

07

## Лазерная доплеровская хроматическая визуализация вращающихся структур

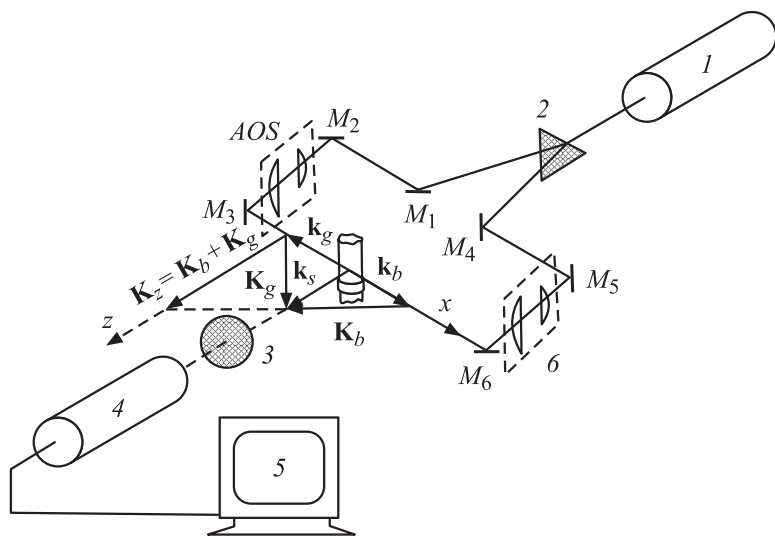
© П.П. Белоусов, П.Я. Белоусов, Ю.Н. Дубнищев

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

Поступило в Редакцию 30 июля 2003 г.

Разработан метод лазерной доплеровской визуализации поля скоростей потоков с хроматической селекцией компонент вектора скорости в ортогональном координатном базисе.

Одной из важнейших проблем в оптической диагностике потоков является визуализация и измерение поля скоростей. Методы лазерной доплеровской анемометрии [1] ориентированы на измерение локальных скоростей. Известные методы PIV (Particle Image Velocimetry) [2] имеют принципиальные ограничения, связанные с зависимостью результатов измерений от пространственной и временной частоты выборки и, следовательно, концентрации вносимых в исследуемую среду частиц, которые к тому же должны быть калиброванными. Остается много нерешенных проблем с обработкой и идентификацией треков. Методические и технические ограничения ставят под сомнение саму возможность применения традиционных методов PIV для визуализации и измерений полей скоростей в реальном масштабе времени. В свое время авторами [3] был предложен метод лазерной доплеровской визуализации и измерения *on line* поля скоростей потоков, основанный на оптической частотной демодуляции светового поля и впоследствии в научной литературе получивший название Global Laser Velocimetry — GLV [4]. В работе [5] была впервые выполнена лазерная доплеровская визуализация поля скоростей закрученного потока в трубке Ранка–Хилша и подтверждено существование биспиральных вихревых структур, обнаруженных в [6] методом гильберт-оптики. Одно из решений проблемы визуализации и измерения поля скоростей в 3D координатном базисе, основанное на темпоральной селекцией компонент вектора скоростей и линейных преобразованиях частотно-демодулированного в когерентном свете изображения исследуемого



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — лазер, 2 — призма, 3 — объектив, 4 — оптический процессор, 5 — компьютер, 6 — анаморфтная оптическая система.

сечения, приведено в работе [7]. Этот метод накладывает ограничения на частоту коммутации световых полей, формирующих „лазерный нож“, частотой Найквиста, связанной с верхней границей спектра мощности исследуемого процесса. Целью настоящей работы является сообщение о методе визуализации и измерения в реальном времени поля векторов скоростей, свободном от этих ограничений.

