

УДК 621.371, 537.874.6

Д.Я. СУХАНОВ, К.В. ЗАВЬЯЛОВА

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ РАЗРЕЖЕННОЙ МАТРИЦЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ¹

Предлагается радиологический метод восстановления радиоизображений на основе разреженных измерений интенсивности поля интерференции опорного и предметного сигналов. Используется несколько источников, облучающих исследуемый объект и область измерений с разных сторон. Источники включаются по очереди, что позволяет увеличить объём информации о рассеивающих объектах. Приводятся результаты численного моделирования и оценка разрешающей способности.

Ключевые слова: радиотомография, радиовидение, радиологическая.

Введение

Радиотомография миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов находит всё большее применение в системах визуализации объектов, скрытых за радиопрозрачными преградами [1]. В частности, радиотомография применяется в системах обеспечения безопасности, контроля доступа и контроля качества.

Радиологические методы [2] являются перспективным развитием систем радиотомографии терагерцового и субтерагерцового диапазонов, поскольку требуют измерения только интенсивности поля и не требуют измерения фазы. В рассматриваемом диапазоне частот измерение фазы является сложной технической задачей. Тем не менее, фазовая информация необходима для восстановления радиоизображения с разрешением, близким к дифракционному пределу. Однако в радиологических системах за счёт интерференции опорного и предметного сигналов возможно частичное сохранение фазовой информации в интенсивности интерференционной картины. Это позволяет восстанавливать радиоизображения с предельно возможным разрешением, что показано в работах [3, 4]. Одной из проблем применения радиологического метода является необходимость измерения амплитуды поля с шагом полдлины волны, что требует значительного времени на измерение при механическом сканировании либо применения дорогостоящих заполненных матриц элементов, измеряющих амплитуду поля. Необходима разработка метода, позволяющего применять разреженные измерения амплитуды поля, но не приводящего к появлению артефактов и вторичных максимумов.

В данной работе предлагается радиологический метод восстановления радиоизображений на основе разреженных измерений амплитуды поля интерференции предметного сигнала и различных опорных сигналов (от разных источников). Минимизировать уровень артефактов и вторичных максимумов предлагается за счёт оптимального размещения излучающих элементов в пространстве относительно области измерений.

Постановка задачи

Рассматривается задача узкополосной радиологической по разреженным измерениям интенсивности поля с применением нескольких опорных источников (рис. 1). На рис. 1 кружочками показаны точки измерения интенсивности, звёздочками обозначены источники. Предполагается, что точки измерения находятся в плоскости на расстоянии h_2 от плоскости размещения излучателей. Исследуемый объект, имеющий форму ступенчатого многоугольника, находится на расстоянии h_1 от плоскости излучателей. Считаем излучатели точечными и изотропными. Количество излучателей может варьироваться, и, очевидно, чем больше будет излучателей, тем больше информации о рассеивающем объекте будет измерено. Предполагается, что излучатели работают не одновременно, а по очереди, и в каждый момент времени работает только один излучатель. То есть в плоскости измерений получаются различные интерференционные картины для различных излучателей.

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

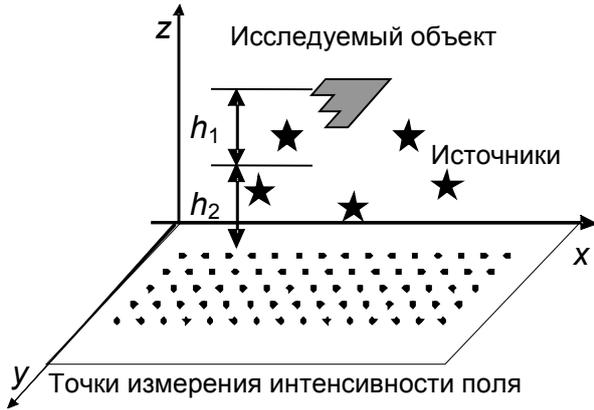


Рис. 1. Схема измерений

По измеренной интенсивности поля интерференции необходимо восстановить изображение исследуемого объекта. Будем рассматривать задачу в скалярном приближении.

Запишем поле в плоскости измерений в виде

$$U(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) + B(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где $A(\mathbf{r})$ - поле, рассеянное объектом (предметная волна); $B(\mathbf{r})$ - поле прямой волны от источника на области измерений (опорная волна). Будем считать, что амплитуда опорной волны много больше амплитуды предметной волны.

