

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 5

2001

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 536.02.004 : 681.7.069.24

П. П. Белоусов, П. Я. Белоусов, Ю. Н. Дубнищев
(Новосибирск)

ЛАЗЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ
3D-ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ*

Обсуждается метод лазерной доплеровской визуализации поля вектора скорости движущейся среды в трехмерном ортогональном координатном базисе.

В лазерной доплеровской анемометрии одной из важнейших является проблема измерения вектора скорости. В современных ЛДИС определение вектора скорости основано, как правило, на мультиплицировании измерительных каналов [1–3]. Возможность селекции компонент вектора скорости в трехмерном ортогональном координатном базисе в более простых оптических измерительных конфигурациях обсуждается в [4]. При этом достигается минимизация числа измерительных каналов, компактность конструктивного исполнения и повышение чувствительности. Изложенные в [4] способы селекции оказываются полезными при решении еще более сложной задачи, которая до сих пор не получила удовлетворительного решения – визуализации и измерения в реальном времени пространственного распределения 3D-вектора скорости.

Известные методы PIV (Particle Image Velocimetry) [5] обладают существенными ограничениями, связанными с зависимостью результата измерений от пространственной и временной частот выборки и, следовательно, концентрации вносимых в среду калиброванных частиц. Обработка треков требует больших затрат машинного времени и соответствующего развития сложного программного обеспечения. Применение методов PIV крайне затруднено как при высоких, так и низких концентрациях рассеивающих частиц (например, при исследовании динамических поверхностных структур и в пристенных областях), а также при малой интенсивности рассеянного света.

В [6, 7] описан метод визуализации и измерения поля 1D-скорости как пространственного распределения доплеровского сдвига частоты в изображении сечения исследуемой среды, сформированного на выходе оптическо-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 99-2а-16702, № 00-15-99089) и INTAS (проект № 2000-135).

го доплеровского демодулятора с резонансной передаточной функцией, склон которой используется в качестве дискриминационной кривой.

Этот метод в сочетании с идеологией 3D-измерений, изложенной в [4], составляет базу для решения проблемы визуализации и измерения пространственного распределения вектора скорости в трехмерном ортогональном базисе. Одна из таких возможностей обсуждается в настоящей работе.

На рис. 1 представлена конфигурация световых пучков, поясняющая действие 3D-визуализатора поля скорости. В качестве частотного демодулятора используется оптический доплеровский процессор с когерентной обратной связью либо оптический частотный дискриминатор, основанный на применении дисперсионных сред, согласованных с параметрами лазерного излучения [6]. На рис. 1 волновые векторы \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 , \mathbf{k}_3 и \mathbf{k}_4 соответствуют лазерным пучкам, конфигурированным в форме плоского «лазерного ножа» и освещающим выбранное сечение исследуемой среды. Волновые векторы \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 ориентированы по оси Ox и направлены навстречу друг другу. Противоположно направленные волновые векторы \mathbf{k}_3 и \mathbf{k}_4 коллинеарны оси Oy , ортогональной оси Ox . Световые пучки \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 , \mathbf{k}_3 и \mathbf{k}_4 могут коммутироваться. Рассеянный световой пучок с осевым волновым вектором \mathbf{k}_s направляется в оптический процессор, формирующий демодулированное по частоте изображение сечения, выделенное лазерными пучками \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 , \mathbf{k}_3 и \mathbf{k}_4 . Волновой вектор \mathbf{k}_s соответствует световому пучку, рассеянному оптической неоднородностью, движущейся со скоростью \mathbf{V} . Оптический визуализатор формирует изображение сечения, интенсивность которого пропорциональна доплеровскому сдвигу частоты в рассеянной волне с волновым вектором \mathbf{k}_s .

