

МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ОЦИФРОВАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ АЛГОРИТМОМ БЫСТРОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКАНИРОВАНИЯ В СХЕМЕ С РАЗДЕЛЬНЫМИ ПЕРЕДАЮЩИМИ И ПРИЕМНЫМИ АПЕРТУРАМИ ТРАНСДЮСЕРА

Бененсон З.М., Елизаров А.Б.

Научный Совет по комплексной проблеме «Кибернетика» РАН,
ГСП-1, Москва, ул. Вавилова 40, к. 232, тел. 135-40-71, e-mail: acsnd@mail.ru

Реферат: В работе рассматривается схема быстрого ультразвукового сканирования в медицинской диагностике, основанная на разделении передающих и приемных субапертур линейной фазированной решетки. Описывается универсальная методика физического эксперимента, позволяющая осуществить на компьютере сопоставление различных методов сканирования и обработки сигналов. Показывается, что предлагаемые схемы и алгоритм повышают поперечное разрешение в 2 раза. Работа выполнена частично по проектам РФФИ № 99-01-01171 и CRDF № RP2-2109.

1. Введение

В работе [1] была предложена схема быстрого сканирования двумерного и трехмерного пространства, облучаемого ультразвуковым импульсным сигналом. В ней основным элементом является линейная ультразвуковая фазированная решетка, в которой сформированы 2 передающие субапертуры небольшого размера, излучающие по очереди, а прием осуществляется всеми не задействованными в данный момент на передачу элементами. Применяя эту схему, за 2 периода излучения и приема сигналов можно при соответствующей обработке сигналов построить изображение сегмента двумерного пространства с поперечным разрешением, улучшенным в 2 раза по сравнению с традиционным методом секторного сканирования с помощью фазированной решетки такого же размера. Кроме того, разделение передающего и приемного каналов разрешает излучить сплошные модулированные сигналы большой длительности с применением методов компрессии при обработке принятых сигналов.

Увеличение средней мощности излучения при ограничении его амплитуды позволяет увеличить полосу частот акустического сигнала и дает дополнительные улучшения поперечного и аксиального разрешения [2].

В настоящей работе приведены результаты обработки оцифрованных физических сигналов, полученных на экспериментальном стенде. Примененная методика физического эксперимента позволила при обработке реальных сигналов на компьютере смоделировать схему работы [1] для построения двумерного изображения и сравнить с данными традиционной схемы ультразвукового секторного сканирования.

2. Алгоритмы обработки сигналов

На рис. 1 изображена линейная фазированная решетка длиной L и шагом между элементами h . $2N_a + 1$ крайних левых и правых элементов решетки ($N_a \ll L/h$) образуют 2 передающие субапертуры, каждая размером $2a = (2N_a + 1)h$. Эти субапертуры имеют гауссову функцию аподизации $\exp(-\xi^2/a^2)$, и времена задержек излучаемых сигналов на их элементах выбраны так, чтобы диаграмма направленности субапертуры соответствовала диаграмме направленности цилиндрической вогнутой линзы с отрицательным фокусным расстоянием $-F$.

Пространственное преобразование Фурье диаграммы направленности субапертуры имеет вид [3]

$$\Phi(\Omega) = \exp(-\alpha\Omega^2) \exp(i\zeta\Omega^2), \quad (1)$$

где Ω – пространственная частота, ω – временная частота,

$$\alpha = \frac{a^2}{4 + (\omega a^2 / cF)^2}, \quad \zeta = \frac{c}{2\omega} \left(-\frac{F}{1 + 4(cF/\omega a^2)^2} - z \right), \quad z - \text{дальность.}$$

Субапертуры последовательно излучают импульсы с периодом повторения $T_0 = 2z_{\max}/c$ (z_{\max} – максимальная дальность). Излученный сигнал имеет вид:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-i\omega t) F(\omega) d\omega, \quad (2)$$

где $F(\omega)$ – преобразование Фурье функции модуляции сложного сигнала [2].

