

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Завьялова Ксения Владимировна

аспирант

Суханов Дмитрий Яковлевич

канд. физ.-мат. наук, доцент

Томский государственный университет

г. Томск, Томская область

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ АМПЛИТУДЫ ПОЛЯ ЗА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКОЙ

***Аннотация:** рассматривается метод визуализации рассеивающих волны объектов по измерениям амплитуды поля за дифракционной решёткой путём специальной математической обработки. В дифракционной решётке имеется отверстие, которое используется в качестве источника опорного сигнала. Приводятся результаты экспериментальных исследований по визуализации источника ультразвуковых волн в воздухе на частоте 40 кГц.*

***Ключевые слова:** радиоголография, дифракционная решётка, синтез апертуры, согласованная фильтрация.*

Введение

Радиоволновая томография является перспективным направлением развития средств неразрушающего контроля качества, дефектоскопии и подповерхностного зондирования [1]. Для получения изображений с разрешением близким к дифракционному пределу используется технология синтеза большой апертуры [2], которая требует измерения фазы сигналов, рассеянных исследуемым объектом. Измерение фазы требует синхронизации с источником излучения, то есть фаза измеренного поля должна отсчитываться от фазы излучателя. В случае если используется собственный генератор, задача синхронизации технически решается с помощью смесительных трактов, фазовращателей и волноводов. Если же источник излучения сторонний, то нет

возможности использовать подобную технологию. Существуют голографические подходы [3–4], позволяющие частично извлекать фазовую информацию за счёт интерференции опорной волны и предметной волны. Но необходимо, чтобы мощность опорной волны была много больше мощности предметной волны.

Предлагается искусственно сформировать опорную волну с помощью дифракционной решётки с большим центральным отверстием. Центральное отверстие имеет размеры порядка длины волны, а все остальные отверстия порядка или менее половины длины волны. За счёт этого, через центральное отверстие проходит больше мощности волны, а через остальные меньше, что позволяет использовать волну от центрального отверстия в качестве опорной волны.

Схема измерений

Предлагается рассмотреть схему измерений представленную на рис. 1: излучатель монохроматических волн находится на расстоянии z от дифракционной решётки и облучает её. По другую сторону от решётки на расстоянии a располагается матрица датчиков амплитуды поля, которая позволяет измерять двумерное распределение поля с шагом менее половины длины волны. Дифракционная решётка формирует опорный сигнал из центрального отверстия и предметные сигналы из остальных отверстий решётки. В результате, в области измерений наблюдается интерференционная картина, из амплитуды которой, возможно частичное извлечение фазовой информации о поле.