На рис. 1, а показана упрощенная схема экспериментальной установки, состоящей из гидродинамического стенда, формирующего закрученный поток в цилиндрическом канале, и лазерного визуализатора поля скоростей с хроматической селекцией компонент вектора скорости в ортогональном координатном базисе. Измерительное устройство содержит аргоновый лазер, генерирующий излучение на синей и зеленой спектральных линиях. Дисперсионная призма расщепляет лазерный луч на синий и зеленый пучки. Синий луч последовательно расположенными зеркалами  $M_1$  и  $M_2$ , анаморфтной оптической системой  $AOS$  и зеркалом  $M_3$  трансформируется в „световую плоскость“, выделяющую

исследуемое сечение в осевом сечении прозрачного цилиндра, через который движется возмущенный завихрителем поток воды. Аналогично зеленый пучок анаморфотной системой  $AOS$  и последовательностью зеркал  $M_4-M_6$  трансформируется в „световую плоскость“, пространственно совмещенную с синей световой плоскостью. Световые поля в синей и зеленой световых плоскостях противоположно направлены:

$$\frac{\mathbf{k}_b}{k_b} = \frac{\mathbf{k}_g}{k_g},$$

где  $\mathbf{k}_b$  и  $\mathbf{k}_g$  — волновые векторы синего и зеленого световых полей. „Световые плоскости“ или, как их еще называют, „лазерные ножи“, освещают исследуемое сечение в потоке.

Бихроматический доплеровский процессор с когерентной обратной связью Bichromatic Doppler Processor (BDP) выполнен на основе полуконфокального оптического резонатора, модовая структура которого согласована с модовой структурой излучения лазера в синей и зеленой областях спектра. Передаточная функция процессора на синей и зеленой спектральных линиях излучения лазера имеет резонансный вид. В качестве дискриминационной кривой используется линейный участок соответствующей хроматической амплитудно-частотной характеристики процессора. Оптическая ось  $BDP$  ориентирована ортогонально плоскости лазерного ножа. В выходной плоскости  $BDP$ -процессора формируется изображение исследуемого сечения потока в частотно-демультированном свете. Частотно-демультированное изображение регистрируется  $CCD$ -камерой. После  $RGB$ -разделения сигналов  $G$ - и  $B$ -изображения нормализуются на соответствующие хроматические изображения, не подвергнутые частотной демодуляции. Обработка осуществляется на персональном компьютере. Интенсивность светового поля в каждой точке изображения является однозначной линейной функцией проекции вектора скорости на направление вектора чувствительности  $\mathbf{K}$ , равного разности волновых векторов рассеянного  $\mathbf{k}_s$  и падающего  $\mathbf{k}_i$  световых пучков:  $\mathbf{K} = \mathbf{K}_s - \mathbf{k}_i$ .  $2D$  координатный базис задается векторами  $\mathbf{K}_x$  и  $\mathbf{K}_y$ :

$$\mathbf{K}_x = \mathbf{K}_b - \beta \mathbf{K}_g;$$

$$\mathbf{K}_y = \mathbf{K}_b + \beta \mathbf{K}_g,$$

где  $\mathbf{K}_b = \mathbf{k}_{b_s} - \mathbf{k}_b$ ,  $\mathbf{K}_g = \mathbf{k}_{g_s} - \mathbf{k}_g$ ,  $\mathbf{k}_{b_s}$  и  $\mathbf{k}_{g_s}$  — волновые векторы синего и зеленого рассеянных пучков,  $\mathbf{k}_b$  и  $\mathbf{k}_g$  — волновые векторы синего

и зеленого световых полей, формирующих встречно направленные и пространственно совмещенные „лазерные ножи“,  $\beta = k_b/k_g$ .

Действительно, сечение исследуемой среды, освещенное световым полем с волновым вектором  $\mathbf{k}_b$ , отображается на выходе оптического процессора как совокупность изображений рассеивающих оптических неоднородностей  $\varphi(\xi, \eta)\delta(x - \xi, y - \eta)$ , где  $\xi, \eta$  — координаты оптических неоднородностей в плоскости сечения  $(x, y)$ . Следовательно, частотно-демодулированное изображение сечения, выделенного синим „лазерным ножом“, можно описать выражением

$$\omega_{D1}(x, y) = \gamma \iint \mathbf{K}_b \mathbf{v}(\xi, \eta) \varphi(\xi, \eta) \delta(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta = \gamma \mathbf{K}_b \mathbf{v}(x, y) \varphi(x, y).$$

