

* *
*

УДК 537.86, 621.396.96

Д.Я. СУХАНОВ

БИСТАТИЧЕСКАЯ МНОГОПОЗИЦИОННАЯ ВОЛНОВАЯ ТОМОГРАФИЯ¹

Предлагается метод бистатической многопозиционной волновой томографии, который применим и для случая радиоволнового зондирования, и для случая ультразвукового зондирования. Рассматривается зондирующая система, в которой излучатель и приемник перемещаются независимо в плоскости над исследуемым объектом. Для получения трёхмерных радиоизображений рассеивающих объектов измеренные данные обрабатываются методом пространственно-согласованной фильтрации. Показана возможность получения разрешения по дальности даже при использовании монохроматических зондирующих сигналов. Приводятся результаты численного моделирования и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: радиотомография, радиовидение, бистатическое радиозондирование.

Введение

Трёхмерная радиоволновая томография может основываться на различных способах зондирования с различными комбинациями количества и размещения излучателей и приёмников [1]. Часто используются локационные моностатические схемы измерений с синтезированной апертурой [2–7]. Применение сверхширокополосных сигналов при локационных измерениях позволяет получать разрешение по дальности и восстанавливать трёхмерные радиоизображения [3–7]. Однако в случае применения монохроматических сигналов разрешение по дальности получить не удаётся. Многокурсовое трансмиссионное монохроматическое зондирование позволяет получить разрешение неоднородностей по глубине [8, 9]. К недостаткам такого метода измерений можно отнести необходимость многостороннего доступа к исследуемому объекту, что не всегда возможно. Бистатические локационные схемы измерений имеют потенциал для получения разрешения по дальности при одностороннем доступе и зондировании монохроматическими сигналами, что было показано в работе [10]. Размещение излучателя и приёмника в различных точках пространства позволяет расширить пространственный спектр аппаратной функции системы в область низких пространственных частот. Расширение пространственного спектра аппаратной функции системы обеспечивает разрешение по дальности. Но при этом требуется осуществлять измерения поля в трёхмерном объёме на различных расстояниях от исследуемого объекта. Другой возможностью для расширения информативности монохроматических измерений является применение множества излучателей и множества приёмников. Сигналы, измеряемые при включении различных комбинаций излучателей и приёмников, несут различную информацию о рассеивающих объектах в среде. В работе [11] было показано, что данный подход может позволить получать двумерные изображения объектов при монохроматическом зондировании с применением перпендикулярно размещённых линейных матриц излучателей и приёмников. Если же разместить линейные матрицы параллельно, то появляются дополнительные возможности повышения уровня сигнал/шум при импульсном сверхширокополосном зондировании, как было показано в работе [12], где множество излучателей используется для преобразования зондирующего поля в плоскую волну.

В настоящей работе предлагается осуществлять радиолокационные измерения путём перемещения излучателя и приёмника в одной плоскости независимо в различных комбинациях. Подобные измерения являются избыточными, однако позволят снизить уровень шума и получить разрешение по дальности при использовании монохроматических сигналов. Применение сверхширокополосных сигналов в такой схеме измерений позволит повысить пространственное разрешение и более существенно увеличить отношение сигнал/шум.

Постановка задачи

Рассмотрим многопозиционную бистатическую схему измерений, в которой источник и приёмник перемещаются независимо вдоль осей x и y (рис. 1). Поле в точке приёма представим в

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ в рамках проекта № 12-02-31470 мол_а.

виде пятимерной функции комплексных амплитуд $U(x_1, y_1, x_2, y_2, f)$, где (x_1, y_1) – координаты излучателя на плоскости измерений, (x_2, y_2) – координаты приёмника на плоскости измерений, f – частота зондирующего сигнала.

При такой схеме измерений существуют различные комбинации положений излучателя и приёмника, что может позволить визуализировать частично затенённые объекты, которые не визуализируются при моностатической схеме зондирования.