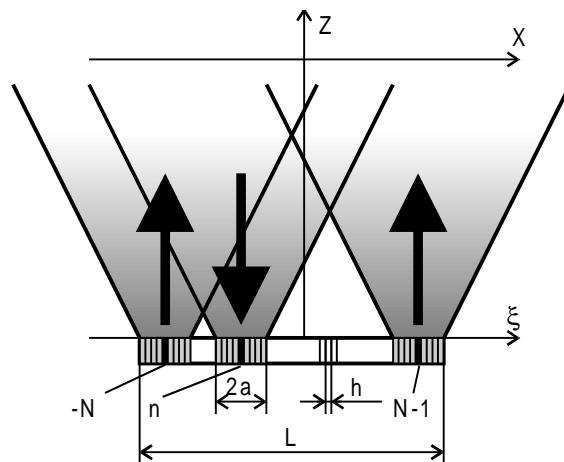


Рис. 1. Схема сканирования.

Сигнал, принятый приемным элементом решетки с координатой $\hat{\xi}_v + \xi_n$, обозначим через $S^{(1)}(\hat{\xi}_v + \xi_n, t)$ и $S^{(2)}(\hat{\xi}_v + \xi_n, t)$ соответственно для сигналов 1-ой и 2-ой передающих субапертур (t – момент времени приема). В алгоритме все приемные элементы группируются в $2N$ приемных перекрывающихся субапертур ($2N = (L - 2a)/h$). Размеры субапертур $2a = (2N_a + 1)h$, $\xi_n = nh$ – координата центра n -ой субапертуры, $n = -N, -N + 1, \dots, N - 1$, $\hat{\xi}_v = vh$, $v = -N_a, -N_a + 1, \dots, N_a$ – местная координата v -го элемента решетки на n -ой субапертуре. В приеме участвуют все элементы решетки кроме тех, которые формируют в данный момент передающую субапертуру.

На интервале времени (t_0, t_{\max}) осуществляется преобразование Фурье по времени принятых сигналов. Эти Фурье-преобразованные сигналы обозначим $S^{(1)}(\hat{\xi}_v + \xi_n, \omega)$ и $S^{(2)}(\hat{\xi}_v + \xi_n, \omega)$. Затем вычисляются Фурье-преобразованные сигналы приемных субапертур $S_n^{(1)}(\omega)$ и $S_n^{(2)}(\omega)$. Для всех приемных субапертур выбирается гауссова функция аподизации $\exp(-\xi^2/a^2)$ и фокусировка вогнутой линзой с фокусным расстоянием $-F$, причем это осуществляется алгоритмически над сигналами $S^{(1)}(\bullet)$ и $S^{(2)}(\bullet)$ по формуле:

$$S_n^{(1,2)}(\omega) = \sum_v S^{(1,2)}(\hat{\xi}_v + \xi_n, \omega) \exp\left(-\frac{\hat{\xi}_v^2}{a^2}\right) \exp\left(i \frac{\hat{\xi}_v^2 \omega}{2Fc}\right). \quad (3)$$

Поскольку прием осуществляется только элементами, не участвующими в передаче, для элементов с «запрещенными» значениями $\hat{\xi}_v + \xi_n$ значения $S^{(1,2)}(\hat{\xi}_v + \xi_n, \omega)$ принимаются равными 0.

Далее производится разбиение всего временного интервала (t_0, t_{\max}) на M смежных интервалов (t_l, t_{l+1}) . Для каждой дальности $\bar{z}_l = \frac{c}{2} \left(\frac{t_l + t_{l+1}}{2} \right)$, соответствующей середине временного интервала (t_l, t_{l+1}) , производится построение сфокусированного сигнала. Сначала для выбранной дальности строится результирующий принятый сигнал:

$$S_l(\omega, x_{n-N}) = S_n^{(1)}(\omega) \exp\left(\frac{(\delta_n^{(1)})^2}{8(\alpha - i\zeta_l)}\right), \quad S_l(\omega, x_{n+N}) = S_n^{(2)}(\omega) \exp\left(\frac{(\delta_n^{(2)})^2}{8(\alpha - i\zeta_l)}\right), \quad (4)$$

где $n = -N, -N + 1, \dots, N - 1$, $\delta_n^{(1,2)} = \mp \frac{L-a}{2} - \xi_n$, $\zeta_l = \zeta(z = \bar{z}_l)$, $x_m = \frac{mh}{2}$.

