распределения неоднородностей при использовании импульсного излучения на основе фокусировки дифракционных гипербол во временной области. Экспериментальные исследования проводились на образцах металлических и пластиковых противопехотных мин, в качестве передающей антенны была использована рупорная антенна, а в качестве приемной — рамочная, ориентированная в вертикальной плоскости. Приводятся методы устранения дефектов и шумов измерений. Демонстрируются результаты восстановления двумерных изображений в горизонтальном сечении, которые могут быть использованы для получения приблизительных координат объектов для дальнейшей обработки.

В работе [4], выполненной в объединенном исследовательском центре Европейской комиссии в Италии в 2001 г., рассмотрен метод, основанный на применении РСА при использовании двумерного углового сканирования антенной системой в верхнем полупространстве. В работе учитывается дисперсия при преломлении и

затухании волн в среде зондирования. Обработка данных осуществляется путем использования пространственной согласованной фильтрации и фокусировки излучения в каждую точку нижнего полупространства. Последовательное сканирование точкой фокусировки позволяет восстанавливать трехмерное распределение неоднородностей под границей раздела сред. Был проведен тестовый эксперимент с влажным песком и металлическими шариками диаметром 7.62 см, помещенными на глубину 27–67 см в цилиндрический резервуар диаметром 2 м. Рабочий диапазон частот зондирования 2–6 GHz. Эксперимент подтвердил хорошую работоспособность метода, однако даже использование высокопроизводительного 64-bit процессора на Sun Ultra-1 Workstation потребовало около 4 часов непрерывной обработки данных. Достигнутое реально разрешение оценивается размерами шариков.

В работах [5,6] описан быстродействующий алгоритм восстановления распределения неоднородностей, основанный на использовании быстрого преобразования Фурье. Основной идеей этого алгоритма является фокусировка РСА в приповерхностную точку среды, что при использовании сверхширокополосного излучения обеспечивает высокую пространственную локализацию аппаратной функции системы в объеме среды и, как следствие, высокую разрешающую способность метода. Этот алгоритм синтеза апертур эквивалентен зондированию среды плоскими волнами, распространяющимися вертикально в пределах локализованного радиолуча. Поскольку зондирующие волны распространяются вертикально, возможно надежное обнаружение преимущественно горизонтальных участков рассеивающих объектов.

Метод наклонной фокусировки

В настоящей работе предлагается модификация алгоритма, описанного в работах [5,6], для осуществления наклонного зондирования среды. В основе алгоритма также лежит быстрое преобразование Фурье, что позволяет обеспечить высокую скорость обработки данных РСА. Наклонная фокусировка РСА способна обеспечить детектирование и негоризонтальных граней рассеивающих объектов. Локационная схема измерений приведена

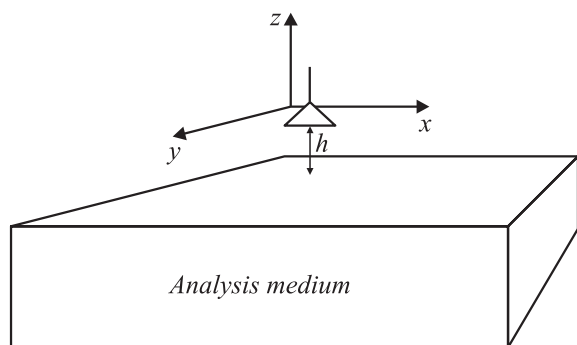


Рис. 1. Схема измерений.

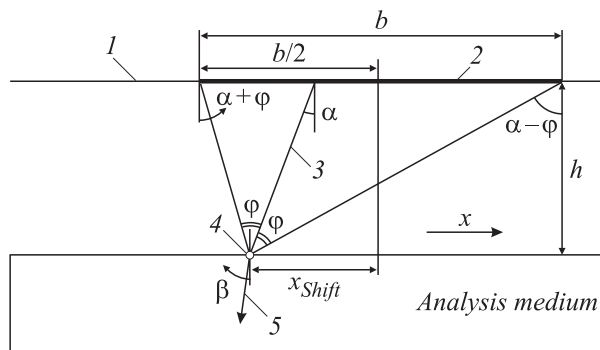


Рис. 2. Наклонная фокусировка и траектория санирования среды: 1 — область перемещения приемопередающей антенны; 2 — синтезируемая апертюра; 3 — аппроксимация траектории распространения волн; 4 — точка фокусировки; 5 — траектория сканирования среды.

