

АФОКАЛЬНЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЕКТОРА СКОРОСТИ

Ю. Г. Василенко и Ю. Н. Дубнищев

Для изучения трехмерных потоков разработан и экспериментально опробован лазерный доплеровский измеритель скорости с двойным прохождением лазерного луча в потоке. Одновременное измерение трех ортогональных составляющих вектора скорости осуществляется только с использованием рассеяния вперед. Для определения направления составляющих вектора скорости применяется частотный модулятор.

Изучение трехмерных течений, какими являются турбулентные потоки, требует одновременного измерения трех ортогональных компонент вектора скорости. В настоящее время надежды на решение этой задачи связываются с разработкой лазерных доплеровских измерителей скорости (ЛДИС). Измерение двух ортогональных проекций вектора скорости осуществляется достаточно легко [1]. Для определения третьей ортогональной компоненты обычно используют обратное рассеяние [2, 3]. Сами устройства представляют собой комбинацию дифференциальной схемы и схемы с опорным пучком. Плотность светового потока, рассеянного на малых частицах по направлению падающего пучка, на два-три порядка выше плотности светового потока, рассеянного в обратном направлении. Поэтому использование обратного рассеяния энергетически не выгодно и требует применения мощных лазеров.

В настоящей работе описывается простая дифференциальная схема, в которой измерение трех ортогональных компонент вектора скорости осуществляется с использованием только рассеяния вперед, а световые потери — минимальны.

В показанной на рис. 1, а схеме луч лазера 1 объективом 2 направляется в малую исследуемую область движущейся прозрачной среды. Эта область и ее изображение, сформированное объективом 3 и зеркальным отражательным устройством 5, в прямом и рассеянном пучках пространственно совмещены. Свет, рассеянный в исследуемой области, объективом 2 направляется на фотоприемники 6, 7, 8 с полевыми диафрагмами 9, 10, 11, расположенными на одинаковом расстоянии от оптической оси. При этом фотоприемники 7, 8 с полевыми диафрагмами 10, 11 размещены в ортогональных плоскостях.

На рис. 1, б, в показаны векторные схемы световых пучков в плоскостях XZ и WZ. Диафрагма 11 ограничивает два пространственно совмещенных пучка. Один из них имеет волновой вектор K_{s11} и соответствует световому пучку, рассеянному от падающего с волновым вектором K_{i1} . Второй пучок имеет волновой вектор K_{s21} и получается при рассеянии от инвертированного падающего пучка с волновым вектором K_{i2} . Частоты выделенных диафрагмой 11 рассеянных пучков с учетом доплеровского сдвига равны

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= \omega_0 + \mathbf{V} (K_{s11} - K_{i1}), \\ \omega_2 &= \omega_0 + \mathbf{V} (K_{s21} - K_{i2}), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где \mathbf{V} — вектор скорости рассеивающей частицы, ω_0 — частота падающего лазерного пучка.

На выходе фотоприемника 8 выделяется электрический сигнал разностной частоты

$$\omega_{d1} = \omega_2 - \omega_1 = V(K_2 - K_1). \quad (2)$$

Согласно рис. 1, б, $K_2 - K_1 = (K_{s21} - K_{s11}) - (K_{i2} - K_{i1}) = K_z + K_x$. Отсюда следует $\omega_{d1} = V(K_z + K_x)$. Так как $V/C \ll 1$, то $K_{i1} \approx K_{i2} \approx K_{s11} \approx K_{s21} =$