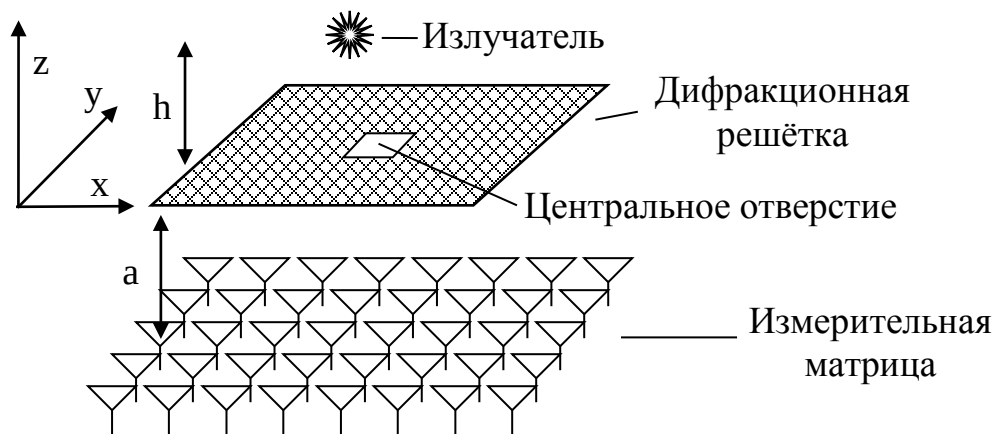


Рис. 1 Схема измерений

Обозначим поле в плоскости дифракционной решётки функцией $V(\mathbf{r})$, где $\mathbf{r} = (x, y, 0)$ – координата точки наблюдения в плоскости дифракционной решётки. Множество отверстий в дифракционной решётке удобно описать с помощью функции прозрачности $M(x, y)$, которая равна 1 в точке, где есть отверстие и равна 0 в точке, где нет отверстия. В приближение Кирхгофа, рассеянное объектом, поле сразу за дифракционной решёткой можно считать равным произведению функций $V(x, y)$ и $M(x, y)$. Следовательно, поле в плоскости измерительной матрицы приближённо можно описать с помощью интеграла по поверхности дифракционной решётки и поля точечного источника, находящегося в текущей точке интегрирования дифракционной решётки:

$$U(\mathbf{r}_M) = \iint_S V(\mathbf{r}) M(\mathbf{r}) \frac{e^{ik|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}|}}{|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}|} dx dy, \quad (1)$$

где $\mathbf{r}_M = (x_M, y_M, -a)$ – координата в плоскости измерительной матрицы, S – область интегрирования по поверхности дифракционной решётки, также предполагается, что в центральном отверстии $V(\mathbf{r}_0) = A$, A – значение поля в центральном отверстии, и множитель $\frac{e^{ik|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}|}}{|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}|}$, описывает набег фазы от точки на дифракционной решетке до плоскости измерений амплитуды.

Так как в измерительной матрице производится измерение только амплитуды поля, без измерений фазы, то для упрощения задачи рассматривается интенсивность волны в плоскости измерений:

$$W(\mathbf{r}_M) = |U(\mathbf{r}_M)|^2 = U(\mathbf{r}_M)U^*(\mathbf{r}_M), \quad (2)$$

следовательно:

$$\begin{aligned} W(\mathbf{r}_M) &= \iint_S V(\mathbf{r}) \frac{e^{ik|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}|}}{|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}|} dx dy \cdot \iint_S V^*(\mathbf{r}) \frac{e^{-ik|\mathbf{r}_M - \tilde{\mathbf{r}}|}}{|\mathbf{r}_M - \tilde{\mathbf{r}}|} d\tilde{x} d\tilde{y} = \\ &= \iiint_S V(\mathbf{r}) V^*(\tilde{\mathbf{r}}) \frac{e^{ik|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}|}}{|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}|} \frac{e^{-ik|\mathbf{r}_M - \tilde{\mathbf{r}}|}}{|\mathbf{r}_M - \tilde{\mathbf{r}}|} dx dy d\tilde{x} d\tilde{y} \end{aligned}, \quad (3)$$

где $\tilde{\mathbf{r}} = (\tilde{x}, \tilde{y}, 0)$, $W(\mathbf{r}_M)$ – фактически является результатом измерения интенсивности (квадрата амплитуды) поля в плоскости измерительной матрицы.

Восстановление изображения

Далее с помощью $W(\mathbf{r}_M)$ вычисляется амплитудно–фазовое распределение поля $V(\mathbf{r})$ в отверстиях дифракционной решётки. Поскольку фаза относительна, за точку с нулевой фазой можно выбрать центр дифракционной решётки, в точке $\mathbf{r}_0 = (0, 0, 0)$. Для восстановления функции $V(\mathbf{r})$ в отверстиях дифракционной решётки из функции $W(\mathbf{r}_M)$ предлагается применить метод согласованной фильтрации:

$$\tilde{V}(\mathbf{r}) = M(\mathbf{r}) \iint_{S_M} W(\mathbf{r}_M) \frac{e^{-ik|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}_0|}}{|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}_0|} \frac{e^{+ik|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}|}}{|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}|} dx_M dy_M, \quad (4)$$

где S_M – область интегрирования по поверхности измерительной матрицы. То есть, фактически, находится разность фаз между центральным и другими отверстиями в виде комплексной амплитуды поля.

Функция $\tilde{V}(\mathbf{r})$ из (5) позволяет приближённо определить функцию $V(\mathbf{r})M(\mathbf{r})$, представляющую собой комплексную амплитуду поля в отверстиях, без учёта постоянного множителя. Следует отметить, что точность восстановления амплитудно–фазового распределения в плоскости дифракционной решётки будет увеличиваться при увеличении шага дифракционной решётки, поскольку в этом случае согласованные фильтры для каждого отверстия будут значительно отличаться друг от друга, что снизит взаимное влияние полей из различных отверстий.