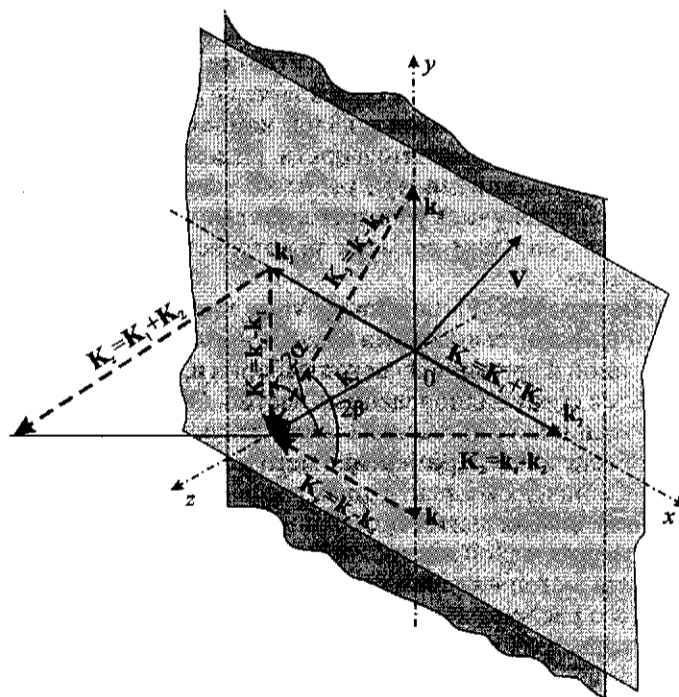


Рис. 1. Оптическая конфигурация в пространстве волновых векторов, формирующая 3D координатный базис

Пусть частица освещена лазерным пучком с волновым вектором \mathbf{k}_1 . Тогда в рассеянном пучке имеет место доплеровский сдвиг частоты

$$\omega_{D1} = \mathbf{V}(\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_1) = \mathbf{V}\mathbf{K}_1.$$

Интенсивность изображения частицы, сформированного когерентным доплеровским процессором, описанным в [6], пропорциональна проекции вектора скорости на вектор чувствительности $\mathbf{K}_1 = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_1$ в каждой точке исследуемого сечения, выделенного «лазерным ножом». Соответственно сечение исследуемой среды, освещенное световой волной с волновым вектором \mathbf{k}_1 , отображается на выходе оптического процессора как совокупность изображений распределения оптических неоднородностей $\varphi(\xi, \eta)\delta(x - \xi, y - \eta)$. Следовательно, частотно-демодулированное изображение сечения, выделенного световым пучком с волновым вектором \mathbf{k}_1 , можно описать выражением

$$\omega_{D1}(x, y) = \iint \mathbf{K}_1 \mathbf{V}(\xi, \eta) \varphi_1(\xi, \eta) \delta(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta = \mathbf{K}_1 \mathbf{V}(x, y) \varphi_1(x, y), \quad (1)$$

где интегрирование выполняется по всему выделенному сечению; $\mathbf{K}_1 \mathbf{V}(x, y)$ – пространственное распределение компоненты вектора скорости в направлении вектора чувствительности \mathbf{K}_1 ; множитель $\varphi_1(x, y)$ соответствует функции рассеяния в направлении \mathbf{k}_s . Она описывает исходное изображение исследуемого сечения, не подвергнутое процессу частотной демодуляции. Тогда

$$\tilde{\omega}_{D1}(x, y) = \mathbf{K}_1 \mathbf{V}(x, y), \quad (2)$$

где $\tilde{\omega}_{D1}(x, y) = \frac{\omega_{D1}(x, y)}{\varphi_1(x, y)}$ – распределение относительной интенсивности де-

модулированного по частоте изображения, получаемого средствами компьютерной обработки. Из (2) видно, что $\tilde{\omega}_{D1}(x, y)$ однозначно отображает поле компоненты скорости в направлении \mathbf{K}_1 :

$$V_1(x, y) = \frac{1}{K_1} \mathbf{V}(x, y) \mathbf{K}_1.$$

После фиксации поля скорости $\tilde{\omega}_{D1}(x, y)$ осуществляется коммутация световых пучков и «лазерный нож» формируется световой волной с волновым вектором \mathbf{k}_2 . Частота коммутации, согласно теореме отсчетов, должна быть не меньше удвоенной максимальной частоты в выбранной спектральной области исследуемого процесса. В изображении сечения отображается случайное поле, соответствующее проекции вектора скорости на разностный волновой вектор $\mathbf{K}_2 = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_2$:

$$\omega_{D2}(x, y) = \iint \mathbf{K}_2 \mathbf{V}(\xi, \eta) \varphi_2(\xi, \eta) \delta(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta = \mathbf{K}_2 \mathbf{V}(x, y) \varphi_2(x, y).$$

Отсюда для распределения относительной интенсивности демодулированного по частоте изображения $\tilde{\omega}_{D2}(x, y) = \frac{\omega_{D2}(x, y)}{\varphi_2(x, y)}$ получаем

$$\tilde{\omega}_{D2}(x, y) = \mathbf{V}(x, y)\mathbf{K}_2. \quad (3)$$

Это изображение также фиксируется фотографически или с помощью видеокамеры. Все полученные результаты вводятся в ЭВМ, выполняющую их обработку.

