

Лазерный метод измерения трехмерного вектора скорости

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

Обсуждается лазерный метод трехмерных измерений вектора скорости с трехпучковой конфигурацией зондирующего поля, формирующего трехмерный ортогональный координатный базис. Метод реализован в виде действующего макета измерительной системы с временной селекцией компонент вектора скорости и экспериментально опробован при исследовании закрученного потока.

Ключевые слова: измерение скорости, трехмерный метод, лазерный анемометр.

Введение

В современных лазерных трехмерных измерительных технологиях одной из важнейших является проблема измерения полного вектора скорости. Она возникает, например, в лазерной диагностике потоков газовых и конденсированных сред [1, 2] и является актуальной как в научных исследованиях, так и в различных сферах промышленного производства, связанных с необходимостью невозмущающего контроля кинематических параметров.

Известные способы селекции вектора скорости (см., напр., [3]) сводятся к построению многоканальной оптической измерительной системы, в каждом канале которой формируется зондирующее поле с вектором чувствительности \mathbf{K}_i , задающим направление одной из осей ортогонального координатного базиса:

$$\mathbf{V} = \sum_{i=1}^3 V_i = \sum_{i=1}^3 \frac{V \mathbf{K}_i}{K_i}.$$

Вектором чувствительности \mathbf{K}_i является вектор амплитудной или фазовой периодической структуры (решетки), сформированной в зондирующем поле. Модуль вектора K_i обратно пропорционален пространственному периоду Λ : $K_i = 2\pi/\Lambda$. Отсюда доплеровский сдвиг частоты в свете, рассеянном движущейся оптической неоднородностью, определяется проекцией вектора скорости \mathbf{V} на вектор \mathbf{K}_i :

$$\omega_{Di} = V \mathbf{K}_i = 2\pi \frac{V_i}{\Lambda_i}, \quad (1)$$

где $V_i = V \cos \varphi_i$; φ_i – угол между \mathbf{V} и \mathbf{K}_i . Выделяя и измеряя доплеровский сдвиг частоты ω_{Di} , получают i -ю компоненту скорости в направлении \mathbf{K}_i . Вектор \mathbf{K}_i задается конфигурацией световых пучков в оптической измерительной схеме.

В гетеродинных схемах лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) вектор чувствительности определяется

разностью волновых векторов падающего (\mathbf{k}_i) и рассеянного (\mathbf{k}_s) пучков:

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i. \quad (2)$$

В дифференциальных схемах вектор чувствительности оказывается равным разности волновых векторов лазерных пучков, формирующих зондирующее интерференционное поле:

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2. \quad (3)$$

В схемах ЛДА с фотосмещением боковых полос фурье-спектра оптического сигнала вектор чувствительности определяется разностью волновых векторов рассеянных пучков:

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_{s1} - \mathbf{k}_{s2}. \quad (4)$$

Проблема измерения трехмерного вектора скорости сводится к формированию в зондирующем поле векторов чувствительности \mathbf{K}_i ($i = 1, 2, 3$), адекватных ортогональному координатному базису, селекции оптических сигналов, выделению и измерению доплеровских сдвигов частоты ω_{Di} , связанных с соответствующими компонентами вектора скорости V_i известными зависимостями, следующими из (1) [4]:

$$V_i = \frac{1}{2\pi} \omega_{Di} \Lambda_i. \quad (5)$$

Мультиплицирование оптических каналов в известных способах селекции трехмерного вектора скорости усложняет измерительную систему, снижает ее надежность и ограничивает функциональные возможности, затрудняя, в частности, измерения в дисперсионных средах, в пространственно ограниченных потоках, пристенных областях и т. д. Это является следствием увеличения числа лазерных пучков, формирующих зондирующее поле (в известных системах – пять пучков, сформированных в телесном угле ~ 0.5 ср). Обычно применяемая хроматическая селекция оптических сигналов крайне усложняет либо делает невозможными измерения в дисперсионных средах.

Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. акад. Лаврентьева, 1

Поступила в редакцию 29 мая 2000 г.

Другая проблема заключается в повышении чувствительности измерений, которая, как это следует из (1), пропорциональна модулю вектора чувствительности K_i . Очевидный путь ее увеличения состоит в поиске конфигураций зондирующего поля с максимальным K_i . В известных способах возможность двумерных и трехмерных измерений скорости сопровождается снижением чувствительности [3].

