

Сверхширокополосная трехмерная радиолокация в плоскостростой среде

© Д.Я. Суханов, К.В. Завьялова

Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: sdy@mail.tsu.ru

(Поступило в Редакцию 16 января 2014 г.)

Предложен метод восстановления трехмерных радиоизображений объектов, скрытых в плоскостростых средах, на основе данных многопозиционного моностатического локационного зондирования. Представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований предложенной системы радиолокации в диапазоне от 4 до 14 GHz.

Введение

Радиоволновые методы визуализации [1] объектов, скрытых за радиопрозрачными преградами, находят все большее применение в геолокации, дефектоскопии и археологии. В ряде случаев преграда может иметь вид плоскостростой среды, влияние которой необходимо учитывать для восстановления радиоизображений скрытых объектов. Задача распространения радиоволн в плоскостростых средах уже достаточно хорошо исследована [2]. Рассчитаны коэффициенты отражения и прохождения плоскостростых сред с произвольными электрическими параметрами. В настоящее время интенсивно ведутся исследования по разработке методов восстановления радиоизображений объектов, скрытых за плоскопараллельными пластинками, поскольку находят применение в системах радиолокации через стены [3,4], слои почвы и другие виды плоскостростых радиопрозрачных преград. В работе [4] учет преломления волн на границе раздела сред рассматривается в приближении геометрической оптики. Такой подход позволяет рассмотреть не более одного или двух границ раздела сред, дальнейшее увеличение числа слоев приводит к необходимости решения алгебраических уравнений высоких порядков, которые требуют численного решения. То есть применение приближения геометрической оптики для радиолокации в средах с произвольным числом слоев затруднительно.

В работе [5] был предложен метод получения трехмерных радиоизображений на основе измерений интенсивности поля интерференции прямой волны и волны, рассеянной средой, в широкой полосе частот. Рассматривалась однородная среда, включающая рассеивающие объекты. Был разработан быстрый алгоритм визуализации на основе алгоритма трехмерного быстрого преобразования Фурье. В работе [6] были представлены результаты экспериментальных исследований по восстановлению радиоизображений объектов на различных дальностях.

В настоящей работе предлагается рассмотреть задачу восстановления трехмерных радиоизображений объек-

тов, скрытых за плоскостростыми преградами с произвольным числом слоев.

Постановка задачи и решение прямой задачи распространения радиоволн в плоскостростой среде

Предлагается рассмотреть следующую схему измерения (рис. 1). Излучающая и приемная антенны размещены на фиксированном расстоянии друг от друга d и образуют приемопередающий модуль. Модуль перемещается с помощью двухкоординатного позиционирующего устройства в плоскости, параллельной плоскостростой среде, в которой находятся исследуемые рассеивающие неоднородности. Перемещения осуществляются с фиксированным шагом менее четверти длины волны в двумерной сетке. Считаем, что излучающая и приемная антенны ненаправленные и излучатель может описываться функцией Грина свободного пространства. Волна от излучателя попадает прямо в приемную антенну и одновременно облучает исследуемую среду, где происходит рассеяние волн. Рассеянные волны попадают в приемную антенну, где интерферируют с прямой волной

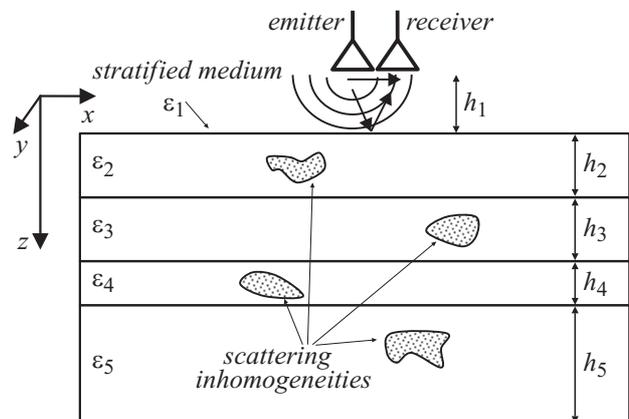


Рис. 1. Схема зондирования плоскостростой среды.

