

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 534-8, 534.08, 534.213, 53.082.4

### ПОПЕРЕЧНОЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2010 г. В. А. Симонова, И. М. Пеливанов\*, В. Я. Панченко, А. А. Карабутов\*

*Институт проблем лазерных и информационных технологий при РАН*

*140700 Шатура Московской обл. ул. Святоозерская 1*

*E-mail: varvara.simonova@gmail.com*

*\* МГУ им. М.В. Ломоносова, Международный лазерный центр*

*119992 Москва, Ленинские горы 1*

*Поступила в редакцию 25.12.09 г.*

Представлено численное исследование функции передачи точки многоэлементной оптоакустической (ОА) антенны. В предлагаемом подходе проводится анализ минимального восстанавливаемого размера ОА изображения точечного источника сферических волн. Детально исследовано влияние геометрических параметров многоэлементной антенны, числа приемников антенны и частотной полосы отдельного приемника на поперечное пространственное разрешение в плоскости изображения. Показывается, что поперечное пространственное разрешение, получаемое с помощью многоэлементной антенны, в плоскости изображения однозначно определяется частотной полосой приемника, угла раскрытия антенны и ширины приемника, и не зависит от числа приемников.

*Ключевые слова:* многоэлементная антенна, функция передачи точки, оптоакустическая томография, широкополосный пьезоэлектрический приемник, пространственное разрешение многоэлементной антенны.

#### ВВЕДЕНИЕ

Пространственное разрешение, обеспечиваемое многоэлементной антенной, является основной характеристикой качества получаемых изображений, обычно описываемых в терминах функции передачи точки. Эта функция может быть определена экспериментально, но так как разработка и создание многоэлементных антенн является достаточно сложной и дорогой технической задачей, то развитие теоретического подхода, позволяющего оценить пространственное разрешение антенны заранее, имеет большое практическое значение.

Эта работа посвящена изучению влияния геометрических параметров многоэлементной антенны, числа приемников и частотной полосы отдельного приемника на функцию передачи точки антенны, а следовательно, и на поперечное пространственное разрешение в плоскости изображения  $\Delta z$ . В проведенных исследованиях рассматривается двумерная оптоакустическая томография и многоэлементная антенна приемников, используемая для решения двумерной обратной задачи оптоакустики [1]. Эта задача не является математически точной, потому что в общем случае количественное значение тепловыделения не может быть восстановлено корректно в плоско-

сти изображения, однако это позволяет определить размер и положение поглощающих неоднородностей [2, 3]. Преимуществом двумерной оптоакустической томографии является возможность получения изображений объекта в реальном времени, что является очень важным фактором для медицинских приложений.

ОА сигналы, возбуждаемые в биологической ткани, являются широкополосными. Временной профиль таких сигналов несет информацию о распределении тепловыделения [1, 4]. Для того чтобы избежать искажений при решении обратной задачи, необходимо использовать широкополосные ОА приемники сигналов. Для регистрации ОА сигналов в большой частотной полосе и с большой чувствительностью используются пьезоприемники [5, 6]. Форма и размер отдельного приемника антенны определяются конкретной задачей ОА томографии.

Двумерное изображение представляет собой сечение распределения тепловых источников "тонким срезом", плоскостью изображения. Толщина "тонкого среза" определяется пространственным разрешением  $\Delta u$  в направлении, перпендикулярном плоскости изображения. Это разрешение зависит от фокальной области отдельного приемника. В предыдущих работах [7, 8, 9] было