Учтём, что в рассматриваемой задаче измеряется интенсивность поля, то есть величина:

$$W(\mathbf{r}) = |U(\mathbf{r})|^2. \quad (2)$$

Запишем предметную волну $A(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s)$ в точках измерения \mathbf{r} при работе излучателя в точке \mathbf{r}_s в приближении однократного рассеяния [5]:

$$A(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) = - \iint_{S'} p(\mathbf{r}') B(\mathbf{r}', \mathbf{r}_s) \frac{\partial G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n} d^2 \mathbf{r}', \quad (3)$$

где $\mathbf{r} = (x, y, z=0)$ - точка измерения поля; $\mathbf{r}_s = (x_s, y_s, z_s = h_2)$ - координата излучателя; $\mathbf{r}' = (x', y', z')$ - координата интегрирования по точкам объекта, где предполагается плоский объект на дальности $z = h_1 + h_2$; S' - поверхность объекта, на которой производится интегрирование; $B(\mathbf{r}', \mathbf{r}_s)$ - поле источника, на поверхности объекта; $p(\mathbf{r}')$ - коэффициент рассеяния точек объекта; $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \exp(ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)/(4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)$ - функция Грина свободного пространства.

Поле опорной волны запишем на основе функции Грина свободного пространства:

$$B(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) = a e^{ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|}/|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|, \quad (4)$$

где a - размерный коэффициент, описывающий амплитуду источника поля.

Восстановление радиоизображений

Для восстановления радиоизображений рассеивающих объектов рассмотрим выражение (2) с учётом выражения (1):

$$W(\mathbf{r}) = |U(\mathbf{r})|^2 = |A(\mathbf{r}) + B(\mathbf{r})|^2 = (A+B)(A+B)^* = |A|^2 + |B|^2 + AB^* + A^*B, \quad (5)$$

где учтём, что $|A| \ll |B|$, при этом B - априорно известная функция. Также можно считать, что $(AB^* + A^*B) \gg |A|^2$, тогда можем вычислить функцию вида

$$C(\mathbf{r}) = (AB^* + A^*B)/(2|B|) \approx (W(\mathbf{r}) - |B(\mathbf{r})|^2)/(2|B|). \quad (6)$$

Если расписать комплексные числа $A = a_1 + ia_2$ и $B = b_1 + ib_2$, то выражение $(AB^* + A^*B) = 2(a_1b_1 + a_2b_2)$, по сути, является удвоенным скалярным произведением векторов (a_1, a_2) и (b_1, b_2) , то есть $C(\mathbf{r})$ представляет собой проекцию вектора (a_1, a_2) на единичный вектор $(b_1, b_2)/|B|$. Величина $\tilde{C} = CB/|B|$ будет иметь фазу двух возможных значений: либо $\arg(B)$,

либо $\arg(B) + \pi$. Если считать, что фаза предметной волны A распределена равномерно от $-\pi$ до π , то фаза \tilde{C} будет иметь максимальное отличие от фазы A не больше $\pm\pi/2$. Данной точности определения фазы достаточно для метода пространственно-согласованной фильтрации и восстановления изображения исследуемого объекта. Формула (6) позволяет вычислить из измеренной интенсивности поля, по сути, C -квадратуру сигнала в точке измерений, фаза которого отсчитывается от фазы опорного сигнала B .

Для восстановления радиоизображения объекта воспользуемся методом пространственно-согласованной фильтрации, где величину \tilde{C} будем рассматривать в качестве комплексного волнового поля в области измерений. Изображение, восстанавливаемое на основе измерений, при работе одного источника запишем в виде:

$$P(x, y, x_s, y_s) = \iint \tilde{C}(x', y', x_s, y_s) M_R(x', y') G^*(\mathbf{r}', \mathbf{r}) G^*(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) dx' dy', \quad (7)$$

где $|\mathbf{r}' - \mathbf{r}| = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2}$ – расстояние от точки измерения до точки фокусировки на объекте; $|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s| = \sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + h_1^2}$ – расстояние от излучателя до точки фокусировки на объекте; $\mathbf{r}_s = (x_s, y_s, h_2)$ – координата излучателя на плоскости; $\mathbf{r}' = (x', y', 0)$ – точка расположения приёмника; $\mathbf{r} = (x, y, z)$ – точка на объекте; $\tilde{C}(x', y', x_s, y_s)$ – поле в плоскости измерений; $M_R(x', y')$ – функция, описывающая положение приёмных элементов, являющаяся суммой дельта-функций, каждая из которых соответствует положению приёмника.

