

УДК 621.396.965, 532.59, 534.143

## НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ КОЛЬЦЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ

© В. П. Ющенко, С. А. Литвиненко, Р. А. Мосейчук, А. Д. Иванова

*Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20  
E-mail: jwp7@mail.ru*

Теоретически исследованы свойства кольцевой антенной решётки путём моделирования. Цель этих исследований состоит в том, чтобы определить, до каких пределов можно уменьшить число элементов кольцевой антенной решётки. Этот вопрос имеет прикладное практическое значение. Уменьшение числа элементов антенной решётки упрощает технологию её изготовления. Путём моделирования представлено, что уменьшение элементов при сохранении диаметра кольцевой решётки не затрагивает её разрешающей способности, однако приводит к появлению вредных артефактов в виде колец на реконструированном изображении. Кроме того, показано, что вместо кольцевой антенной решётки можно использовать сегмент кольцевой решётки. Например, кольцо можно заменить полукольцом, при этом, если сохранён диаметр, то разрешающая способность изменится незначительно.

*Ключевые слова:* кольцевая антенная решётка, фокусировка монохроматического сигнала, сканирующее управление положением фокуса, реконструкция изображения с помощью сканирующего фокуса, антенная решётка из сегмента кольца.

DOI: 10.15372/AUT20240211

EDN: ITFMZU

**Введение.** В представленной работе исследуется возможность томографирования, основанного на принципах сканирующего фокуса. Этот метод находится в стадии развития и нуждается в теоретической проработке и моделировании. В настоящее время широко распространён и достиг совершенства импульсный метод, применяемый в ультразвуковой томографии. Принципиальным недостатком этого метода являются дисперсионные искажения, которые не позволяют достичь чёткого изображения и получить потенциально высокую разрешающую способность, определяемую длительностью импульса. Одной из первых работ, посвящённых томографии с помощью сканирующего фокуса, можно считать исследование Д. Л. Менсы, Ш. Халеви и Г. Уайда [1], в котором для томографии предложен метод обратного проецирования. Авторы регистрируют кольцевой спектр. Для этого вращающийся вокруг своей оси объект облучают монохроматической волной, которую излучает неподвижная антенна. Другой приёмной антенной регистрируют амплитуду и фазу отражённой волны. В результате получают кольцевой спектр, а затем с помощью обратного преобразования Радона восстанавливают функцию рассеяния объекта, т. е. изображение объекта.

Возможен другой путь. Для его реализации нужно зарегистрировать траекторный доплеровский сигнал. После этого необходимо подвергнуть данный траекторный сигнал многократной корреляции с набором опорных сигналов, которые представляют собой опорные траекторные сигналы от точечных объектов, полученные расчётным путём. Эти данные позволяют построить корреляционную поверхность из центральных отсчётов корреляционных функций. Построенная корреляционная поверхность — это функция рассеяния объекта, такая же, как полученная в работе Д. Л. Менсы [1].

Проделанные манипуляции с траекторным сигналом оказались не чем иным, как синтезом апертуры на сверхблизком расстоянии. При этом использовалось свойство синтеза

рованной апертуры фокусироваться на заданную дальность. Варьируя параметрами опорного сигнала, удаётся управлять положением фокуса. Таким образом, оказалось, что синтезированная апертура обладает разрешающей способностью по дальности за счёт фокусировки [1, 2].

Способность синтезированной апертуры разрешать отражатели по дальности за счёт фокусировки в классическом самолётном синтезе апертуры не используется. В самолётных радиолокационных станциях с синтезом апертуры разрешение по дальности достигается путём импульсной модуляции.

Ранее был исследован синтез апертуры по прямолинейной траектории, затем — по прямоугольной траектории и наконец — по круговой траектории [1, 2]. Для томографии предпочтительным является круговой синтез апертуры.

В [4] проведена экспериментальная проверка возможности томографирования с помощью кругового синтеза апертуры в водной среде на ультразвуке. Показано, что положением фокуса можно управлять, а значит, можно томографировать. В результате были получены тестовые изображения простейших объектов.

Экспериментальная проверка кругового синтеза апертуры показала, что томографирование с его помощью возможно, но связано с некоторыми неудобствами, такими как помещение пациента в водную среду. Практически без особых сложностей можно томографировать конечности, молочную железу — всё, кроме головы. Это связано с тем, что для получения траекторного сигнала необходимо движение антенн локатора по круговой траектории в водной среде вокруг исследуемого объекта.