То есть бистатическая многопозиционная схема измерений может позволить обнаруживать объекты, скрытые за другими объектами. Поскольку размерность измеряемых данных (5 измерений) больше размерности восстанавливаемого изображения (3 измерения), возможно также существенное повышение уровня сигнал/шум за счёт избыточности измеренных данных.

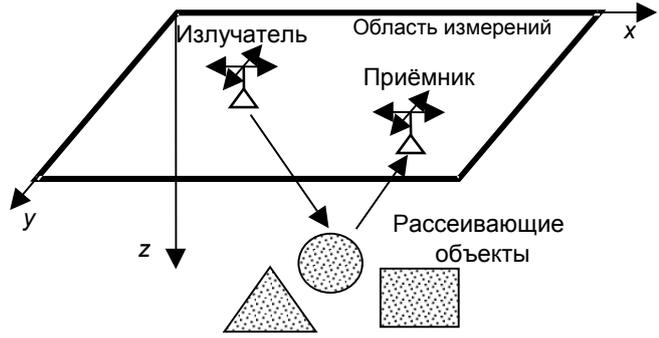


Рис. 1. Схема бистатических многопозиционных измерений

Решение прямой и обратной задачи

Поле, рассеянное распределением неоднородностей в среде, можно записать в скалярном приближении однократного рассеяния в следующем виде:

$$U(x_1, y_1, x_2, y_2, f) = \iiint_V P(x, y, z) G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) G(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}) dx dy dz, \quad (1)$$

где $P(x, y, z)$ – функция, описывающая распределение рассеивающих неоднородностей; $G(\mathbf{r}) = e^{ik|\mathbf{r}|} / (4\pi|\mathbf{r}|)$ – функция Грина свободного пространства; $\mathbf{r}_1 = (x_1, y_1, 0)$ – координаты излучателя; $\mathbf{r}_2 = (x_2, y_2, 0)$ – координаты приёмника; $\mathbf{r} = (x, y, z)$ – координаты текущей точки интегрирования в среде; V – объём исследуемой среды, содержащей рассеивающие неоднородности, не включающий плоскость измерений; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число в фоновой среде без поглощения; λ – длина волны в среде, рассматривается временная зависимость вида $e^{-i2\pi ft}$. В (1) не учитываются постоянные множители, поскольку восстановленные изображения, в конечном счете, будут нормированы на максимум. Скалярное представление полей применимо не только для ультразвуковых волн, но и для электромагнитных волн, так как поляризационные эффекты существенно не влияют на фазу волны, а в рассматриваемой задаче наибольший интерес представляют именно фазовые соотношения полей. Для учёта затенения необходимо учитывать дифракцию на вышележащих объектах. Будем учитывать эффект дифракции в приближении Кирхгофа.

Для решения обратной задачи, то есть восстановления изображения рассеивающих неоднородностей предлагается воспользоваться методом согласованной фильтрации, в котором в качестве согласованного фильтра будет использоваться комплексно-сопряжённая реакция системы на точечный рассеиватель. Восстанавливаемое изображение записывается в виде

$$p(x, y, z) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} U(x_1, y_1, x_2, y_2, f) G^*(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) G^*(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 df, \quad (2)$$

где $[x_{\min}, x_{\max}]$ – пределы перемещения излучателя и приёмника по оси x ; $[y_{\min}, y_{\max}]$ – пределы перемещения излучателя и приёмника по оси y ; $[f_{\min}, f_{\max}]$ – пределы изменения частоты зондирующего сигнала f . Функция $p(x, y, z)$ является восстановленным трёхмерным изображением рассеивающих неоднородностей.

При обработке экспериментальных данных в качестве функции U будет выступать многомерный массив комплексных чисел, сформированный из квадратур измеренного сигнала на выбранной частоте зондирования. Восстановление трёхмерных радиоизображений по формуле (2) требует значительных вычислительных ресурсов, поскольку такое вычисление, по сути, содержит восемь вложенных циклов с операциями комплексного умножения и сложения.

