

УДК 621.396.96

ВЛИЯНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ НА КАЧЕСТВО РЕКОНСТРУКЦИИ ОБЪЕКТОВ ПРИ КРУГОВОМ СИНТЕЗЕ АПЕРТУРЫ

В. П. Ющенко, С. А. Литвиненко

*Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: jwp@aport2000.ru*

Исследуется проблема сектора приёма акустических волн локатором томографа в водной среде, решение которой приближает реализацию томографа с круговым синтезом апертуры при монохроматическом зондировании. При теоретическом рассмотрении задачи реконструкции изображения объекта предполагалась изотропная в плоскости, т. е. дискообразная диаграмма направленности датчика с неограниченным круговым сектором приёма, позволяющая изучать внутреннюю структуру объекта в плоскости диаграммного диска. С использованием моделирования реконструкции точечного изображения объекта по траекторному доплеровскому сигналу, принятому локатором при круговом перемещении вокруг точечного объекта, выясняется влияние отклонения от изотропности, вызванное ограничением сектора приёма акустических волн, на результаты реконструкции изображения точечного объекта.

Ключевые слова: синтезированная апертура, траекторный доплеровский сигнал, реконструкция изображения, передаточная функция точки, опорные траекторные сигналы, корреляционная обработка.

DOI: 10.15372/AUT20160402

Введение. Рассматривается метод томографии с применением апертурного синтеза при монохроматическом зондировании в водной среде, находящийся в стадии теоретической и экспериментальной разработки. Результаты моделирования реконструкции изображения объектов синтезом апертуры антенны представлены в [1–8]. Как правило, на первом этапе исследования моделирования апертурного синтеза оговариваются допущения, которые не должны существенно исказить и дискредитировать конечные результаты, например устанавливается требование дискообразной формы диаграммы направленности (ДН).

Когерентная томография с круговым синтезом апертуры зародилась в 1980-х годах, реконструкция изображения объекта осуществлялась методом обращения по Фурье [1] (разновидностью проекционного метода реконструкции). Следует обратить внимание на метод сбора данных. В работе [1] проекции регистрируются с помощью неподвижного локатора при вращающемся объекте вокруг своей оси, расположенной перпендикулярно плоскости и проходящей через томографируемый объект и локатор.

Как известно, монохроматические сигналы не обладают радиальным разрешением, зато дают хорошее разрешение по скорости. Это вытекает из анализа функции Вудворда для монохроматического зондирующего сигнала. Чтобы осуществить реконструкцию изображения, надо извлечь информацию о дальности из отражённого непрерывного доплеровского сигнала. В системах с монохроматическим зондированием и перемещающимся локатором эта задача решается с помощью фокусировки синтезированной апертуры

на заданную дальность. Варьируя дальность фокусировки, можно просканировать окружающее локатор пространство и по результатам сканирования построить изображение объекта. Если волны зондирующего сигнала проходят внутрь объекта, то возможна реконструкция его внутренней структуры. Обработаться будет отражённый от объекта траекторный доплеровский сигнал, полученный при движении локатора по кругу с постоянной скоростью вокруг томографируемого объекта [2].

Корреляционный метод обработки траекторного сигнала с помощью опорных сигналов от точечных отражателей и реконструкция изображения объекта изложены в [2–5]; результаты получены при допущении дискообразной формы ДН. При переходе к экспериментальной проверке результатов теоретического моделирования возникает вопрос о необходимости применения дискообразных диаграмм направленности.

Цель данной работы — определение влияния реальных диаграмм с секторной направленностью на результаты реконструкции изображений объектов. Проблема актуальна для тех, кто приступает к практическим экспериментам или предпринимает попытку реализовать томограф с монохроматическим зондированием и синтезированием апертуры по круговой траектории.