от излучателя. Измеряется интенсивность поля интерференции, которая в дальнейшем будет использоваться для восстановления изображений объектов в среде. В каждый момент времени на излучатель подается монохроматический сигнал, однако частота перестраивается в сверхширокой полосе частот. Таким образом, осуществляются сверхширокополосные измерения, благодаря которым возможно получение разрешения по дальности. В работе [5] был описан метод извлечения косинусной квадратуры из интенсивности интерференционной картины. В настоящей работе в качестве измеренного поля будем рассматривать косинусную квадратуру сигнала.

Распространение радиоволн в плоскостойкой среде удобно описать с помощью разложения поля в спектр плоских волн. Для каждой плоской волны можно рассчитать коэффициенты отражения и прохождения согласно известным решениям [2].

Однако интерес представляет процесс рассеяния радиоволн на неоднородностях, находящихся в плоскостойкой среде. Конечно, будут существовать отражения от границ слоев, многократные переотражения внутри системы слоев, но наибольший вклад будет вноситься однократно рассеянным полем. Однократно рассеянная от неоднородности в среде волна будет приходить с минимальной задержкой и иметь наибольшую амплитуду относительно многократно рассеянных волн. Поэтому рассмотрим процесс однократного рассеяния волн на неоднородностях в плоскостойкой среде. При этом не будем рассматривать поля, отраженные от плоскостойкой среды, поскольку данная задача уже имеет известное решение [2].

Главным образом интересуют фазовые набеги при распространении волн и в меньшей степени медленные измерения амплитуды волн. При этом допущении можно воспользоваться приемом замены рассеивателей на эквивалентные источники, излучающие на удвоенной частоте. Данный прием применим для моностатической схемы измерений, когда излучающая антенна совмещена с приемной антенной, или они находятся много ближе относительно расстояния до рассеивающих объектов.

Таким образом, для определения поля, измеряемого на плоской апертуре над плоскостойкой структурой, рассмотрим процесс распространения волн от источников удвоенной частоты, находящихся в точках размещения рассеивателей. Будем рассматривать каждую точку рассеивающего объекта как изотропный источник сферических волн на удвоенной частоте. Разложим сферическую волну в спектр плоских волн [7], рассчитаем прохождение каждой плоской волны через плоскостойкую среду и путем обратного преобразования Фурье восстановим из спектра плоских волн поле в области измерений.

Обозначим диэлектрическую проницаемость слоев ε_n , а ширину каждого слоя h_n . Причем ε_1 описывает диэлектрическую проницаемость среды, в которой находится зондирующая система, h_1 — высота зондирующей системы над границей раздела первого слоя. Пусть точечный

рассеиватель находится в слое с номером M в точке (x_s, y_s, z_s) . Тогда поле точечного рассеивателя в области приема описывается выражением

$$Q(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_s) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i \sum_{n=1}^{M-1} k_{nz} h_n + i k_{Mz} [z_s - \sum_{n=1}^{M-1} h_n]} \times \frac{ie^{ik_x(x_0-x_s) + ik_y(y_0-y_s)}}{2(2\pi)^2 k_{Mz}} dk_x dk_y, \quad (1)$$

где $k_{nz} = \sqrt{4k_n^2 - k_x^2 - k_y^2}$, $k_{Mz} = \sqrt{4k_M^2 - k_x^2 - k_y^2}$, $k_n = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_n \mu_0}$ — волновое число в слое с номером n , ε_0 — диэлектрическая постоянная, $\sum_{n=1}^{M-1} k_{nz} h_n$ — это набег фазы в слоях, находящихся выше слоя, в котором размещается рассеиватель, $[z_s - \sum_{n=1}^{M-1} h_n]$ — расстояние, проходимое волной в слое, где находится рассеиватель. Здесь не учитываются коэффициенты прохождения слоев.