Для практического использования решение (2) необходимо свести к преобразованиям Фурье, чтобы было возможно восстанавливать изображение неоднородностей, применяя алгоритмом быстрого преобразования Фурье. Для упрощения рассмотрения задачи ограничимся получением плоского изображения с разрешением по дальности вида $p(x, z)$, то есть рассмотрим данную задачу в плоскости XOZ , положив везде $y = 0$. Тогда (2) примет следующий вид:

$$p(x, z) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} U(x_1, x_2, f) \frac{e^{-ik\sqrt{(x-x_1)^2+(z-z_1)^2}}}{\sqrt{(x-x_1)^2+(z-z_1)^2}} \frac{e^{-ik\sqrt{(x-x_2)^2+(z-z_2)^2}}}{\sqrt{(x-x_2)^2+(z-z_2)^2}} dx_1 dx_2 df, \quad (3)$$

где (x_1, z_1) – координаты излучателя; (x_2, z_2) – координаты приёмника.

Можно видеть, что в (3) либо интеграл по x_1 , либо интеграл по x_2 может быть вычислен по теореме о свёртке с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Это снизит размерность вычислений на 1, а для случая двумерного сканирования (по осям x и y) на 2. Но тем не менее для двумерного сканирования потребуется шесть вложенных циклов, содержащих операции сложения и умножения. В случае одномерного сканирования (по оси x) потребуется четыре вложенных цикла, что приемлемо для вычислений на персональном компьютере.

Было проведено численное моделирование сверхширокополосного радиозондирования согласно схеме, представленной на рис. 1. Прямая задача решалась на основе формулы (1) для случая одномерного сканирования вдоль оси x с учётом дифракции в приближении Кирхгофа. В качестве тестового объекта рассматривались два горизонтальных отрезка длиной 20 и 60 см на дальности 25 и 50 см соответственно. Рассматривался диапазон частот зондирующего сигнала от 1 до 10 ГГц, диапазон перемещения излучающей и приёмной антенн 1 м. Поскольку сферические волны рассеиваются на плоских объектах в широкой диаграмме, то это потенциально может обеспечить визуализацию затенённых областей при бистатистическом зондировании. При моностатическом зондировании плоские горизонтальные затенённые объекты не будут визуализированы, поскольку волны, падающие под углом, отражаются в противоположную сторону от моностатического локатора. Полученные результаты решения прямой задачи диагонально симметричны, поскольку положение источника (x_1) и приёмника (x_2) можно менять местами вследствие выполнения теоремы

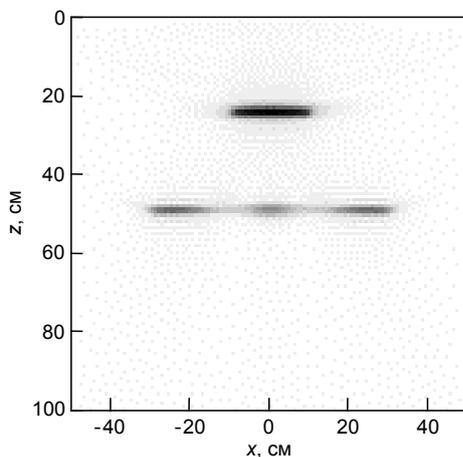


Рис. 2. Восстановленное изображение неоднородностей при радиоволновом зондировании в полосе частот от 1 до 10 ГГц

взаимности.

Результат восстановления распределения неоднородностей, согласно формуле (3), представлен на рис. 2. Можно видеть, что затеняемая область нижнего объекта визуализирована. Также отметим, что при бистатистическом многопозиционном зондировании снижается уровень шума и артефактов благодаря избыточности информации в измеренных данных, даже если измерения производятся с шагом больше полдлины волны.

Затеняемая область визуализирована, поскольку существуют зеркально отражённые волны от нижней пластины, проходящие к приёмнику. При моностатическом же зондировании волны уходили бы в сторону от точки приёма. Данное рассуждение справедливо для плоских объектов, имеющих узкую диаграмму рассеяния. Возможность визуализации объекта можно оценить в приближении геометрической оптики: если луч от источника, отражаясь от объекта, попадает в приёмник, то этот объект будет визуализирован.

