

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ СКОРОСТИ КРОВОТОКА ДЛЯ ВСЕЙ ОБЛАСТИ СКАНИРОВАНИЯ В МЕТОДЕ «БЕЗДИФРАКЦИОННОГО» ЛУЧА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ (ЦВЕТНОЕ ДОПЛЕРОВСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ)

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

Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика» РАН
Москва ГСП-1, ул. Вавилова, д. 40, к. 232, e-mail: benenson@mtu-net.ru

1. Введение

В системах современной двумерной ультразвуковой медицинской диагностики широко применяется определение величины аксиальной скорости кровотока во всей области сканирования (цветное доплеровское картирование). Для построения изображения используется как правило пьезоэлектрическая фазированная решетка и метод динамической фокусировки на прием [1]. Для измерения скорости на каждой линии сканирования двумерного изображения излучается 5—15 импульсов, по которым осуществляется усреднение измеренной величины скорости.

Метод «бездифракционного луча» основан на модифицированном для ближней зоны методе синтезированной приемопередающей апертуры. При этом достигается существенное повышение разрешения, особенно в ближней зоне, по сравнению с методом динамической фокусировки на прием. Однако при данном методе традиционный алгоритм измерения скорости кровотока оказывается неприменимым.

В докладе предлагается новый метод цветного доплеровского картирования, основанный на формировании из элементов фазированной решетки двух независимых приемных субапертур для каждого излученного импульса. Работа выполнена по гранту РФФИ № 02-01-01037

2. Теория метода

На рисунке 1 изображена схема сканирования. Из некоторого числа элементов линейной решетки с шагом h формируется передающая апертура размером $2a = mh$ с некоторым фокусным расстоянием F_0 и гауссовой аподизацией. Также из $m-1$ элементов формируются две приемные субапертуры с некоторым фокусным расстоянием $F_1 = F_0 \cdot (m-1)/m$. Центры приемных субапертур отстоят от центра передающей на $\pm h/2$.

Передающая апертура излучает импульсный сигнал, спектр которого равен $\Phi(\omega) = \exp(-\tau_l(\omega - \omega_0)^2/4)$. Здесь ω — временная частота, ω_0 — несущая частота сигнала, τ_l — длительность импульса, по величине примерно равная $1/\omega_0$. Прием сигналов осуществляется в течение времени $T_0 = 2z_{\max}/c$, где z_{\max} — максимальная дальность, c — скорость звука.

После излучения каждого импульса через время T_0 путем соответствующей коммутации элементов решетки выбирается новая передающая субапертура, смещенная на h относительно прежней.

Можно показать, что Фурье-преобразование по координате x от произведения передающей и соответствующих приемных апертур для дальности z_n , имеет вид:

$$\tilde{U}_r(\Omega, \omega, z_n) = \tilde{U}_l(\Omega, \omega, z_n) = K_1 \exp\left(-\frac{1}{2}(\alpha + i\zeta)\Omega^2\right), \text{ где } \alpha \approx \left(\frac{F_r c}{\omega a_{re}}\right), \zeta \approx \frac{(z_n - F)c}{2\omega} \quad (1)$$

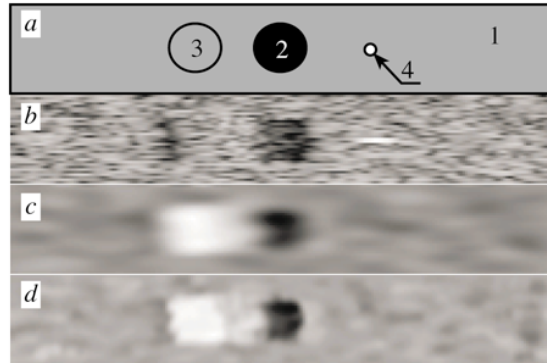
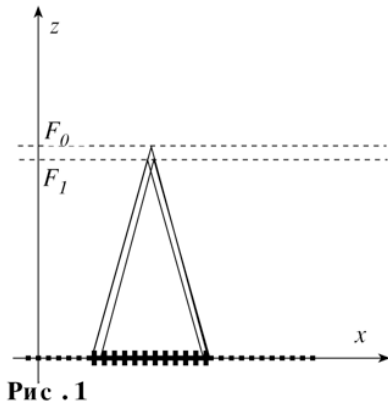
Преобразование Фурье для сигнала точечного отражателя с координатой (x_n, z_n) для левой (U_l) и правой (U_r) приемных субапертур определяется выражениями:

$$U_{l,r}(\Omega, \omega, x_n, z_n) = K_1 \gamma_n \exp\left(-\frac{(\alpha + i\zeta)}{2}\left(\Omega \pm \frac{\Omega h}{2}\right)\right) \exp\left(-i\Omega\left(x_n \pm \frac{h}{2}\right)\right) \exp\left(2i\frac{\omega z}{c}\right), \quad (2)$$