Здесь интегрирование выполняется по всему выделенному сечению;  $\omega_{D1}(x, y)$  — доплеровский сдвиг частоты в синем свете, формирующем точку  $(x, y)$  изображения на выходе оптического процессора;  $\mathbf{v}(x, y)$  — вектор скорости потока в точке  $(x, y)$ ;  $\gamma$  — крутизна частотной дискриминационной характеристики процессора. Множитель  $\varphi(x, y)$  соответствует функции рассеяния в направлении  $\mathbf{K}_{bs}$ , которая описывает исходное изображение исследуемого сечения, не подвергнутое частотной демодуляции. Тогда

$$\tilde{\omega}_{Db}(x, y) = \frac{\omega_{D1}(x, y)}{\gamma \varphi(x, y)} = \mathbf{K}_b \mathbf{v}(x, y)$$

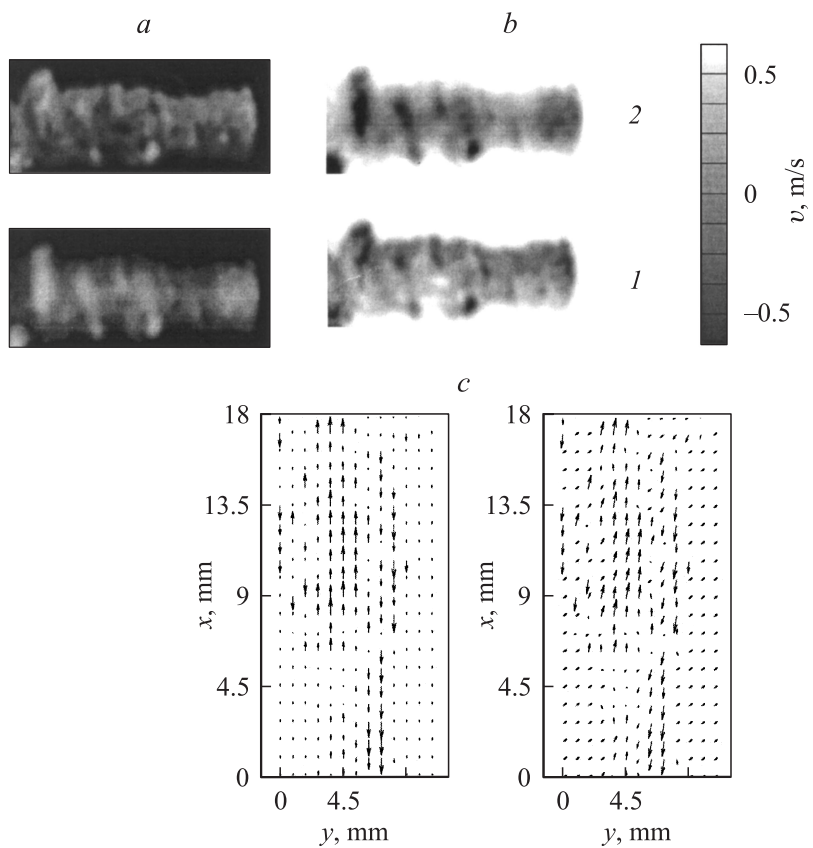
дает распределение относительной интенсивности демодулированного по частоте изображения. Отсюда видно, что  $\tilde{\omega}_{Db}(x, y)$  однозначно отображает поле компоненты скорости в направлении  $\mathbf{K}_b$ :

$$v_b(x, y) = \frac{1}{K_b} \mathbf{v}(x, y) \mathbf{K}_b. \quad (1)$$

По аналогии для поля компоненты скорости в направлении вектора чувствительности  $\mathbf{K}_g$ , формируемого в зеленой области спектра излучения лазера, получаем

$$v_g(x, y) = \frac{1}{K_g} \mathbf{v}(x, y) \mathbf{K}_g. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) описывают поля скоростей хроматически селективных компонент вектора скорости в ортогональном координатном базисе, сформированном векторами чувствительности  $\mathbf{K}_b$  и  $\mathbf{K}_g$ .