Необходимо заметить, что томографирование на электромагнитных волнах практически не представляется возможным [5]. Это связано с тем, что радиоволны с длиной волны  $< 3$  см практически не проникают в тело человека. А при длине волны 3 см достижимая разрешающая способность, согласно пределу Рэлея,  $\lambda/5 = 3/5 = 0,6$  см [1].

Хотелось бы отказаться от движения гидролокатора в водной среде, но при этом сохранить принцип томографирования с помощью управляемой и сканирующей фокусировки. С этой целью круговой синтез апертуры был заменён кольцевой антенной решёткой. Кольцевая антенная решётка обладает свойством фокусировки [3]. При этом можно обойтись без водной среды и движущихся в воде антенн локатора. Доказать возможность фокусировки кольцевой антенной решётки можно простым и очевидным рассуждением. Для этого надо все её излучающие элементы запитать в одинаковой фазе. В центр кольца колебания от каждого элемента придут в одинаковой фазе. Синфазность волн в центре кольцевой решётки объясняется тем, что волны проходят одинаковое расстояние от каждого элемента антенной решётки до центра, равное радиусу. В результате синфазного сложения образуется пик мощности в центре кольца, т. е. фокусировка. В [3] показано, как управлять положением фокуса. Если внутрь кольца поместить биологический объект, то, управляя положением фокуса, можно просканировать внутренности объекта и построить изображение в сечении [3].

При моделировании кольцевой антенной решётки было взято 256 пар антенных элементов, из которых 256 излучающих и 256 принимающих элементов, расположенных на кольце в чередующемся порядке.

**Постановка задачи.** Большое количество элементов антенной решётки сопряжено с технологическими трудностями изготовления кольцевой решётки. Возникает задача: можно ли уменьшить число элементов антенной решётки, на что это может повлиять? Прибегнем к моделированию. Чтобы не отправлять читателя к источникам, в которых дано описание алгоритма математической модели [3], приведём его ниже.

**Алгоритм моделирования.** Геометрические соотношения будем брать из рис. 1. Окружность на рис. 1 обозначает кольцевую антенную решётку. В неё вписана квадратная область реконструкции, представляющая собой дискретную матрицу изображения,

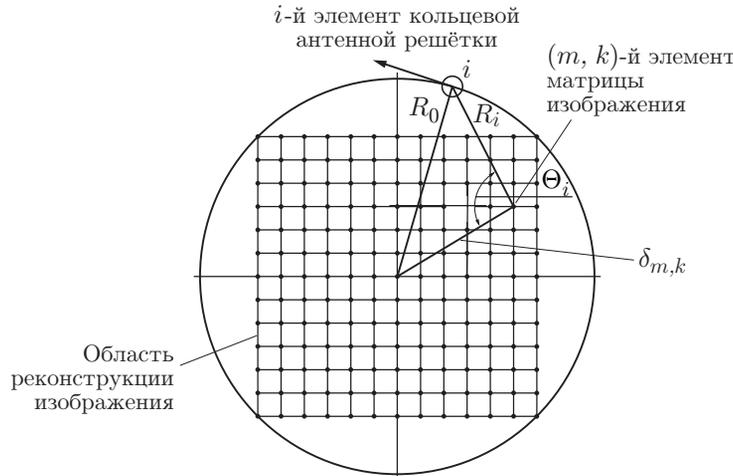


Рис. 1. Геометрическая схема для описания математической модели

которая имеет  $m \times k$  элементов. Элементы матрицы показаны точками на матрице изображения:  $\delta_{m,k}$  — расстояние от центра окружности до  $m, k$ -элемента матрицы изображения,  $i$ -й элемент кольцевой антенной решётки,  $R_0$  — радиус кольцевой антенной решётки,  $R_i$  — расстояние от  $i$ -го элемента антенной решётки до  $m, k$ -элемента матрицы,  $\Theta_i$  — угол между  $R_i$  и  $\delta_{m,k}$ .