Алгоритм моделирования реконструкции точечных объектов с учётом диаграммы направленности. Для начала рассмотрим задачу в плоскости. Это позволит реконструировать изображение объекта в секущей плоскости, в которой расположена ДН локатора. Пусть локатор движется по кругу с постоянной скоростью, а исследуемый объект помещён в квадрат внутри круга (рис. 1). Реконструкции подлежат объекты, находящиеся в квадратной области (далее область реконструкции).

Суть корреляционной обработки состоит в следующем. При движении по кругу локатор регистрирует отражённый от объекта траекторный сигнал. Точечный объект расположен в области реконструкции. Задаются опорные точечные отражатели в декартовой системе координат, находящиеся в квадратной области. Координаты опорных точек (x_i, y_i) известны. Опорные точки (по 256 на каждой координате) расставляются равномерно по всей квадратной области с некоторым шагом. Радиус окружности, по которой движется локатор, состоит из 512 отсчётов. Зададим длину волны $\lambda = 3$ мм. Выберем шаг между отсчётами $\Delta = 0,16\lambda = 0,48$ мм. Тогда синтезированная апертура позволит получить разрешающую способность $\lambda/5$ по координатам x и y [1]. Чтобы определить координаты опорной точки, нужно номер отсчёта умножить на шаг Δ . Зная координаты опорных то-

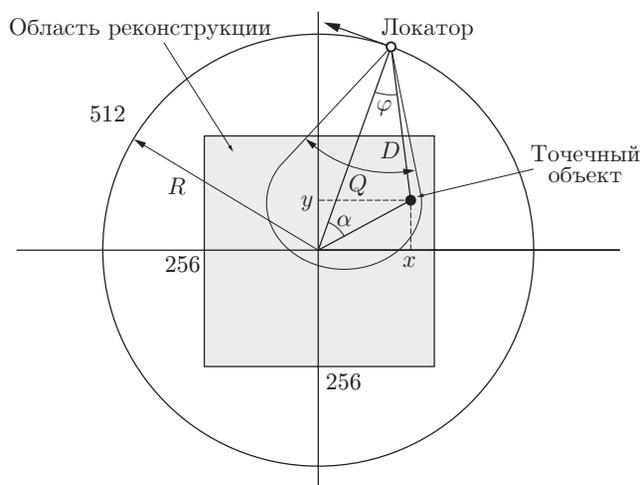


Рис. 1. Геометрия сбора данных локатором при движении по круговой траектории

чек, нетрудно рассчитать отсчёты опорного траекторного сигнала для выбранной опорной точки с номером i :

$$S_k = A(\varphi_k) \cos\left(\frac{2\pi D_k}{\lambda}\right), \quad (1)$$

где $D_k = \sqrt{R^2 + (x_i^2 + y_i^2) - 2R\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos \alpha_k}$, $\alpha_k = \arctg \frac{y_i}{x_i} + \frac{2\pi}{512} k$, $k = 1, 2, 3, 4, \dots, 512$.

Здесь приняты следующие обозначения: S_k — отсчёты траекторного сигнала; D_k — отсчёты текущей дальности от i -й опорной точки до движущегося локатора; R — радиус окружности, по которой движется локатор; (x_i, y_i) — координаты i -й опорной точки; α_k — угловое положение локатора на круговой траектории.

Вычислим угол визирования на опорную точку от места нахождения локатора на круговой траектории φ_k . Этот угол отсчитывается между радиусом, соединяющим локатор с центром окружности, и линией визирования от локатора до опорной точки:

$$\varphi_k = \arcsin \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin \alpha_k}{D_k}. \quad (2)$$

После нахождения угла визирования нетрудно рассчитать амплитуду траекторного сигнала, обусловленную ДН ультразвукового пьезодатчика. Пусть в первом приближении диаграмма направленности изменяется по косинусоидальному закону. Это повлияет на амплитуду траекторного сигнала A_k :

$$A_k = \cos(\varphi_k). \quad (3)$$

Тогда траекторный сигнал, отражённый от опорной точки, с учётом изменения его амплитуды из-за диаграммы направленности пьезодатчика при движении локатора по кругу примет вид

$$S_k = \cos(\varphi_k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi D_k}{\lambda}\right). \quad (4)$$

В этом случае ДН будет иметь угловую ширину $Q = 180^\circ$.