Радиоизображение объекта с учётом всех источников записывается в виде

$$\Phi(x, y) = \iint P(x, y, x_s, y_s) M_S(x_s, y_s) dx_s dy_s, \quad (8)$$

где $M_S(x_s, y_s)$ – функция, описывающая положение излучателей, являющаяся суммой дельта-функций, каждая из которых соответствует положению излучателя.

Функция $\Phi(x, y)$ в выражении (8) является решением задачи восстановления радиоизображения объекта, расположенного на известной дальности. Качество восстанавливаемого изображения и уровень артефактов зависит от количества и расположения излучателей и приёмников. Возникает задача оптимизации положения излучателей и приёмников, позволяющая минимизировать уровень артефактов при минимальном количестве излучающих и приёмных элементов.

Оптимизация матриц излучающих и приёмных элементов

Предлагается решить задачу оптимизации матрицы излучателей и матрицы приёмных элементов для точечного изотропного рассеивателя, расположенного напротив центра системы приёмных и передающих элементов на фиксированном расстоянии. Будем считать, что решётка приёмных элементов является плоской и решётка излучающих элементов тоже является плоской, однако две эти решётки не лежат в одной плоскости.

Запишем поле в точках измерения для точечного рассеивателя в точке $(x_0 = 0, y_0 = 0, z_0)$:

$$U(\mathbf{r}', \mathbf{r}_s) = G(\mathbf{r}', \mathbf{r}_0) G(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_0), \quad (9)$$

где $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ – точка расположения точечного рассеивателя; $\mathbf{r} = (x', y', 0)$ – точка расположения приёмного элемента; $\mathbf{r}_s = (x_s, y_s, z_s = \text{const})$ – точка расположения излучателя.

Подставим полученную запись для $U(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s)$ в формулы (7), (8), приняв, что $\tilde{C}(x', y', x_s, y_s) = U(\mathbf{r}', \mathbf{r}_s)$:

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= \iint \iint M_R(x', y') M_S(x_s, y_s) G(\mathbf{r}', \mathbf{r}_0) G(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_0) G^*(\mathbf{r}', \mathbf{r}) G^*(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) dx' dy' dx_s dy_s = \\ &= \iint M_R(x', y') G(\mathbf{r}', \mathbf{r}_0) G^*(\mathbf{r}', \mathbf{r}) dx' dy' \iint M_S(x_s, y_s) G(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_0) G^*(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) dx_s dy_s. \end{aligned} \quad (10)$$

То есть изображение точечного рассеивателя $\Phi(x, y)$ представляется в виде произведения двух интегралов, один из которых зависит от функции размещения матрицы излучателей $M_S(x_s, y_s)$, а второй – от функции размещения матрицы приёмников $M_R(x', y')$. Запишем эти интегралы отдельно:

$$R(x, y) = \iint M_R(x', y') G(\mathbf{r}', \mathbf{r}_0) G^*(\mathbf{r}', \mathbf{r}) dx' dy'; \quad (11)$$

$$S(x, y) = \iint M_S(x_s, y_s) G(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_0) G^*(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) dx_s dy_s; \quad (12)$$

$$\Phi(x, y) = R(x, y) S(x, y), \quad (13)$$

где $R(x, y)$ назовём реакцией матрицы приёмников на точечный рассеиватель; $S(x, y)$ – реакцией матрицы излучателей; $\Phi(x, y)$ – реакция всей системы на точечный рассеиватель.

Задача оптимизации матриц излучателей и приёмников состоит в варьировании функций $M_R(x', y')$ и $M_S(x_s, y_s)$, для того чтобы реакция на точечный рассеиватель $\Phi(x, y)$ имела единственный максимум в центре с наибольшей локализацией, то есть стремилась к дельта-функции. То есть необходимо добиться того, чтобы у функций $R(x, y)$ и $S(x, y)$ совпали максимумы в точке $(x = 0, y = 0)$ и не совпадали вторичные максимумы. Будем считать, что приемлемая область локализации центрального максимума $\Phi(x, y)$ имеет радиус $\lambda/2$. Тогда в качестве минимизируемой величины можно взять величину

$$\sigma = \iint_{S_1} \Phi(x, y) dx dy / \iint_{S_0} \Phi(x, y) dx dy, \quad (14)$$

где S_0 – область поверхности, для которой $\sqrt{x^2 + y^2} < \lambda/2$; S_1 – область поверхности, для которой $\sqrt{x^2 + y^2} \geq \lambda/2$. При таком выборе минимизируемой величины разрешение системы будет не хуже λ .

