

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ РЕКОНСТРУКТИВНАЯ ТОМОГРАФИЯ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ

© 2012 г. Ю.В. ПЫЛЬНОВ, Л.М. КРУТЯНСКИЙ\*, Н.В. СМАГИН\*,  
Ю.И. КУТЛУБАЕВА, С.С. КОШЕЛЮК

Московский государственный технический университет радиотехники,  
электроники и автоматики,

\*Научный Центр Волновых Исследований Института Общей Физики РАН  
e-mail: pylnov@mirea.ru

### Введение

Благодаря бурному развитию информационно-вычислительных технологий реконструктивная компьютерная томография, в настоящее время, находит широкое применение в задачах интроскопии, медицинской диагностики и неразрушающем контроле [1]. Разработанный к настоящему времени математический аппарат позволяет качественно восстанавливать внутреннюю структуру исследуемых объектов по результатам измерений параметров поля датчиками, расположенными вне этой структуры [2]. Разнообразие методов реконструктивной томографии определяется использованием физических полей различной физической природы: от рентгеновского излучения (рентгеновская томография РТ) до ядерного магнитного резонанса (ЯМР - томография) [1-2].

В акустоскопии в настоящее время широко распространены методы ультразвукового сканирования фазированными антенными решетками, которые позволяют восстанавливать пространственное распределение акустических импедансов в среде распространения ультразвукового сигнала. Однако такие методы не позволяют получать информацию о наличии в среде распространения изоэхогенных фазовых объектов. Под фазовым объектом мы будем понимать область с отличной от остальной среды скоростью распространения ультразвуковых волн, но обладающей близким к среде распространения акустическим импедансом. Реконструированным параметром, характеризующим внутреннюю структуру, в данном случае может быть локальная скорость звука или однозначно связанный со скоростью показатель преломления. Для восстановления этого параметра могут быть использованы либо зарегистрированные времена задержки ультразвуковых лучей, либо суммарный фазовый набег акустических волн в исследуемой области. Следует отметить, что фазовым объектом можно считать также локальные потоки однородной жидкости, изменяющие, благодаря доплеровскому эффекту, скорость распространения акустических волн [3].

Временные задержки акустического сигнала вдоль траектории распространения ультразвукового луча могут быть выражены следующим соотношением

$$\Delta t(s, \vec{n}) = \int_0^L \frac{dl}{c(\vec{r})} = \int \frac{\delta(\vec{n}\vec{r} - s)}{c(\vec{r})} d\vec{r}, \quad (1)$$

где  $r = (x, y)$ ,  $\vec{n} = (\cos \varphi, \sin \varphi)$ ,  $L$  - длина акустического луча,  $c(x, y)$  – скорость звука в среде распространения. Интеграл (1) полностью совпадает с классическим преобразованием Радона используемым в реконструктивной томографии [4]. Учитывая связь преобразования Радона с преобразованием Фурье можно получить алгоритм обратного преобразования Радона, необходимого для восстановления пространственного распределения скорости звука в сечении исследуемой области. Преобразование Радона (1) представляет собой совокупность одномерных проекций пространственного распределения скоростей в среде распространения обращенной ультразвуковой волны,

для восстановления которого в ультразвуковой томографии обычно используют метод обратного проецирования [2]. В этом случае для предварительной обработки информации находится среднее по углу от исходного набора проекций. Результат усреднения удобно представить в виде свертки:

$$g(\vec{r}') = \int R(\vec{r}, \vec{n}, \vec{r}') d\varphi = \int \frac{\delta[\vec{n}(\vec{r} - \vec{r}')] }{c(\vec{r})} d\vec{r} = \int \frac{c^{-1}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} = c^{-1}(\vec{r}') * \vec{h}(\vec{r}'), \quad (2)$$

где  $h(r, \varphi)$ - функция отклика системы на импульсное воздействие,  $\vec{r}' = (x', y') = (r', \varphi')$  в прямоугольной или полярной системе координат. При реконструкции карты скоростей функция отклика имеет вид  $\vec{h}(\vec{r}') = \frac{1}{|\vec{r}'|}$ , а интеграл (2) содержит