В [5] описаны новые методы селекции вектора скорости в ортогональном координатном базисе, основанные на линейных суммарно-разностных преобразованиях векторов чувствительности. Отличительная особенность их состоит в возможности измерения трехмерного вектора скорости в конфигурациях с меньшим числом зондирующих лазерных пучков и в повышении чувствительности измерений. Например, для селекции трехмерного вектора скорости достаточно трехпучковой конфигурации, которую обычно используют для формирования зондирующего поля в двумерных измерительных технологиях. В настоящей работе обсуждается реализация лазерной измерительной системы с адаптивной темпоральной селекцией полного вектора скорости в ортогональном координатном базисе, сформированном в трехпучковой конфигурации зондирующего поля.

1. Описание метода

На рис.1 представлена функциональная схема измерительной системы. Ортогональный координатный базис образован векторами чувствительности K_x , K_y и K_z , сформированных в трехпучковой геометрии:

$$\begin{aligned} K_x &= k_2 - k_1, \\ K_y &= k_3 - k_1, \\ K_z &= k_4 - k_1, \end{aligned} \quad (6)$$

где k_1 , k_2 и k_3 – волновые векторы падающих пучков; k_4 – вектор выделенного рассеянного пучка. Для обеспечения трехмерных измерений конфигурация лазерных пучков в пространстве волновых векторов должна удовлетворять условиям

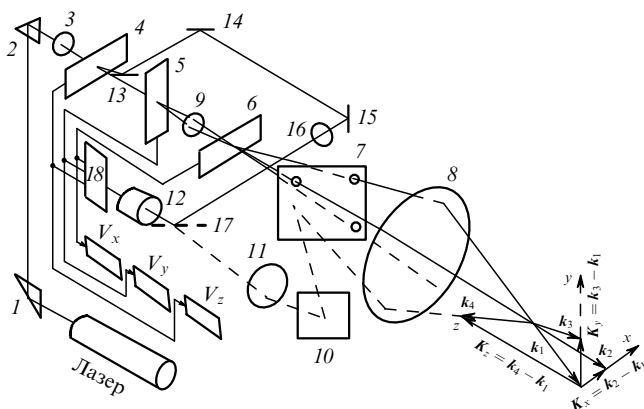


Рис.1. Функциональная схема лазерного доплеровского измерителя трехмерного вектора скорости:

1, 2 – поворотные призмы; 3 – линза; 4–6 – акустооптические модуляторы бегущей волны; 7 – зеркало с диафрагмами; 8 – объектив; 9 – согласующий объектив; 10 – поворотное зеркало; 11 – микрообъектив; 12 – фотоприемник; 13–15 – зеркала; 16 – согласующий объектив; 17 – полупрозрачное зеркало; 18 – коммутационный процессор.

$$(k_2 - k_1)^2 + (k_3 - k_1)^2 = (k_3 - k_2)^2,$$

$$(k_4 - k_1)^2 + (k_3 - k_1)^2 = (k_4 - k_3)^2,$$

$$(k_4 - k_1)^2 + (k_2 - k_1)^2 = (k_4 - k_2)^2$$

или

$$K_x^2 + K_y^2 = (K_y - K_x)^2,$$

$$K_z^2 + K_y^2 = (K_z - K_y)^2,$$

$$K_z^2 + K_x^2 = (K_z - K_x)^2,$$

откуда следует $K_x K_y = 0$, $K_z K_y = 0$, $K_z K_x = 0$.

Измерительное устройство содержит лазер и последовательно расположенные по ходу лазерного луча поворотные призмы 1 и 2, линзу 3 и ортогонально ориентированные акустооптические модуляторы бегущей волны 4–6, зеркало 7 с диафрагмами и объектив 8. Между акустооптическими модуляторами 5 и 6 помещен согласующий объектив 9. На пути рассеянного пучка, ограниченного апертурой объектива 8 и отраженного зеркалом 7, последовательно установлены поворотное зеркало 10, микрообъектив 11 и фотоприемник 12.

Направления распространения ультразвуковых волн в модуляторах 5 и 6 соответствуют ориентациям измеряемых компонент вектора скорости V_x и V_y . Режим работы модуляторов – брэгговский, диафрагмы в зеркале 7 ограничивают дифрагировавшие световые пучки. Дифрагировавший в первый порядок световой пучок на выходе модулятора 4 отклоняется последовательно зеркал 13–15 и после прохождения согласующего объектива 16 направляется полупрозрачным зеркалом 17 на фотоприемник 12.