на рис. 1. Используемый диапазон частот 0.5–20 GHz. Для каждой частоты производится измерение амплитуды и фазы рассеянных волн. Собранные в ходе измерения данные используются для синтеза апертюры размером меньше области перемещения антенн.

В результате измерений получается трехмерный массив данных $S(x, y, k)$ из комплексных чисел, где $k = 2\pi f/c$ — волновое число в свободном пространстве, соответствующее частоте зондирующего излучения. По сути, $S(x, y, k)$ — комплексная амплитуда сигнала на выходе приемной антенны при расположении системы приемной и передающей антенн в точке (x, y) горизонтальной плоскости.

Для осуществления наклонного сканирования среды предлагается производить фокусировку РСА в приповерхностные точки среды, смещенные относительно центра апертюры на определенное расстояние. При этом эквивалентная траектория распространения зондирующих волн аппроксимируется биссектрисой угла между точкой фокусировки и краями апертюры. Траектория распространения излучения в среде продлевается согласно закону Снеллиуса.

Пример наклонной фокусировки радара с синтезированной апертюрой приведен на рис. 2.

При условии, что передающая и приемная антенны совмещены, фокусировку рассеянного излучения в приповерхностные точки среды можно записать в виде свертки

$$U(x, y, k) = \int_{y'} \int_{x'} S(x', y', k) H(x - x', y - y', k) dx' dy'$$

где в пределах апертюры b , если $(x \geq -b/2)$ и $(x \leq b/2)$

$$H(x, y, k) = \exp\left(-i2k \sqrt{(x - x_{Shift})^2 + y^2 + h^2}\right),$$

$x_{Shift} = h \tan(\alpha + \varphi) + \frac{b}{2}$ — сдвиг точки фокусировки относительно центра апертюры; за пределами апертюры,

если $(x < -b/2)$ или $(x > b/2)$, $H(x, y, k) = 0$: α — угол поворота апертуры; (x, y) — точки фокусировки системы; h — расстояние от плоскости апертуры до плоскости фокусировки.

Из построения на рис. 2 видно, что $b = h \times (\tan(\alpha + \varphi) + \tan(\alpha - \varphi))$, и следовательно

$$\tan\varphi = -\frac{h}{b} \left(1 + \frac{1}{\tan^2\alpha} \right) + \sqrt{\left(\frac{h}{b} \left(1 + \frac{1}{\tan^2\alpha} \right) \right)^2 + \frac{1}{\tan^2\alpha}}.$$

Условие равенства нулю функции $H(x, y, k)$ при $x > b/2$ и при $x < b/2$ позволяет синтезировать апертуру заданного размера b (b должно быть меньше области перемещения антенн). Чем больше размер апертуры, тем больше разрешение системы в горизонтальной плоскости, но тем меньше область поверхности, где наклонная фокусировка работает правильно.

Чтобы получить трехмерное распределение неоднородностей в среде при наклонной фокусировке, достаточно осуществить обратное преобразование Фурье по частоте функции $U(x, y, k)$:

$$V(x, y, z) = \int_k U(x, y, k) \exp(-ik2z) dk,$$

где $V(x, y, z)$ — восстановленное трехмерное изображение распределения неоднородностей в среде при наклонной фокусировке. Однако изображение $V(x, y, z)$ имеет искажения масштабирования, сдвига и вращения относительно системы координат измерений. Для устранения нежелательных искажений применим следующую операцию:

$$W(x, y, z) = V(x/\cos\beta, y, zn - xn \operatorname{tg}\beta),$$

где β — угол преломления, соответствующий углу падения α ; n — средний показатель преломления среды; функция $W(x, y, z)$ является трехмерным изображением распределения неоднородностей в среде, повернутым относительно системы координат измерений на угол β .