Уменьшить угловую ширину до 90° возможно при удвоении φ_k , а до 45° — при учетверении φ_k , и тогда траекторный сигнал запишем следующим образом:

$$S_k = \cos(4\varphi_k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi D_k}{\lambda}\right).$$

По данному алгоритму рассчитывается траекторный сигнал для объектной точки. Любую из опорных точек можно взять в качестве объектной. Далее следует найти корреляцию траекторного сигнала объектной точки с каждым траекторным сигналом опорной точки:

$$B_{x_i, y_i}(k1) = \sum_n^{2N} S(n) S_{x_i, y_i}(n) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} k1n\right) \quad \text{при } k1 = 1, 2, \dots, 2N, \quad (5)$$

$$S(n) = \sum_{k=1}^{2N} s(k) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} kn\right) \quad \text{при } k = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

$$s(k) = 0 \quad \text{при } k = N + 1, N + 2, \dots, 2N,$$

$$S_{x_i, y_i}(n) = \sum_{k=1}^{2N} s_{x_i, y_i}(k) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} kn\right) \quad \text{при } k = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

$$s_{x_i, y_i}(k) = 0 \quad \text{при } k = N + 1, N + 2, \dots, 2N,$$

где $B_{x_i, y_i}(k1)$ — отсчёты корреляционной функции объектного и опорного траекторных сигналов для конкретной опорной точки; $S(n)$ — отсчёты спектра объектного траекторного сигнала; $S_{x_i, y_i}(n)$ — отсчёты спектра траекторного сигнала для конкретной опорной точки, определяемой координатами (x_i, y_i) ; $s(k)$ — отсчёты объектного траекторного сигнала; $s_{x_i, y_i}(k)$ — отсчёты траекторного сигнала для конкретной опорной точки.

Для построения корреляционной поверхности используются только центральные отсчёты корреляционных функций. Таковую поверхность будем называть передаточной функцией точки.

Описанный алгоритм позволяет осуществить круговой апертурный синтез. Реконструкция с помощью синтезированной апертуры возможна при движении локатора по прямой [6–8] и круговой траекториям. Из-за простоты технической реализации в данной работе отдаётся предпочтение движению локатора по круговой траектории, т. е. круговому апертурному синтезу.

В [2–5] предполагалось, что ДН приёмной и передающей антенн имели дискообразный характер, т. е. диаграммы изотропны в плоскости диска. У реального ультразвукового пьезодатчика такие диаграммы не реализуются и вряд ли будут востребованы. Изотропные диаграммы приёмника и передатчика, расположенные в одной общей плоскости, не позволяют «развязать» приёмный и передающий тракты томографа. Лучше иметь хоть какую-то направленность диаграмм пьезодатчиков. Как повлияют реальные диаграммы с некоторой направленностью на результат реконструкции точечного объекта без моделирования, предсказать невозможно.

Результаты моделирования. Реконструированное изображение точечного объекта, расположенного рядом с центром траекторного круга, представлено на рис. 2 (первый эксперимент). Смещение отражающей точки от центра равно 0,92 мм. Ширина ДН локатора составляет 90° . Зависимость изменения угла визирования на отражающую точку от положения локатора на круговой траектории показана на рис. 2, *a*. Отклонение угла визирования не превышает 0,01 рад или $0,4^\circ$, т. е. точечный объект находится в центре главного максимума ДН. В данном случае локатор можно снабдить игольчатой ДН с угловой шириной 1° . При полном прохождении локатором траекторного круга отражающая точка не выйдет за пределы игольчатой ДН. Траекторный доплеровский сигнал представлен на рис. 2, *b*. Низкая частота доплеровских колебаний подтверждает присутствие отражающей объектной точки рядом с центром траекторного круга. Передаточная функция точки, т. е. корреляционная поверхность, построенная в соответствии с вышеописанным алгоритмом, приведена на рис. 2, *c*. Вид этой поверхности сверху (рис. 2, *d*) даёт окончательную картину реконструкции изображения объектной точки.