Покажем, что кольцевая антенная решётка позволяет управлять положением фокуса в области реконструкции. Управлять положением фокуса будем с помощью подбора начальных фаз излучаемых волн антенными элементами. Начальные фазы излучаемых колебаний каждым элементом антенной решётки  $\varphi_i$  для любого положения фокуса в области реконструкции можно рассчитать по формуле (1), используя геометрическую схему рис. 1:

$$\varphi_i = \frac{4\pi}{\lambda} R_i, \quad (1)$$

$$R_i = \sqrt{R_0^2 + \delta_{k,m}^2 - 2R_0\delta_{k,m} \cos \theta_i}, \quad (2)$$

где  $R_i$  — расстояние от  $(k, m)$ -го элемента матрицы изображения до  $i$ -го элемента кольцевой антенной решётки,  $k$  — номер элемента строки матрицы изображения,  $m$  — номер столбца матрицы изображения,  $R_0$  — радиус кольцевой антенной решётки,  $\delta_{k,m} = \Delta\sqrt{k^2 + m^2}$  — расстояние от центра кольцевой антенной решётки до  $(k, m)$ -го элемента матрицы изображения,  $\Delta$  — шаг между элементами матрицы изображения,  $\lambda$  — длина ультразвуковой волны,  $\theta_i$  — меняющийся угол между  $\delta_{k,m}$  и  $R_i$  при смене  $i$ -го элемента кольцевой антенной решётки.

Для расчёта требуемого угла поворота фазы сигнала  $\varphi_i$  в  $i$ -м фазовращателе, который обеспечивает попадание фокусом в нужный элемент матрицы изображения на рис. 1, из полученной фазы по формуле (1) следует отбросить целое число периодов волны, как это показано в (3):

$$\varphi_i = \frac{4\pi}{\lambda} R_i - 4\pi n_i, \quad (3)$$

где  $n_i$  — целое число волн  $\lambda$ , укладываемых на отрезке  $R_i$ .

В (3) цифра 4 означает, что волна проходит удвоенное расстояние  $R_i$ , т. е. от фокуса до элемента кольцевой антенной решётки и обратно. Путём расчёта всех начальных фаз волн  $\varphi_i$  на выходе каждого фазовращателя происходит совмещение фокуса с требуемым элементом матрицы изображения.

Вышеописанный алгоритм обеспечивает сканирующее управление фокусом. Мы добились того эффекта, что управляемый нами фокус дискретно скользит по элементам заданной матрицы изображения (см. рис. 1).

Чтобы убедиться в том, что фокус перемещается, необходимо задать на матрице изображения хотя бы одну отражающую точку. Допустим, что отражающая точка расположена в середине матрицы изображения. В этом случае всплеск суммарного сигнала на выходе сумматора, который собирает сигналы со всех принимающих элементов антенной решётки, будет только в тот момент, когда управляемый фокус совместится с отражающей точкой. В этот момент сигналы на каждый принимающий элемент антенной решётки от отражающей точки придут в одинаковой фазе и в результате синфазного сложения дадут мощный всплеск.

После того, как перестраиваемый фокус уйдёт с отражающей точки, сигналы на входах принимающих антенных элементов станут несинфазны, и мощный всплеск пропадёт.

Математически это можно сформулировать следующим образом:

$$S_\Sigma = \sum_{i=1}^N s_i e^{j\varphi_i} = e^{i\varphi} \sum_{i=1}^N s_i, \quad (4)$$