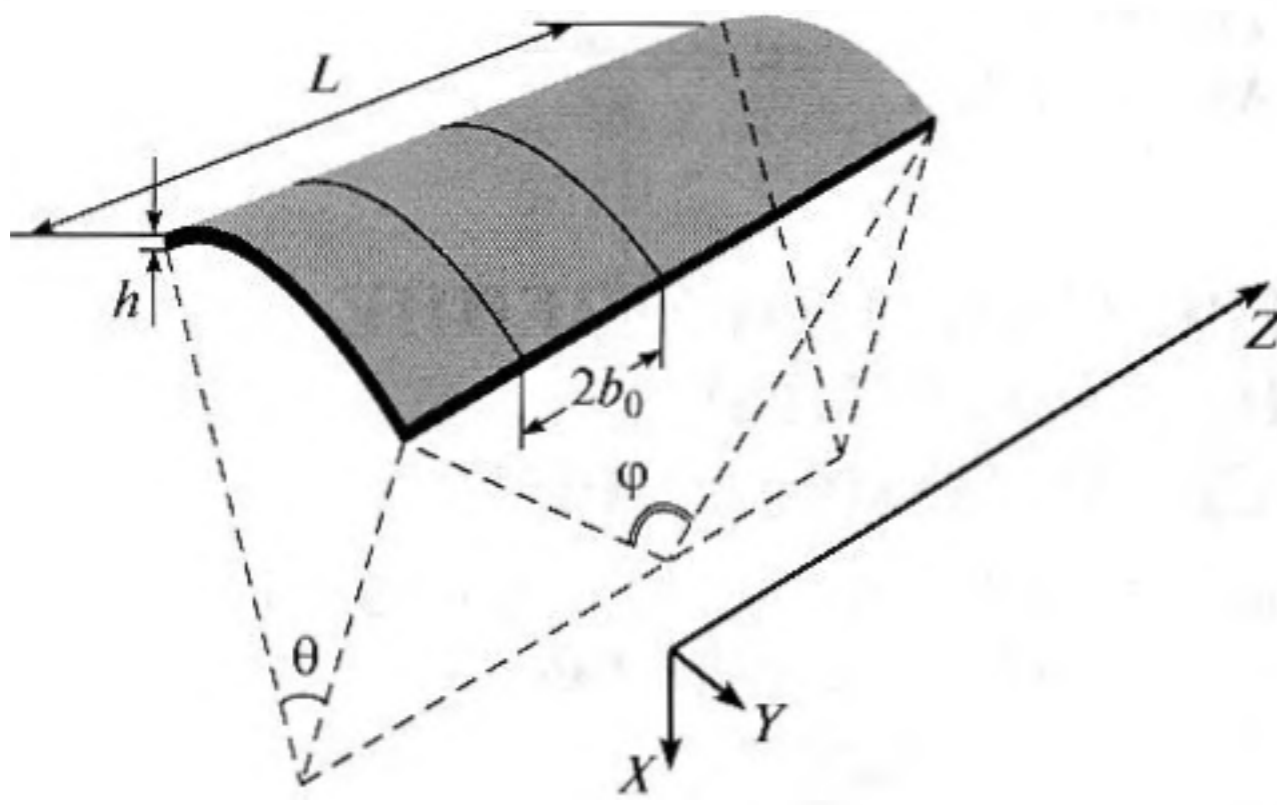


Рис. 1. Пример геометрии цилиндрически фокусирующей антенны;  $2b_0$  — ширина приемника;  $h$  — толщина приемника;  $L$  — полная длина антенны;  $\theta$ ,  $\varphi$  — углы раскрыва антенны.

показано, что разрешение  $\Delta y$  может быть значительно улучшено при использовании фокусирующей формы отдельного приемника. Влияние геометрических параметров приемника и его частотной полосы приема на оба поперечных размера области по уровню  $1/2$  от максимума на карте чувствительности фокальной области, определение значения разрешения  $\Delta y$  и размера исследуемой области детально исследованы в [10]. Было показано, что пространственное разрешение  $\Delta y$  в направлении, перпендикулярном плоскости изображения, определяется только углом раскрыва  $\theta$  и частотной полосой приемника и описывается выражением

$$\Delta y = \frac{0.52c_0}{f_0 \sin \theta/2}, \quad (1)$$

где  $c_0$  — скорость звука,  $f_0$  — характеристическая частота спектра ОА сигнала по уровню  $1/e$ .

Несмотря на то, что ОА сигналы рассматривались как широкополосные, выражение (1) для разрешения  $\Delta y$  с точностью до постоянного фактора соответствует выражению, данному О'Нейлом для поля сферически фокусирующего излучателя непрерывных ультразвуковых волн [10]. Очевидно, что этого исследования не достаточно для определения всех минимальных размеров изображения, получаемого с помощью многоэлементной антенны и необходимо провести дополнительные исследования пространственных разрешений в плоскости изображения.

#### ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ПРИЕМНИКА И УГЛА РАСКРЫВА АНТЕННЫ НА ПОПЕРЕЧНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Функция передачи точки антенны определяется как набор трех значений  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta z$ , характеризующих минимальный размер изображения точечного

источника, получаемого с помощью многоэлементной антенны. Разрешение  $\Delta x$  определяется только частотной полосой приемника и не зависит от расположения приемников в антенне [6].

Определение функции передачи точки в двумерной ОА томографии подразумевает анализ изображений точечного источника, расположенного в фокусе плоскости  $XZ$  антенны. Для этого используется алгоритм восстановления изображения. Наиболее распространенным алгоритмом восстановления изображения в 2D ОА томографии является алгоритм обратных проекций, основанный на методе обратного распространения, наиболее подходящий для поставленных целей, когда число приемников в антенне не велико (менее 256) [3]. Этот алгоритм использовался в представленной работе. Для осуществления этого алгоритма необходимо наличие временных профилей ОА сигналов с приемников антенны. Эти сигналы могут быть получены экспериментально. Однако в виду того, что изготовление многоэлементных антенн является дорогой и сложной задачей, альтернативным способом получения этих сигналов может служить их численное моделирование. Расчет ОА сигналов на приемниках антенны производился с помощью интеграла Рэлея с учетом спектральной передаточной функции приемника, его формы и размера. Детальное описание процесса восстановления изображения можно найти в [11].

Во всех предложенных до последнего времени конструкциях многоэлементных антенн пространственное поперечное разрешение в плоскости изображения было основным фактором, ограничивающим качество получаемого изображения [12]. Данная проблема частично решается путем использования решетки из фокусируемых приемников [6, 8, 9, 10] или плоских приемников с фокусирующей акустической линзой [13]. Изготовление сферически фокусируемых антенн связано с существенными техническими трудностями изготовления и расположения фокусируемых приемников на сферической поверхности. Поэтому целесообразно рассматривать цилиндрически фокусируемые многоэлементные антенны (рис. 1). Такие антенны значительно проще выполнимы технически, но обеспечивают относительно небольшой угол раскрыва в связи с разницей акустических импедансов между материалом пьезоприемника и биологической средой [7, 9].