Используя амплитудно–фазовое распределение поля $\tilde{V}(\mathbf{r})$ в плоскости дифракционной решётки, восстанавливается изображение источника, с помощью метода пространственно согласованной фильтрации:

$$p(\mathbf{r}') = \iint_S \tilde{V}(\mathbf{r}) e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} dxdy, \quad (5)$$

где $p(\mathbf{r}')$ – приближённо восстановленное изображение распределения излучателей в исследуемом объёме.

Экспериментальные исследования

Для проверки предложенного метода была разработана экспериментальная установка (Рис. 2) на основе ультразвуковых датчиков МА40S4/R и двухкоординатного механического сканера. Датчики МА40S4/R использовались в качестве излучателя и приёмника. Между излучателем и приёмником располагалась дифракционная решётка с шагом отверстий 10 мм и размером отверстий 4 мм. В центре решётки было создано квадратное отверстие со сторонами 10 мм. Приёмный датчик размещался на сканере и перемещался с шагом 3 мм на области 500 мм на 500 мм на дальности 225 мм от дифракционной решётки. Излучатель располагался на дальности 430 мм от дифракционной решётки.

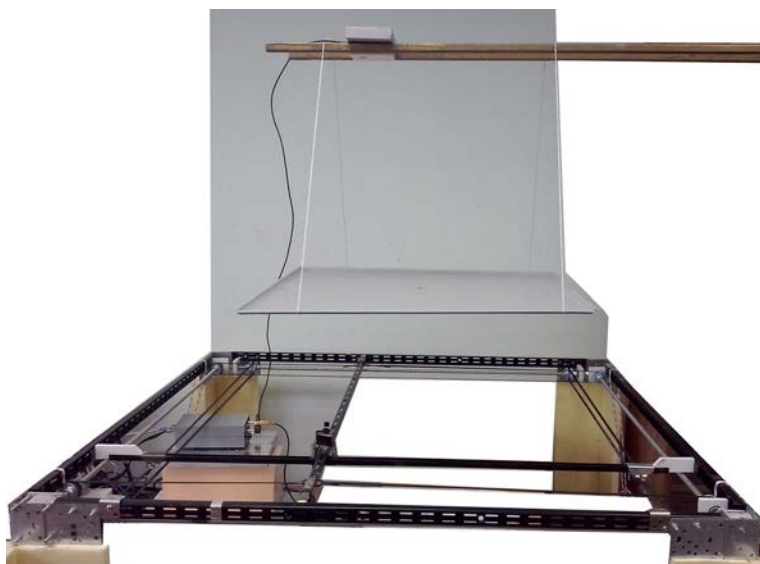


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки

В результате эксперимента была измерена амплитуда поля дифракции на частоте 40 кГц (Рис. 3). Можно наблюдать сложную интерференционную картину.