Монохроматическое многопозиционное бистатистическое радиозондирование

Допустимо сделать предположение, что при многопозиционном бистатистическом зондировании, даже при измерениях на одной частоте, возможно получение разрешения по дальности для плоских объектов, так же как при использовании сверхширокополосных сигналов. Проверим данное предположение.

Исследуем реакцию системы на горизонтальную плоскость. Результат измерений можно оценить на основе метода эквивалентных зеркальных источников, то есть заменим поле, отражённое от плоской поверхности, на поле эквивалентного зеркального источника. Реакцию на плоскость, находящуюся на высоте z , исходя из модели зеркального источника, можно записать в виде

$$U(x_1, x_2) = e^{ik\left(\sqrt{(x_2-x_1)^2+4(z-z_0)^2}\right)} / \sqrt{(x_2-x_1)^2+4(z-z_0)^2}, \quad (4)$$

где x_1 – координата излучателя по оси x ; x_2 – координата приёмника по оси x ; z_0 – координата излучателя и приёмника по оси z .

Исходя из формулы (4), можно сделать вывод, что зависимость поля от $(x_2 - x_1)$ меняется при изменении высоты отражающей плоскости. То есть по характерной зависимости поля от $(x_2 - x_1)$ возможно определить высоту отражающей плоскости z . В то же время при моностатическом зондировании такой зависимости нет. То есть бистатическое зондирование потенциально может позволить получать разрешение по дальности для плоских объектов при использовании монохроматического сигнала.

Оценим разрешающую способность по дальности при решении обратной задачи по формуле (3) для плоских объектов при бистатическом зондировании. Подставив (4) в (3) без учёта медленно меняющегося знаменателя и положив $x = 0$, получим

$$p(z) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} e^{ik\left(\sqrt{(x_2-x_1)^2+4(z-z_0)^2}-\sqrt{x_1^2+(z-z_0)^2}-\sqrt{x_2^2+(z-z_0)^2}\right)} dx_1 dx_2, \quad (5)$$

где z_s – высота размещения отражающей плоскости; z – текущая высота фокусировки. Разложим квадратные корни в показателе экспоненты в ряд Тейлора в приближении $z \gg x$ и вычислим интеграл по x_2 методом стационарной фазы (точка стационарной фазы $x_2 = -x_1$), а полученный интеграл по x_1 сведём к интегралу Френеля. Тогда получим

$$p(z) \approx \frac{e^{ik2(z_s-z)} \sqrt{z_s z}}{\sqrt{k} \sqrt{z-z_s}} \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} e^{it^2} dt = \frac{e^{ik2(z_s-z)} \sqrt{z_s z}}{\sqrt{k} \sqrt{z-z_s}} [F(T_{\max}) - F(T_{\min})], \quad (6)$$

где введено обозначение интеграла Френеля: $\int_0^T e^{it^2} dt = F(T)$, $t = x_1 \sqrt{k(z-z_s)/(z_s z)}$, $T_{\min} = x_{\min} \sqrt{k(z-z_s)/(z_s z)}$, $T_{\max} = x_{\max} \sqrt{k(z-z_s)/(z_s z)}$. Заметим, что при $z < z_s$ T_{\min} и T_{\max} становятся мнимыми, тогда необходимо заменить $F(T)$ на $(F(|T|))^*$.

Желательно связать разрешающую способность с размерами апертуры $B = x_{\max} - x_{\min}$. Нас интересует разрешение системы напротив центра апертуры, тогда положим $x_{\max} = B/2$, $x_{\min} = -B/2$ и $T_{\max} = -T_{\min} = B \sqrt{k(z-z_s)/(4z_s z)}$, обозначим $T = T_{\max}$. Следовательно, $[F(T_{\max}) - F(T_{\min})] = [F(T) - F(-T)] = 2F(T)$.

