

АЛГОРИТМ БЫСТРОГО ТРЕХМЕРНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКАНИРОВАНИЯ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Бененсон З.М., Кульберг Н.С., Шестопапов В.С.

Научный Совет по комплексной проблеме «Кибернетика» РАН
117967 г. Москва ул. Вавилова д. 40 ком. 232

Возможность трехмерного сканирования в большинстве современных ультразвуковых медицинских диагностических систем основана на механическом перемещении линейного, конвексного или аннулярного датчиков. Принципиальным недостатком подобных технологий является, во-первых, малая разрешающая способность по углу места, а во-вторых — низкая скорость обзора трехмерного пространства (время получения одного трехмерного кадра составляет 2—4 секунды).

В качестве способа преодоления указанных недостатков можно предложить использование двумерных фазированных решеток с очень большим числом элементов (5 000—15 000). Создание таких решеток в ближайшем будущем проблематично, не говоря уже об огромной стоимости систем, основанных на их применении.

В США в последнее время ведется создание системы на основе двумерной решетки, состоящей из 2000 элементов и сравнительно невысокой рабочей частотой (1,5—2 МГц). Однако получаемое изображение недостаточно качественно, а стоимость системы очень высока.

В настоящем докладе предлагается электронный метод трехмерного сканирования, основанный на применении датчика, состоящего из двух одномерных фазированных решеток. Благодаря оригинальному алгоритму цифровой обработки сигналов этот метод позволяет получать динамическую фокусировку как при приеме, так и при излучении сигналов. Отметим, что такой подход также перспективен и в случае применения двумерных фазированных решеток.

Данная работа выполнена по гранту РФФИ № 02-01-01087.

Схема датчика и принцип сканирования изображены на рис. 1. Датчик сканирует в пирамидальных координатах (r, φ, θ) . Датчик состоит из передающей решетки TX и приемной решетки RX. Передающий датчик излучает короткие импульсные сигналы и посредством введения соответствующих задержек на отдельных элементах осуществляет сканирование по координате θ . Датчик фокусируется на некоторое переменное фокусное расстояние $F/\cos \theta$.

Оба датчика снабжаются вогнутой цилиндрической линзой, благодаря чему передающий датчик обеспечивает засветку в широком секторе по углу φ , а приемный — принимает одновременно в широком секторе по углу θ .

Приемный датчик принимает сигнал отдельно каждым своим элементом. Сигналы, принятые элементами приемного датчика, запоминаются, после чего суммируются с определенными сдвигами, обеспечивающими фокусировку в нужных направлениях.

Сигналы, принятые элементами приемной решетки, есть функции $S_m(\varphi, \theta, t) = \sum_n S_m^{\square}(\varphi, t) S_n^{\square}(\theta, t)$,

где время $t = 2r/c$, r — расстояние до объекта, m — номер элемента решетки RX, n — номер элемента решетки TX. Путем цифровой обработки функции S на основе применения многомерного преобразования Фурье по координатам φ , θ и t осуществляется динамическая фокусировка (то есть фокусировка на всех расстояниях r) и синтез трехмерного изображения.

Алгоритм цифровой обработки сигналов

Принятые сигналы S_m подвергаются преобразованию Фурье по времени t . В результате получается функция $\mathcal{F}_m(\varphi, \theta, k)$, где $k = \omega/c$ — волновое число.

Рассмотрим сначала алгоритм применительно к функции $\sum_n \mathcal{F}_n(\theta, k)$ где \mathcal{F}_n — преобразование Фурье по t от S_n . Апертурная функция решетки имеет вид:

$$f_a(n, \theta, k) = \exp\left(-\frac{\eta_n^2}{a^2}\right) \exp\left(-\frac{ik\eta_n^2}{2F/\cos\theta}\right) \exp(ik\eta_n \sin\theta) \quad (1)$$

где $2a$ — размер апертуры. Преобразование Фурье принятого сигнала по координатам y и t

$$\mathcal{F}_T(\Omega_y, k, z) = K_1 \mathcal{F}_a(\mathcal{F}_y, k, z) \mathcal{F}_f(\Omega_y, k, z) \quad (2)$$

где K_1 — масштабный множитель, z — декартова координата по глубине, $\mathfrak{F}_a(\bullet)$ — преобразование Фурье апертурной функции, $\mathfrak{F}_f(\bullet) = \sqrt{k^2 - (\mathfrak{G}_y + k \sin \theta)^2}$ — функция свободного пространства [1]. Частота $\mathfrak{G}_y = \Omega_y - k \sin \theta$, где Ω_y — частота при осуществлении преобразования Фурье. Функцию S_f представляем в приближенном виде:

$$\mathfrak{F}_f = \exp(ikz \cos \varphi) \exp\left(-\frac{ikz \mathfrak{G}_y^2}{2k \cos \varphi} - ikz \operatorname{tg} \theta \frac{\mathfrak{G}_y}{k}\right) \quad (3)$$