Будем искать оптимальное решение среди матриц с эквидистантным размещением элементов, для которых можно легко вычислить положение центрального и вторичных максимумов по формулам (11), (12). Интегралы в (11) и (12) сводятся к интегралам типа свертки и вычисляются с применением быстрого преобразования Фурье. Таким образом, можно быстро перебирать возможные виды функций $M_R(x', y')$ и $M_S(x_s, y_s)$, и вычислять $\Phi(x, y)$, подбирая оптимальный шаг матриц, количество элементов в них и угол поворота матриц относительно друг друга.

Предлагается рассмотреть гексагональные матрицы размещения элементов, так как подобная геометрия обеспечивает наибольшую плотность размещения элементов на плоскости. Количество элементов в матрицах выбирается исходя из технических возможностей коммутации и стоимости элементов. Можно утверждать, что коммутация излучающих элементов является технически более сложной задачей, чем коммутация приёмников, поскольку для излучателей требуется коммутация СВЧ-трактов, а для сигналов с приёмников достаточно коммутаторов постоянного напряжения. Следовательно, количество излучателей должно быть существенно меньше количества приёмников. Также подразумевается требование, чтобы матрица излучающих элементов не перекрывала матрицу приёмных элементов, чтобы сигнал в плоскости приёма не искажался дифракцией на матрице излучателей.

Размеры матриц определяют апертуру системы: чем больше апертура, тем лучше разрешение. Для получения приемлемого разрешения, близкого к дифракционному пределу, достаточно иметь апертуру, сравнимую с дальностью до объекта. Зафиксируем размеры матрицы приёмников порядка расстояния до объекта. Но не будем фиксировать размеры матрицы излучателей, то есть будем считать, что апертура излучающей матрицы меньше апертуры приёмной. Чем больше будут размеры излучающей матрицы, тем больше элементов приёмной матрицы будет перекрыто, и данные измерений для них будут искажаться. Поэтому будем убирать элементы из приёмной матрицы, закрытые излучающей матрицей. То есть с увеличением размеров излучающей матрицы будет

уменьшаться количество элементов в приёмной матрице. Из этих соображений следует, что приёмная матрица будет иметь гексагональное размещение элементов, ограниченное на плоскости апертурой системы с вырезом в центре. Пример возможного вида приёмной матрицы представлен на рис. 2. Шаг размещения приёмных элементов 4 см. Для данной приёмной матрицы была рассчитана оптимизированная матрица излучателей из 36 элементов при частоте 20 ГГц, размещённых с шагом 4 см (рис. 3). Матрица излучателей повернута относительно матрицы приёмников на угол 90° , поскольку такой поворот минимизирует величину σ . Расстояние от приёмной матрицы до объекта предполагается равным 70 см, а расстояние между матрицами излучателей и приёмников 20 см.

На рис. 4 представлены результаты расчёта реакции системы на точечный рассеиватель на расстоянии 70 м от приёмной матрицы. Можно видеть, что вторичные максимумы функций $R(x, y)$ и $S(x, y)$ не совпадают, а центральный максимум совпадает, что при их перемножении даёт только центральный максимум – это видно на рис. 4, в.

Отметим, что представленная решётка оптимизирована только для дальности до цели в 70 см. При других дальностях возможно возрастание уровня артефактов. Однако в целом, благодаря повороту матриц на 90° , не должно появляться вторичных максимумов, сравнимых по уровню с центральным.