Определим разность полей (1) и (2):

$$\tilde{\omega}_{Dx} = \tilde{\omega}_{D1}(x, y) - \tilde{\omega}_{D2}(x, y) = \mathbf{V}\mathbf{K}_1 - \mathbf{V}\mathbf{K}_2 = \mathbf{V}(\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2) = \mathbf{V}\mathbf{K}_x, \quad (4)$$

где $\mathbf{K}_x = \mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2 = (\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_1) - (\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_2) = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$. Как видно из (4), разность полей $\tilde{\omega}_{D1}(x, y)$ и $\tilde{\omega}_{D2}(x, y)$ определяет результирующее поле, соответствующее проекции скорости на разностный вектор $\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$. Вектор чувствительности \mathbf{K}_x задаст направление оси $0x$, коллинеарное разности волновых векторов освещающих лазерных пучков \mathbf{k}_2 и \mathbf{k}_1 .

Суммируя поля (1) и (2), находим

$$\tilde{\omega}_{D1}(x, y) + \tilde{\omega}_{D2}(x, y) = \mathbf{V}\mathbf{K}_1 + \mathbf{V}\mathbf{K}_2 = \mathbf{V}(\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2). \quad (5)$$

Из рис. 1 видно, что результатом суммирования полей является поле проекции вектора скорости на координатную ось $0z$, задаваемую направлением вектора чувствительности $\mathbf{K}_z = \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2$:

$$\tilde{\omega}_{Dz}(x, y) = \tilde{\omega}_{D1}(x, y) + \tilde{\omega}_{D2}(x, y) = \mathbf{V}\mathbf{K}_z. \quad (6)$$

Таким образом, векторы чувствительности \mathbf{K}_z и \mathbf{K}_x задают двумерный координатный базис $x0z$, в котором осуществляется визуализация и измерение $2D$ -поля скорости.

Для организации $3D$ координатного измерительного базиса посредством коммутируемых световых пучков формируется «лазерный нож» из встречно направленных световых волн с волновыми векторами \mathbf{k}_3 и \mathbf{k}_4 , ортогональными и компланарными волновым векторам \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 . На выходе оптического процессора последовательно во времени формируются частотно-демодулированные изображения исследуемого сечения, выделенного коммутируемыми световыми пучками с волновыми векторами \mathbf{k}_3 и \mathbf{k}_4 . Соответственно регистрируются два изображения исследуемого сечения, отображающие поля проекций вектора скорости на векторы чувствительности $\mathbf{K}_3 = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_3$ и $\mathbf{K}_4 = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_4$:

$$\omega_{D3}(x, y) = \int \int \mathbf{K}_3 \mathbf{V}(\xi, \eta) \varphi_3(\xi, \eta) \delta(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta = \mathbf{K}_3 \mathbf{V}(x, y) \varphi_3(x, y), \quad (7)$$

$$\omega_{D4}(x, y) = \int \int \mathbf{K}_4 \mathbf{V}(\xi, \eta) \varphi_4(\xi, \eta) \delta(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta = \mathbf{K}_4 \mathbf{V}(x, y) \varphi_4(x, y). \quad (8)$$

Здесь множители $\varphi_3(x, y)$ и $\varphi_4(x, y)$, как и в (1), описывают распределение в плоскости «лазерного ножа» интенсивности функции рассеяния в направле-

нии волнового вектора \mathbf{k}_s . Распределения относительных интенсивностей демодулированных по частоте изображений следуют из (7) и (8):

$$\tilde{\omega}_{D3}(x, y) = \frac{\omega_{D3}(x, y)}{\varphi_3(x, y)} = \mathbf{K}_3 \mathbf{V}(x, y), \quad (9)$$

$$\tilde{\omega}_{D4}(x, y) = \frac{\omega_{D4}(x, y)}{\varphi_4(x, y)} = \mathbf{K}_4 \mathbf{V}(x, y). \quad (10)$$