Если выполнить обратное преобразование Фурье по Ω_y , от (2) с учетом приближения (3), получаем приближенное выражение для функции $S_T = \sum_n \mathfrak{F}_n(\theta, k)$ — преобразование Фурье по t от принятого сигнала, пришедшего из точки (y, z) :

$$S_T(\theta, k) = K_1 K_2 \exp(i k \cos \theta) \exp(i k \sin \theta) \exp\left(\frac{\frac{y - \theta}{z}}{4(\mathfrak{E} + i \zeta)}\right) \quad (3a)$$

где K_2 — масштабный множитель, $\mathfrak{k} = kz$, $\mathfrak{E} = \frac{\alpha_0}{z^2 \cos \theta}$, $\alpha_0 = \frac{F}{k^2 a^2}$, $\mathfrak{E} = \frac{\zeta_0}{z^2}$, $\zeta_0 = \frac{z - F}{2k}$.

Теория и алгоритм динамической фокусировки строится на основании (3a) аналогично идее, примененной в [2] для сплошной вращающейся апертуры.

Применяем к (3a) преобразование Фурье по θ , получаем:

$$\mathfrak{S}_T^{\square}(\Omega_\theta, k, z) = K_1 K_2 K_3 \exp\left(\frac{iy}{z} \Omega_\theta\right) \exp\left(i \left(\frac{\mathfrak{E}}{r}\right)^2 \frac{\mathfrak{k}}{2}\right) \exp(i \mathfrak{k}) \exp(i(\alpha_r + i \zeta_r) \Omega_\theta^2), \quad (4)$$

где $\alpha_r = \frac{\mathfrak{E}}{(1 - 2\mathfrak{k}\mathfrak{E})^2}$, $\zeta_r = \frac{\mathfrak{E} - 2k\zeta^2 - 2\mathfrak{k}\mathfrak{E}^2}{(1 - 2\mathfrak{k}\mathfrak{E})^2 + 4\mathfrak{k}\mathfrak{E}^2}$, K_3 — масштабный множитель

Формулы для α_r и ζ_r имеют приближенный вид:

$$\alpha_r \approx \frac{1}{k^2 a^2 \cos \theta}, \quad \zeta_r \approx \frac{z - F}{2kzF} \quad (4a)$$

Далее умножаем (4) на $\exp(i \zeta_r \Omega_\theta^2)$ и находим обратное преобразование Фурье. В результате получаем:

$$\mathfrak{S}_T^{\square}(\theta, k, z, y) = K_1 K_2 K_3 K_4 \exp(ikr) \exp\left(-\frac{\left(\frac{y - \theta}{z}\right)^2}{4\alpha_r}\right), \quad \text{где } K_4 \text{ — масштабный множитель} \quad (5)$$

Из (5) следует, что угловое разрешение будет равно $2\sqrt{\alpha_r}$ при всех z .

В общем алгоритме преобразование Фурье по φ выполняется также применительно к $\sum_m \mathfrak{F}_m$, а затем осуществляется умножение на $\exp(i \zeta_r \Omega_\varphi^2)$ и обратное преобразование Фурье по Ω_φ (Ω_φ — угловая частота по углу φ). На заключительном этапе осуществляется обратное преобразование Фурье по $k = \frac{\omega}{c}$ от

полученной функции $\sum_j S_T^{\square}(\varphi, \theta, r, z_j, y_j, x_j)$, где (z_j, y_j, x_j) — декартовы координаты всех отражающих точек среды.

В результате получается функция изображения $I\left(\varphi, \theta, t = \frac{2r}{c}\right)$ с угловым разрешением $2\sqrt{\alpha_r}$ и разрешением по дальности, определяемым длительностью излучаемого импульса.

Результаты численного эксперимента

С целью проверки работы метода было проведено математическое моделирование. Моделировались фазированные датчики размером $2 \times 0,5$ см, состоящие из 100 элементов размером $0,02 \times 0,5$ см каждый. При несущей частоте 3 МГц размер одного элемента составляет, таким образом, половину длины волны.

В объеме пространства $10 \times 10 \times 10$ см были размещены 50 отражателей, расположенных на различных дальностях от апертуры. На передающей апертуре с помощью задержек излучения осуществлялась фокусировка на фиксированном расстоянии $F=8$ см. После облучения всего пространства осуществлялась адаптивная динамическая фокусировка.

Изображения, полученные в результате моделирования, представлены на рис. 2 и 3. По результатам моделирования среднее время обзора сектора $60^\circ \times 60^\circ \times 10$ см составило около 1/100 сек.