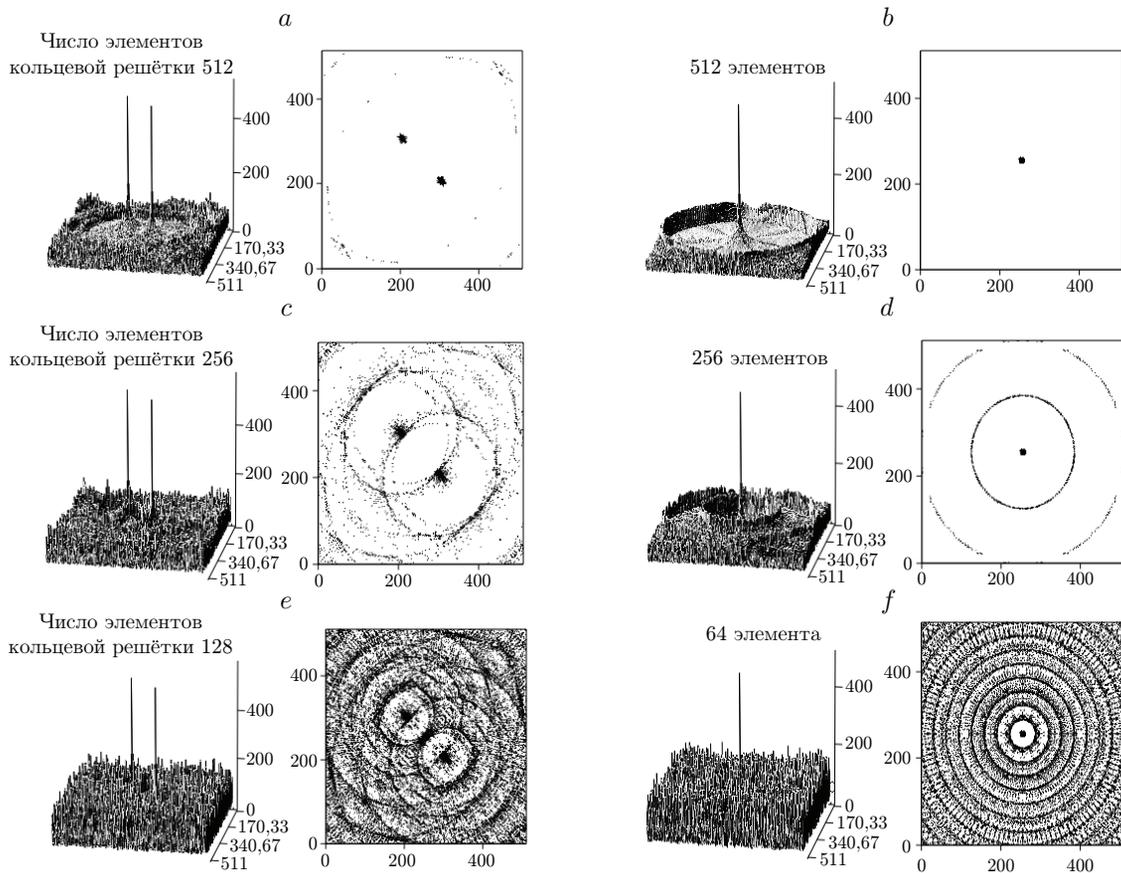
где  $S_\Sigma$  — амплитуда суммарного сигнала на выходе сумматора, на входы которого подаются сигналы со всех принимающих антенных элементов кольцевой антенной решётки;  $\varphi_i = \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = \dots$  — фазы волн (сигналов) на выходе отдельных принимающих элементов кольцевой антенной решётки;  $s_i = s_1 = s_2 = s_3 = \dots$  — амплитуды волн (сигналов) на выходе отдельных принимающих элементов кольцевой антенной решётки.

Задавая  $\delta_{k,m}$ , мы будем управлять местоположением фокуса. Но для этого надо рассчитать, а потом изменить по результатам расчёта начальные фазы волн на выходах излучающих элементов кольцевой антенной решётки в соответствии с (3). Эти действия позволят перестраивать фокус, обеспечивая в нём концентрацию энергии всех излучателей кольцевой антенной решётки. Он последовательно будет занимать ряд дискретных местоположений, которые соответствуют элементам матрицы изображения (см. рис. 1). Однако сигнал на выходе сумматора появится только в том случае, если в этот момент в фокусе окажется отражатель, иначе на выходе сумматора не будет суммарного сигнала.

Если появится потребность рассмотреть, как выглядит смещённый от центра фокус, то необходимо перенести отражающую точку подальше от центра матрицы. Математически это будет выглядеть так:

$$S_\Sigma = \sum_{i=1}^N s_i e^{j(\varphi_i + \varphi_{k,m})}, \quad (5)$$

где  $\varphi_{k,m}$  — различные фазы на выходах принимающих антенных элементов от смещённого отражателя, установленного в  $(k, m)$ -й элемент матрицы изображения.