Дальнейшая обработка состоит в вычитании и сложении относительных частотно-демодулированных изображений (9) и (10):

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{D3}(x, y) - \tilde{\omega}_{D4}(x, y) &= \tilde{\omega}_{Dy}(x, y) = \mathbf{K}_3 \mathbf{V}(x, y) - \mathbf{K}_4 \mathbf{V}(x, y) = \\ &= (\mathbf{K}_3 - \mathbf{K}_4) \mathbf{V}(x, y) = \mathbf{K}_y \mathbf{V}(x, y), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{D3}(x, y) + \tilde{\omega}_{D4}(x, y) &= \tilde{\omega}_{Dz}(x, y) = \mathbf{K}_3 \mathbf{V}(x, y) + \mathbf{K}_4 \mathbf{V}(x, y) = \\ &= (\mathbf{K}_3 + \mathbf{K}_4) \mathbf{V}(x, y) = \mathbf{K}_z \mathbf{V}(x, y). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь вектор чувствительности \mathbf{K}_y , равный разности векторов \mathbf{K}_3 и \mathbf{K}_4 , задает направление оси Oy в ортогональном координатном измерительном базисе. Вектор чувствительности $\mathbf{K}_z = \mathbf{K}_3 + \mathbf{K}_4$, как и в (6), определяет направление координатной оси Oz .

Запишем выражения (5), (6) и (11) в скалярном виде:

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{Dx} &= V_x(x, y) K_x; \\ \tilde{\omega}_{Dy} &= V_y(x, y) K_y; \\ \tilde{\omega}_{Dz} &= V_z(x, y) K_z, \end{aligned} \quad (13)$$

где $V_x(x, y)$, $V_y(x, y)$ и $V_z(x, y)$ – компоненты вектора скорости в ортогональном координатном базисе; K_x , K_y и K_z – модули векторов чувствительности, формирующих этот базис. Величины K_x , K_y и K_z легко находятся из рис. 1:

$$K_x = 2 \left[\frac{k}{\cos \alpha} \right] \sin \alpha = 2k \operatorname{tg} \alpha, \quad K_y = 2k \operatorname{tg} \beta, \quad K_z = 2k.$$

Отсюда, учитывая, что в конфигурации, представленной на рис. 1, $\alpha = \beta = 45^\circ$, получаем

$$V_x(x, y) = \frac{\tilde{\omega}_{Dx}(x, y)}{2k}, \quad V_y(x, y) = \frac{\tilde{\omega}_{Dy}(x, y)}{2k}, \quad V_z(x, y) = \frac{\tilde{\omega}_{Dz}(x, y)}{2k},$$

т. е. все 3D-компоненты вектора скорости визуализируются и измеряются с одинаковой чувствительностью.

Экспериментальное обоснование изложенного выше метода 3D-визуализации поля скорости выполнено на лабораторном действующем стенде, упрощенная функциональная схема которого показана на рис. 2, а. В качестве объекта исследования выбрана поверхность вращающегося с известной уг-