Результаты второго модельного эксперимента при тех же условиях, но при отражающей объектной точке, вынесенной на расстояние 48 мм от центра, представлены на рис. 3. Смещение вызвало резкое увеличение доплеровской частоты и появление амплитудной модуляции доплеровского сигнала (рис. 3, *b*). Модуляция амплитуды объясняется повышением диапазона угла визирования на точечный объект при перемещении локатора по

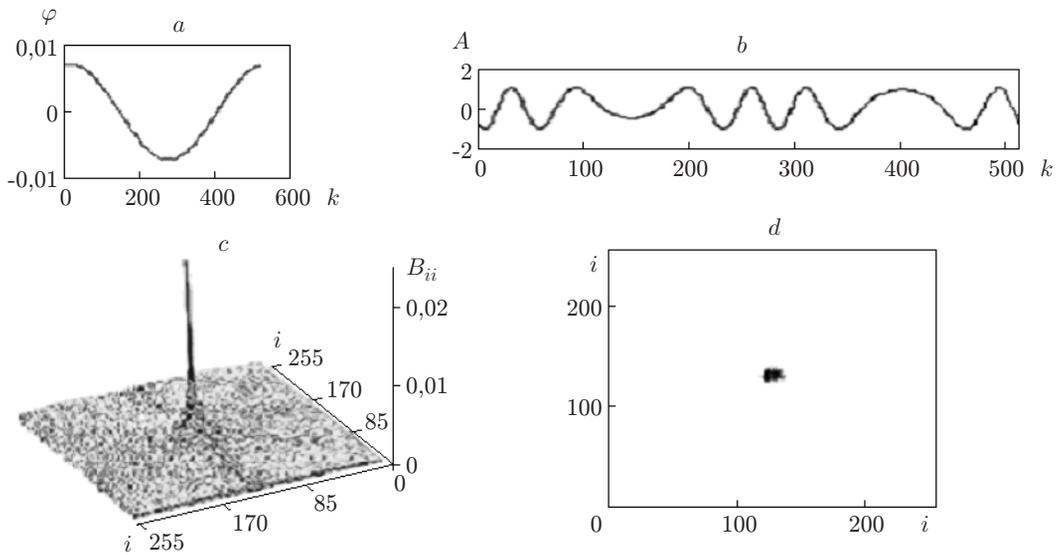


Рис. 2. Реконструкция точечного объекта, расположенного рядом с центром траекторного круга, при ширине диаграммы направленности локатора $Q = 90^\circ$

кругу (от $-0,2$ до $+0,2$ рад или от -11 до $+11^\circ$) (рис. 3, *a*). Если учесть, что угловая ширина ДН по нулевому уровню $Q = 90^\circ$, а по уровню 0,7 величина $Q_{0,7} = 22^\circ$, то становится понятным, почему коэффициент амплитудной модуляции не превысил 10 %, а угол визирования не достиг скатов ДН. Если сравнить передаточные функции точки (см. рис. 2, *c* и рис. 3, *c*), а также полученные изображения точечных объектов (см. рис. 2, *d* и рис. 3, *d*), то можно констатировать, что применение диаграммы с сектором приёма 90° практически не повлияло на результат реконструкции.