Затем производится преобразование Фурье сигнала $S_l(\omega, x_m)$ по координате x_m и получение массива спектральных коэффициентов $\Phi_l(\omega, \Omega)$. Полученный спектр домножается на фокусирующий множитель:

$$\tilde{\Phi}_l(\omega, \Omega) = \Phi_l(\omega, \Omega) \exp(-i\hat{\zeta}_l \Omega^2), \quad (5)$$

где $\hat{\zeta}_l = \frac{1}{2} \zeta_l \left(1 - \frac{64\zeta_l^2}{L^4} \right)$, и производится обратное преобразование Фурье по Ω и ω . В результате получается сфокусированный на интервале (t_l, t_{l+1}) пространственно-временной сигнал $\tilde{P}_l(x, t)$, или, переходя к дальности z , $P_l(x, z) = \tilde{P}_l(x, 2z/c)$.

Итоговый сфокусированный сигнал строится в соответствии с формулой:

$$P(x, z) = \sum_l e_l(z) P_l(x, z), \quad (6)$$

где $e_l(x, z) = \begin{cases} 1, & 2z/c \in [t_l, t_{l+1}) \\ 0, & 2z/c \notin [t_l, t_{l+1}) \end{cases}$.

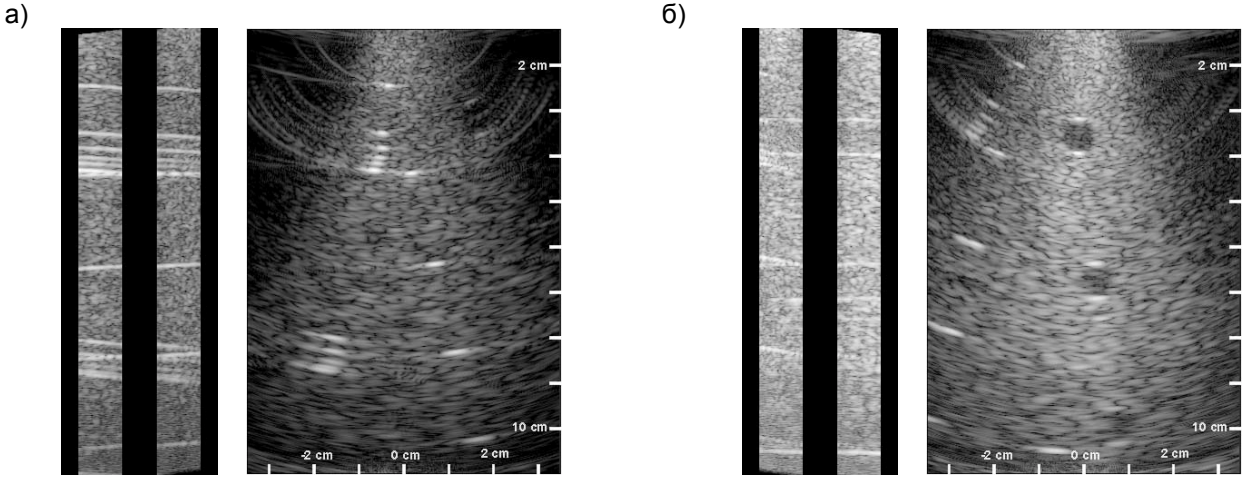


Рис. 2. Изображения фрагментов фантома. а) Угол поворота $\varphi = -15^\circ$. б) $\varphi = 15^\circ$. Слева даны изображения сигналов до обработки, справа – после обработки. Динамический диапазон – 60 дБ.