*Рис. 2.* Результаты реконструкции положения фокуса при разном количестве элементов на кольцевой решётке: *a* — двухточечный объект, полученный сканирующим фокусом при 512 элементах на антенном кольце; *b* — одноточечный объект, полученный сканирующим фокусом при 512 элементах на антенном кольце; *c* — двухточечный объект, полученный сканирующим фокусом при 256 элементах на антенном кольце; *d* — одноточечный объект, полученный сканирующим фокусом при 256 элементах на антенном кольце; *e* — двухточечный объект, полученный сканирующим фокусом при 128 элементах на антенном кольце; *f* — одноточечный объект, полученный сканирующим фокусом при 64 элементах на антенном кольце

Просканировав фокусом все элементы заданной матрицы изображения, получим двумерный массив распределения амплитуд по всем элементам матрицы. Данный двумерный массив позволяет построить поверхность, на которой отразится в виде всплеска фокусировка, выявляющаяся с помощью отражающей точки, совмещённой с выбранным элементом матрицы изображения.

**Результаты моделирования антенного кольца с прореживанием элементов на нём.** Моделирование проводилось при следующих условиях. Число элементов матрицы изображения выбрано равным  $256 \times 256$ , т. е.  $k = 256$  и  $m = 256$ ,  $\lambda = 1,3$  мм,  $\Delta = 0,208$  мм — шаг между элементами матрицы изображения,  $R_0 = 10,6$  см — радиус кольцевой антенной решётки.

На рис. 2, *a*, *c*, *e* представлены результаты моделирования двухточечного объекта. Два пика, показывающие локализацию отражающих точек, хорошо различимы, поэтому на виде сверху эти пики превращаются в точки, т. е. мы видим изображения точечных объектов.

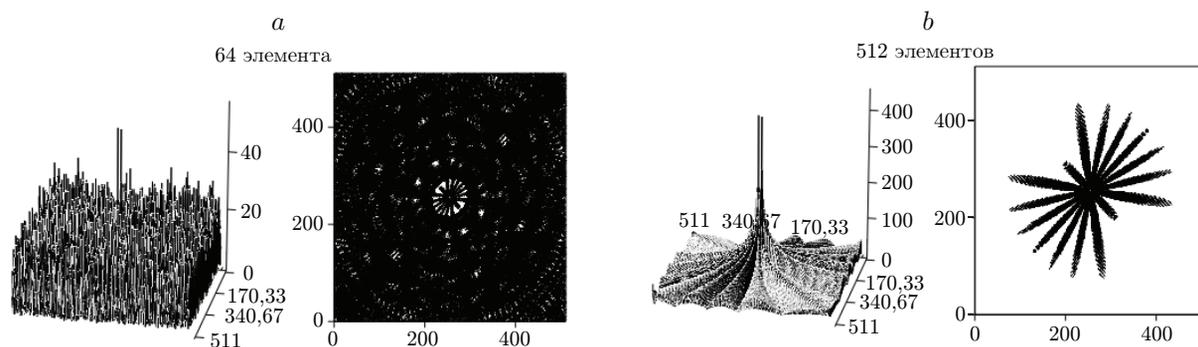


Рис. 3. Результаты модельного эксперимента, демонстрирующие независимость разрешающей способности от числа антенных элементов на кольцевой антенной решётке: *a* — 64 элемента на кольцевой решётке, *b* — 512 элементов

Каждому пику сопутствуют свои кольца (артефакты). Высота колец и их интерференция воспринимаются как шумы на пьедестале поверхности изображения.

На рис. 2, *b*, *d*, *f* представлены результаты реконструкции положения фокуса в центре антенного кольца при разном количестве антенных элементов на кольцевой решётке. Будем считать, что в фокусе располагается отражающая точка. Тогда можно говорить о реконструкции одноточечных объектов, расположенных в центре, при разном количестве антенных элементов на кольце. На рис. 2, *b*, *d*, *f* показано, что прореживание числа элементов на кольце, т. е. уменьшение их количества на кольце антенной решётки, приводит к появлению артефактов в виде колец. При этом чем реже расположены антенные элементы на кольце, тем больше колец на реконструированном изображении одноточечного объекта. Если обратить внимание на поверхности, показывающие локализацию отражающей точки с пиком посередине, то можно отметить, что с уменьшением антенных элементов на кольце антенной решётки растёт амплитуда артефактов на пьедестале поверхности, вызванная высотой колец, но при этом толщина пиков, т. е. диаметр окружности, полученной в результате горизонтального сечения центрального пика (место локализации фокуса), остаётся без изменения. Это свидетельствует о том, что разрешающая способность не зависит от количества антенных элементов на кольце и остаётся равной пределу Рэлея, т. е.  $\lambda/5$ . Указанный предел подтверждается другими источниками, например, в [6, с. 34]. Воспользуемся этой формулой:

$$\rho = \frac{1,22\lambda}{2\alpha} = \frac{1,22\lambda}{2\pi} = \frac{1,22\lambda}{6,14} = \frac{\lambda}{5,03}, \quad (6)$$