Представленный алгоритм производит фокусировку излучения только в приповерхностные точки среды и может быть реализован на основе операции быстрого преобразования Фурье, что обеспечивает невысокие требования к вычислительным ресурсам. Кроме того, для работы алгоритма не требуется априорной информации о показателе преломления среды, которая необходима только для определения правильной системы координат.

Моделирование аппаратной функции системы

Для подповерхностного радиотомографа с наклонной фокусировкой РСА была рассчитана аппаратная функция системы для случая использования монохроматического

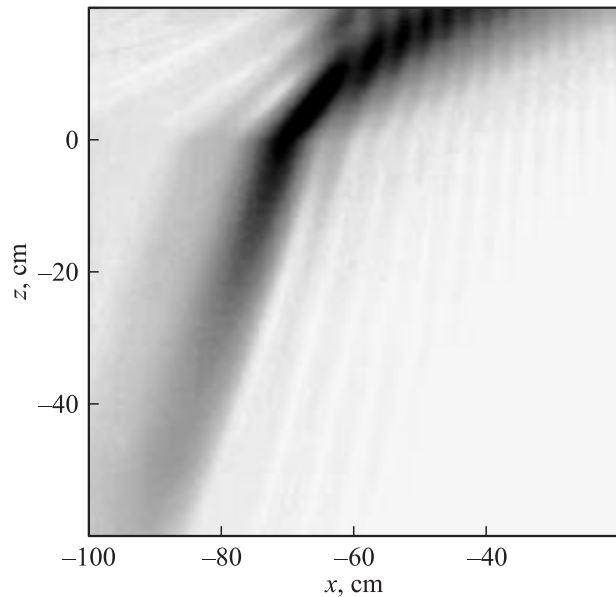


Рис. 3. Амплитуда аппаратной функции при частоте 3 GHz и $n = 2$.

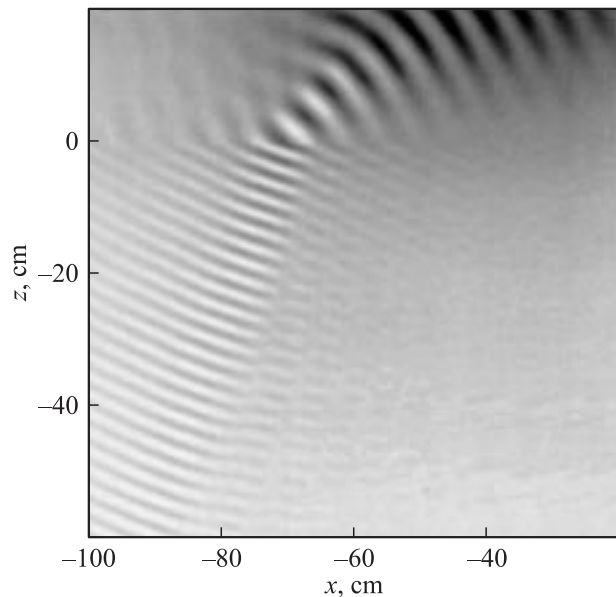


Рис. 4. Действительная часть аппаратной функции при частоте 3 GHz и $n = 2$.

и сверхширокополосного импульсного излучения. На рис. 3 и 4 представлены соответственно амплитуда и действительная часть аппаратной функции системы при монохроматическом излучении 3 GHz, наклоне фокусировки 45° и показателе преломления среды, равном 2. Темным цветом отмечены области наибольшей чувствительности системы большей амплитуды аппаратной функции зондирования среды, подобно зондированию плоскими волнами, распространяющимися под углом преломления к нормали поверхности.