информацию о направлении скорости. Решение уравнения (2) может быть найдено в пространстве Фурье, в котором операция свертки соответствует перемножению Фурье образов функций и для распределения скорости получаем:

$$c(r, \varphi) = \mathfrak{S}^{-1} \left\{ \frac{\tilde{G}(\rho, \theta)}{\tilde{H}(\rho, \theta)} \right\} \quad (3)$$

где  $\mathfrak{S}^{-1}$  - оператор обратного преобразования Фурье,  $\tilde{G}(\rho, \theta), \tilde{H}(\rho, \theta)$  - фурье - образы усредненных радоновских проекций и функции отклика. Обратная величина фурье – образа импульсной функции,  $\tilde{H}^{-1}(\rho, \theta) = |\rho|$ . Операцию (3) часто называют  $\rho$  – фильтрацией, а метод коррекции обратных проекций - методом обратного проецирования с фильтрацией пространственных частот (FBP – Filtered Back Projection) [1-3].

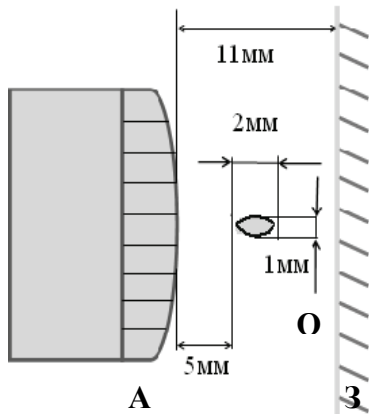


Рис.1. А- фазированная антенная решетка; О- фазовый объект; З- акустическое зеркало.

Алгоритм FBP позволяет восстановить двумерное распределение скорости ультразвука по одномерным временным профилям исследуемого объекта. Наложение конечного числа лучевых проекций приводит к появлению шума дискретизации в реконструированном изображении объекта. Этот шум лежит в области высоких пространственных частот и может быть отфильтрован в процессе восстановления векторного поля скоростей. Для подавления артефактов преобразования Фурье используются также функции сглаживания (аподизации), которые подбираются исходя из геометрии задачи, размеров и формы исследуемых объектов. В окончательном варианте формула обратного преобразования имеет следующий вид:

$$c(r, \varphi) = \mathfrak{S}^{-1} \left\{ \frac{\tilde{G}(\rho, \theta)}{\tilde{H}(\rho, \theta)} \cdot F(\rho, \theta) \cdot A(\rho, \theta) \right\}, \quad (4)$$

где  $F(\rho, \theta)$ - фильтр низких частот  $A(\rho, \theta)$  - функция аподизации.

Следует отметить, что фазовым объектом можно считать также локальные потоки однородной жидкости, изменяющие благодаря доплеровскому эффекту скорость распространения акустических волн. Особенностью восстановления поля скоростей потока в ультразвуковой реконструктивной томографии является векторный характер этого распределения [3,4]. В этом случае необходимо учитывать проекцию скорости потока на направление акустического луча  $V_1(\vec{r}) = V_0(\vec{r}) \cos(\varphi - \alpha)$  и после операции обратного проецирования имеем:

$$\begin{aligned} g(\vec{r}') &= \int R(\vec{r}, \vec{n}, \vec{r}') d\varphi = \int \delta[\vec{n}(\vec{r} - \vec{r}')] \cdot \vec{V}(\vec{r}) \cdot \vec{n} d\vec{r} = \\ &= \int \frac{\vec{V}(\vec{r}) \cdot \vec{n}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \cdot d\vec{r} = \vec{V}(\vec{r}') * \vec{h}(\vec{r}') \end{aligned} \quad (5)$$

При реконструкции карты скоростей функция отклика имеет вид  $\vec{h}(\vec{r}') = \frac{\vec{n}}{|\vec{r}'|}$ , а интеграл (5) содержит информацию о направлении скорости. Обратная величина Фурье – образа импульсной функции в этом случае равна  $\tilde{H}^{-1}(\rho, \theta) = \vec{\tau} \cdot |\rho|$ , где  $\vec{\tau} = (-\sin \theta, \cos \theta)$  соответствует вектору  $\vec{n}$ , повернутому на 90 градусов против часовой стрелки. Для выделения составляющих скорости могут быть использованы ортогональные тригонометрические функции [5].