где  $\rho$  — радиус центрального пятна дифракционной картины [6, с. 34].

Применительно к результатам нашего модельного эксперимента  $\rho$  — это радиусы пиков на рис. 3 у их основания, которые отсчитываются от максимума до первого нуля дифракционной картины,  $2\alpha$  — угловая апертура объектива. Для случая круговой апертуры она равна  $2\pi$ , а для случая полукруговой апертуры —  $\pi$ .

Поскольку угловая апертура при полукольцевой антенной решётке в 2 раза меньше, чем при кольцевой, то разрешающая способность при полукольцевой апертуре в два раза хуже, чем при кольцевой апертуре антенной решётки.

Осталось показать путём модельного эксперимента, что число антенных элементов на кольцевой апертуре практически не влияет на толщину пиков, а следовательно, на разрешающую способность. Полагается, что угловая апертура кольцевой антенной решётки не меняется и остаётся равной  $2\pi$ . Изменяется число элементов на кольцевой антенной решётке от 512 до 64. Расстояние между отражающими точками выбрано равным  $0,48\lambda$ .

Две отражающие точки дают два пика, которые не сливаются и хорошо просматриваются на рис. 3, *a, b*, несмотря на то, что точки расположены близко друг от друга на расстоянии  $0,48\lambda$ . Интерференционный рисунок, состоящий из двенадцати лепестков и расположенный в центре, одинаков на рис. 3, *a, b*, что подтверждает одинаковое расстояние между точками в обоих экспериментах.

Главным результатом этого эксперимента является то, что сформировавшиеся пики при 64 и 512 антенных элементах не сливаются на рис. 3, *a, b* и хорошо просматриваются, несмотря на то, что отражающие точки установлены близко друг от друга на расстоянии  $0,48\lambda$ . Это служит доказательством неизменности разрешающей способности от числа антенных элементов на кольцевой антенной решётке.

Рассмотрим вопрос о том, будет ли фокусировать антенное полукольцо или четверть кольца, а также представляет интерес: останется ли возможность управления положением фокуса? Этот вопрос также имеет прикладное значение. Специалисту, производящему томографирование, легче осуществлять манипуляции с полукольцом, чем с кольцом.

Кольцо или полукольцо должны плотно прилегать к телу пациента при томографировании. Между кольцом или полукольцом должна быть гелевая смазка для предотвращения воздушного зазора. При наличии воздушного зазора между кольцом и поверхностью тела пациента возникают две среды с границей раздела. Плотный контакт при наличии геля устраняет границу раздела между неодинаковыми средами и способствует беспрепятственному проникновению ультразвуковой волны в тело пациента. С помощью кольца плотный контакт создать труднее, чем с помощью полукольца. Например, для томографи-