Проведём третий, более жёсткий эксперимент. Уменьшим ширину ДН до 30° по нулевому уровню и удалим отражающую точку на 61 мм от центра окружности (рис. 4). Отражающая точка окажется на границе квадратной области, а угол визирования при из-

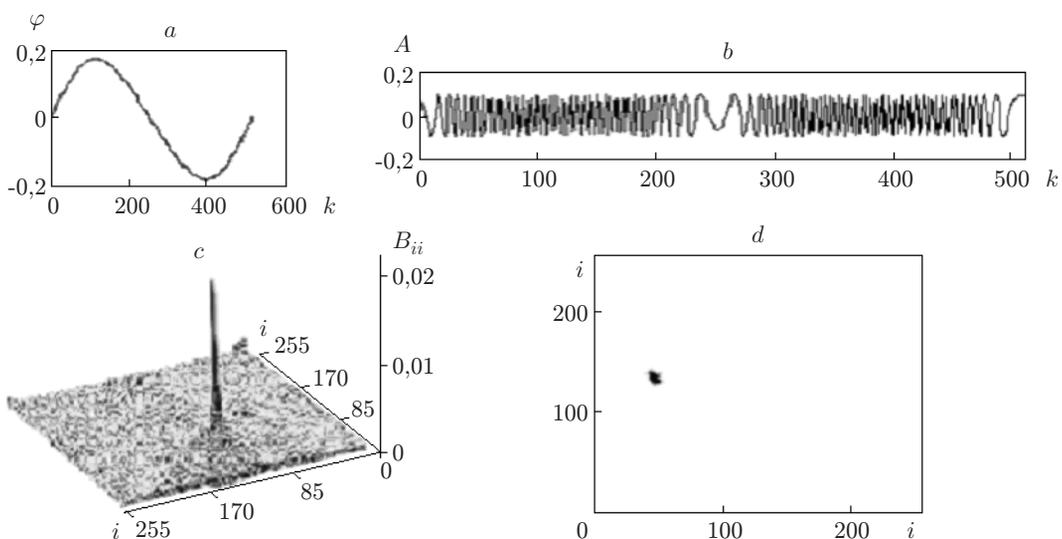


Рис. 3. Реконструкция точечного объекта, смещённого на расстояние 48 мм от центра траекторного круга, при ширине диаграммы направленности локатора $Q = 90^\circ$

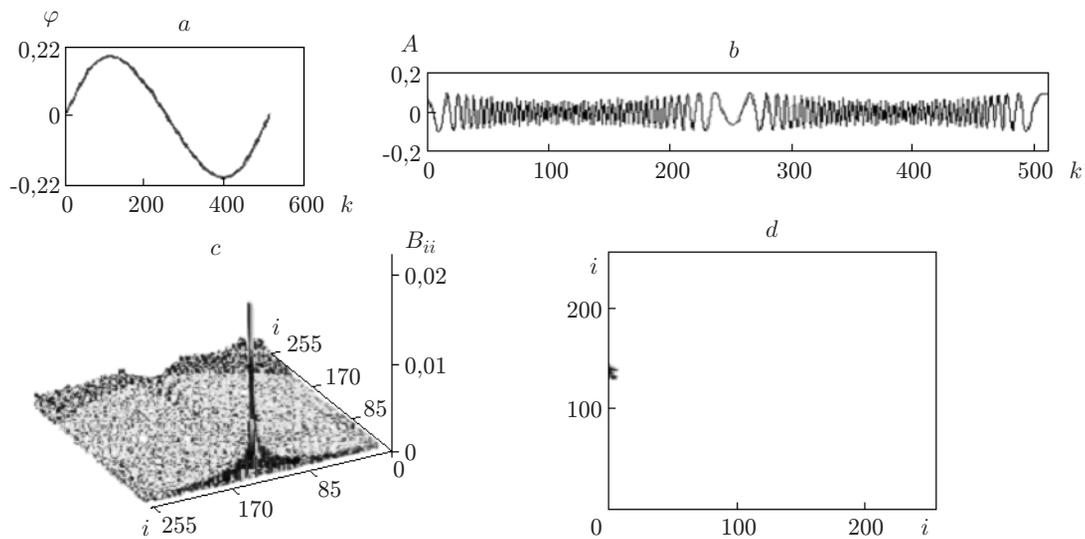


Рис. 4. Реконструкция точечного объекта, смещённого на расстояние 61 мм от центра траекторного круга, при ширине диаграммы направленности локатора $Q = 30^\circ$