Зависимость поперечного пространственного разрешения  $\Delta z(\varphi)$  от угла раскрыва антенны представлена на рис. 2. Точки на рис. 2 соответствуют численному расчету, пунктирные линии — описываются выражением (2):

$$\Delta z = \frac{0.52c_0}{f_0 \sin \varphi/2}, \quad (2)$$

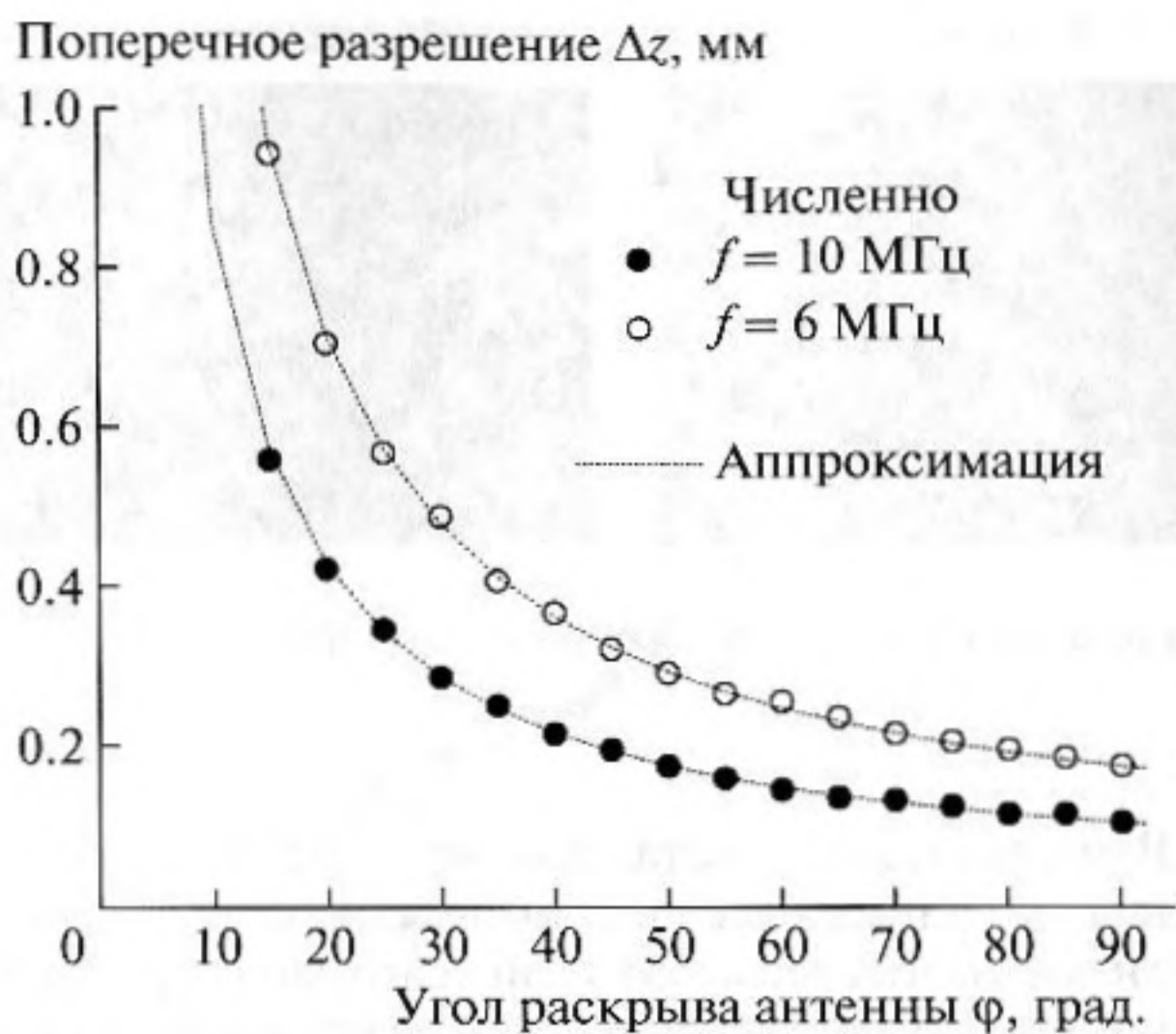


Рис. 2. Численная зависимость поперечного пространственного разрешения  $\Delta z(\phi)$  от угла раскрыва многоэлементной цилиндрически фокусированной антенны  $\phi$  (точки) ( $2b_0 = 0.01$  мм), аппроксимация выражением (2) (пунктирные линии).