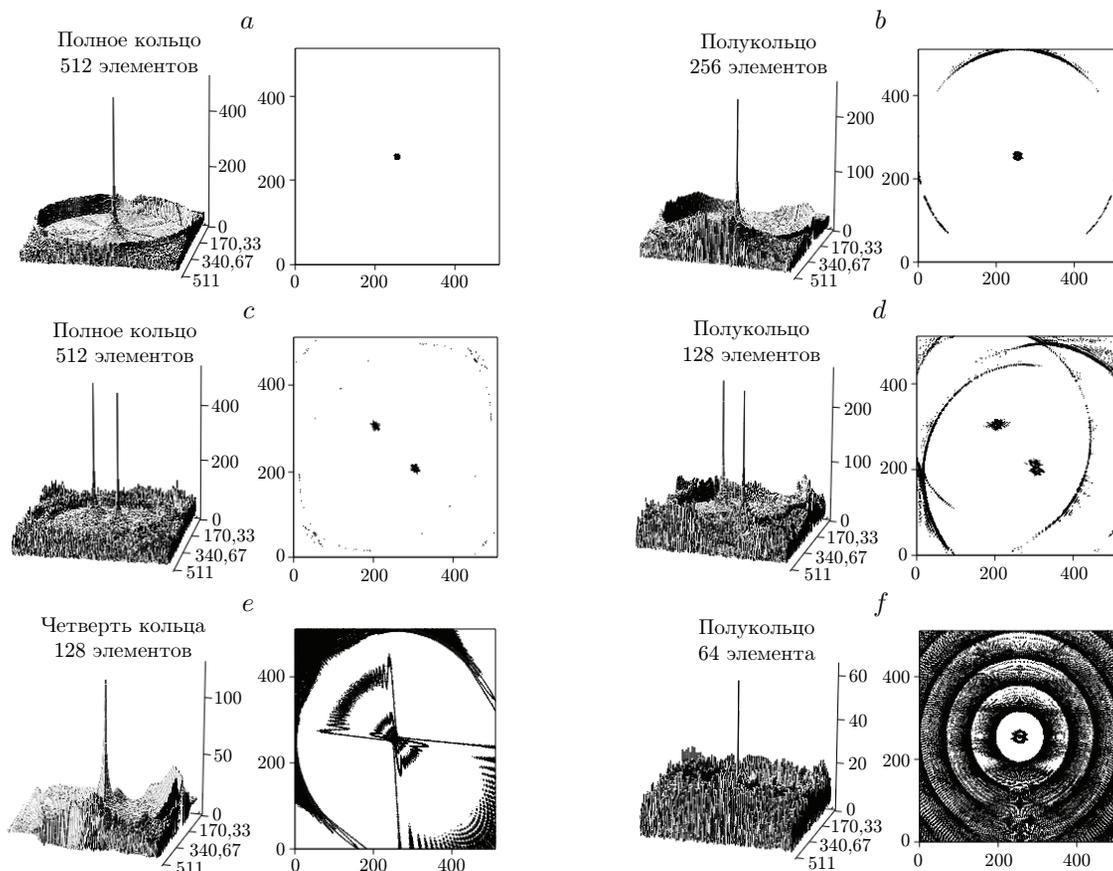


Рис. 4. Реконструкция фокуса при переходе от кольца (*a, c*) к полукольцу (*b, d, f*) и четверти кольца (*e*)

рования шейного отдела с кольцом возникают трудности при надевании его через голову. А если удастся надеть, то не будет обеспечен плотный контакт с шеей пациента.

Таким образом, сегментно-кольцевая антенная решётка позволяет преодолеть указанные проблемы.

**Моделирование сегментно-кольцевой антенной решётки.** В качестве сегмента кольца будем использовать полукольцевую или четвертькольцевую антенную решётку. При моделировании полукольцевой антенной решётки можно применять тот же алгоритм, который использовался для кольцевой антенной решётки. Отличие заключается в том, что антенными элементами заполняется не всё кольцо, а только его половина или четверть.

Результаты моделирования представлены на рис. 4. Два верхних рисунка (рис. 4, *a, b*) относятся к томографированию одноточечного объекта, расположенного в центре области реконструкции в виде матрицы на рис. 1. Плотность антенных элементов на кольце и полукольце одинаковая, но на полукольце их суммарное количество в два раза меньше, т. е. 256, а не 512 (см. рис. 4, *a, b*).

На рис. 4, *a, b* изображена реконструкция фокуса (изображения относятся к томографированию одноточечного объекта), и показано, что антенное полукольцо обладает такой же хорошей фокусировкой, как и кольцо. Однако в случае полукольца пик имеет в два раза больший диаметр в сечении. Следовательно, при переходе от кольца к полукольцу разрешающая способность ухудшается в два раза.

На рис. 4, *c, d* за счёт задания двухточечной модели иллюстрируется, что полукольцо также эффективно управляет местоположением фокуса, как и кольцо. Отсюда вытекает возможность томографирования с помощью сканирующего фокуса.

На рис. 4, *f* показано, как ведёт себя полукольцо при прореживании количества антенных элементов до 64. При прореживании появляются артефакты в виде колец.

На рис. 4, *e* демонстрируется, как ведёт себя четвертькольцевая антенная решётка при непрореженном количестве антенных элементов, равном 128.