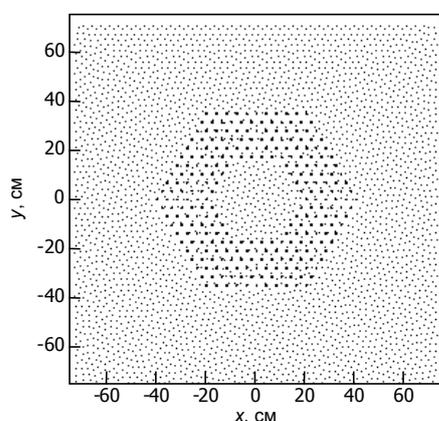


Рис. 2. Матрица из 270 приёмных элементов

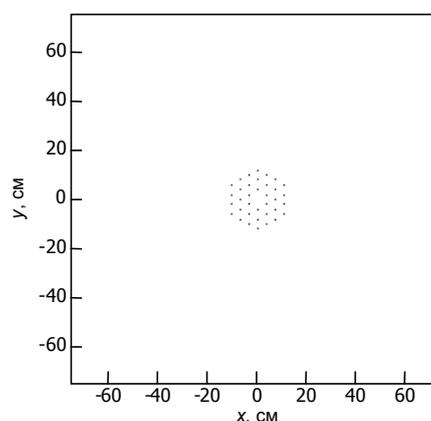


Рис. 3. Матрица из 36 излучающих элементов

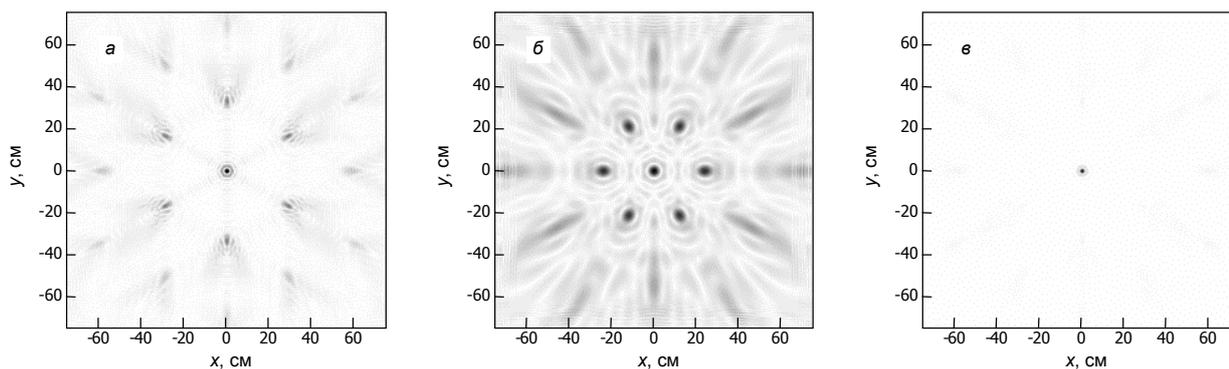


Рис. 4. Реакции системы на точечный рассеиватель: а – реакция матрицы приёмников $R(x, y)$, б – реакция матрицы излучателей $S(x, y)$, в – реакция всей системы $\Phi(x, y)$

Численное моделирование радиологической системы с множеством излучателей

Предложенный метод радиологической системы был смоделирован численно на частоте 20 ГГц для приёмной матрицы вида рис. 2 и матрицы излучателей вида рис. 3. Форма исследуемого объекта представлена на рис. 5, размер ступеньки 10 см. Расстояние от приёмной матрицы до объекта – 70 см, расстояние от матрицы излучателей до объекта – 50 см.

С помощью формул (1) – (3) была решена прямая задача, то есть определена интенсивность поля интерференции в области измерений. На рис. 6 представлена интенсивность поля при включении одного из источников. Можно видеть отчётливую интерференционную картину, образованную полем источника и полем, рассеянным объектом.

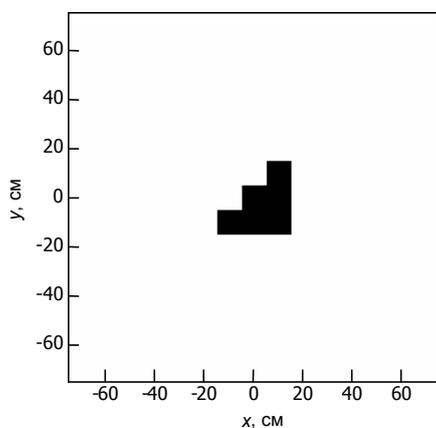


Рис. 5. Изображение исследуемого объекта

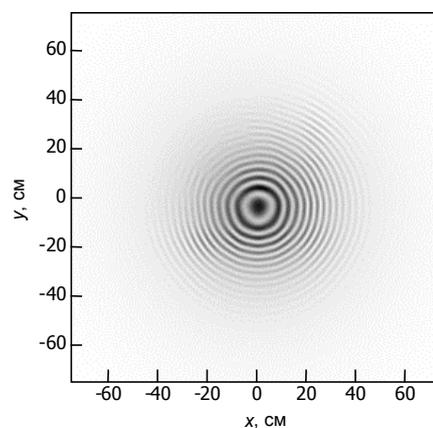


Рис. 6. Интенсивность поля интерференции предметного и опорного сигналов в области измерений для одного источника