В случае цилиндрически фокусированной многоэлементной антенны ширина отдельного приемника  $2b_0$  влияет на обеспечиваемое антенной поперечное разрешение  $\Delta z$ . Причиной этого является тот факт, что сферическая волна от точечного ОА источника не приходит на всю поверхность отдельного приемника одновременно. На рис. 3 представлены результаты численных исследований зависимости поперечного пространственного разрешения  $\Delta z(2b_0)$  от ширины приемника. Первым интересным фактом является то, что для достаточно широкого диапазона значений ширин приемника поперечное разрешение  $\Delta z$  определяется шириной отдельного приемника антенны  $2b_0$ . В этом диапазоне ширин влияние других параметров антенны на разрешение не существенно, и поперечное пространственное разрешение соответствует ширине отдельного приемника. Этот факт объясняется увеличением длительности акустического сигнала в случае, когда регистрация осуществляется приемником конечного размера. Вторым интересным фактом, который иллюстрирует рис. 3, является то, что зависимость предельного поперечного разрешения  $\Delta z_{\min}$  описывается выражением (2).

Зависимости рассчитаны для различных значений характеристической частоты  $f_0$  (рис. 3а) и угла раскрыва антенны  $\phi$  (рис. 3б). Влияние параметров  $f_0$  и  $\phi$  на предельное поперечное разрешение  $\Delta z_{\min}$  также описывается выражением (2). Подобные кривые получены ранее в исследованиях [10] для случая поперечного простран-

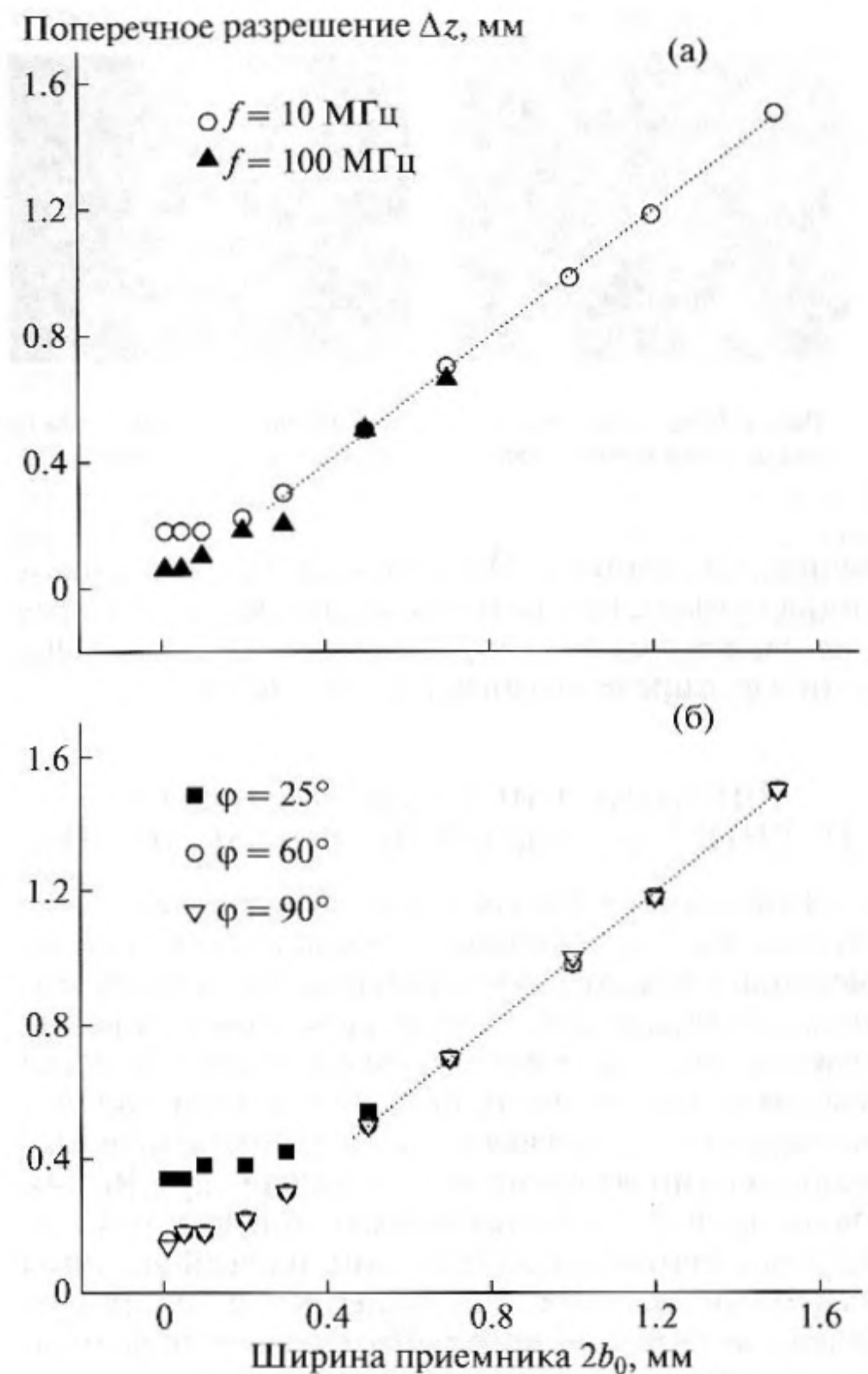


Рис. 3. Численная зависимость поперечного пространственного разрешения  $\Delta z(2b_0)$  от ширины отдельного приемника многоэлементной цилиндрически фокусированной антенны  $2b_0$  (точки), аппроксимация прямой (пунктирная линия).