К фотоприемнику подключен коммутационный процессор 18, содержащий логический коммутатор, к выходу которого попарно подсоединены измерители скоростей V_x , V_y , V_z и соответствующие акустооптические модуляторы 4–6.

Действие трехмерного измерительного устройства основано на временной селекции ортогональных компонент вектора скорости. В отличие от лазерного анемометра с адаптивной временной селекцией и визуализацией двумерного вектора скорости, описанного в [6], в трехмерный измеритель введен канал, измеряющий z-компоненту скорости в заданном координатном базисе.

Луч лазера после прохождения оптических элементов 1–4 направляется на акустооптический модулятор 5, бегущая ультразвуковая волна в котором ориентирована параллельно оси y . Под действием управляющего напряжения с частотой Ω на выходе модулятора формируются два пучка, дифрагировавшие в нулевой и минус первый порядки. Расщепленные пучки проходят последовательно через согласующий объектив 9, модулятор 6 и диафрагмы в зеркале 7, после чего объективом 8 направляются в исследуемую область потока.

Пересекаясь в потоке, пучки с волновыми векторами k_1 и k_3 образуют интерференционное поле с вектором решетки K_y (6). Изображение этого интерференционного поля в свете, рассеянном движущимися в потоке частицами, формируется последовательно оптических элементов 7, 8, 10, 11 на светочувствительной поверхно-

сти фотоприемника 12. При пересечении рассеивающей частицей зондирующего оптического поля на выходе фотоприемника появляется радиоимпульс фототока, частота несущей которого есть известная линейная функция доплеровского сдвига частоты:

$$\omega_y = \Omega + \omega_{Dy} = \Omega + \mathbf{VK}_y,$$

а длительность равна времени прохождения рассеивателя через интерференционное поле. Коммутационный процессор 18 направляет выходной сигнал на измеритель V_y -компоненты скорости.

По окончании одного или заданного числа (N) радиоимпульсов фотоэлектрического сигнала коммутационный процессор выключает модулятор 5 и активизирует модулятор 6, синхронно подавая выходной сигнал на измеритель компоненты скорости V_x . Бегущая ультразвуковая волна в модуляторе 6 ориентирована параллельно оси x в координатном измерительном базисе. Эта ось задается вектором решетки K_x , формируемой при интерференции лазерных пучков с волновыми векторами k_1 и k_2 , дифрагировавших на ультразвуковой волне в модуляторе 6.

При движении рассеивающей частицы в зондирующем поле появляется радиоимпульс фототока на выходе фотоприемника, частота которого является известной линейной функцией доплеровского сдвига частоты ω_{Dx} :

$$\omega_x = \Omega + \omega_{Dx} = \Omega + \mathbf{VK}_x,$$

По окончании одного или заданного числа (N) радиоимпульсов коммутационный процессор переключает оптическую и электронную системы в режим измерения z -проекции скорости V_z , активизируя акустооптический модулятор 4 и измеритель скорости V_z . При этом зондирующее поле формируется лазерным пучком с волновым вектором k_1 .

Световой пучок с волновым вектором k_4 , рассеянный движущейся в зондирующем поле частицей, является сигнальным и направляется последовательностью оптических элементов 7, 8, 10, 11 на светочувствительную поверхность фотоприемника. На полупрозрачном зеркале 17 происходит пространственное совмещение сигнального и опорного пучков. Опорный пучок образуется в результате дифракции в первый порядок на ультразвуковой волне в модуляторе 4 и последовательностью элементов 13–17 направляется на светочувствительную поверхность фотоприемника 12. Фотоэлектрический сигнал, получающийся в результате оптического смещения сигнального и опорного пучков, представляет собой радиоимпульс, частота которого является известной линейной функцией z -компоненты скорости:

$$\omega_z = \Omega + \omega_{Dz} = \Omega + \mathbf{VK}_z.$$

Измерение ω_z дает информацию о z -проекции скорости.

По окончании одного или заданного числа (N) радиоимпульсов коммутационный процессор переключает оптические и электронные измерительные каналы, повторяя цикл измерений. Коммутация оптических каналов осуществляется в тот момент времени, когда доплеровский сигнал отсутствует, поэтому коммутационные помехи не возникают. Частота выборки информации определяется частотой коммутации каналов f_c . При уменьшении N частота выборки для каждой компоненты ско-

рости увеличивается, достигая максимума при $N = 1$.