где γ_n — коэффициент отражения, а знаки \pm подставляются соответственно для левой и правой субапертур.

В алгоритме «бездифракционного» луча [2] компенсируется дефокусирующий множитель $\exp(-i(\zeta\Omega^2 \pm h\Omega)/2)$. Таким образом, пространственный спектр диаграмм направленности $U_{r,f} = U_{l,f} = \exp(-\alpha\Omega^2/2)$. Это означает, что линейная ширина диаграммы направленности не зависит от дальности.

Если отражатель перемещается вдоль оси z с некоторой скоростью v_z , за время перемещения апертур дальность до него изменяется в соответствии с формулой $z = z_n + v_z t$. Так как $t = x/v_s$, где продольная скорость сканирования $v_s = h/T_0$, в формуле (2) появляется дополнительный множитель $\exp\left(i\frac{2\omega v_z}{c v_s} x\right)$.



После компенсации дефокусирующего множителя в формуле (2) получается следующее выражение для пространственных спектров сигналов приемных субапертур:

$$\hat{U}_{l,r}(\hat{\Omega}, \omega, z_n) = \hat{K}_l \gamma_n \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \hat{\Omega}^2\right) \exp\left(-i\hat{\Omega}\left(x_n - (z_n - F_1)\frac{v_z}{v_s}\right)\right) \times \exp\left(2i\frac{\omega}{c}\left(z_n + (z_n - F_1)\frac{v_z^2}{v_s^2} \pm \frac{v_z}{2v_s} h\right)\right), \text{ где } \hat{\Omega} = \Omega + \frac{\omega 2v_z}{c v_s}. \quad (3)$$

Вычислив обратное преобразование Фурье по $\hat{\Omega}$ и ω , получаем выражения для принятых сигналов, позволяющие построить акустическое изображение и определить скорость v_z для отражателя с координатами (x_n, z_n) .

$$U_{r,l}(x - x_n, z_n, t) = K_2 \gamma_n \exp\left(-\frac{(x - x_n - (z_n - F_1)v_z/v_s)^2}{2\alpha_0}\right) \exp\left(-i\omega_0\left(t - 2\frac{z_n}{c}\right)\right) \exp\left(-\frac{(t - 2z_n/c)^2}{\tau_l^2}\right) \exp\left(\pm i\frac{\omega_0 v_z}{c v_s} h\right) \quad (4)$$

где α_0 — среднее значение α .

Вычислив функцию взаимной корреляции сигналов двух приемных субапертур, получаем:

$$U_r U_l^* = w(x, t) \exp\left(2i\frac{\omega_0 v_z}{c_0 v_s} h\right) \quad (5)$$

Плотность вероятности функции w определяется выражением $P_w = \sigma_0^2 \exp(-w/\sigma_0^2)$, где σ_0 — некоторый параметр, определяемый числом отражателей в фазовом объеме излученного импульса и диаграммы направленности. Вычислив фазу (5), можно получить искомую величину v_z . При условии отсутствия шумов приемника и постоянной скорости движения отражателей в пределах ширины диаграммы направленности скорость находится без ошибки.

3. Результаты математического моделирования

Для оценки предлагаемого метода было выполнено математическое моделирование рассеивания ультразвука на движущихся и неподвижных объектах. Исходные данные задавались тремя множествами точечных отражателей, рассеивающих ультразвук. Первое множество — фон, состоящий из неподвижных отражателей (рис. 2а, 1) и одиночная неподвижная яркая точка (рис. 2а, 4); второе — отражатели с положительной скоростью движения и малым коэффициентом отражения (рис. 2а, 2); третье — отражатели с отрицательной скоростью движения и коэффициентом отражения, равным коэффициенту отражения неподвижного фона (рис. 2а, 3). Исследовался вышеописанный алгоритм измерения скорости за счет вычисления функции корреляции двух приемных апертур, а также традиционный алгоритм измерения скорости, основанный на повторном облучении пространства.