3. Методика физического эксперимента и результаты обработки сигналов

В физическом эксперименте была применена следующая схема сканирования. Излучение и прием осуществлялись фазированной решеткой, состоящей из $2N_{Pcu} = 48$ элементов с шагом между элементами $h = 0,27$ мм. Каждым элементом по очереди излучался импульс на несущей частоте 3 МГц с шириной полосы 2 МГц. При каждом акте излучения принятые сигналы с каждого элемента решетки отдельно оцифровывались и записывались в массив. Таким образом, исходные данные представляют собой трехмерный массив целых чисел в диапазоне от -128 до 127. Две координаты массива соответствуют номерам передающего и принимающего элемента, а третья координата соответствует времени прихода сигнала.

Для проверки рассматриваемого метода построения изображений было необходимо синтезировать из имеющихся данных сигналы, соответствующие облучению среды субапертурами размера $2a$ с отрицательным фокусом F , расположенными в точках $\xi^{(1),T} = \xi_{-n_{min}}^T = -n_{min}h$ и $\xi^{(2),T} = \xi_{n_{max}}^R = n_{max}h$, и приему такими же субапертурами, расположенными во всех точках $\xi_n^R = nh$, $n = -n_{min}, \dots, n_{max}$. Моделировался также поворот решетки относительно исходного положения на небольшой угол φ (в пределах $\pm 30^\circ$).

Для вычисления принятого сигнала использовалась формула:

$$S(\xi_i^T, \xi_j^R, t_n) = \sum_{\hat{i}=-N_a}^{N_a} \sum_{\hat{j}=-N_a}^{N_a} M(i + \hat{i}, j + \hat{j}, t_n - \delta(i, \hat{i}, j, \hat{j})), \quad (7)$$

где $S(\xi_i^T, \xi_j^R, t_n)$ – сигнал от субапертуры с центром $\xi_i^T = ih$, принятый субапертурой с центром $\xi_j^R = jh$ в момент времени t_n ;

\hat{i}, \hat{j} – номера элементов субапертур, отсчитываемые от центра субапертуры;

h – шаг решетки;

$2N_a + 1$ – количество элементов решетки в субапертурах;

$\delta(i, \hat{i}, j, \hat{j})$ – время задержек на передающей и приемной субапертурах;

$M(i, j, t)$ – сигнал от i -го элемента, принятый j -м элементом в момент времени t .

Индекс i принимал значения $-N$ и $N-1$. Индекс j пробегал все целые значения от $-N + 2N_a + 1$ до $N-1$ и от $-N$ до $N-1-2N_a-1$ для $i = -N$ и $i = N-1$ соответственно, $N = N_{Pcu} - N_a$.

Для вычисления задержек применялось выражение, учитывающее поворот решетки:

$$\delta(i, \hat{i}, j, \hat{j}) = -\frac{(i + \hat{i})h + (j + \hat{j})h}{c} \sin \varphi + \frac{(\hat{i}h)^2}{2c(F - ih \sin \varphi)} + \frac{(\hat{j}h)^2}{2c(F - jh \sin \varphi)}. \quad (8)$$

Поскольку значения исходного массива принятых сигналов заданы в дискретные моменты времени, значения $M(i, j, t)$ вычислялись посредством интерполяции по 7 ближайшим к требуемому моменту отсчетам времени:

$$M(i, j, t) = \sum_{\tilde{n}=-N_{int}}^{N_{int}} \alpha\left(\left\{\frac{t}{\Delta t}\right\}, \tilde{n}\right) M\left[i, j, \left[\frac{t}{\Delta t}\right] + \tilde{n}\right]$$

(9)

где

$M[i, j, k]$ – исходный массив;

Δt – шаг дискретизации по времени;

$\alpha(\delta, n)$ – коэффициенты интерполяционного многочлена;

$2N_{int} + 1 = 7$ – количество отсчетов интерполяции.