Решение обратной задачи радиотомографии в плоскостойкой среде

Для решения обратной задачи воспользуемся методом пространственно-согласованной фильтрации

$$\tilde{p}(k_x, k_y, z_s) = \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \tilde{U}(k_x, k_y, k) \tilde{Q}^*(k_x, k_y) dk, \quad (2)$$

где $\tilde{p}(k_x, k_y, z_s)$ — пространственный спектр восстанавливаемого изображения на различных глубинах, $\tilde{U}(k_x, k_y, k)$ — пространственный спектр измеряемого поля в плоскости сканирования, $\tilde{Q}^*(k_x, k_y)$ — это пространственный спектр реакции на точечный рассеиватель (аппаратная функция) системы $Q(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_s) = Q(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_s) = Q(x_0 - x_s, y_0 - y_s) = Q(x, y)$, вычисляемый по формуле

$$\tilde{Q}(k_x, k_y) = \frac{ie^{i \sum_{n=1}^{M-1} k_{nz} h_n + i k_{Mz} [z_s - \sum_{n=1}^{M-1} h_n]}}{2(2\pi)^2 k_{Mz}}. \quad (3)$$

После подстановки (3) в (2) получаем

$$\tilde{p}(k_x, k_y, z_s) = \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \tilde{U}(k_x, k_y, k) \times \frac{e^{-i \sum_{n=1}^{M-1} k_{nz} h_n - i k_{Mz} [z_s - \sum_{n=1}^{M-1} h_n]}}{i 2(2\pi)^2 k_{Mz}} dk. \quad (4)$$

Для вычисления интеграла (4) целесообразно свести его к преобразованию Фурье, так же как это было сделано для однородной среды. Однако здесь трудно выделить одну пространственную переменную по вертикальной оси для всех слоев сразу. То есть необходимо ограничиться возможностью восстановления распределения неоднородностей только в одном слое, заменив переменную интегрирования k на k_{Mz} — пространственную частоту по вертикальной оси для слоя с номером M . Замена переменной интегрирования будет выглядеть следующим образом:

$$k = \frac{\sqrt{\tilde{k}_{Mz}^2 + k_x^2 + k_y^2}}{2\sqrt{\epsilon_M}}, \quad dk = \frac{\tilde{k}_{Mz} d\tilde{k}_{Mz}}{2\sqrt{\epsilon_M} \sqrt{\tilde{k}_{Mz}^2 + k_x^2 + k_y^2}}. \quad (5)$$

Подставим (5) в (4) и получим

$$\tilde{p}(k_x, k_y, z) = \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \tilde{U} \left(k_x, k_y, \frac{\sqrt{\tilde{k}_{Mz}^2 + k_x^2 + k_y^2}}{2\sqrt{\epsilon_M}} \right) \times \frac{e^{-i \sum_{n=1}^{M-1} k_{nz} h_n - i k_{Mz} z} \tilde{k}_{Mz} d\tilde{k}_{Mz}}{i 2(2\pi)^2 k_{Mz} 2\sqrt{\epsilon_M} \sqrt{\tilde{k}_{Mz}^2 + k_x^2 + k_y^2}}, \quad (6)$$

где обозначим $z = z_s - \sum_{n=1}^{M-1} h_n$ — это глубина рассеивателя, отсчитываемая от верхней границы слоя, в котором он находится. Выражение (6) является преобразованием Фурье, отображающем функцию z в пространственные частоты k_{Mz} в пространство z . Однако полученный результат $\tilde{p}(k_x, k_y, z)$ справедлив только для слоя с номером M .

Трехмерное изображение неоднородностей в слое M восстанавливается следующим образом:

$$p_M(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}(k_x, k_y, z) e^{ik_x x + ik_y y} dk_x dk_y. \quad (7)$$

Для получения решения в других слоях необходимо повторить вычисления преобразования Фурье, изменив номер слоя M , после чего решения, полученные в различных слоях, необходимо объединить для получения общего распределения неоднородностей в плоскостой среде.