Частота коммутации определяется динамикой исследуемого процесса и концентрацией рассеивающих частиц. Для частот в спектре исследуемого процесса, не превышающих $(1/6)f_c$, в модели регулярной выборки измерение компонент вектора скорости можно считать одновременным. Для случайной выборки эта граничная частота оценивается как $0.1f_c$. При этом достигается больший по сравнению с известными системами выигрыш в энергетической чувствительности, что повышает отношение сигнал/шум и, соответственно, точность, поскольку для измерения каждой компоненты вектора скорости используется вся мощность излучения лазера.

При измерении скорости исследуемый процесс дискретизируется движущимися рассеивающими частицами. Время, за которое усредняется (накапливается) результат измерения компонент вектора скорости, определяется временем прохождения частицы через зондирующее поле, формируемое при активации соответствующего измерительного канала. В этой ситуации мощность зондирующего светового поля в режиме разделения времени оказывается втрое большей, чем при одновременных измерениях в трех каналах, чем обеспечивается выигрыш в отношении сигнал/шум (например, в случае дробового шума отношение сигнал/шум увеличивается в $\sqrt{3}$), растет энергетическая чувствительность и улучшаются точностные характеристики.

Поскольку при обратном рассеянии интенсивность светового сигнала на 2–3 порядка ниже, чем в случае рассеяния вперед, возможность повышения отношения сигнал/шум имеет определяющее значение для улучшения функциональных и точностных характеристик измерителя. Коммутация измерительных каналов происходит в момент отсутствия сигнала, во временном интервале между окончанием сигнала от одной частицы и началом сигнала от следующей за ней. Таким образом, радиоимпульсный сигнал, формируемый при прохождении частицы через зондирующее поле, при коммутации каналов не стробируется. Время накопления остается равным длительности радиоимпульса, а коммутационные помехи при этом не возникают.

Диапазон размеров рассеивающих частиц в лазерной доплеровской анемометрии обычно соответствует условиям рассеяния Ми. Индикатриса рассеяния на макрочастицах сильно изрезана. Рассеянный свет при измерениях фильтруется в полосе углового спектра, соответствующей в среднем одному дифракционному порядку. Если же телесный угол, ограничивающий рассеянный пучок, захватывает несколько дифракционных максимумов, происходит подавление полезного сигнала из-за фазового рассогласования световых полей. Это означает, что полоса углового спектра, в которой фильтруется рассеянное световое поле в измерительных x - и y -каналах, существенно не отличается от полосы, полученной при измерении V_z -компоненты скорости. Кроме того, в канале измерения z -компоненты амплитуда переменной составляющей фотоэлектрического сигнала увеличивается за счет гетеродинного преобразования соответствующего рассеянного светового пучка.

2. Экспериментальные результаты

Выполнялись измерения трехмерного вектора скорости в закрученном водном потоке в кювете квадратного

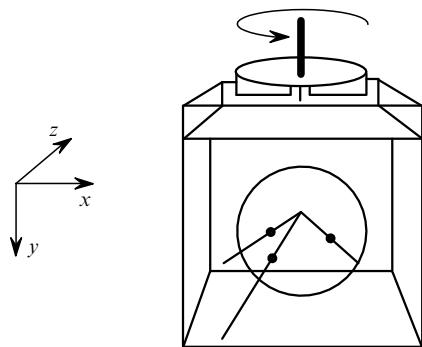


Рис.2. Кювета с закрученным потоком.

сечения (рис.2) с размерами 12 × 12 × 13 см. Поток индуцировался вращающимся над поверхностью воды диском. Ось y ортогонального координатного базиса, сформированного в зондирующем поле, ориентировалась параллельно оси вращения.

На рис.3 показаны примеры доплеровских сигналов и соответствующих аналоговых сигналов, пропорциональных V_x -, V_y - и V_z -компонентам трехмерного вектора скорости.

Реконструкция трехмерного вектора скорости в двух различных точках закрученного потока, находящихся по радиусу на расстояниях 17.5 и 31.5 мм от оси потока и на расстоянии 86 мм от дна кюветы, показана в стереоскопической проекции на рис.4. Для стереоскопического восприятия рис.4 надо рассматривать с аккомодацией глаз на бесконечность.

Приведенные примеры показывают возможность лазерной технологии измерения трехмерного вектора скорости с трехлучевой конфигурацией зондирующего оптического поля и ее практического применения для исследования закрученных потоков.