Затем синтезированный сигнал подвергся обработке алгоритмом п. 2, и строилось результирующее изображение среды. Результаты обработки двух фрагментов фантома приведены на рис. 2.

Те же исходные данные обрабатывались традиционным алгоритмом динамической фокусировки на прием путем вычисления соответствующих задержек, зависящих от времени прихода сигналов и координат элементов решеток [3]. Результаты этой обработки для всего фантома изображены на рис. 3.

4. Заключение

Сравнение результатов подтверждает улучшение поперечного разрешения в 2 раза в предлагаемой схеме сканирования и алгоритме обработки сигналов по сравнению с традиционным методом секторного сканирования и динамической фокусировки.

Литература

1. З. М. Бененсон, А. Б. Елизаров, Н. С. Кульберг. Новый алгоритм обработки сигналов цифровой двумерной ультразвуковой фазированной решетки, повышающий угловое разрешение. Сборник трудов 2-ой Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», том III, стр. 589-598, МЦНТИ, М., 1999
2. З. М. Бененсон, А. Б. Елизаров. Разработка и исследование алгоритмов компрессии дискретных широкополосных модулированных сигналов для целей медицинской диагностики. В настоящем сборнике.
3. Г. Кайно. Акустические волны. М., Мир, 1990.

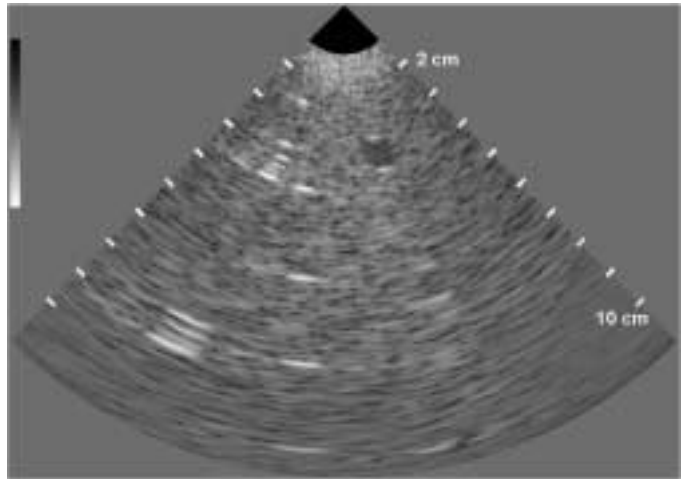


Рис. 3. Изображение фантома, полученное традиционным методом динамической фокусировки на прием. Динамический диапазон – 60 дБ.

PHYSICAL EXPERIMENT TECHNIQUE AND PROCESSING RESULTS OF DIGITIZED PHYSICAL SIGNALS BY FAST ULTRASOUND SCANNING ALGORITHM WITH SEPARATE TRANSMITTING AND RECEIVING TRANSDUCER APERTURES

Benenson Z.M., Elizarov A.B.

Scientific Council on Cybernetics, Russian Academy of Sciences,

Vavilova 40, k. 232, Moscow, tel. 135-40-71, e-mail: acsnd@mail.ru

Abstract: This paper considers a scheme for fast ultrasound scanning in medicine, which is based on separating transmitting and receiving apertures of a linear phased array. This paper describes a universal technique for physical experiment allowing to compare by means of computer different techniques of scanning and signal processing. The proposed technique is shown to improve lateral resolution two times as compared to traditional dynamic focusing.

Paper [1] proposed a scheme of fast 2-D and 3-D ultrasound scanning. For 2-D case, transducer consists of a linear phased array. Its leftmost and rightmost elements form 2 transmitting subapertures, which radiate in turns ultrasound pulse signals. Reflected signals are received by all transducer elements, that are not used at the moment to transmit the pulse. This scheme allows constructing images of 2-D sections of medium for 2 transmitting-receiving periods, with lateral resolution being 2 times better than that of traditional dynamic focusing. Moreover, separated transmitting and receiving channels make it possible to use continuous time signals in conjunction with signal compression algorithms, which in turn leads to further resolution advances [2].