Для оценки разрешения нас интересует только амплитуда функции $p(z)$:

$$|p(z)| = |F(T) 2\sqrt{z_s z} / \sqrt{k(z-z_s)}| = B |F(T)/T|. \quad (7)$$

Будем считать, что разрешение по дальности определяется полушириной функции $|p(z)|$. Максимального значения функция $|p(z)|$ достигает при $z = z_s$ или $T = 0$. Уравнением для вычисления разрешающей способности будет

$$|p(z)|/|p(z_s)| = 0.5 \quad \text{или} \quad |F(T)/T| = 0.5, \quad (8)$$

так как $\lim_{T \rightarrow 0} \frac{F(T)}{T} = 1$ и $|p(z_s)| = B$. Уравнение (8) имеет решение, которое находится численно: $T_{0.5} = 1.9504318$. Исходя из полученных решений, можно определить ширину $|p(z)|$ на уровне половинной амплитуды из уравнений

$$B\sqrt{k(z_s - Z_1)}/\sqrt{4Z_1z_s} = T_{0.5}, \quad B\sqrt{k(Z_2 - z_s)}/\sqrt{4Z_2z_s} = T_{0.5}, \quad (9)$$

где Z_1 – нижняя граница; Z_2 – верхняя граница. Разрешающая способность определяется как $\Delta Z = Z_2 - Z_1$. Из (9) следует

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 = \frac{8T_{0.5}^2 z_s^2 B^2 k}{B^4 k^2 - z_s^2 16T_{0.5}^4}. \quad (10)$$

Выражение (10) является оценкой разрешающей способности по дальности для бистатической монохроматической томографии при зондировании плоских объектов. Зависимость разрешающей способности от расстояния, размеров апертуры и длины волны нелинейная. Однако можно утверждать, что с уменьшением расстояния до плоскости разрешение улучшается. С увеличением размеров апертуры и с уменьшением длины волны разрешение также улучшается. Данные закономерности согласуются с аналогичными закономерностями для моностатических радаров с синтезированной апертурой при визуализации точечного рассеивателя.

Для оценки возможности визуализации объектов с разрешением по дальности, при измерениях на одной частоте по многопозиционной бистатической схеме зондирования, было проведено

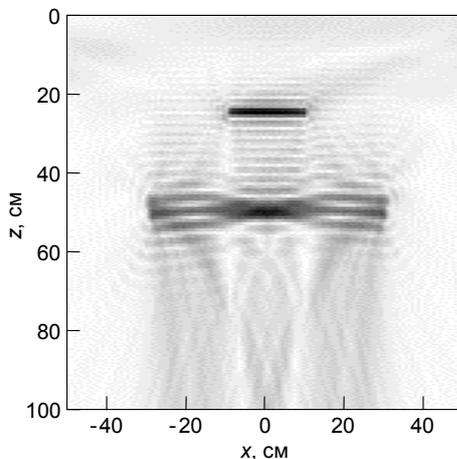


Рис. 3. Восстановленное изображение неоднородностей при бистатическом многопозиционном зондировании на частоте 10 ГГц

численное моделирование согласно формуле (1) с учётом дифракции в приближении Кирхгофа для 10 ГГц. Рассматривался диапазон перемещения приёмной и передающей антенн на отрезке 2 м. Путём обработки данных для частоты 10 ГГц по формуле (3), но без интегрирования по частоте, поскольку частота одна, было восстановлено изображение верхних границ объектов (рис. 3). Можно видеть, что действительно получено разрешение по дальности, несмотря на использование монохроматического сигнала. Более качественное изображение можно получить, если повысить частоту зондирующего сигнала.

Даже при зондировании на одной частоте сохраняется возможность визуализации затенённых областей. Однако более существенным результатом является возможность получения разрешения по дальности плоских объектов при монохроматическом радиозондировании. Эффект дифракции на вышерасположенных объектах приводит к искажению изображения нижележащих объектов.