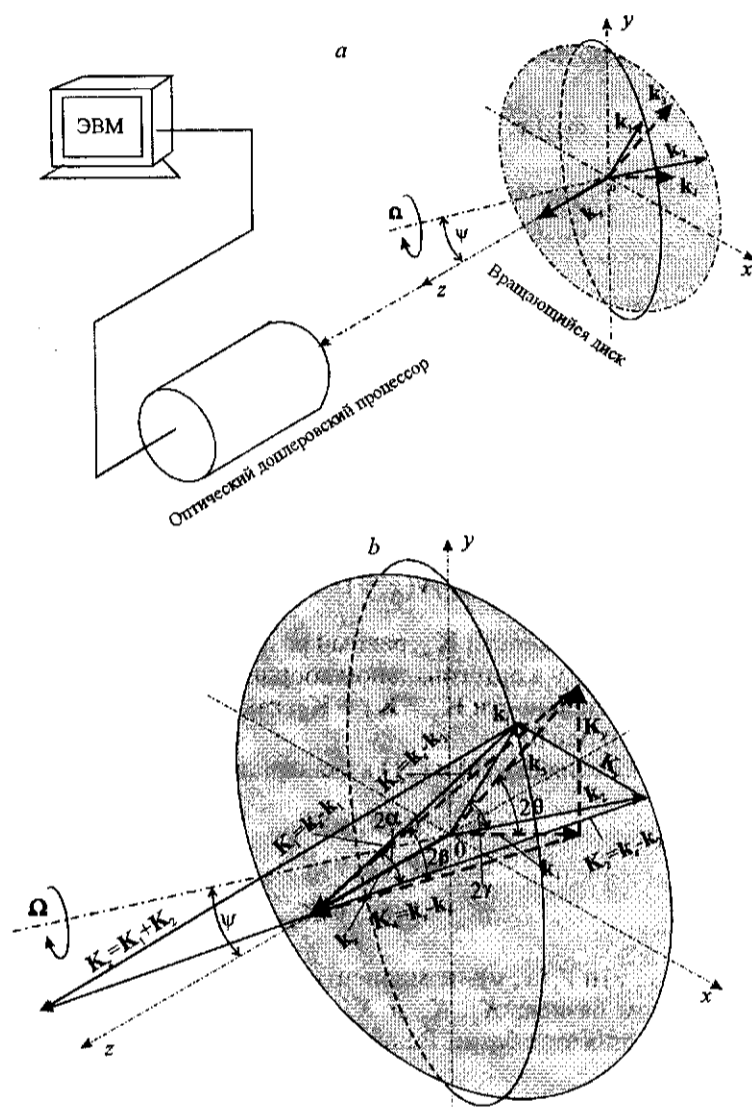


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки (а), формирование трехмерного ортогонального координатного измерительного базиса в лазерном доплеровском визуализаторе скорости (б)

ловой скоростью диска. Плоскость диска повернута относительно оси Ox на угол ψ для обеспечения V_z компоненты скорости в измерительном координатном базисе. Угол ψ равен углу между вектором угловой скорости Ω , ортогональным к плоскости диска, и осью Oz . Поверхность диска попеременно освещается лазерными пучками с волновыми векторами k_1, k_2, k_3 и k_4 . Пучки формируются коммутируемым лазерным осветительным устройством. Световые пучки (рис. 2, б) с волновыми векторами k_1 и k_2, k_3 и k_4 попарно ориентированы в ортогональных плоскостях (xOz и yOz). Угол между волновыми векторами k_1 и k_2 в горизонтальной плоскости равен 2γ . Соответственно угол между волновыми векторами k_3 и k_4 в вертикальной плос-

кости равен 2θ . Световой пучок с волновым вектором \mathbf{k}_s , рассеянный поверхностью диска, направляется в оптический доплеровский процессор. Процессор формирует на выходе частотно-демодулированное изображение поверхности вращающегося диска. Это изображение вводится в компьютер, где подвергается соответствующей обработке. Направление волнового вектора рассеянного пучка \mathbf{k}_s совпадает с биссектрисами углов между волновыми векторами освещающих лазерных пучков \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 , \mathbf{k}_3 и \mathbf{k}_4 .

На рис. 2, *b* показано построение векторов чувствительности $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3, \mathbf{K}_4, \bar{\mathbf{K}}_x, \bar{\mathbf{K}}_y$ и \mathbf{K}_z в соответствии с приведенной выше теорией. Из конфигурации волновых векторов, показанной на рисунке, легко устанавливается связь углов 2γ и 2θ между волновыми векторами зондирующих пучков и углами между соответствующими векторами чувствительности 2α и 2β : $\alpha = \frac{1}{2}\gamma$,

$\beta = \frac{1}{2}\theta$. Из рис. 2, *b* получаем следующие выражения для модулей векторов чувствительности, формирующих ортогональный координатный базис:

$$\begin{aligned} K_x &= 2k \sin 2\alpha = 2k \sin \gamma, \\ K_y &= 2k \sin 2\beta = 2k \sin \theta, \\ K_z &= 4k \cos^2 \alpha = 2k(1 + \cos 2\alpha) = 2k(1 + \cos \gamma). \end{aligned} \quad (14)$$

При $\gamma = \theta = 90^\circ$ получаем модули векторов чувствительности K_x, K_y и K_z (14) для измерительной конфигурации в пространстве волновых векторов, показанной на рис. 1. Нулевая скорость соответствует выбранной рабочей точке на дискриминационной кривой [6].