ственного разрешения  $\Delta u$ , где функциональная зависимость разрешения  $\Delta u$  описывалась выражением (1). Как видно, выражения (1) и (2) совпадают друг с другом с точностью до замены угла  $\theta$  на  $\phi$ . Это может быть объяснено следующим образом. В процедуре алгоритма обратных проекций, основанном на методе обратного распространения, приемники представляются в качестве излучателей, которые излучают обратные волны, сходящиеся в точке расположения точечного источника. Совокупный волновой фронт, который получается в таком случае, близок к случаю излучателя непрерывных ультразвуковых волн с такой же кривизной.

Необходимо отметить, что в численных расчетах также варьировалась полная длина антенны  $L$  и расстояние  $r$  от ее центра до расположения то-

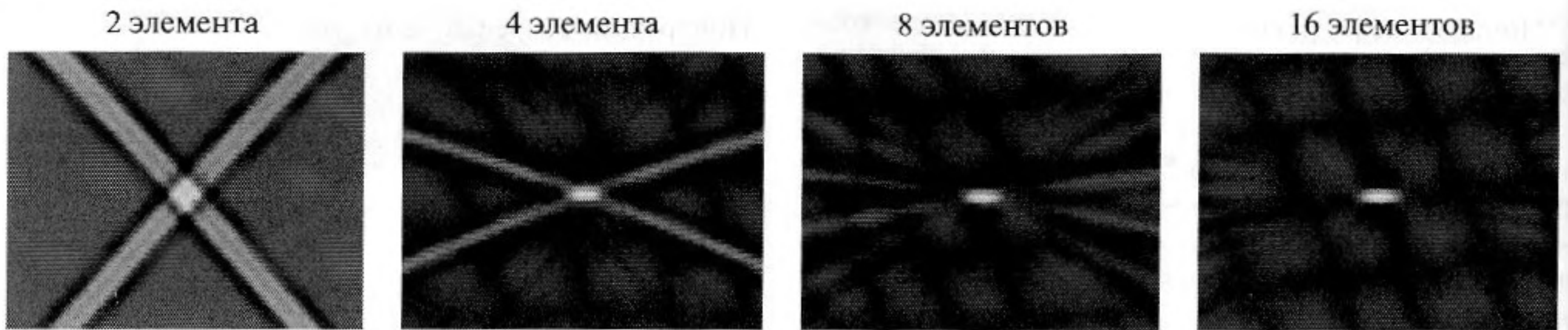


Рис. 4. Численно рассчитанные изображения функции передачи точки цилиндрически фокусированной антенны для различного количества приемных элементов антенны.

чечного источника. Однако эта ситуация аналогична случаю, при котором поперечное разрешение зависит от варьируемого угла раскрытия антенны  $\varphi$ , определяемого отношением  $L$  и  $r$ .

### ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ПРИЕМНИКОВ АНТЕННЫ НА ПОПЕРЕЧНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Во всех проводимых численных расчетах, описанных выше, использовалось достаточно большое число приемников в антенне  $N = 32$  и полагалось, что дальнейшее увеличение их числа не отразится на полученных результатах. Хорошо известно, что число приемников сильно влияет на уровень артефактов в восстанавливаемом изображении и соотношение сигнал-шум [6, 14]. Очень важно для практических применений выяснить влияние числа приемников всей антенны на обеспечиваемое ей поперечное пространственное разрешение  $\Delta z$ . Этот раздел посвящен результатам, проясняющим этот вопрос.

В численных расчетах для этого раздела все параметры, влияющие на поперечное пространственное разрешение  $\Delta z$  и описанные в предыдущих разделах, фиксировались (частотная полоса приемника  $f_0$ , угол раскрытия антенны  $\varphi$ , ширина приемника  $2b_0$ ). Приемники располагались с одинаковыми промежутками между ними, определяемыми полной длиной антенны  $L$  и числом приемников  $N$  в ней. Расчеты проводились для значений числа приемников  $N = 2, 4, 6, 16, 32$ . При числе приемников  $N = 2$ , приемники располагаются на краях антенны.

Рис. 4 демонстрирует восстановленные изображения точечного источника при использовании  $N$  приемников многоэлементной антенны. Для случая  $N = 2, 4$  хорошо видны дуги вероятности, восстанавливаемые с помощью алгоритма обратных проекций по методу обратного распространения. Уровень артефактов очень высок для случая малого количества приемников в антенне [6].