Экспериментальные исследования бистатической многопозиционной схемы зондирования

Экспериментальные исследования бистатической многопозиционной схемы зондирования

Для проверки возможности получения разрешения по дальности при монохроматическом бистатическом многопозиционном зондировании был проведён эксперимент с ультразвуковыми волнами в воздухе на частоте 40 кГц (длина волны 8.25 мм). На рис. 4 представлена фотография экспериментальной установки. В качестве излучателя и приёмника использовались датчики МА40S4R. Тестовый объект имел вид двух горизонтальных пластинок, верхняя имела ширину 5 см, а нижняя 20 см. Расстояние между пластинками 10 см. Верхняя пластинка находилась на расстоянии 10 см от области измерений. Два линейных сканера позволяли перемещать излучатель и приёмник независимо на области 42 см. На рис. 5 представлен результат измерений косинусной квадратуры сигнала. Полученный результат качественно согласуется с результатами численного моделирования прямой задачи.



Рис. 4. Фотография экспериментальной установки и тестового объекта

Результаты измерений были обработаны с помощью формулы (3), в результате чего было восстановлено изображение тестового объекта с разрешением по дальности (рис. 6). Можно видеть, что верхний объект визуализирован с разрешением по дальности около 1 см, в то время как нижний объект визуализирован с разрешением около 3 см. Также частично визуализируется затенённая область нижнего объекта. Для сравнения полученного результата с численной моделью было проведено численное моделирование бистатического многопозиционного ультразвукового зондирования на частоте 40 кГц для объектов той же формы. На рис. 7 представлен результат численного моделирования. Можно видеть, что в целом он согласуется с результатами эксперимента. То есть предложенная математическая модель прямой задачи, с учётом явления дифракции, соответствует реальным физическим процессам.

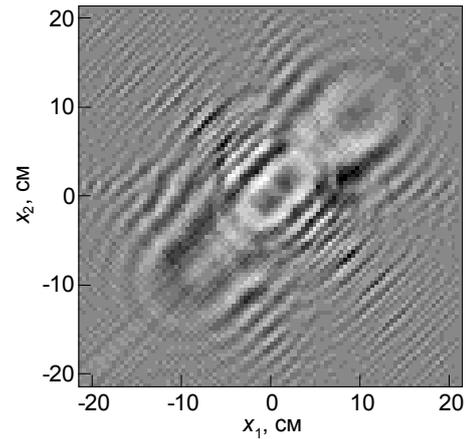


Рис. 5. Результат измерений ультразвукового поля в воздухе (косинусная квадратура)

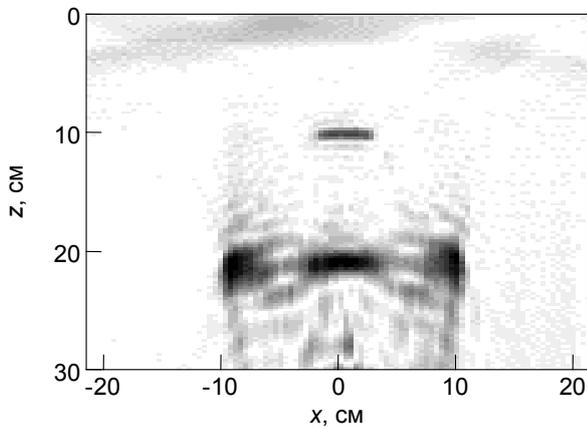


Рис. 6. Восстановленное изображение тестового объекта

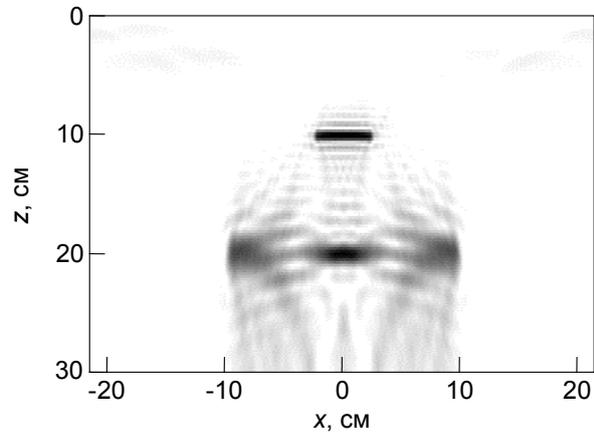


Рис. 7. Восстановленное изображение тестовых объектов по результатам численного моделирования для ультразвуковых волн в воздухе на частоте 40 кГц