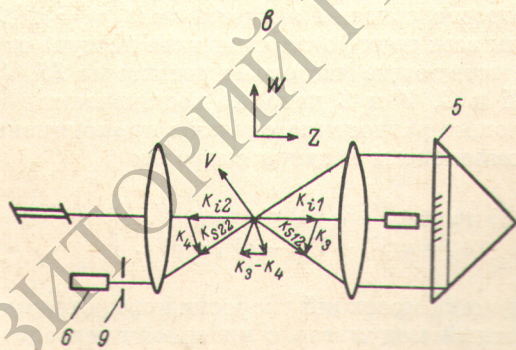
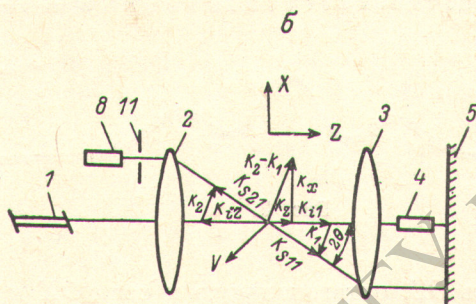
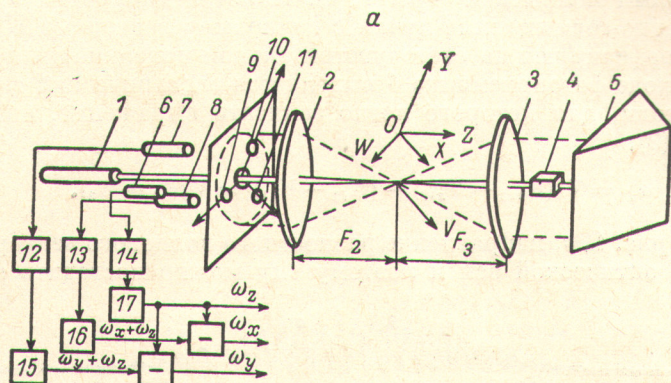


Рис. 1.

$= 2\pi/\lambda$, где C — скорость света, λ — длина волны лазерного излучения. Поэтому

$$\omega_{d1} = \alpha(V_z + V_x), \quad (3)$$

где $\alpha = 4\pi \sin \theta / \lambda$ — масштабный коэффициент, связывающий доплеровскую частоту и измеряемую проекцию скорости, $V_z = \langle \mathbf{V} \mathbf{K}_z \rangle / \alpha$, $V_x = \langle \mathbf{V} \mathbf{K}_x \rangle / \alpha$, 2θ — угол между направлением падающего и выделенного рассеянного пучков.

Для частоты сигнала на выходе фотоприемника 7 с полевой диафрагмой 10, лежащей в ортогональной плоскости, можно получить аналогичное выражение

$$\omega_y = \mathbf{V} \mathbf{K}_y = \alpha V_y. \quad (4)$$

Следовательно, частоты выходных сигналов фотоприемников соответственно пропорциональны ортогональным проекциям скорости $\omega_x = \alpha V_x$, $\omega_y = \alpha V_y$.

Для одновременного измерения третьей ортогональной компоненты вектора скорости зеркальное отражательное устройство выполняется в виде прямоугольной призмы полного внутреннего отражения с частичным зеркальным покрытием (рис. 1, *в*). Полевая диафрагма 9 выделяет пространственно-совмещенные пучки с волновыми векторами K_{s12} и K_{s22} , которые интерферируют на светочувствительной поверхности фотоприемника. На выходе фотоприемника 6 выделяется электрический сигнал разностной частоты, для которого легко записать выражение, аналогичное выражению (2),

$$\omega_{d3} = V[(K_{s22} - K_{s12}) - (K_{i2} - K_{i1})] = V(K_4 - K_3).$$

Согласно рис. 1, *в*, направление разностного волнового вектора $K_4 - K_3$ параллельно оптической оси и поэтому ему можно поставить в соответ-

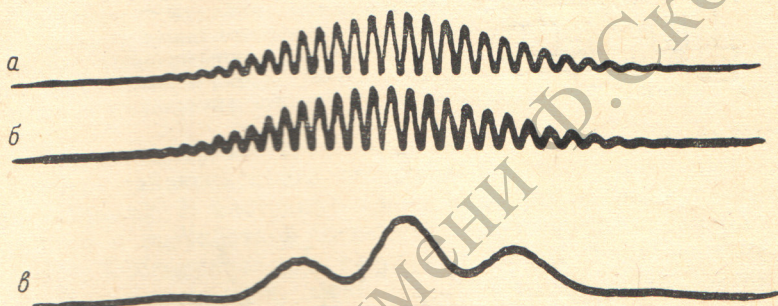


Рис. 2.

ствие координатную ось OZ , ортогональную к осям OX и OY . Следовательно, частота электрического сигнала на выходе фотоприемника и Z -компонента вектора скорости связаны зависимостью $\omega_z = \alpha V_z$.