Было проведено численное моделирование четырех точечных рассеивателей в плоскостой среде. Рассматривалась плоскостойкая среда из 4 слоев (рис. 2), толщина каждого из которых 20 см, с диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_1 = 1$, $\epsilon_2 = 2.25$, $\epsilon_3 = 4$, $\epsilon_4 = 6.25$. Рассеиватели располагались на глубинах 10, 30, 50 и 70 см. Область сканирования по оси x (размер синтезируемой апертуры) был равен 2 м. Размещение рассеивателей и границы слоев представлены на рис. 2. Моделирование проводилось для сигнала с равномерным спектром в полосе от 100 MHz до 10 GHz.

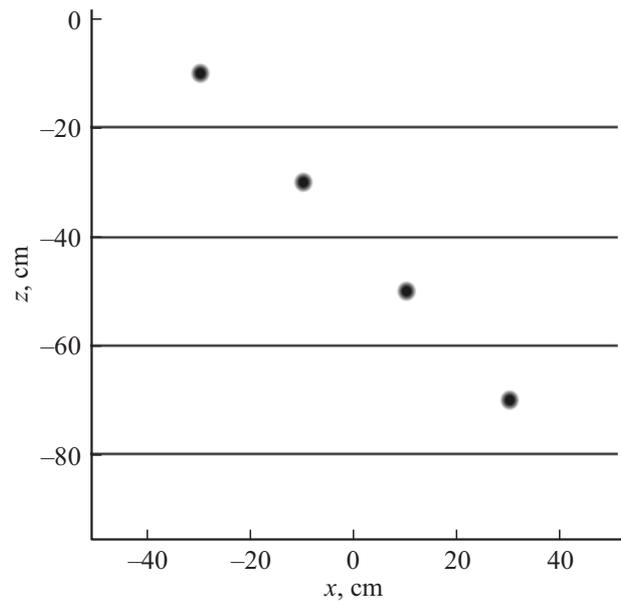


Рис. 2. Размещение точечных рассеивателей в плоскостой среде.

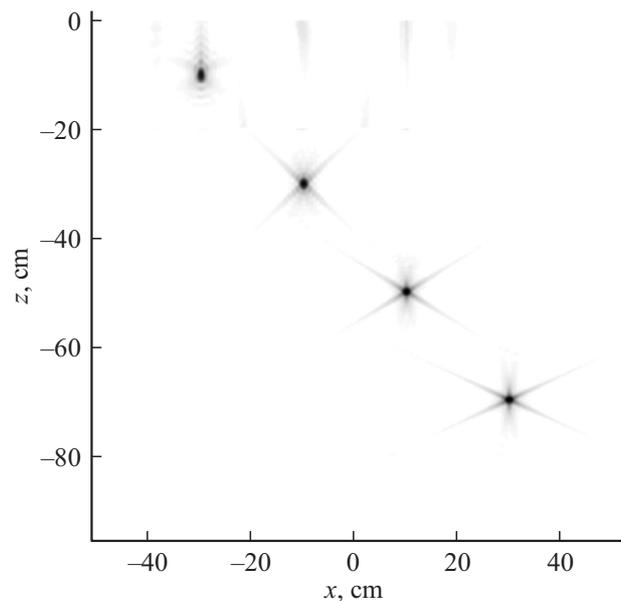


Рис. 3. Восстановленное распределение рассеивателей в плоскостой среде.

После объединения решений, полученных для каждого слоя, было сформировано общее распределение рассеивающих неоднородностей в рассматриваемой плоскостой среде (рис. 3)

Представленный метод решения обратной задачи является быстродействующим, поскольку полностью сводится к применению алгоритма быстрого преобразования Фурье. Однако для каждого слоя среды необходимо каждый раз заново производить расчет, поэтому применение данного метода для среды с плавным профилем

