

УДК 535.8 : 621.378

Ю. Н. Дубнищев

*(Новосибирск)***МЕТОДЫ СЕЛЕКЦИИ ВЕКТОРА СКОРОСТИ
В ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ***

Предложены новые конфигурации оптических измерительных схем лазерной доплеровской анемометрии, позволяющие селективировать компоненты вектора скорости в ортогональном координатном базисе. При этом достигается минимизация числа измерительных каналов, компактность исполнения и повышение чувствительности.

Введение. В лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) [1] одной из важнейших является проблема измерения вектора скорости. Как известно, действие лазерного анемометра заключается в формировании в исследуемой среде когерентного зондирующего поля; выделении света, рассеянного движущимися оптически неоднородностями; квадратичном фотоэлектрическом преобразовании оптического сигнала; селекции и измерении частоты электрического сигнала, являющейся известной линейной функцией доплеровского частотного сдвига ω_D , который определяется проекцией вектора скорости v на так называемый вектор чувствительности K :

$$\omega_D = vK. \quad (1)$$

Вектор K задается конфигурацией световых пучков в оптической измерительной схеме. В координатном пространстве K соответствует вектору амплитудной или фазовой решетки в структуре зондирующего поля. Любая сколь угодно сложная система ЛДА представляет собой комбинацию одной или нескольких базовых оптических схем, отличие которых заключается в способе формирования вектора чувствительности K (1). В гетеродинной схеме лазерного доплеровского анемометра вектор чувствительности равен разности волновых векторов падающего k и рассеянного k_s пучков:

$$K = k_s - k. \quad (2)$$

Особенностью второй базовой схемы ЛДА — дифференциальной — является формирование вектора чувствительности как разности волновых векторов k_1 и k_2 двух лазерных пучков, образующих зондирующее поле в области их пересечения:

$$K = k_1 - k_2. \quad (3)$$

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 96-02-19246а).

Третья базовая оптическая конфигурация — инверсно-дифференциальная. Она определяется как схема ЛДА с фотосмещением боковых полос фурье-спектра оптического сигнала. В этой конфигурации вектор чувствительности равен разности волновых векторов k_{s1} и k_{s2} рассеянных пучков, выделенных в заданных разнесенных полосах углового спектра:

$$K = k_{s1} - k_{s2}. \quad (4)$$

Все известные способы селекции $2D$ и $3D$ вектора скорости (D — "dimension" — размерность) традиционно сводятся к образованию многоканальной оптической системы, в каждом измерительном канале которой формируется вектор чувствительности, задающий направление одной из осей ортогонального координатного базиса. Например, лазерные анемометры, выпускаемые фирмами DANTEC и THERMOSYSTEMS, основаны на пятилучевой конфигурации зондирующих лучей, ограниченной в телесном угле $\sim \pi/2$, и содержат три измерительных канала [2]. Мультиплицирование оптических измерительных каналов усложняет систему, снижает надежность и ограничивает функциональные возможности, затрудняя, в частности, измерения в пространственно ограниченных потоках, пристенных областях и т. п. Исключение составляет лазерная доплеровская анемометрия с адаптивной временной [3] и пространственно-временной [4] селекцией вектора скорости. Однако возможности применения этих методов ограничиваются соотношением частоты коммутации измерительных каналов, определяющей частоту выборки информации, с высокочастотной границей спектра исследуемого процесса. Другая проблема заключается в повышении чувствительности измерений, которая, как следует из (1), пропорциональна модулю вектора чувствительности. Очевидный путь ее повышения состоит в поиске конфигураций оптической измерительной схемы с максимальным $|K|$. На практике возможность измерения двух и трех компонент вектора скорости сопровождается снижением чувствительности измерений [1, 5].

Обсуждению возможности селекции $2D$ и $3D$ вектора скорости методами, свободными от недостатков традиционных решений, посвящена настоящая работа.