Current paper presents results of processing digitized physical signals which allowed to simulate (by means of computer) processing scheme [1] with separate transmitting and receiving apertures and traditional dynamic focusing.

Scanning scheme used here is shown in Fig. 1. Linear phased array of length L consists of elements with elements step h . Leftmost and rightmost elements form at different time intervals 2 transmitting subapertures of size $2a$ ($2a \ll L$) with Gauss apodization function $\exp(-\hat{\xi}^2/a^2)$. Signal delays for each element of the subapertures correspond to delays of a cylindrical lens with a negative focal length $-F$. Reflected signals are received by all elements of the array except those used for transmitting in each transmitting-receiving series. Each scan consists of 2 series, with the left subaperture transmitting in the first series, and the right one in the second series. Received signals $S^{(1)}(\xi_i, t)$ and

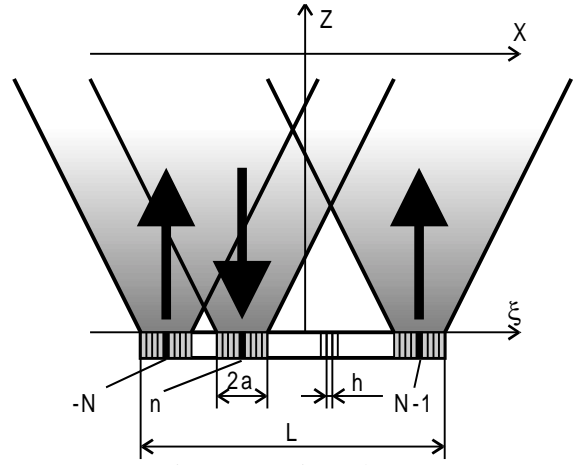


Fig. 1. Scanning scheme.

$S^{(2)}(\xi_i, t)$ are digitized and processed by a computer. In the processing algorithm, all receiving elements are grouped into $2N = (L - 2a)/h$ receiving overlapped subapertures of size $2a$ (the number of elements in subaperture is $2N_a + 1 = 2a/h$). Each subaperture has Gauss apodization function and negative focus $-F$. All received signals $S^{(\mu)}(\xi_i, t)$ are Fourier-transformed to $S^{(\mu)}(\xi_i, \omega)$. Receiving subapertures signals are computed by the formula:

$$S_n^{(1,2)}(\omega) = \sum_{v=-N_a}^{N_a} S^{(1,2)}(\hat{\xi}_v + \xi_n, \omega) \exp\left(-\frac{\hat{\xi}_v^2}{a^2}\right) \exp\left(i \frac{\hat{\xi}_v^2 \omega}{2Fc}\right), \quad (1)$$

where $\hat{\xi}_v = v h$, $\xi_n = n h$, $n = -N, \dots, N - 1$. «Missing» signals $S^{(\mu)}(\xi_i, \omega)$ of transmitting elements in μ -th series are substituted with 0. Then total time interval is divided into M adjacent intervals (t_l, t_{l+1}) , and focused signal is calculated for each interval individually. First, signals of two series are combined together in one received signal:

$$S_l(\omega, x_{n-N}) = S_n^{(1)}(\omega) \exp\left(\frac{(\delta_n^{(1)})^2}{8(\alpha - i\zeta_l)}\right), \quad S_l(\omega, x_{n+N}) = S_n^{(2)}(\omega) \exp\left(\frac{(\delta_n^{(2)})^2}{8(\alpha - i\zeta_l)}\right), \quad (2)$$

where $n = -N, -N + 1, \dots, N - 1$, $\delta_n^{(1,2)} = \mp (L - a)/2 - \xi_n$, $x_m = m h/2$,