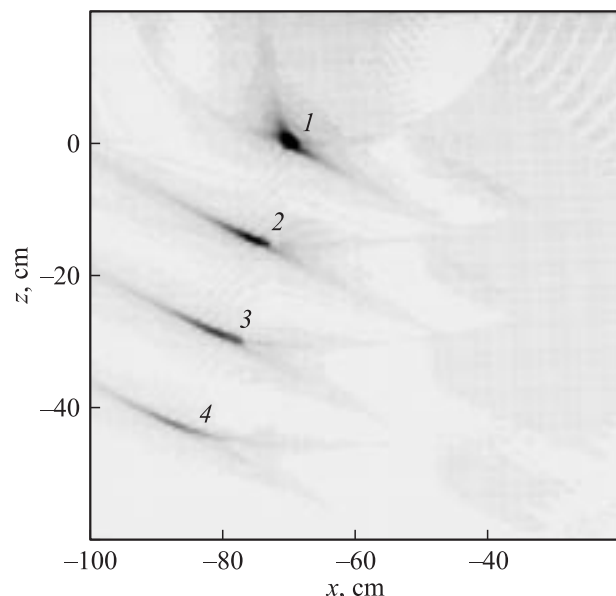


Рис. 5. Аппаратная функция системы в моменты времени: 1 — 0, 2 — 2, 3 — 2, 4 — 3 ns.

На рис. 5 приведена аппаратная функция (импульсная реакция) системы в различные моменты времени при использовании импульсного излучения с шириной полосы 0.5–20 GHz. Как видно из рисунков, аппаратная функция имеет наибольшую амплитуду в локализованной области пространства. С увеличением глубины степень локализации аппаратной функции снижается и, как следствие, уменьшается разрешение. Следовательно, при наклонном импульсном зондировании среды возможно восстановление трехмерной структуры среды в некоторой приповерхностной области. Причем с увеличением показателя преломления среды увеличивается глубина, где сохраняется высокое разрешение метода.

Экспериментальные исследования

Для проверки метода наклонной фокусировки радара с синтезированной апертурой был проведен эксперимент с наклонной металлической пластиной, помещенной в песок (рис. 6).

После обработки данных зондирования с помощью алгоритма наклонной фокусировки были получены изображения (рис. 7, 8) при наклоне фокусировки соответственно 0 и 30°. Координате по оси z соответствует время прохождения зондирующего импульса до рассеивателя, умноженное на скорость света в вакууме.

Как видно из представленных рисунков, заложенный объект наиболее отчетливо выделяется при наклоне фокусировки в 30°, т.е. когда направление падения волны наиболее близко к нормальному. Таким образом, проводя сканирование среды под разными углами методом наклонной фокусировки, можно определить все горизонтальные и негоризонтальные участки объекта, скрытого под землей, и восстановить его форму.

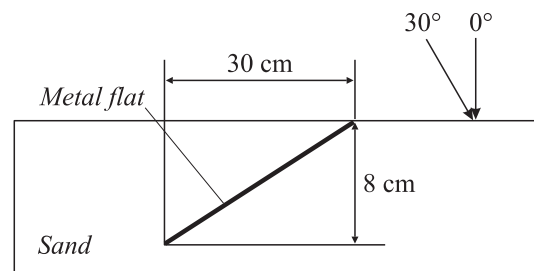


Рис. 6. Расположение металлической пластины в песке.