Оптические конфигурации измерительных схем для измерения $2D$ и $3D$ вектора скорости. На рис. 1 показана конфигурация оптической измерительной схемы в пространстве волновых векторов, представляющая собой

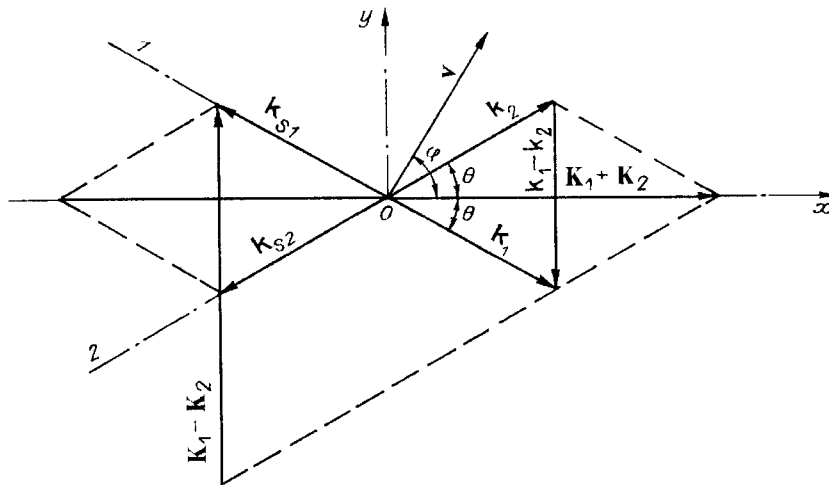


Рис. 1. Конфигурация оптической гетеродинной схемы ЛДА в k -пространстве для селекции $2D$ вектора скорости ($K_1 = k_{s1} - k_1$; $K_2 = k_{s2} - k_2$)

комбинацию двух гетеродинных схем. В каждой из них направления селективных рассеянного и зондирующего пучков противоположны:

$$k_{s_i} + k_i = 0.$$

Здесь k_{s_i} , k_i — волновые векторы рассеянного и падающего пучков в i -м измерительном канале, образованном соответствующей гетеродинной схемой. Для доплеровских сдвигов частоты, выделенных в первом ($i = 1$) и втором ($i = 2$) измерительных каналах, согласно (1), имеем

$$\omega_{D_i} = vK_i, \quad (5)$$

где $K_i = k_{s_i} - k_i$.

Разность частот на выходе первого и второго измерительных каналов

$$\omega_{D_y} = v(K_1 - K_2). \quad (6)$$

Отсюда следует, что разностная частота $\omega_{D_{21}}$ пропорциональна проекции скорости на разностный волновой вектор $K_1 - K_2$, ортогональный биссектрисе угла между падающими пучками и параллельный оптической оси y .

Поскольку скорость рассеивающих частиц много меньше скорости света, модули волновых векторов падающих и рассеянных световых пучков с большой точностью можно принять одинаковыми: $|k_{s_i}| = |k_i| = k$. В случае параллельности векторов $(k_{s_1} - k_{s_2})$ и $(k_1 - k_2)$, а также при условии $|k_{s_1} - k_{s_2}| = |k_1 - k_2|$ скалярная форма выражения (6) следует из рис. 1:

$$\omega_{D_y} = 4v_y k \sin \Theta. \quad (7)$$

Здесь $4k \sin \Theta$ — модуль разностного вектора $K_1 - K_2$; $v_y = v \sin \varphi$; 2Θ — угол между волновыми векторами k_1 и k_2 зондирующих лучей; φ — угол между вектором скорости v и биссектрисой угла 2Θ .

Для суммы доплеровских сдвигов частоты, выделенных в первом и втором каналах, имеем

$$\omega_x = \omega_{D_1} + \omega_{D_2} = v(K_1 + K_2), \quad (8)$$

т. е. суммарная частота ω_x пропорциональна проекции вектора скорости на сумму векторов чувствительности $K_1 + K_2$. В скалярной форме

$$\omega_x = 4v_x k \cos \Theta, \quad (9)$$

где $v_x = v \cos \varphi$, $|K_1 + K_2| = 4k \cos \Theta$.

Из рис. 1 видно, что вектор $K_1 + K_2$ направлен вдоль биссектрисы угла 2Θ и соответственно оси x . Взаимная ортогональность разности и суммы векторов чувствительности $K_1 - K_2$ и $K_1 + K_2$ означает равенство нулю скалярного произведения:

$$(K_1 - K_2)(K_1 + K_2) = 0.$$

Откуда

$$|K_1| = |K_2|.$$

Следовательно, необходимым условием для ортогональности векторов $(K_1 - K_2)$ и $(K_1 + K_2)$ является равенство модулей векторов чувствительности $|K_1|$ и $|K_2|$. С ортогональными векторами $(k_1 - k_2)$ и $(k_1 + k_2)$ сопоставляются соответствующие координатные оси $0y$ и $0x$. Таким образом, измеряя разностную и суммарную частоты на выходах первого и второго гетеродинных измерительных каналов, получаем информацию об ортогональных компонентах v_x и v_y вектора скорости v .