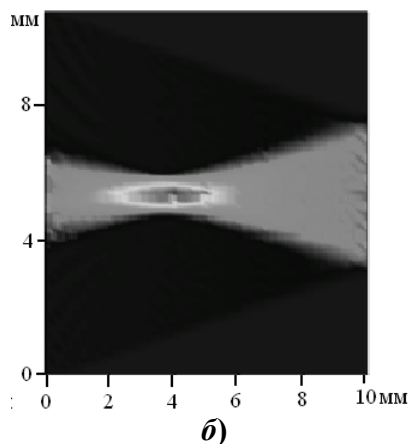
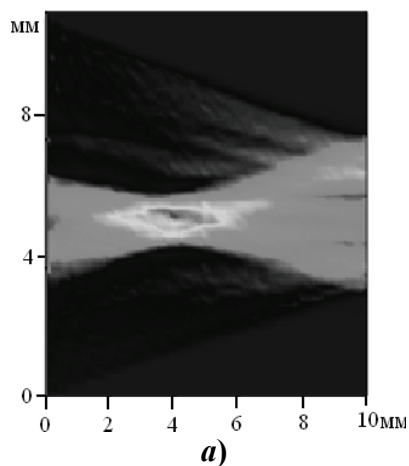


Рис.2. а – ультразвуковая томограмма фазового объекта; б – результат численного модели-

рования. На Рис. 2а приведено измеренное распределение скоростей звука в сечении исследуемой области, восстановленное с использованием алгоритма ФВР. Для сравнения на Рис. 2б показаны результаты численного моделирования, основанные на фундаментальных законах распространения ультразвука в фазово-неоднородной среде [6].

### Томография струи жидкости

Для реконструкции поля скоростей потока жидкости вместо фазового объекта вводилась струя воды под углом 30 градусов к плоскости регистрации. Сечение потока приблизительно соответствовало размерам фазового объекта, использованного в предыдущем эксперименте. При таких малых размерах объекта временные задержки составляли величину в несколько наносекунд при скоростях потока превышающих несколько метров в секунду. Для повышения чувствительности регистрирующей аппаратуры на этапе обработки волновых форм использовалась интерполяция принятого акустического импульса полиномом второго порядка. Это позволило регистрировать вре-

### Томография фазового объекта

В эксперименте использовалась 64 – элементная линейная решетка ультразвуковых преобразователей в геометрии, показанной на Рис. 1. Для реконструкции фазового профиля объекта использовалась схема с отражением ультразвукового сигнала от акустического зеркала. Исследуемый объект из полистирола имел эллиптическую форму и размещался между антенной и акустическим зеркалом. Пространство между акустической антенной и зеркалом заполнялось водой. Многоэлементная решетка управлялась системой **Multi.X** согласно следующему алгоритму: каждый из 64 элементов ультразвуковой антенны последовательно излучает ультразвуковой импульс с частотой 5МГц, который после прохождения в среде и отражения от зеркала регистрируется всеми остальными элементами антенны. По зарегистрированной таким образом матрице волновых форм формируется матрица корреляций с волновыми формами, полученными в отсутствие фазового объекта. Времена задержки зондирующего сигнала определяются по мнимой части Фурье образов корреляционных функций волновых форм. В результате этого формируется матрица временных задержек  $\|t_{i,j}\|$  при распространении УЗ импульса от элемента с номером  $i$  к элементу с номером  $j$ . Для томографической реконструкции составлялась матрица  $\Delta t_{i,j} = t_{i,j} + t_{j,i}$ , элементы которой использовались для

восстановления фазового объекта. Волновые формы ультразвуковых сигналов регистрировались в цифровом виде с частотой оцифровки 100МГц, что обеспечивало точность определения времени задержки 10нс.