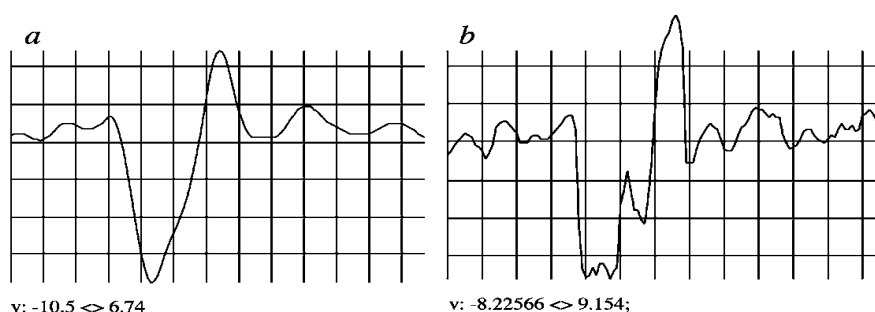


Рис. 3

На рисунке 2 представлены геометрия расположения излучателей (2a), акустическое изображение (2b) и полутоновые изображения скоростей для традиционного (2c) и нового (2d) алгоритмов. На рисунке 3 изображены графики вычисленных скоростей для всех значений x при постоянной дальности также для традиционного (3a) и нового (3b) алгоритмов. Численный эксперимент показывает, что предлагаемый метод дает значительно большую точность, чем традиционный алгоритм.

Литература

1. Л. В. Осипов. Ультразвуковые диагностические приборы. М., 1999
2. Z. M. Benenson, N. S. Kulberg, A. B. Elizarov. Algorithmic method for generation of a non-diffraction beam for constructing 3d high-resolution images in ultrasonic medical diagnostics. Pattern Recognition and Image Analysis, МАИК «Наука/Interperiodica» (Russia), vol. 9, № 3, pp. 492-504, 1999.



THE DETERMINATION OF LOCAL BLOOD FLOW VELOCITY FOR ALL SCANNING AREA USING "NON-DIFFRACTION" BEAM TECHNIQUE IN MEDICINE ULTRASOUND

Benenson Z., Kulberg N., Shestopalov V.

Scientific Council on Cybernetics, Vavilova 40, k 232, Moscow, e-mail: benenson@mtu-net.ru

The matter of the paper is the new technique for colour flow [1] in medicine ultrasound, based on the "non-diffraction beam" algorithm [2].

The matter of this new technique consists in the following. On the linear phased array after the pulse transmitting there are created two receiving subapertures. These subapertures are shifted by 1 element one from another. Subapertures are built of linear array elements via electronic commutation. Scanning is to be done along the entire linear array.

The "non-diffraction beam" algorithm is applied then to the raw signals. Speed value is measured via computing the mutual correlation function for signals of the receiving apertures.

Signals for the left and right receiving subapertures after the "non-diffraction beam" processing are the following:

$$U_{r,l}(x-x_n, z_n, t) = K_2 \gamma_n \exp\left(-\frac{(x-x_n - (z_n - F_1)v_z/v_s)^2}{2\alpha_0}\right) \exp\left(-i\omega_0\left(t - 2\frac{z_n}{c}\right)\right) \exp\left(-\frac{(t - 2z_n/c)^2}{\tau_l^2}\right) \exp\left(\pm i\frac{\omega_0}{c} \frac{v_z}{v_s} h\right) \quad (1)$$

Here (x_n, z_n) mean the coordinates of the certain scattering object, γ_n is its complex amplitude, ω_0 is the carrier frequency, c is the sound velocity, v_z is the motion speed, τ_l is the pulse duration, $\sqrt{2\alpha_0}$ is the width of the pattern diagram, \pm corresponds to right and left subapertures.

Mutual correlation function of the "left" and "right" signals allows to compute the speed v_z :

$$U_r U_l^* = w(x, t) \exp\left(2i\frac{\omega_0}{c_0} \frac{v_z}{v_s} h\right) \quad (2)$$

The considered method is found to be more precise than traditional colour flow algorithm.