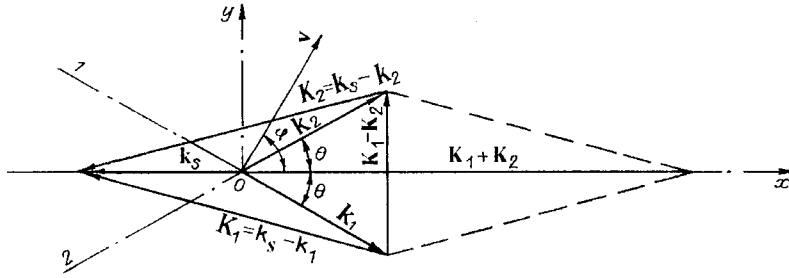


Рис. 2. Конфигурация оптической дифференциальной схемы ЛДА в k -пространстве для селекции 2D вектора скорости ($K_1 = k_S - k_1$; $K_2 = k_S - k_2$)

На рис. 2 представлена гибридная конфигурация из дифференциальной и гетеродинной оптических схем в k -пространстве, предназначенная для измерения двух ортогональных компонент вектора скорости. Лазерные лучи с волновыми векторами k_1 и k_2 и известными частотными сдвигами Ω_1 и Ω_2 направляются в исследуемую область потока. Частотные сдвиги задаются, например, с помощью однополосных частотных оптических модуляторов. Свет, селектированный в направлении биссектрисы угла между волновыми векторами k_1 и k_2 , является суперпозицией двух пучков, имеющих волновой вектор k_S и рассеянных движущейся частицей в зондирующем поле соответственно от первого ($i = 1$) и второго ($i = 2$) падающих лазерных лучей. Для частотных сдвигов в этих рассеянных пучках, согласно (1), получаем

$$\omega_i = \Omega_i + vK_i,$$

где $K_i = k_S - k_i$. Выполним квадратичное фотосмещение селектированного рассеянного света с референтным пучком, имеющим для определенности несмещенную частоту. В результирующем фотоэлектрическом сигнале появляются составляющие с частотами ω_i , а также комбинационная компонента с разностной частотой ω_{12} . Электрические сигналы с частотами ω_1, ω_2 выделяются путем полосовой фильтрации и подвергаются квадратичному преобразованию. В результате образуются и селектируются комбинационные компоненты с суммарной и разностной частотами:

$$\omega_x = \omega_1 + \omega_2 = \Omega_1 + \Omega_2 + \omega_{Dx};$$

$$\omega_y = \omega_1 - \omega_2 = \Omega_1 - \Omega_2 + \omega_{Dy}.$$

Здесь $\omega_{Dx} = v(K_1 + K_2)$; $\omega_{Dy} = v(K_1 - K_2)$.

Частота ω_x является известной линейной функцией проекции вектора скорости v на вектор, равный сумме векторов чувствительности K_1 и K_2 и задающий направление координатной оси $0x$. Скалярная форма этой зависимости имеет вид

$$\omega_{Dx} = |v| |K_1 + K_2| \cos\varphi = 4v_x k \cos^2 \frac{\Theta}{2}. \quad (10)$$

Здесь 2Θ — угол между волновыми векторами k_1 и k_2 зондирующих лучей; φ — угол между вектором скорости v и вектором $K_1 + K_2$.

Частота ω_{Dy} пропорциональна проекции вектора скорости на направление вектора $K_1 - K_2$, являющегося разностью векторов чувствительности K_1 и K_2

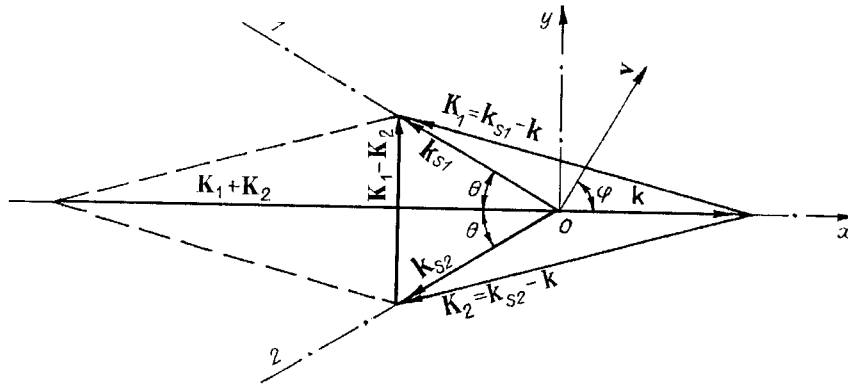


Рис. 3. Конфигурация оптической инверсно-дифференциальной схемы ЛДА в k -пространстве для селекции $2D$ вектора скорости ($K_1 = k_{s1} - k$; $K_2 = k_{s2} - k$)

и задающего направление координатной оси Ox . Скалярная форма записи для частоты

$$\omega_{Dy} = 2kv_y \sin\Theta, \quad (11)$$

где $v_y = v \sin\varphi$.