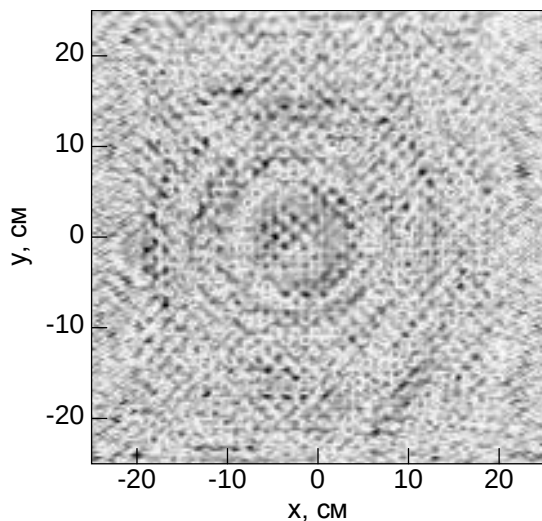


Рис. 3. Амплитуда поля в области измерений на частоте 40 кГц

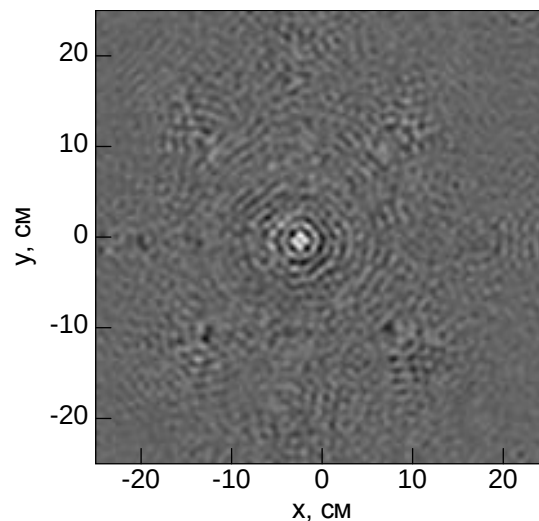
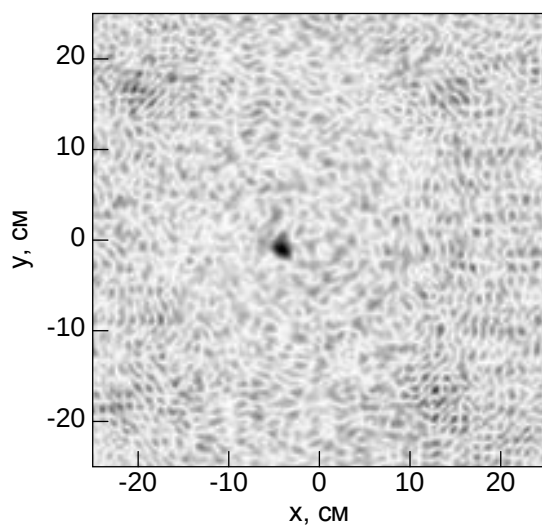
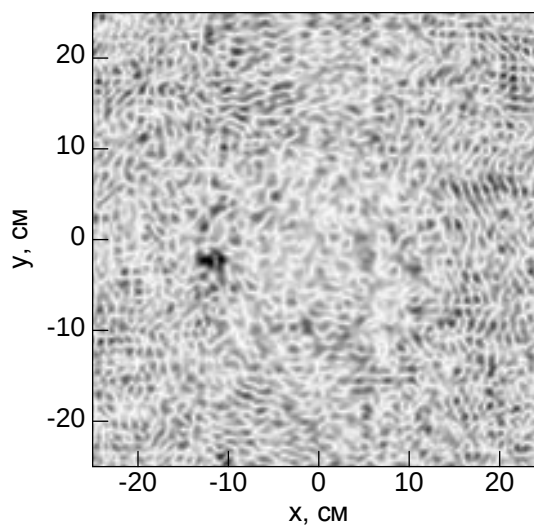


Рис. 4. Восстановленное поле в плоскости дифракционной решётки

Измеренное распределение амплитуды поля было обработано с помощью формул (4–5). Было получено распределение поля в плоскости дифракционной решётки (Рис.4) и изображение источника (Рис.5).



а



б

Рис. 5. Восстановленное изображение источника
(а – излучатель в центре, б – излучатель смещён от центра)

Заключение

В работе приводятся результаты экспериментальной проверки метода восстановления изображения излучателя по измерениям амплитуды поля через дифракционную решётку с большим центральным отверстием для

ультразвуковых волн в воздухе на частоте 40 Гц. Показана возможность визуализации точечного источника.

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. Yakubov V.P., Sukhanov D.Ya., Sklarczyk K.G., Pinchuk R.V., Bulavinov A.N., Bevetskii A.D. Radio-wave tomography of hidden objects for safety systems // Russian Physics Journal, 2008, vol. 51. No 10. pp. 1064–1082.
3. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. Восстановление трехмерных радиоизображений по результатам многочастотных голографических измерений // Журнал технической физики, – 2012. – Т. 82. – Вып. 6. – С. 85–89.
4. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. Система трёхмерного голографического сверхширокополосного радиовидения // Известия высших учебных заведений. Физика, – 2012. – Т. 55. – № 9/2. – С. 17–21.
5. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. –М.: Наука, – 1990.