$\alpha = \frac{a^2}{4 + (\omega a^2/cF)^2}$, $\zeta_l = \frac{c}{2\omega} \left(-\frac{F}{1 + 4(cF/\omega a^2)^2} - \frac{c(t_l + t_{l+1})}{4} \right)$. This signal is Fourier-transformed to

$\Phi_l(\omega, \Omega)$ and multiplied by a focusing factor:

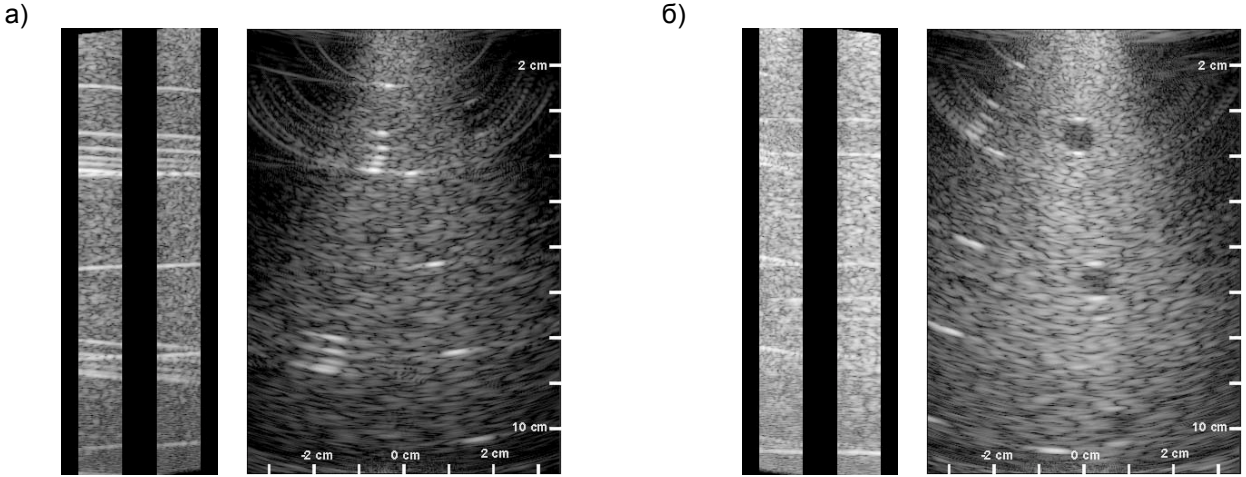


Fig. 2. Images of phantom. a) $\varphi = -15^\circ$. b). On the left – images of signals before focusing, on the right – images of focused signals. Dynamic range – 60 dB.

$$\tilde{\Phi}_l(\omega, \Omega) = \Phi_l(\omega, \Omega) \exp(-i\hat{\zeta}_l \Omega^2), \quad \hat{\zeta}_l = 1/2 \zeta_l (1 - 64\zeta_l^2 / L^4). \quad (3)$$

Reverse FFT gives focused signal for each interval.

Physical data were obtained the following way. Linear phased array consisted of $2N_{Array} = 48$ elements with step $h = 0.27$ mm. Each element separately transmitted a pulse at carrier frequency 3 MHz with bandwidth of about 2 MHz. Signals received by each element were digitized and stored as an array of integer numbers. To apply the described algorithm of processing, we synthesized the signals corresponding to the scheme mentioned above. Scanning at some small angle φ was also modeled.