На рис. 3 показаны результаты экспериментов, полученные на лабораторном стенде (см. рис. 2). Рис. 3, *a* – частотно-демодулированные изображения, полученные при освещении поверхности вращающегося диска коммутируемыми лазерными пучками с волновыми векторами \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 , ориентированными в горизонтальной плоскости. Изображение *XL* дает распределение $\bar{\omega}_{D1}(x, y)$; *XR* → $\bar{\omega}_{D2}(x, y)$; изображение *X* соответствует распределению компоненты скорости $V_x(x, y)$, а изображение *XZ* отображает поле компоненты скорости $V_z(x, y)$.

Рис. 3, *b* представляет частотно-демодулированные изображения поверхности диска, освещенной коммутируемыми лазерными пучками с волновыми векторами \mathbf{k}_3 и \mathbf{k}_4 , ориентированными в вертикальной плоскости. Изображение *YU* отображает распределение $\bar{\omega}_{D3}(x, y)$; *YD* → $\bar{\omega}_{D4}(x, y)$; фрагмент *Y* соответствует полю $V_y(x, y)$ компоненты вектора скорости, а *YZ* дает распределение $V_z(x, y)$ компоненты скорости в ортогональном координатном базисе, заданном векторами чувствительности $\mathbf{K}_x, \mathbf{K}_y$ и \mathbf{K}_z .

На рис. 3, *c* и *d* изображены реконструированные распределения $V_x(x, y)$ и $V_y(x, y)$ компонент вектора скорости, на рис. 3, *e* – поле вектора скорости $\mathbf{V}_x(x, y) + \mathbf{V}_y(x, y)$ на поверхности вращающегося диска, а на рис. 3, *f* – распределение $V_z(x, y, z)$ компоненты скорости в заданном ортогональном координатном базисе.

Как следует из вышеизложенного, измерительный координатный базис может формироваться при произвольных углах 2θ и 2γ между направлениями зондирующих пучков. В случае $\gamma \neq 90^\circ$ и $\theta \neq 90^\circ$ и выборе соответствующей конфигурации пучков можно получить пространственное распределение