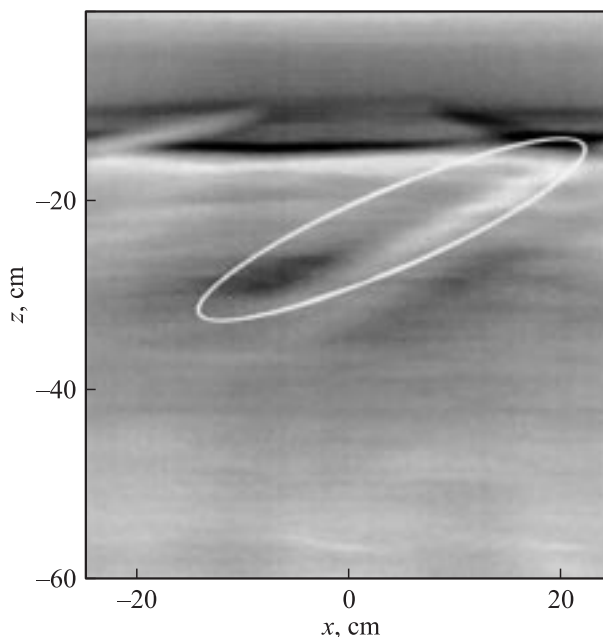


Рис. 7. Восстановленное изображение без наклона фокусировки.

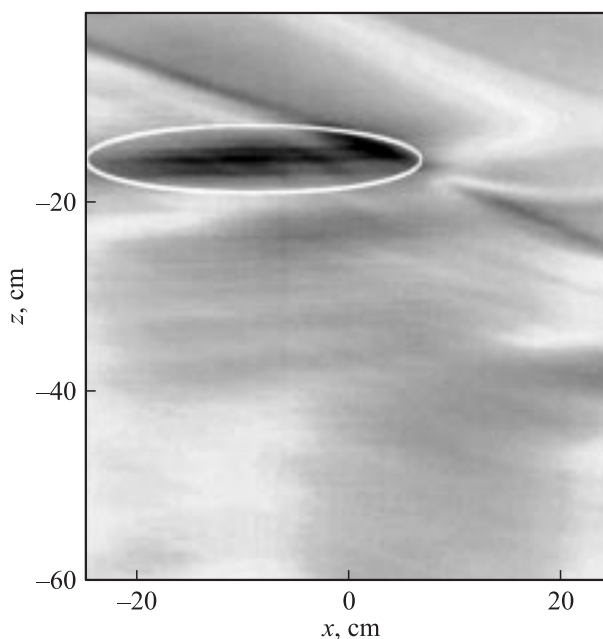


Рис. 8. Восстановленное изображение при наклоне фокусировки на 30°.

Заключение

Использование сверхширокополосного излучения и технологии радара с синтезированной апертурой дает широкие возможности для разработки и применения различных методов обработки данных измерений, благодаря чему стало возможным создание алгоритмов наклонного или многокурсного сканирования исследуемой среды.

Разработанный алгоритм наклонной фокусировки, как и алгоритм, предложенный в работе [5], имеет высокое быстродействие благодаря фокусировке РСА только в приповерхностные точки среды и возможности использования процедуры быстрого преобразования Фурье.

Используя одни и те же данные радиозондирования и алгоритм наклонной фокусировки для различных углов, можно восстановить полную трехмерную форму объекта, расположенного под поверхностью земли.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории Lehrstuhls für Hochfrequenz und Kommunikationstechnik am Institut für Elektronik, Signalverarbeitung und Kommunikationstechnik der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Авторы выражают благодарность профессору А.С. Омару за предоставленную возможность проведения экспериментальных исследований.

Список литературы

- [1] *Morrow I.L. and van Genderen P.* // IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. 2002. Vol. 40. N 4. P. 943–949.
- [2] *Valle S., Zanzi L., Lentz H., Braun H.M.* // Conf. On Ground Penetrating Radar. 2000. P. 464–470.
- [3] *Groenenboom J., Yarovoy A.G.* // Proc. of Int. Conf. on Ground Penetrating Radar. 2000. P. 367–371.
- [4] *Fortuny-Guasch J.* // IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. 2002. Vol. 40. N 2. P. 443–452.
- [5] *Yakubov V.P., Omar A.S., Suhanov D.Y.* et al. // Proc. of 10th Int. Conf. on Ground Penetrating Radar. Delft, The Netherlands. 2004. P. 103–106.
- [6] *Якубов В.П., Суханов Д.Я.* // VII МНТК „Актуальные проблемы электронного приборостроения“ АПЭП-2004. Новосибирск, 2004. С. 13–17.