мена задержки ультразвуковых сигналов с чувствительностью менее десятой доли наносекунды. Для томографической реконструкции векторного поля скоростей составлялась матрица  $\Delta t_{i,j} = t_{i,j} - t_{j,i}$ , отличная от матрицы используемой для восстановления фазового объекта [7].

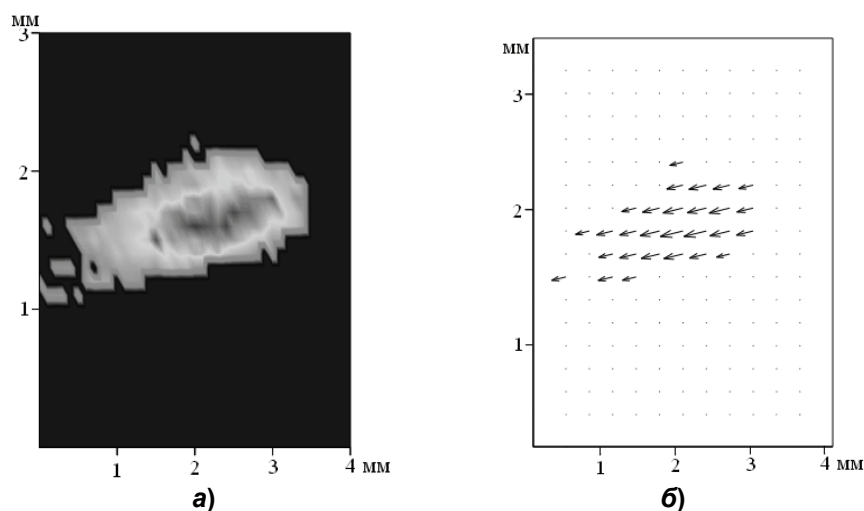


Рис. 3. а – томограмма распределения скорости потока в сечении струи жидкости. б – реконструкция векторного поля скоростей.

На Рис. 3а приведено распределение модуля продольной составляющей скорости струи воды в сечении потока. Скорость потока в центре струи составляла величину 5м/с, что совпадало с оценками, сделанными по измерению расхода жидкости. На Рис. 3б приведена томограмма векторного поля скоростей, соответствующая распределению 3а.

### Заключение

В настоящей работе приведены результаты томографического восстановления распределения скорости в стационарном потоке жидкости, а также показателя преломления фазового объекта. Работа проведена в рамках Европейского проекта IRSES при поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации и Национального Центра Научных Исследований Франции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравчук А.С. Вычислительная томография. // М. МГАПИ, 1996, 136.
2. Натерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. – М. Мир, 1990, 279.
3. Hans Braun and Axel Hauck. "Tomographic Reconstruction of Vector Fields", IEEE transactions on signal processing, 39(2), p. 464-471, 1991.
4. Пыльнов Ю.В., Преображенский В.Л., Перно Ф. Детектирование движущихся объектов и потоков в жидкости с помощью обращения волнового фронта ультразвука. // Акуст.Журн. - 2005, т. 51, № 1, с. 105-109.
5. Pyl'nov Yu., Preobrazhensky V., Pernod Ph. "Ultrasonic tomography of liquids flows by means of phase-conjugated acoustical waves". ICFM-2011, 5-10 oct., Partenit, Ukraine, 2011. p. 103.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Гидродинамика. // М.: Наука, 1986, т.6, 736 с.
7. Pyl'nov Yu. V., Koshelyuk S.S., Pernod P., Kutlubaeva Yu. I. Ultrasonic Tomographic Reconstruction of Liquid Flows Using Phase-Conjugate Waves. //Physics of Wave Phenomena, 2012, V. 20, № 3, p. 231–234.