Заключение

Рассмотренный лазерный метод измерений полного вектора скорости в ортогональном координатном базисе

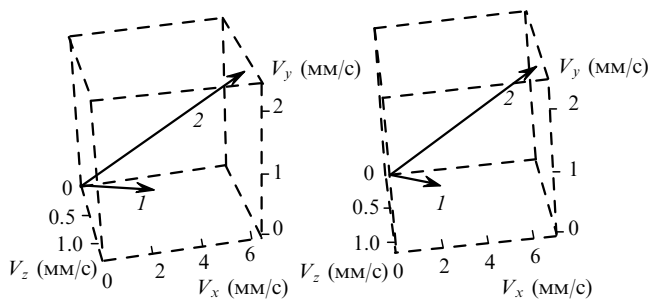


Рис.4. Стереоскопическая проекция трехмерных векторов скорости, измеренных в разнесенных по радиусу точках закрученного потока в кювете, на расстояниях 17.5 (1) и 31.5 мм (2) от оси потока и 86 мм от дна потока.

с трехлучевой конфигурацией зондирующего поля, реализованный в виде действующего макета лазерного анемометра с временной селекцией трехмерного вектора скорости, обладает высокой энергетической чувствительностью, которая достигается за счет использования для измерения каждой компоненты вектора скорости всей мощности лазерного излучения при адаптивной или принудительной коммутации измерительных каналов. Этот метод может найти применение в научных исследованиях и промышленных технологиях, связанных с необходимостью невозмущающих измерений кинематических параметров газовых и конденсированных сред.

Авторы выражают благодарность В.Г.Меледину, И.В.Наумову и В.А.Павлову за помощь в работе. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 99-02-16702).

1. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. *Методы лазерной доплеровской анемометрии* (М., Наука, 1982).
2. Ринкевичюс Б.С. *Лазерная диагностика потоков* (М., изд-во МЭИ, 1990).
3. Buchave P. *Three-component LDA measurements* (DISA Information, 1983, v.1, № 3).
4. Дубнищев Ю.Н. *Квантовая электроника*, 22, 1262 (1990).
5. Дубнищев Ю.Н. *Автометрия*, № 2, 12 (1996).
6. Belousov P.Ya., Dubnischev Yu.N., Meledin V.G. et al. *Optica Applicata*, 20, 187 (1990).

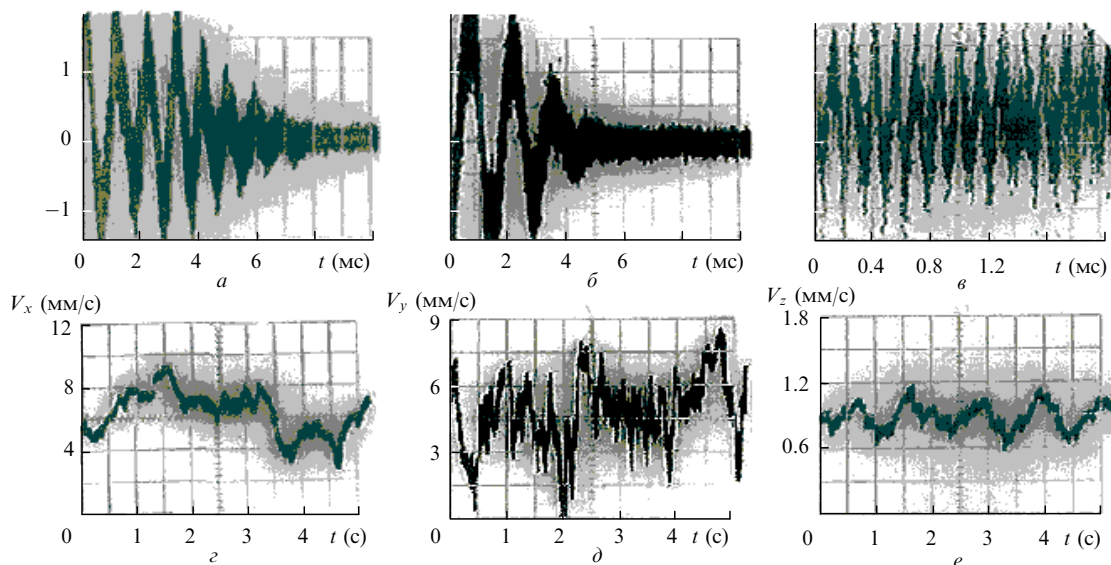


Рис.3. Доплеровские (а-в) и аналоговые (г-е) сигналы, соответствующие V_x - (а, г), V_y - (б, д), V_z -компонентам (в, е) трехмерного вектора скорости.