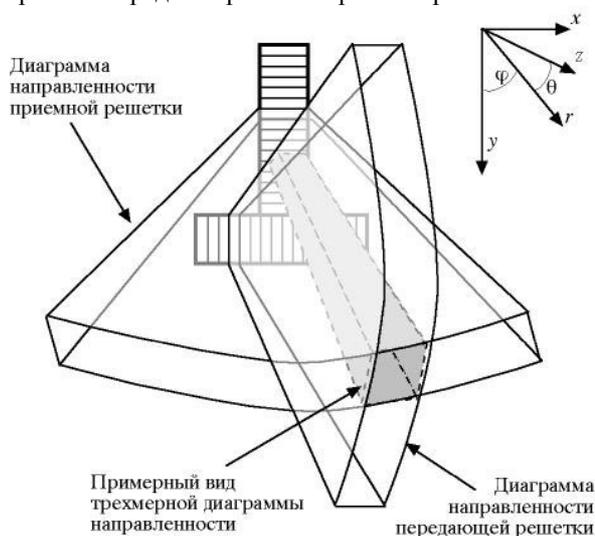


Рис. 1. Схема трехмерного сканирования.

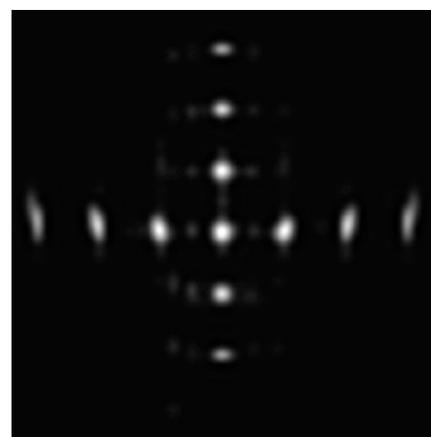


Рис. 2. Сечение трехмерного изображения плоскостью XY ($z=6$ см).

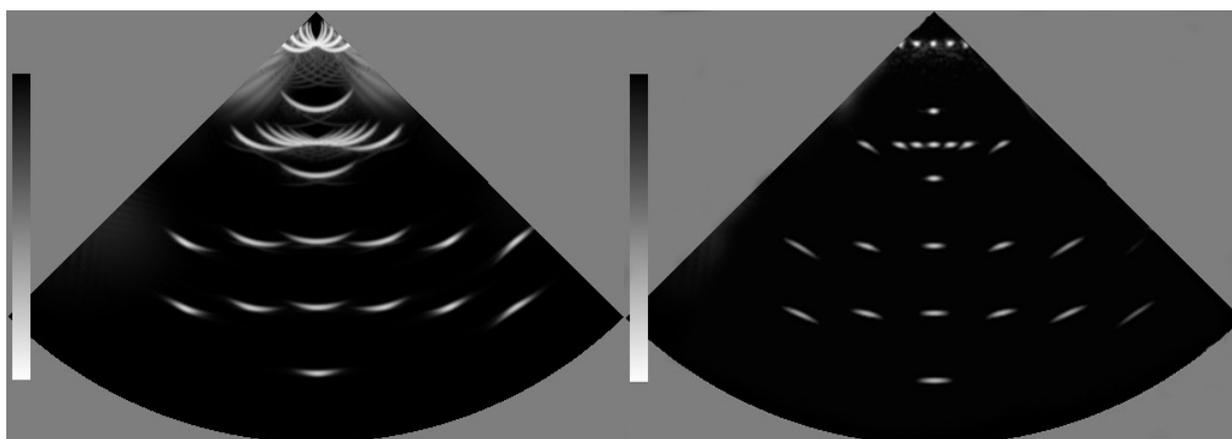


Рис. 3. Адаптивная динамическая фокусировка на передачу. Слева — исходное изображение, полученное в результате сканирования (сечение плоскостью XZ). Справа — динамически сфокусированное изображение.

Заключение

Полученные результаты позволяют создать приборы трехмерной ультразвуковой медицинской диагностики с высоким разрешением, малым временем обзора пространства и сравнительно небольшой стоимостью, сопоставимой со стоимостью приборов двумерного изображения среднего класса.

Литература

1. Approach to 3D Ultrasound High Resolution Imaging for Mechanically Moving Large-Aperture Transducer Based upon Fourier Transform. Z. M. Benenson, A. B. Elizarov, T. V. Yakovleva, and W. D. O'Brien, Jr. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 49, no. 12, 2002 (December)
2. Dynamical Focusing of the Both Transmitted and Received Beams via Digital Processing of Pulsed Acoustical Signals on a Single-Element Scanning Aperture. Z. M. Benenson, N. S. Kulberg. Acoustical Imaging, vol. 22, P. Tortoli and L. Massotti ed., Plenum Press, NY, 1996.