Выходные сигналы всех трех фотоприемников поступают через фильтры 12, 13, 14 на соответствующие частотные детекторы 15, 16, 17, выходы которых попарно (X и Z , Y и Z каналы) подключаются к вычитающим схемам. Результирующие разностные сигналы пропорциональны соответственно V_x - и V_y -компонентам вектора скорости

$$\left. \begin{aligned} \omega_x &= \alpha(V_z + V_x) - \alpha V_z = \alpha V_x, \\ \omega_y &= \alpha(V_x + V_y) - \alpha V_x = \alpha V_y. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для определения знака проекций скорости перед отражателем помещен электрический частотный модулятор с вращающимся электрическим полем [4]. Такой модулятор может быть выполнен на кристалле, обладающем двойным поперечным эффектом Поккельса и вырезанным вдоль оси третьего порядка. Вращающееся электрическое поле возбуждается в плоскости, перпендикулярной оптической оси двумя парами электродов, попарно размещенных в ортогональных плоскостях. На каждую пару электродов поступают ортогональные по фазе электрические сигналы. Такой электрооптический модулятор эквивалентен фазовой пластинке, вращающейся с угловой скоростью, равной половине частоты возбуждающего электрического сигнала. В данной схеме управляющее напряжение, приложенное к модулятору, должно быть выбрано четвертьволновым. В этом случае модулятор работает как вращающаяся четвертьволновая пластинка. Частота отраженного пучка на выходе модулятора смещена на частоту модуляции. В результате на выходе вычитающих схем уровень сигнала оказывается смещенным на величину, пропорциональную частоте

модуляции Ω . Положение доплеровской частоты относительно уровня Ω указывает на знак соответствующей проекции скорости

$$\left. \begin{aligned} \omega_x &= \Omega + \alpha V_x, \\ \omega_y &= \Omega + \alpha V_y, \\ \omega_z &= \Omega + \alpha V_z. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При малом угле Θ и малой компоненте скорости V_z $\omega_{d1} \approx \omega_x$ с точностью до $\Theta^2 V_z$. При этом необходимо выполнение условия $\Theta V_z / V_x < \eta$, где η — допустимая относительная погрешность измерения компоненты вектора скорости, что обычно имеет место на практике для двумерных течений. Если перечисленные выше условия реализованы, устройство для обработки выходных сигналов существенно упрощается, так как отпадает необходимость в вычитающих схемах. Аналоговые сигналы, пропорциональные трем ортогональным компонентам вектора скорости, непосредственно получаются на выходах соответствующих частотных детекторов 15, 16, 17.

На рис. 2 показаны сигналы *a*, *b*, *c* с выходов трех фотоприемников, частоты которых соответственно пропорциональны ортогональным компонентам вектора скорости. Сигналы получены от одиночной рассеивающей частицы в ламинарном потоке. Для показа структуры сигналов фотографии получены при одночастотном режиме работы схемы, представленной на рис. 1.

Описанное устройство в одночастотном режиме может быть выполнено с подавлением аддитивной составляющей доплеровского сигнала согласно методике, описанной в работе [5]. Для этого перед отражателем на пути проходящего нерассеянного светового пучка помещается четвертьволновая фазовая пластинка, а фотоприемное устройство в каждом канале выполнено в виде двух фотоприемников и поляризационной призмы, развернутой под углом 45° к плоскости поляризации входного лазерного пучка. Выходы каждой пары фотоприемников подключены к дифференциальному усилителю.

Если вместо четвертьволновой пластины поставить фазовую пластинку $\lambda/8$, то доплеровские составляющие сигналов фотоприемников в каждой паре будут ортогональны по фазе. Такая схема позволяет фазочувствительным устройством, подключенным параллельно дифференциальному усилителю, определить знак соответствующей компоненты скорости.

Литература

- [1] К. А. Blake. J. of Phys. E., 5, № 7, 1972.
- [2] Yu. N. Dubnistchev, V. S. Sobolev, V. P. Koronkevich, A. A. Stolpovski, E. N. Utkin. Proc. DISA conf. 1972, vol. 1, Leicester, 1972.
- [3] Ю. Г. Василенко, Ю. Н. Дубнищев, В. П. Коронкевич, В. С. Соболев, А. А. Столповский, Е. Н. Уткин. Лазерные доплеровские измерители скорости. Изд. «Наука», Новосибирск, 1975.
- [4] Е. Р. Мустель, В. Н. Парыгин. Методы модуляции и сканирования света. Изд. «Наука», М., 1970.
- [5] Yu. N. Dubnistchev, Yu. G. Vasilenko. Optics and Laser Technology, № 10, 1974.

Поступило в Редакцию 6 января 1975 г.