Зависимость, представляющая влияние числа приемников в антенне  $N$  на поперечное пространственное разрешение  $\Delta z$ , показана на рис. 5. Зависимости построены для различных ширин приемника. Как видно, поперечное разрешение не изменяется при числе приемников  $N \geq 8$ . В случае малого числа приемников поперечное разрешение формально не определено из-за большого уровня артефактов (отсутствуют центральные приемники, формирующие восстановление), сравнимого с амплитудой сигналов в области по уровню  $1/2$  от максимума.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Основной вопрос проведенных исследований можно сформулировать следующим образом: какое предельное поперечное пространственное разрешение многоэлементной антенны в 2D ОА томографии может быть достигнуто? Ответ на этот вопрос иллюстрирует рис. 6. Предельное поперечное разрешение определяется выражением

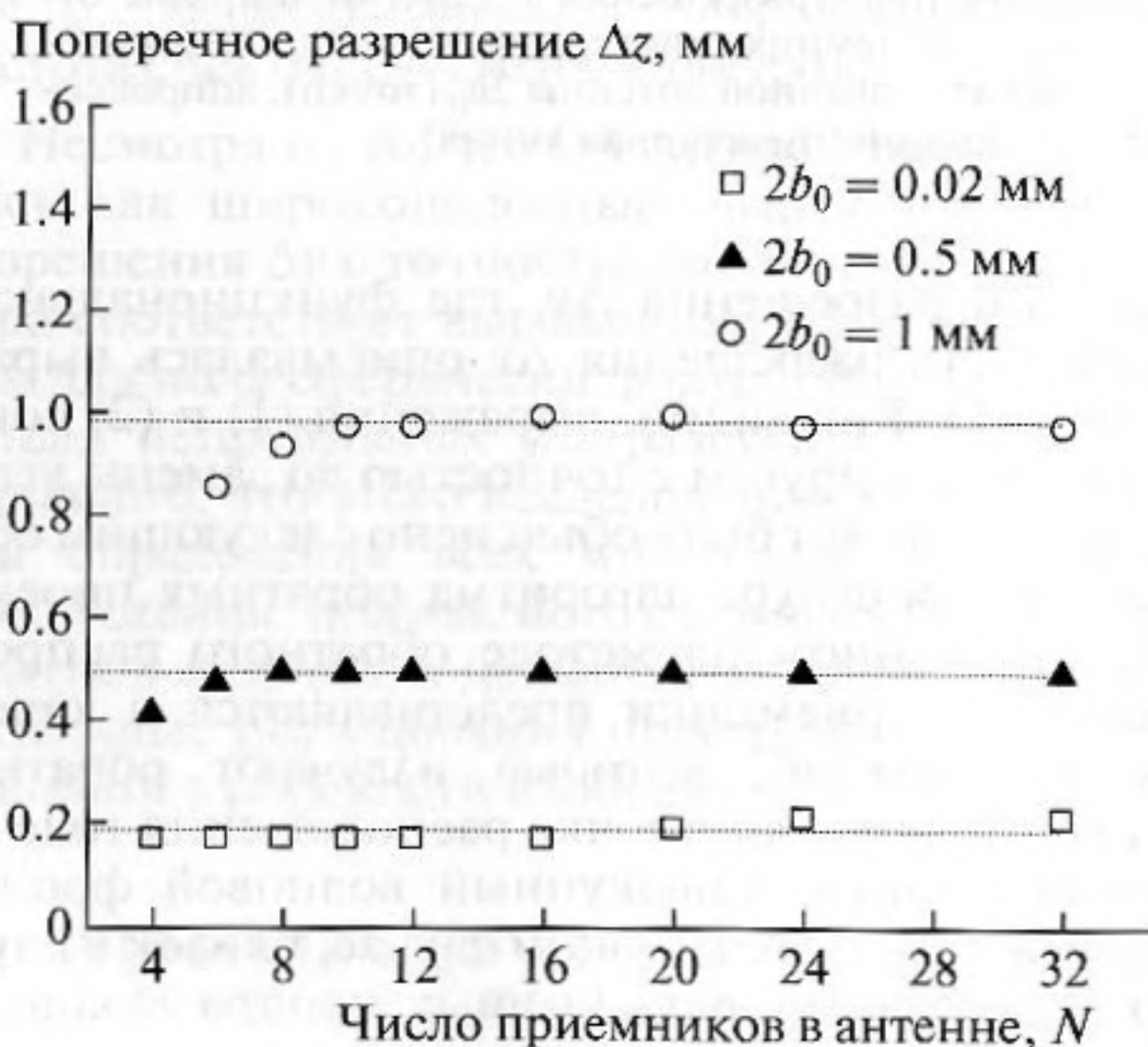
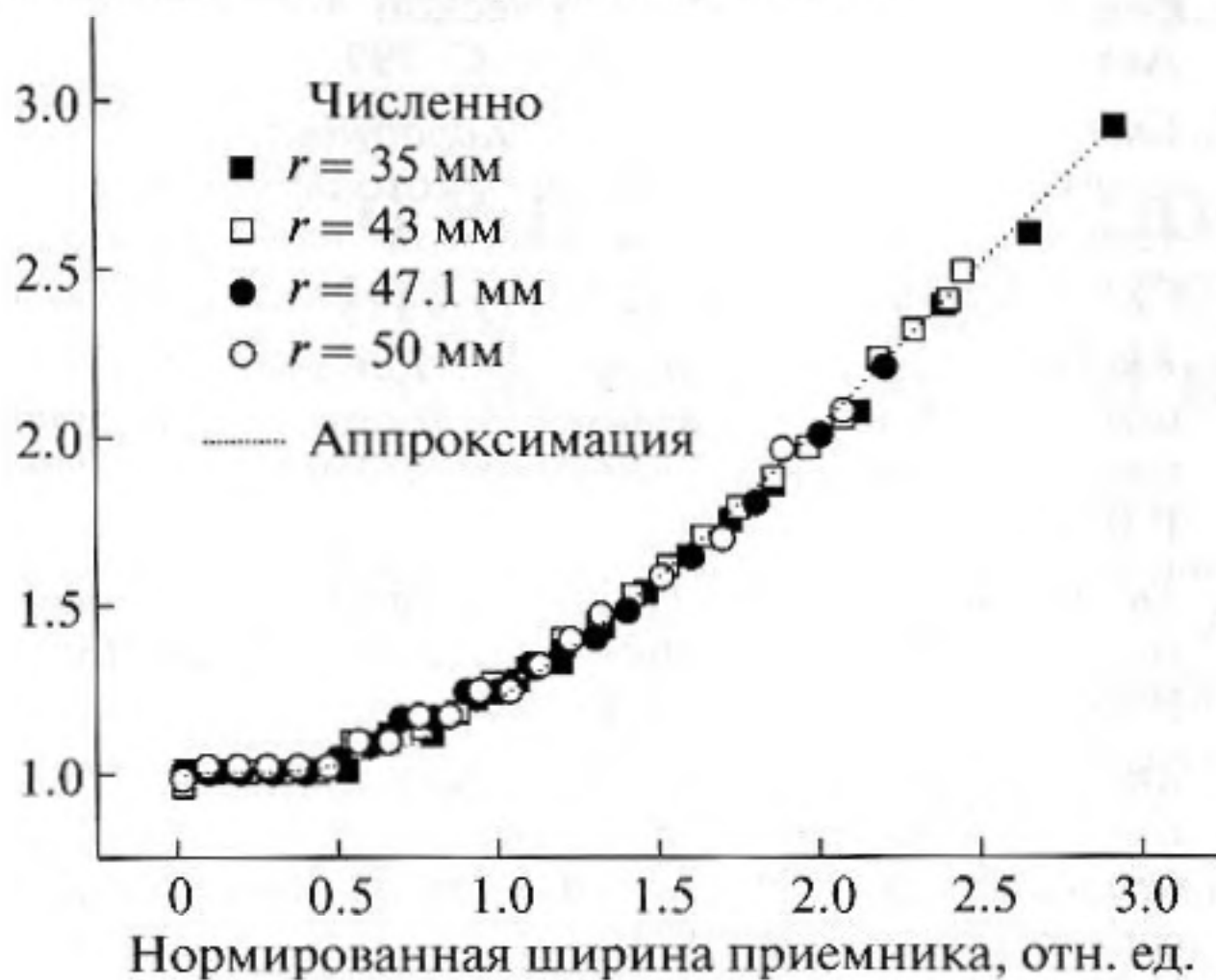