**Рис. 2.** *a* — поле скоростей закрученного водного потока в ортогональном координатном базисе  $(\mathbf{K}_b, \mathbf{K}_g)$ ; *b* — поле скоростей в ортогональном координатном базисе  $(\mathbf{K}_x, \mathbf{K}_z)$ ; *c* — стереоскопическая реконструкция поля  $2D$  векторов скорости. *1* — зеленый канал, *2* — синий канал.

Для перехода к  $2D$  координатному базису, ось  $x$  в котором лежит в плоскости лазерного ножа, а ось  $z$  ортогональна ему, достаточно выполнить линейные операции над изображениями  $v_b(x, y)$  и  $v_g(x, y)$ .

Сумма выражений (1) и (2) дает

$$v_b(x, y) + v_g(x, y) = \mathbf{v}(x, y) \left( \frac{\mathbf{K}_b}{K_b} - \frac{\mathbf{K}_g}{K_g} \right) = \mathbf{v}(x, y) \frac{\mathbf{K}_x}{K_x} = v_x(x, y); \quad (3)$$

$$v_b(x, y) + v_g(x, y) = \mathbf{v}(x, y) \left( \frac{\mathbf{K}_b}{K_b} + \frac{\mathbf{K}_g}{K_g} \right) = \mathbf{v}(x, y) \frac{\mathbf{K}_z}{K_z} = v_z(x, y). \quad (4)$$

На рис. 2, *a* показан пример визуализированного поля  $2D$  вектора скорости в ортогональном координатном базисе  $(\mathbf{K}_x, \mathbf{K}_y)$ . Рис. 2, *b* представляет  $2D$  поле скорости закрученного потока в координатном базисе  $(\mathbf{K}_x, \mathbf{K}_z)$ . На рис. 2, *c* показано реконструированное  $2D$  поле скорости в стереоскопической проекции. Для его рассмотрения необходимо глаза аккомодировать на бесконечность.

Для визуализации поля скоростей с хроматической селекцией компонент вектора скорости в трехмерном ортогональном координатном базисе достаточно сформировать в исследуемом сечении потока третью световую плоскость с использованием, например, лазерного излучения в красной спектральной области. Волновой вектор  $\mathbf{k}_r$  светового поля, формирующего красный „лазерный нож“, должен быть ортогонален волновым векторам синего ( $\mathbf{k}_b$ ) и зеленого ( $\mathbf{k}_g$ ) лазерных ножей. Как и в описанном выше методе, осуществляется  $RGB$  разделение сигналов и их дальнейшее преобразование.

Разработанный метод впервые позволяет визуализировать динамические поля векторов скоростей потоков в ортогональном координатном базисе, существенно расширяя возможности оптической диагностики в экспериментальной гидро- и газодинамике, а также в промышленных технологиях, связанных с необходимостью невозмущающих измерений и контроля потоков газовых и конденсированных сред.

Работа выполнена при поддержке INTAS (проект 00–135).

## Список литературы

- [1] Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. 304 с.
- [2] Puvost J., Legrand J., Legentilhomme P., Doubliez L. // Experiments in Fluids. 2000. V. 29. P. 291–301.
- [3] Belousov P.Ya., Dubnischev Yu.N., Palchikova I.G. // Optica I Spectroscopia. 1982. V. 52. N 5. P. 876.

- [4] *Turner J.T.* // Proc. of the 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. of Fluid Dynamic Measurement and its Application. Beijing, China: Intern. Academic Publishers, 1994. P. 551.
- [5] *Белоусов П.П., Белоусов П.Я., Дубнищев Ю.Н.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 29. В. 16. С. 6–11.
- [6] *Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н., Лебедев А.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 23. С. 84–90.
- [7] *Belousov P.P., Belousov P.Ya., Dubnishchev Yu.N.* // Optoelectronics, Instrumentation, and Data Processing. 2001. N 5. P. 1–8.