Таким образом, двухлучевая конфигурация, состоящая из дифференциальной и гетеродинной схем, обеспечивает возможность измерения двух ортогональных компонент вектора скорости.

На рис. 3 показана конфигурация световых пучков в пространстве волновых векторов, соответствующая комбинации инверсно-дифференциальной и гетеродинной оптических схем. В исследуемую область потока направляется зондирующий лазерный луч с волновым вектором k . Под углами $\pm(180^\circ - \Theta)$ к направлению зондирующего луча и компланарно к нему селектируются рассеянные световые пучки с волновыми векторами k_{s1} , k_{s2} . Частоты выделенных рассеянных пучков содержат доплеровские сдвиги, описываемые выражением (5), где $i = 1, 2$, $K_i = k_{si} - k$, K_1 и K_2 — векторы чувствительности; k_{s1} и k_{s2} — волновые векторы выделенных рассеянных пучков; k — волновой вектор зондирующего лазерного луча. Далее осуществляется квадратичное фотосмещение каждого из выделенных рассеянных пучков с референтным, в который введены известные частотные сдвиги Ω_1 и Ω_2 . В результате выделяются электрические сигналы с частотами:

$$\omega_{10} = \Omega_1 - \omega_1 = \Omega_1 - vK_1,$$

$$\omega_{20} = \Omega_2 - \omega_2 = \Omega_2 - vK_2.$$

После перемножения этих электрических сигналов селектируются компоненты с суммарной ω_x и разностной ω_y частотами:

$$\omega_x = \omega_{10} + \omega_{20} = \Omega_1 + \Omega_2 - \omega_{Dx},$$

$$\omega_y = \omega_{10} - \omega_{20} = \Omega_1 - \Omega_2 - \omega_{Dy},$$

где $\omega_{Dx} = v(K_1 + K_2)$, $\omega_{Dy} = v(K_1 - K_2)$. Отсюда видно, что частота ω_x — известная линейная функция проекции вектора скорости v на вектор $K_1 + K_2$, задающий направление координатной оси Ox . Скалярная форма этой зависимости имеет вид, аналогичный выражению (10), в котором 2Θ — угол между волновыми векторами k_{s1} и k_{s2} . Разностная частота ω_y является известной

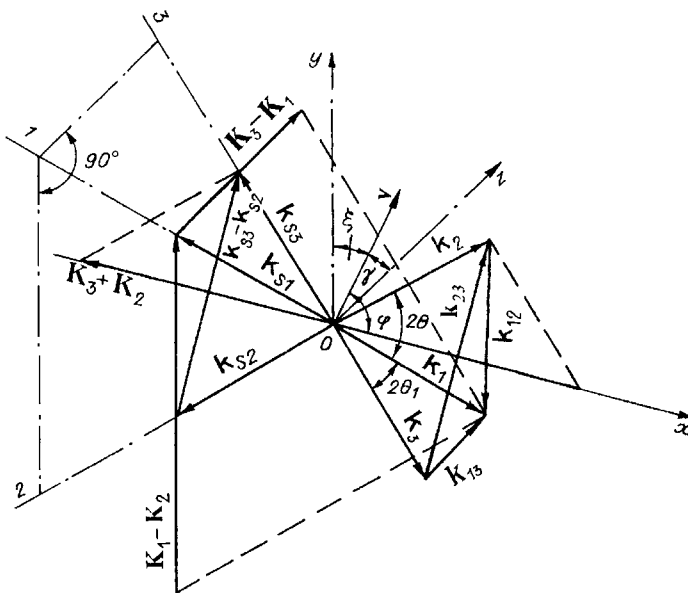


Рис. 4. Трехпучковая конфигурация ЛДА для селекции 3D вектора скорости ($K_i = k_{Si} - k_i$, $i = 1, 2, 3$)

линейной функцией проекции вектора скорости на направление вектора $K_1 - K_2$, задающего направление на координатной оси Oy .