Рис. 5. Численно рассчитанная зависимость поперечного разрешения  $\Delta z(N)$  от числа приемников  $N$  в цилиндрически фокусированной многоэлементной антенне ( $f = 10$  МГц,  $\varphi = 60^\circ$ ).

Нормированное разрешение, отн. ед.



**Рис. 6.** Численно рассчитанная зависимость нормированного поперечного разрешения  $\Delta z / \frac{0.52c_0}{f_0 \sin \varphi/2}$  от нормированной ширины приемников  $2b_0 / \frac{0.52c_0}{f_0 \sin \varphi/2}$  в цилиндрически фокусированной многоэлементной антенне.

$$\Delta z_{\min} = \frac{0.52c_0}{f_0 \sin \varphi/2}$$

Частотная полоса приемника  $f_0$ , определяется толщиной пьезополимерной пленки приемника и может быть выбрана в соответствии с задачей ОА томографии [6]. Предельное значение может быть достигнуто при угле раскрытия антенны  $\varphi = 180^\circ$ . При этих условиях геометрические параметры исследуемого объекта восстанавливаются в области фокуса с максимально возможным разрешением без каких-либо искажений в плоскости XZ. Поперечное разрешение зависит не только от частотной полосы отдельного приемника  $f_0$  и угла раскрытия антенны  $\varphi$ , но и от ширины отдельного приемника (рис. 3). Недостатком зависимостей, изображенных на рис. 3, является то, что они представлены для определенных параметров, влияющих на поперечное разрешение  $\Delta z$ . Таким образом, необходимо определить безразмерный параметр подобия по этим зависимостям. Этот параметр может быть найден из анализа выражений (1) и (2). Для получения универсальной зависимости для всех значений используемых параметров вертикальная и горизонтальная ось на рис. 3 должны быть нормированы на значение предельного поперечного разрешения  $\Delta z_{\min}$ .