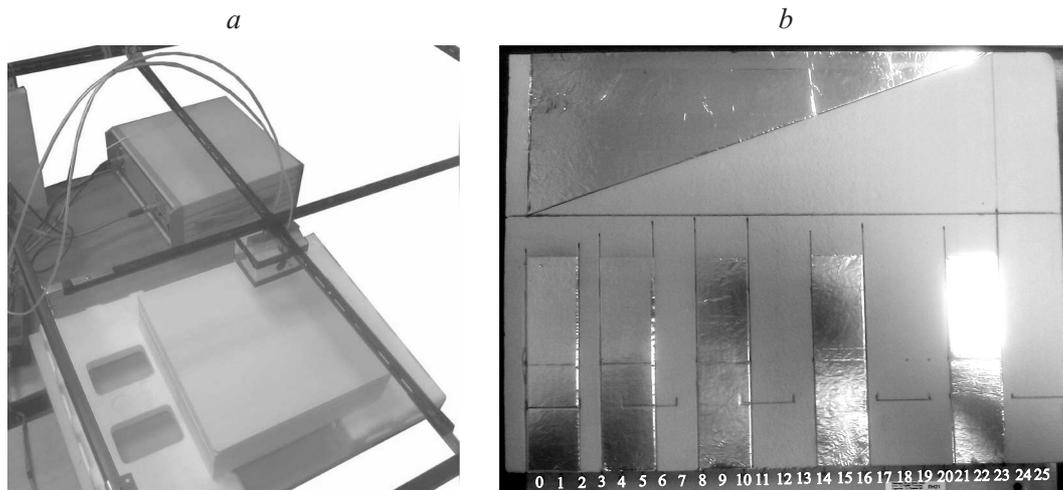


Рис. 4. Фотографии экспериментальной установки (а) и тестового объекта (b).

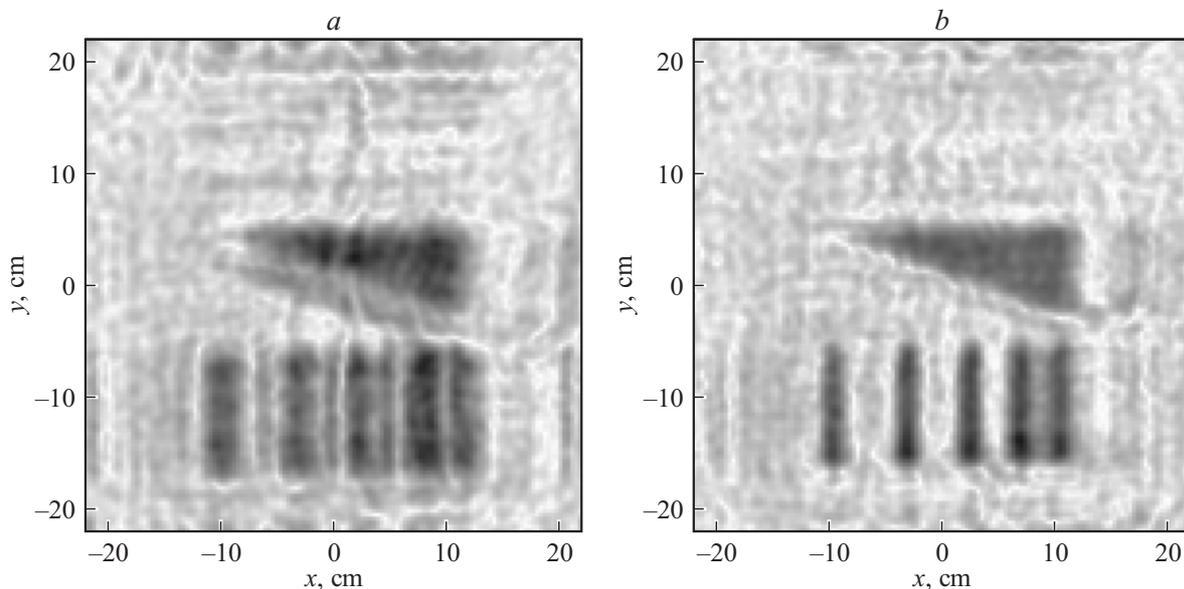


Рис. 5. Восстановленное изображение тестового объекта (а — без учета плоскопараллельной пластинки из ПВХ, b — с учетом преломления волн в пластинке).

диэлектрической проницаемости (множеством слоев) приведет к существенному росту количества вычислительных операций. Также следует отметить, что для работы алгоритма требуется априорная информация о толщине слоев и их диэлектрической проницаемости.