На рис. 4 приведена трехпучковая конфигурация оптической измерительной схемы, предназначенной для измерения полного вектора скорости. Она представляет собой комбинацию двух схем, показанных на рис. 1. Волновые векторы k_1, k_2, k_3 зондирующих пучков пересекаются в исследуемой среде в точке O . Эта точка является вершиной трехгранной пирамиды, образующие ребра которой имеют длину k и совпадают с направлением волновых векторов зондирующих пучков k_1, k_2, k_3 , а основание ограничено разностными волновыми векторами $k_{12} = k_1 - k_2, k_{13} = k_1 - k_3$ и $k_{23} = k_2 - k_3$. Основание — прямоугольный треугольник, стороны которого удовлетворяют условию [1]: $|k_{12}|^2 + |k_{13}|^2 = |k_{23}|^2$. Конфигурация, образуемая падающими пучками с волновыми векторами k_1, k_2 и рассеянными пучками с волновыми векторами k_{S1} и k_{S2} , как и в случае, представленном на рис. 1, определяет компоненту скорости v_y . В первом и втором гетеродинных измерительных каналах выделяются электрические сигналы с частотами ω_{D1} и ω_{D2} , определяемыми выражением (5) для $i = 1, 2$. Разность векторов чувствительности $K_1 - K_2$ задает направление координатной оси Oy . Согласно (6), разностная частота ω_{D12} соответствует компоненте v_y .

По аналогии конфигурация, сформированная волновыми векторами k_1, k_3, k_{S1}, k_{S3} , селектирует компоненту скорости v_z . Разность частот, выделяемых в первом и третьем измерительных каналах, пропорциональна проекции вектора скорости v на ось Oz , задаваемую направлением разности векторов чувствительности K_1 и K_3 :

$$\omega_z = \omega_{D13} = \omega_{D1} - \omega_{D3} = v(K_1 - K_3).$$

Третья проекция вектора скорости v_x определяется действием измерительных каналов 2 и 3, образующих диагональную пару в трехпучковой конфигурации. В соответствии с (8) получаем для суммарной частоты

$$\omega_x = \omega_{D2} + \omega_{D3} = v(K_2 + K_3)$$

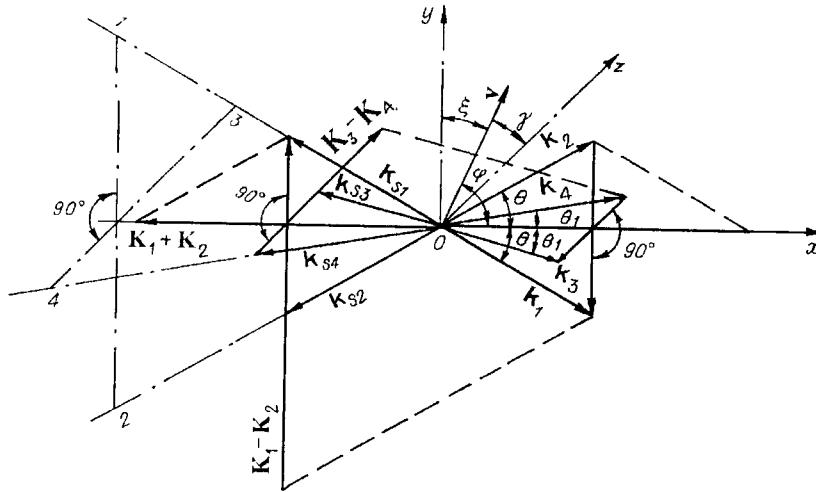


Рис. 5. Четырехпучковая конфигурация ЛДА для селекции 3D вектора скорости ($K_i = k_{Si} - k_i$, $i = 1, 2, 3, 4$)

или в скалярной форме

$$\omega_x = v_x 4k \cos \Theta_2.$$

где $2\Theta_2$ — угол между волновыми векторами k_2 и k_3 . Вектор $K_2 + K_3$ задает направление координатной оси Ox , ортогональной осям Oy и Oz .

Четырехпучковая конфигурация, предназначенная для измерения полного вектора скорости, представлена на рис. 5. Она является комбинацией двух схем, показанных на рис. 1, ориентированных в ортогональных плоскостях с совмещением биссектрис углов между волновыми векторами зондирующих пучков. Схема, образованная первым и вторым измерительными каналами, дает информацию об y - и x -компоненте.