Параметры  $f_0$ ,  $\varphi$  и  $2b_0$  варьировались в широком диапазоне значений и по этим данным была получена зависимость, приведенная на рис. 6. Для того чтобы использовать зависимость, изображенную на рис. 6 для расчета поперечного пространственного разрешения  $\Delta z$ , необходимо

определить выражение, описывающее эту зависимость. Наилучшим путем было бы нахождение аналитического выражения, но в данном случае это является достаточно сложной задачей. Поэтому предлагается эмпирическое выражение

$$\begin{aligned} (\Delta z / \Delta z_{\min})_{\text{fit}} = & 2b_0 / \Delta z_{\min} + \\ & + \exp(-1.45(2b_0 / \Delta z_{\min} + 0.02)^{1.27}) \end{aligned} \quad (3)$$

для аппроксимации полученных данных. Это выражение может быть использовано для расчета поперечного пространственного разрешения многоэлементной антенны  $\Delta z$  по известным параметрам  $f_0$ ,  $\varphi$  и  $2b_0$  и обратно — геометрические параметры многоэлементной антенны и частотная полоса отдельного приемника могут выбираться определенным образом с целью достижения требуемого поперечного пространственного разрешения  $\Delta z$ .

## ВЫВОДЫ

Подводя итоги вышесказанного, в настоящей работе представлено исследование поперечного разрешения многоэлементной антенны, используемой для различных проблем 2D ОА томографии. Рассмотрена цилиндрически фокусированная многоэлементная антенна, состоящая из широкополосных пьезоприемников. Получены результаты численного моделирования зависимости поперечного разрешения  $\Delta z$  вдоль соответствующей оси в плоскости изображения от геометрических параметров антенны и частотной полосы отдельного приемника. Было показано путем моделирования функции передачи точки антенны, что поперечное разрешение  $\Delta z$  многоэлементной цилиндрически фокусированной антенны зависит от трех параметров: частотной полосы отдельного приемника  $f_0$ , угла раскрытия антенны  $\varphi$  и ширины приемника  $2b_0$ . Для случая бесконечно малой ширины отдельного приемника поперечное разрешение  $\Delta z$  соответствует поперечному разрешению  $\Delta u$ , полученному для тех же параметров с точностью до замены угла  $\theta$  на  $\varphi$ . Для величины поперечного разрешения антенны были определены безразмерные параметры, а также предложена гладкая функция, аппроксимирующая эту зависимость. Это позволяет оценивать поперечное разрешение, обеспечиваемое многоэлементной антенной при определенных геометрических параметрах антенны и частотной полосе отдельного приемника. Было показано, что в случае восстановления изображения методом обратных проекций поперечное разрешение, обеспечиваемое многоэлементной антенной в 2D ОА томографии, не зависит от числа приемников, их расположения и расстояния между ними.

Работа поддержана грантами РФФИ (проект № 07-02-00940, 10-02-01468, 10-02-91765).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В.Е., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
2. Kostli K.P., Frenz M., Bebie H., Weber H.P. Temporal backward projection of optoacoustic pressure transients using Fourier transform methods // *Phys. Med. Biol.* 2001. V. 46. P. 1863–1872.
3. Хохлова Т.Д., Пеливанов И.М., Карабутов А.А. Методы оптико-акустической диагностики биотканей // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 4. С. 1–12.
4. Симонова В.А., Саватеева Е.В., Карабутов А.А. Новая комбинированная антенна для оптико-акустической и лазерной ультразвуковой томографии // ВМУ. Серия 3. Физика. 2009. № 4. С. 35–37.
5. Kremkau F.W. Diagnostic ultrasound. Principles and Instruments. (sixth edition) // W.B. Saunders Company. 2002.
6. Oraevsky A.A., Karabutov A.A. Ultimate sensitivity of Time-resolved Opto-Acoustic detection // *Proc. SPIE*, 2000. V. 3916. P. 1.
7. Kozhushko V.V., Khokhlova T.D., Zharinov A.N., Pelivanov I.M., Solomatin V.S., Karabutov A.A. Focused array transducer for two-dimensional optoacoustic tomography // *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 116. № 3. P. 1498.
8. Жаринов А.Н., Карабутов А.А., Кожушко В.В., Пеливанов И.М., Соломатин В.С., Хохлова Т.Д. Плечный широкополосный фокусируемый гидрофон для оптико-акустической томографии // *Акуст. журн.* 2003. Т. 49. № 6. С. 799.
9. Симонова В.А., Хохлова Т.Д., Карабутов А.А. Широкополосная фокусирующая многоэлементная антенна для оптико-акустической томографии // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 6. С. 1–7.
10. Khokhlova T.D., Pelivanov I.M., Karabutov A.A. Optoacoustic tomography utilizing focused transducers: the resolution study // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. P. 024105-1-3.
11. Xu M., Wang L.&V. Universal backprojection algorithm for photoacoustic computed tomography // *Phys. Rev. E.* 2005. V. 71. P. 1–7.
12. Andreev V.G., Karabutov A.A., Solomatin S.V., Savateeva E.V., Aleynikov V.L., Zhylina Y.V., Fleming R.D., Oraevsky A.A. Opto-acoustic tomography of breast cancer with arc-array transducer // *Proc. SPIE*. 2003. V. 3916. P. 36.
13. He Y., Tang Zh., Chen Zh., Wan W., Li J. A novel photoacoustic tomography based on a time-resolved technique and an acoustic lens imaging system // *Phys. Med. Biol.* 2006. V. 51. P. 2671.
14. Andreev V.G., Popov D.A., Sushko D.V., Karabutov A.A., Oraevsky A.A. Inverse Radon Transformation for Optoacoustic Imaging // *Proc. SPIE*. 2002. V. 4618. P. 137.