**Заключение.** Прореживание антенных элементов на антенном кольце приводит к артефактам в виде колец на реконструированном изображении.

Появление колец на реконструированном изображении фокуса объясняется интерференцией по Френелю. Можно полагать, что кольцевая антенная решётка соответствует кольцевому фронту волны. Каждая точка фронта является источником вторичных сферических волн. Если излучающие точки кольцевого фронта начать прореживать, то дискретные излучающие точки кольцевого фронта дадут интерференционный узор в виде колец, повторяющий первоначальный кольцевой фронт. При этом чем больше интервал между дискретными элементами на исходном кольце, тем чаще следуют интерференционные кольца. Чем больше прореживание, тем больше амплитуда артефактов в виде колец на пьедестале изображения фокуса. Вместе с тем прореживание не влияет на разрешающую способность кольцевой антенной решётки.

Полукольцевая антенная решётка по свойствам близка к кольцевой антенной решётке. Она обладает хорошей фокусировкой и даёт возможность управлять местоположением фокуса.

Вышеперечисленные качества позволяют применять полукольцевую решётку для томографирования, притом, что ею легче манипулировать при сборе данных. При прореживании элементов на полукольцевой антенной решётке, так же, как в случае с кольцевой решёткой, появляются артефакты в виде колец. Четвертькольцевая антенная решётка показывает работоспособность, но результаты реконструкции изображения значительно хуже, чем у полукольцевой антенной решётки.

Анализ зарубежных источников [7–11] показал, что кольцевые антенные решётки применяются в основном для дальней локации. При этом диаграмму направленности формируют за пределами антенного кольца перпендикулярно его плоскости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mensa D. L., Halevy S., Wade G.** Coherent Doppler tomography for microwave imaging // Proc. of the IEEE. 1983. **71**, Iss. 2. P. 254–261.
2. **Ющенко В. П.** Круговой апертурный синтез для целей томографии // Автометрия. 2002. **38**, № 6. С. 28–35.
3. **Ющенко В. П., Эдвабник В. Г., Гофман О. В. и др.** Метод реконструкции изображения объекта с помощью кольцевой антенной решётки // Автометрия. 2020. **56**, № 6. С. 68–77. DOI: 10.15372/AUT20200608.
4. **Ющенко В. П., Литвиненко С. А., Гофман О. В., Дулуба Т. В.** Экспериментальное подтверждение теоретических положений кругового апертурного синтеза // Автометрия. 2023. **59**, № 3. С. 112–125. DOI: 10.15372/AUT20230312.
5. **Якубов В. П., Славгородский С. А.** Модель радиоволнового томографа // Журнал радиоэлектроники. 2001. № 9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct01/6/text.html> (дата обращения: 30.06.2023).
6. **Франсон М.** Голография / Пер. с франц. С. И. Балашовой; под ред. Ю. И. Островского. М.: Мир, 1972. 247 с.
7. **Whitrow J. L.** The Radiation Patterns of Circular Apertures. Edinburgh: National Security and ISR Division, 2018. 44 p.
8. **Maldonado A. R., Panduro M. A., del Rio Bocio C., Mendez A. L.** Design of concentric ring antenna array for a reconfigurable isoflux pattern // Journ. Electromagnetic Waves and Applications. 2013. **27**, Iss. 12. P. 1483–1495. DOI: 10.1080/09205071.2013.816877.
9. **Reyna A., Panduro M. A., del Rio Bocio C.** Synthesis of volumetric ring antenna array for terrestrial coverage pattern // Sci. World Journ. 2014. **2014**. 260949. DOI: 10.1155/2014/260949.
10. **Al-Shabkhoon E. U. T.** Design of complementary ring array antenna // Al-Rafidain Eng. Journ. (AREJ). 2010. **18**, Iss. 5. P. 88–93.
11. **Ketavath K. N.** Analysis of Ten-Concentric Circular Ring Antenna Array for Radar and Wireless Applications // Int. Journ. Res. Appl. Sci. Eng. Technol. (IJRASET). 2018. **6**, Iss. 2. P. 355–360.

*Поступила в редакцию 30.06.2023*

*После доработки 07.09.2023*

*Принята к публикации 07.09.2023*

---