Значения интенсивности поля, полученные при решении прямой задачи, были обработаны с помощью формул (6) – (8). В результате применения (7) было получено изображение объекта на основе данных измерений при включении одного источника (рис.7, а). Наблюдаются вторичные максимумы, что связано с разреженностью измерительной матрицы. После применения формулы (8) было получено изображение при включении 36 источников (рис.7, б). Здесь уже нет выраженных вторичных максимумов, а также изображение объекта однозначно идентифицируется. Повышение качества изображения связано с оптимизированным размещением источников, которое обеспечивает синфазное сложение центрального максимума и при этом несинфазное сложение вторичных максимумов при суммировании изображений для разных источников по формуле (7).

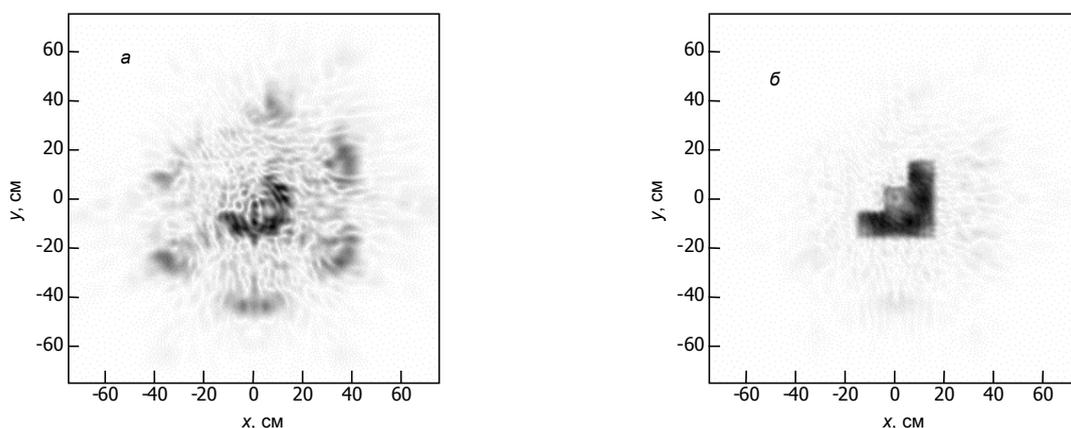


Рис. 7. Восстановленные изображения исследуемого объекта: а – при использовании одного источника, б – при использовании 36 источников

Отметим, что разрешение полученного изображения близко к дифракционному пределу для системы с рассматриваемой здесь апертурой и составляет 15 мм.

Заключение

Предложен метод голографического радиовидения на основе измерений интенсивности поля разреженной матрицей приёмных элементов с применением разреженной матрицы излучателей. Разработан метод оптимизации матриц излучателей и приёмников для заданной дальности до исследуемого объекта. Данный метод позволяет получать плоские радиоизображения объектов при

работе на одной частоте. При этом получаемое разрешение близко к дифракционному пределу, что не уступает технологии синтезирования апертуры при заполненных измерениях амплитудно-фазового распределения поля. Данный метод может найти применение в системах радиовидения в ближней зоне.

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. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. // ЖТФ. - 2012. - Т. 82. - Вып. 6. - С. 85–89.
4. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. // Изв. вузов. Физика. - 2012. - Т. 55. - № 9/2. – С. 17–21.
5. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухорук А.П. Теория волн. – М.: Наука, 1990.

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

Поступила в редакцию 15.07.13.

Суханов Дмитрий Яковлевич, к.ф.-м.н., доцент;
Завьялова Ксения Владимировна, аспирантка.

D.Y. SUKHANOV, K.V. ZAVYALOVA

RECONSTRUCTIONS OF RADIO IMAGES BY MEASUREMENTS OF INTENSITY OF THE INTERFERENCE FIELD BY SPARSE MATRIX ELEMENTS USING MULTIPLE SOURCES

It is proposed the radio-holographic method of the recovery of radio images based on sparse measurements of the reference and object signals interference field of the intensity. Multiple sources irradiating the object of study and field of measurements from different angles. Sources turning on one after another increasing the amount of information about the scattering object. The results of numerical modeling and estimation resolution are presented.

Keywords: *radiotomography, radiovision, radioholography.*