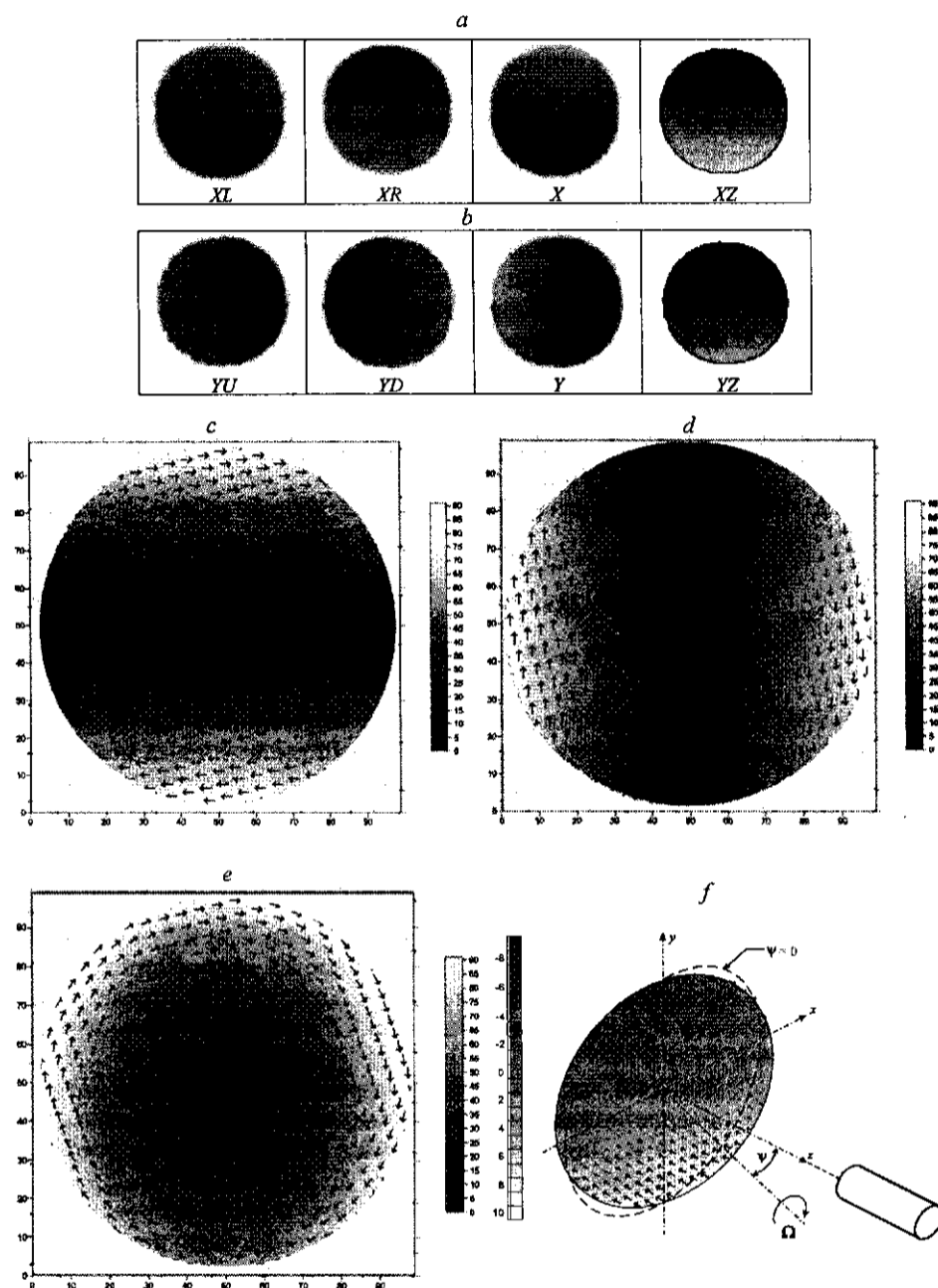


Рис. 3. Визуализация поля скорости на поверхности вращающегося диска: частотно-демодулированные изображения поверхности вращающегося диска, полученные при освещении диска коммутируемым лазерным пучком (a, b); реконструированные распределения компонент вектора скорости $V_x(x, y)$ и $V_y(x, y)$ на изображении поверхности диска (c, d); реконструированные поля 2D-вектора скорости на поверхности диска (e); реконструированное распределение компоненты скорости $V_z(x, y)$ на поверхности диска (радиус диска 10^{-2} м, скорость вращения 10^5 об./мин, $\psi = 10^\circ$) (f)

вектора скорости в ортогональном координатном базисе в отличие от распределения в плоском сечении, задаваемом «лазерным ножом» при $\gamma = 90^\circ$, $\theta = 90^\circ$. Дополнительные функциональные возможности возникают при использовании методов компьютерной голографии. Подробное изложение таких 3D-технологий – предмет последующих публикаций.

При малых временах экспонирования изображений осуществляется пространственная дискретизация поля скорости в исследуемом сечении случайно распределенными рассеивающими неоднородностями. В этом случае рассмотренную технологию формально можно определить как PIV с когерентной оптической доплеровской обработкой информации – Coherent Doppler Processing (PIV CDP). В отличие от известных методов PIV рассмотренный способ снимает проблему идентификации частиц и треков, существенно расширяет диапазон концентрации рассеивающих частиц, устраняет ограничение на их однородность. Появляется возможность измерений в реальном времени в широком динамическом диапазоне кинематических и структурных параметров исследуемых потоков. Теоретическое и экспериментальное обоснование метода лазерной доплеровской визуализации вектора скорости в трехмерном ортогональном координатном базисе определяет новое направление оптической измерительной техники, ориентированное на применение в экспериментальной гидро- и аэродинамике, а также в промышленных технологиях, связанных с необходимостью контроля пространственного распределения кинематических параметров движущихся сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичюс Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982.
2. Ринкевичюс Б. С. Лазерная диагностика потоков. М.: МЭИ, 1990.
3. Buchhave P. Three-component LDA measurements // DISA Information. 1983. 1, N 3.
4. Дубнищев Ю. Н. Методы селекции вектора скорости в лазерной доплеровской анемометрии // Автометрия. 1996. № 2. С. 13.
5. Paffel M., Willert C. E., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Springer-Verlag, 1998.
6. Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н., Пальчикова И. Г. Визуализация поля скорости потока // Оптика и спектроскопия. 1982. 52. С. 876.
7. Белоусов П. П., Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н. Лазерная доплеровская визуализация поля скорости // Квантовая электроника. 1999. 29, № 2. С. 157.

*Институт теплофизики СО РАН,
E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
26 июня 2001 г.*