Различия результата численного моделирования и эксперимента можно объяснить ограниченностью диаграмм направленных ультразвуковых излучателей, что приводит к уменьшению размера апертуры, а также наличием шумов измерений. Согласно формуле (10), уменьшение размера апертуры приводит к ухудшению разрешения по дальности, что также наблюдается на восстановленном изображении. Ограниченностью диаграммы направленности можно объяснить искажение изображения затененной части объекта. Объекты и в эксперименте, и в численной модели визуализируются практически одинаково. Для исследования изображения нижней пластины без влияния дифракции на верхней был проведён эксперимент с нижней пластиной отдельно. Результат восстановления изображения объекта представлен на рис. 8. Объект отчётливо визуализирован, однако имеет неравномерную ширину, что связано с уменьшением апертуры системы на краях области измерений.

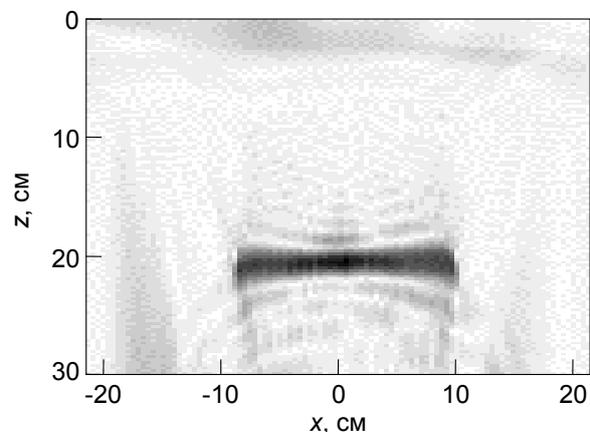


Рис. 8. Восстановленное изображение одиночного объекта по результатам эксперимента на частоте 40 кГц

Заключение

Предложенный метод бистатической многопозиционной томографии применим для визуализации рассеивающих объектов в однородной среде при наличии частичного затенения, а также позволяет получить разрешение по дальности при зондировании на одной частоте. Приводится метод оценки разрешения по дальности при монохроматическом зондировании. Разрешение по дальности тем лучше, чем больше размер апертуры и меньше расстояние до объекта. Результаты численного моделирования прямой и обратной задачи согласуются с результатами экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие для вузов / под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Якубов В.П., Тельпуховский Е.Д., Буянов Ю.И. // Вестник Томского государственного университета. – 2003. – № 278. – С. 55–60.
3. Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 10. – С. 63–79.
4. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. // ЖТФ. – 2012. – Т. 82. – Вып. 6. – С. 85–89.
5. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 9/2. – С. 17–21.
6. Якубов В.П., Суханов Д.Я. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. L. – № 4. – С. 329–338.
7. Суханов Д.Я., Якубов В.П. // ЖТФ. – 2006. – Т. 76. – Вып. 7. – С. 64–68.
8. Суханов Д.Я., Муравьева А.А. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 8/2. – С. 193–195.
9. Якубов В.П., Славгородский С.А., Кутов В.П. // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16. – № 09. – С. 811–815.
10. Суханов Д.Я., Козик А.А. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 8/2. – С. 180–183.
11. Суханов Д.Я., Латипова Л.М. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 9/2. – С. 17–21.
12. Zhaofa Zeng, Jing Li, Ling Huang, and Fengshan Liu. // 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), June 4–8, 2012. – Shanghai, China, 2012. – P. 119–124.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: sdy@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 18.12.13.