Конфигурация, образованная третьим и четвертым измерительными каналами, определяет z - и x -компоненты вектора скорости. В процессе измерений для определения компоненты скорости v_x используется любая из конфигураций световых пучков, сформированная первым и вторым либо третьим и четвертым измерительными каналами. Аналогично образуются измерительные схемы для определения полного вектора скорости на основе дифференциальной и инверсно-дифференциальной конфигураций, приведенных на рис. 2 и 3.

Обсуждение. Рассмотренные выше способы селекции вектора скорости в ортогональном координатном базисе заключаются в последовательном выполнении следующих операций: в исследуемую среду направляются лазерные лучи, формирующие зондирующие поля с заданными векторами чувствительности; выделяются световые пучки, рассеянные в зондирующем поле; выполняется квадратичное фотоэлектрическое преобразование выделенных оптических сигналов; селективируются компоненты электрических сигналов, частота которых соответствует проекциям скорости на заданные векторы чувствительности; частоты селективированных сигналов трансформируются в значения соответствующих компонент вектора скорости посредством известных линейных преобразований, определяемых пространственной конфигурацией векторов чувствительности. При этом измерение ортогональных пар компонент вектора скорости производится путем вычитания и суммирования частот электрических сигналов, соответствующих проекциям вектора скорости на векторы чувствительности в выбранной паре, а модули этих векторов чувствительности задаются равными между собой.

Отличительная особенность предложенных способов — возможность селекции ортогональных компонент вектора скорости в конфигурациях с меньшим числом зондирующих и рассеянных световых пучков, чем в известных оптических системах. Другое достоинство — выигрыш в чувствительности измерений. Это относится главным образом к x -компоненте вектора скорости. Так, для известной четырехпучковой дифференциальной схемы, описанной в [6], выражение, связывающее частоту ω_{Dx} и проекцию вектора скорости на биссектрису угла 2Θ , имеет вид (в сопоставимых обозначениях):

$$\omega_{Dx} = 4v_x k \sin^2 \frac{\Theta}{2}.$$

Из сравнения этого выражения с (10) видно, что выигрыш в чувствительности будет $\operatorname{ctg}^2 \frac{\Theta}{2}$. Например, для типичной величины угла $\Theta = 10^\circ$ выигрыш в чувствительности составляет 100.

Если обратиться к гетеродинной схеме на рис. 1, то выигрыш в чувствительности с учетом (9) составит $\operatorname{ctg}^2 \frac{\Theta}{2} - 1$.

При измерении y -компоненты вектора скорости, согласно (7), получается удвоение чувствительности по сравнению с дифференциальной схемой (11) при тех же угловых параметрах. Такая же повышенная чувствительность обеспечивается в дифференциальной схеме ЛДА с поляризационной селекцией боковых полос углового спектра оптического сигнала [7].

Заключение. Предложены новые способы селекции вектора скорости в ортогональном базисе при измерениях методами лазерной доплеровской анемометрии. Эти способы обеспечивают возможность селекции ортогональных компонент вектора скорости в конфигурациях с меньшим числом зондирующих и рассеянных световых пучков, чем в известных оптических системах, и дают выигрыш в чувствительности измерений. Возможность реализации в малых телесных углах составляет еще одно из достоинств предложенных оптических конфигураций. Указанное обстоятельство является особенно важным при оптико-волоконном исполнении измерительных систем. Применение рассмотренных способов селекции ортогональных компонент вектора скорости не ограничивается ЛДА и может быть полезно, например, в интерферометрии, динамической голографии, лазерной спектроскопии оптического смешения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичус Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982.
2. Buchhave P. Three-component LDA measurements // DISA Information. 1983. 1, N 3.
3. Dubnistchev Yu. N., Belousov P. Ya., Meledin V. G. et al. Laser-Doppler anemometer with adaptive temporal selection of the velocity vector // Optica Applicata. 1990. 20. P. 187.
4. Дубнищев Ю. Н. Новые оптические методы исследования потоков газовых и конденсированных сред // Автометрия. 1994. № 3.
5. Dubnistchev Yu. N., Vasilenko Yu. G. A laser Doppler velocimeter which measures the three components of velocity // Optics and Laser Technology. 1976. 8, N 3. P. 129.
6. Shen X., Yan Y. Modern Techniques and Measurements in Fluid Flows: Proc. Int. Conf. Beijing: Pergamon Press, 1989. P. 19.
7. Dubnistchev Yu. N., Belousov P. Ya., Meledin V. G. Optical velocimeters for moving surfaces using gas and semiconductor lasers // Optics and Laser Technology. 1990. 22, N 5. P. 335.

Поступила в редакцию 12 февраля 1996 г.