менении будет достигать скатов ДН, которые ограничивают сектор приёма. При угловой ширине диаграммы направленности $Q = 30^\circ$ границы сектора приёма составляют $\pm 15^\circ$. Так как диапазон изменения угла визирования колеблется от $-0,22$ до $+0,22$ рад, что соответствует $\pm 12^\circ$ (рис. 4, *a*), а границы сектора приёма ограничены углами $\pm 15^\circ$, можно констатировать, что угол визирования достигает скатов диаграммы направленности. Об этом будем судить по увеличению глубины амплитудной модуляции доплеровского сигнала (рис. 4, *b*). Однако на результаты реконструкции изображения точечного объекта условия третьего эксперимента не повлияли. Это подтверждают вид передаточной функции и результат реконструкции изображения смещённого точечного объекта (рис. 4, *c*, *d*).

Таким образом, результаты моделирования показали возможность применения секторных диаграмм приёма:

- 1) для реконструкции изображения томографируемых объектов с помощью кругового синтеза апертуры не нужны изотропные диаграммы направленности;
- 2) использование пьезодатчиков с направленными диаграммами позволяет развязать приёмный и передающий тракты локатора, что облегчает решение задачи реконструкции изображения;
- 3) для качественной реконструкции изображения угловой сектор диаграммы направленности пьезодатчика должен перекрывать три четверти области реконструкции.

Заключение. В данной работе представлена реальная модель томографа с областью реконструкции размером $12,5 \times 12,5$ см. Такой области достаточно для томографирования конечностей или шейного отдела пациента. Если томографирование производится по схеме рис. 1 и размеры объекта не выходят за пределы квадратной области (12×12 см), то угол визирования на граничные точки объекта не превышает $0,5$ рад или 30° . Следовательно, для томографии необходима ширина ДН 60° и не требуются изотропные диаграммы направленности, что облегчает реализацию пьезодатчиков томографа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Менса Д. Л., Халеви Ш., Уэйд Г. Применение методов когерентной доплеровской томографии для получения изображения на СВЧ // ТИИЭР. 1983. **71**, № 2. С. 76–84.

2. **Yushchenko W. P.** Object image reconstruction by using trajectory doppler signal in the process of monochromatic probing and circular aperture synthesis of antenna // Elec. and Electron. Eng. 2012. **2**, N 2. P. 1–6. DOI:10.5923/j.eee.20120202.01.
3. **Ющенко В. П.** Синтез апертуры по квадратной траектории для когерентной томографии // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. 2004. **2**. С. 18–28.
4. **Ющенко В. П.** Круговой апертурный синтез для целей томографии // Автометрия. 2002. **38**, № 6. С. 28–35.
5. **Ющенко В. П.** Сопоставление двух методов когерентной томографии // Радиотехника и электроника. 2004. **49**, № 2. С. 196–204.
6. **Ющенко В. П.** Доплеровское сканирование структуры объекта с помощью синтезированной апертуры // Приборы и техника эксперимента. 2001. **44**, № 2. С. 41–45.
7. **Ющенко В. П.** Восстановление внутренней структуры гомогенных объектов с локальной неоднородностью // Автометрия. 2005. **41**, № 1. С. 50–56.
8. **Ющенко В. П., Литвиненко С. А., Ромодин В. Б., Щебалкова Л. В.** Монохромная СВЧ-томография с синтезом апертуры антенны методом взаимных корреляций // Автометрия. 2007. **43**, № 6. С. 28–38.

Поступила в редакцию 2 декабря 2015 г.