Received signal was computed by the formula:

$$S(\xi_i^T, \xi_j^R, t_n) = \sum_{\hat{i}=-N_a}^{N_a} \sum_{\hat{j}=-N_a}^{N_a} M(i + \hat{i}, j + \hat{j}, t_n - \delta(i, \hat{i}) - \delta(j, \hat{j})), \quad (4)$$

where $S(\xi_i^T, \xi_j^R, t_n)$ – signal of transmitting subaperture with center $\xi_i^T = ih$, received by subaperture with center $\xi_j^R = jh$ at time t_n ; \hat{i}, \hat{j} – subapertures elements numbers, counted from the center of subapertures; h – array elements step; $2N_a + 1$ – subaperture elements number; $\delta(i, \hat{i}, j, \hat{j})$ – time delays for subaperture elements; $M(i, j, t)$ – signal of i -th element, received by j -th element at time t ; $i = -N, N - 1$; $N = N_{Array} - N_a$; $j = \{-N + 2N_a + 1, \dots, N - 1$ for $i = -N$; $-N, \dots, N - 1 - 2N_a - 1$ for $i = N - 1\}$.

Delays were calculated by the formula:

$$\delta(i, \hat{i}) = -\frac{(i + \hat{i})h}{c} \sin \varphi + \frac{(\hat{i}h)^2}{2c(F - ih \sin \varphi)}. \quad (5)$$

The source signal was digitized at some discrete time moments, so $M(i, j, t)$ were calculated by means of interpolation:

$$M(i, j, t) = \sum_{\tilde{n}=-N_{Int}}^{N_{Int}} \alpha\left(\left\{\frac{t}{\Delta t}\right\}, \tilde{n}\right) M\left[i, j, \left[\frac{t}{\Delta t}\right] + \tilde{n}\right], \quad (6)$$

where $M[i, j, k]$ – source signals array; Δt – digitizing time step; $\alpha(\delta, n)$ – interpolation polynom; $2N_{Int} + 1 = 7$ – interpolation steps count. Then the synthesized signal was processed by the described above algorithm. Processing results for two fragments of a phantom are represented in Fig.2 ($2N_a + 1 = 13$, $-F = -0.35$ cm).

The same source data were processed by traditional dynamic focusing algorithm (by summing received signals with appropriate delays depending on time and receiving element number) [3]. The resulting image of the phantom is shown in Fig. 3.

Comparison of the results proves that lateral resolution of the suggested method is 2 times better than that of traditional dynamic focusing algorithm.

Acknowledgements

This work was supported by grant N 99-01-01171 of Russian Foundation of Basic Researches (RFBR) and grant N RP2-2109 of Civilian Research and Development Foundation (CRDF).

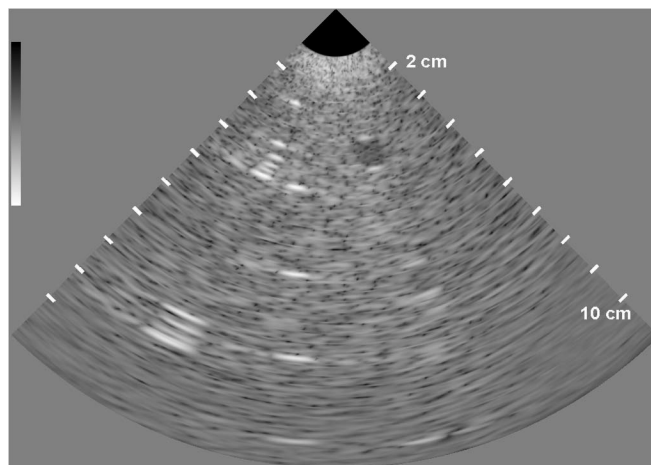


Fig. 3. Image of phantom obtained by dynamic focusing algorithm. Dynamic range – 60 dB.

References

1. Z. M. Benenson, A. B. Elizarov, N. S. Kulberg. A New Signal Processing Algorithm for 2-D Ultrasound Phased Array with High Angle Resolution. Proceedings of the 2-nd International conference The Digital Signal Processing and Its Applications, vol. II, Moscow, 1999.
2. Z. M. Benenson, A. B. Elizarov. Elaboration and Research of Compression Algorithms for Wideband Modulated Ultrasound Signals in Medicine. In the current Proceedings.
3. G. S. Kino. Acoustic Waves. Prentice-Hall Inc., 1987.