Экспериментальная проверка метода визуализации объектов в плоскослоистой среде

На рис. 4, b представлена фотография экспериментальной установки и тестового объекта. В качестве плоскослоистой среды была рассмотрена среда воздух-поливинилхлорид-воздух. Пластины из поливинилхло-

рида (ПВХ) располагались на опорах из пенопласта. Общая толщина пластин составила 10 см. За ПВХ размещался тестовый объект (рис. 4, b), который представляет собой 5 металлических полосок шириной 25 мм каждая и металлический прямоугольный треугольник, с катетами 80 и 225 мм. Металлические полоски были размещены на расстояниях друг от друга 1, 2, 3 и 4 см соответственно. Данный тестовый объект позволит оценить разрешающую способность системы. Показатель преломления ПВХ составляет 1.38.

Расстояние от измерительной системы до тестового объекта составляет 20 см, расстояние от преграды до объекта 4 см. Для радиозондирования использовался скалярный анализатор цепей Микран Р2М-18/2, а полоса зондирования была выбрана от 4 до 14 GHz.

По сути рассматриваемая экспериментальная сцена содержит три плоских слоя: воздух–ПВХ–воздух. Для восстановления радиоизображений использовалась формула (7). В результате обработки данных радиозондирования без учета наличия пластины из ПВХ в приближении, что фоновая среда–вакуум, было получено радиоизображение тестового объекта, которое представлено на рис. 5, *a*. Можно видеть, что изображение объекта искажено, поскольку волны проходят через плоскопараллельную пластинку.

Если учесть толщину пластин и диэлектрическую проницаемость ПВХ, то восстанавливается более точное изображение объекта, которое представлено на рис. 5, *b*. Полученный результат подтверждает необходимость учета распространения волн в плоскостойких преградах для точного восстановления изображений неоднородностей. Также обработка экспериментальных данных показала практическую применимость формулы (7) и ее соответствие реальным физическим процессам.

Видно, что учет преломления в пластинке позволяет восстановить более качественное изображение, полученное разрешение порядка 1 см. По изображению рис. 5, *a* можно судить о наличии искажений, когда влияние плоскопараллельной пластинки не учитывается. Также следует отметить, что при решении обратной задачи не учитываются многократные переотражения в слое, что приводит к появлению артефактов в виде ложных целей на расстоянии больше, чем первичное изображение объекта. Поскольку амплитуда ложной цели меньше и она находится на большем расстоянии, то ее легко отличить от истинного изображения. Поэтому пренебрежение многократным рассеянием не приводит к существенным ошибкам при визуализации целей.

Заключение

Предложен метод сверхширокополосной трехмерной радиотомографии через плоскостойкую среду на основе измерения амплитуды поля интерференции предметного и опорного сигналов одиночным приемопередающим модулем, перемещающимся в плоской прямоугольной области, при последовательном измерении на различных частотах в широкой полосе. Обработка данных измерений реализуется на основе быстрого преобразования Фурье, благодаря чему обработка данных может происходить в режиме реального времени (в процессе измерений). Разрешение получаемых радиоизображений близко к теоретическому пределу для широкополосных радиолокаторов с синтезированной апертурой. Восстановление радиоизображений осуществляется в приближении однократного рассеяния и многократные переотражения в слоях не учитываются, что может вызвать появление артефактов, однако их влиянием можно пренебречь. Применимость предложенного метода подтверждена экспериментально. Метод может найти

применение в системах визуализации объектов, скрытых за радиопроницаемыми плоскостойкими преградами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ в рамках проекта № 12-02-31470 мол_а, и проекта № 13-02-98025 р_сибирь_а.

Список литературы

- [1] Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
- [2] Бреховский Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
- [3] Ahmad F., Amin M.G., Kassam S.A. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2005. Vol. 41. N 1. P. 271–283.
- [4] Ahmad Fauzia, Amin Moeness G., Kassam Saleem A., Frazer Gordon J. // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. 2003. P. 187–192.
- [5] Суханов Д.Я., Завьялова К.В. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 6. С. 85–89.
- [6] Суханов Д.Я., Завьялова К.В. // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 9/2. С. 17–21.
- [7] Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979. 384 с.