

УДК 5.35.9 : 621.379

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

(Новосибирск)

**ОПТИКО-ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ
ДОПЛЕРОВСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ 2D-ВЕКТОРА СКОРОСТИ***

Обсуждается способ селекции ортогональных компонент вектора скорости в оптико-волоконной лазерной доплеровской анемометрии.

Введение. В световолоконной лазерной доплеровской анемометрии одной из важнейших является проблема селекции компонент вектора скорости в ортогональном координатном базисе при минимальном числе оптических пучков, формирующих зондирующее поле [1]. В [2] обсуждались различные конфигурации оптических измерительных схем, решающих эту задачу с использованием мультипликативных и суммарно-разностных преобразований фотоэлектрических сигналов. В работе [3] описывалась конфигурация двухпучковой схемы ЛДА с гетеродинной селекцией осевой компоненты вектора скорости, направленной по биссектрисе угла между зондирующими лучами. Разделение сигналов, соответствующих ортогональным проекциям вектора скорости, осуществлялось по амплитуде. В оптико-волоконном исполнении этой конфигурации селекция по амплитудному признаку не является достаточно надежной.

В настоящей работе описывается оптико-волоконный ЛДА, в котором впервые выполняется уверенная селекция осевой и ортогональной ей составляющих 2D-вектора скорости в двухпучковой измерительной схеме.

Описание метода и результаты эксперимента. На рис. 1 показана функциональная схема оптико-волоконного измерителя 2D-вектора скорости. Луч лазера 1 поворотными призмами 2 и 3 направляется на брэгговский акустооптический модулятор бегущей волны 4. Дифрагированные пучки, выходящие из модулятора 4, отличаются по частоте на величину Ω , равную частоте ультразвуковой волны, возбуждаемой в светозвукопроводе модулятора. Поворотными призмами 5—8 и согласующими объективами 9, 10 дифрагированные пучки соответственно вводятся в одномодовые оптические волокна 11 и 12. Выходные концы оптических волокон 11 и 12 ориентированы в пространственной конфигурации, соответствующей дифференциальной схеме ЛДА, в которой зондирующее поле формируется в исследуемой среде как результат интерференции лазерных пучков с волновыми векторами k_1 и k_2 . С целью миниатюризации оптико-волоконного зонда приемопередающие объективы отсутствуют. В качестве имитатора исследуемой среды в эксперименте использовалась боковая поверхность вращающегося с заданной скоростью диска 13. При пересечении зондирующего поля поверхностью диска происходит рассеяние света. Пусть частота падающего пучка с волновым вектором k_1 равна ω_0 , а частота падающего пучка с волновым вектором k_2 — соответственно $\omega_0 + \Omega$. Рас-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 96-02-19246).

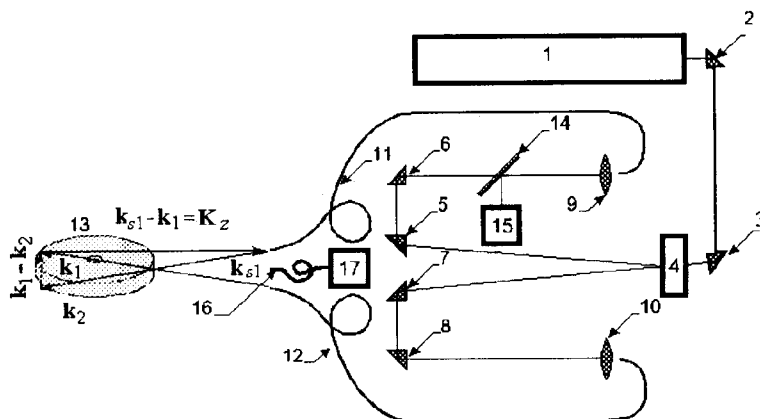


Рис. 1. Функциональная схема оптико-волоконного лазерного доплеровского измерителя $2D$ -вектора скорости

смотрим суперпозицию световых пучков e_{Σ} , попадающих в световод 11 через выходную торцевую поверхность:

$$e_{\Sigma} = e_{s1} + e_{s2} + e_0. \quad (1)$$

Здесь $e_{s1} = E_{s1}e^{j(\omega_0 + \omega_{D1})t}$ — поле светового пучка, рассеянного от падающего пучка с волновым вектором k_1 ; E_{s1} — амплитуда; $\omega_{D1} = v(k_{s1} - k_1)$ — доплеровский сдвиг частоты; k_{s1} — волновой вектор рассеянного пучка e_{s1} , направленный противоположно волновому вектору k_2 ; $e_{s2} = E_{s2}e^{j(\omega_0 + \Omega + \omega_{D2})t}$ — поле светового пучка, рассеянного от падающего пучка с волновым вектором k_2 ; E_{s2} — амплитуда поля; $\omega_{D2} = v(k_{s2} - k_2)$ — доплеровский сдвиг частоты; k_{s2} — волновой вектор рассеянного пучка e_{s2} , противоположный по направлению волновому вектору k_2 ; $e_0 = E_0e^{j(\omega_0 + \Omega)t}$ — поле светового пучка, отраженного от выходного торца оптического волокна 11; E_0 — амплитуда поля. Эта суперпозиция полей световых пучков e_{Σ} канализируется оптическим волокном 11 и объективом 9 через полупрозрачное зеркало 14 направляется на фотоприемник 15, выполняющий квадратичное фотоэлектрическое преобразование светового сигнала:

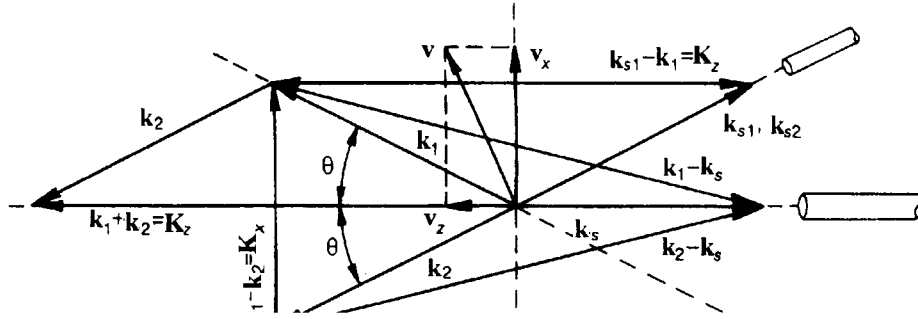
$$i = \rho |e_{\Sigma}|^2. \quad (2)$$

Здесь ρ — коэффициент, учитывающий чувствительность и усиление фотоприемника. В результате фотосмешения составляющих оптического сигнала возникает суперпозиция комбинационных компонент фотоэлектрического сигнала на низких частотах и в окрестности несущей частоты Ω . Выделяя полосовым фильтром комбинационные компоненты фотоэлектрического сигнала на несущей частоте Ω , получаем

$$i_1(\Omega) = \rho 2E_{s1}E_{s2} \cos[\Omega + \omega_{D2} - \omega_{D1}]t + \rho 2E_{s1}E_0 \cos[\Omega - \omega_{D1}]t. \quad (3)$$

Поскольку $\frac{E_{s2}}{E_0} \sim sr \ll 1$ (s — коэффициент рассеяния исследуемой среды; r — коэффициент отражения выходного торца световода 11), первым членом, соответствующим дифференциальной компоненте оптического сигнала, можно пренебречь. Отсюда находим

$$i_1 = \rho 2E_{s1}E_0 \cos[\Omega - \omega_{D1}]t. \quad (4)$$



Выполняя частотную демодуляцию сигнала, получаем информацию о величине и знаке доплеровского сдвига частоты ω_{D1} . Из рис. 2, показывающего в увеличенном масштабе конфигурацию оптической измерительной схемы в пространстве волновых векторов, следует, что доплеровский сдвиг частоты ω_{D1} определяется проекцией вектора скорости на разностный волновой вектор $k_{s1} - k_1 = K_z$. Учитывая, что $k_{s1} = -k_2$, получаем

$$\omega_{D1} = v(k_1 + k_2) = vK_z = \gamma_z v_z. \quad (5)$$

Вектор чувствительности $K_z = k_1 + k_2$ ориентирован по биссектрисе угла между волновыми векторами k_1 и k_2 падающих пучков и задает направление координатной оси z . Из рис. 2 следует, что $\gamma_z = |K_z| = 2k \cos \theta$. Таким образом, измеряя доплеровский сдвиг частоты ω_{D1} , получаем информацию о z -компоненте вектора скорости.

Определение ортогональной v_x x -компоненты вектора скорости производится обычным в лазерной доплеровской анемометрии дифференциальным методом:

$$\omega_{Dx} = v(k_1 - k_2) = vK_x = \gamma_x v_x, \quad (6)$$

где $\gamma_x = 2k \sin \theta$. Из рис. 2 видно, что векторы чувствительности $K_z = k_1 + k_2$ и $K_x = k_1 - k_2$ взаимно ортогональны:

$$K_z K_x = K_z \cdot (k_1 + k_2)(k_1 - k_2) = |k_1|^2 - |k_2|^2 = 0, \quad (7)$$

поскольку $|k_1| = |k_2| = k$.

Фотоприемный канал определения x -компоненты скорости показан на рис. 1. Он содержит многомодовый световод 16, собирающий рассеянное излучение, и квадратичный фотоприемник 17. Отметим, что чувствительность канала измерения z -компоненты вектора скорости многократно превышает разрешающую способность x -канала: $\frac{\gamma_z}{\gamma_x} = \text{ctg} \theta$, так как величина угла θ в оптико-волоконных ЛДА для достижения компактности датчика обычно выбирается малой.

На рис. 3 приведены выходные электрические сигналы в x - и z -каналах оптико-волоконного лазерного доплеровского измерителя $2D$ -вектора скорости, полученные в эксперименте согласно схеме на рис. 1. На рис. 4 даны результаты измерения z -компоненты вектора скорости (в размерности частоты) в зависимости от смещения диска по оси x при разных угловых скоростях вращения.

Для повышения чувствительности в схеме, показанной на рис. 1, оптико-волоконный канал, формирующий зондирующий пучок с волновым вектором

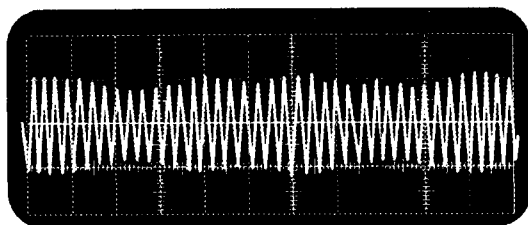


Рис. 3. Доплеровские сигналы x ($\sim 0,56$ м/с, ~ 80 кГц) - и z ($\sim 3,3$ мм/с, ~ 10 кГц) -компонент на экране осциллографа (доплеровское смещение для z -компоненты ~ 3 МГц \cdot с/м)

k_1 , выполняется идентичным гетеродинному оптико-волоконному каналу, формирующему пучок с волновым вектором k_2 . В этом канале, согласно (4), выделяется электрический сигнал вида

$$i_2 = \rho 2E_{s2}E_0 \cos[\Omega + \omega_{D1}], \quad (8)$$

где E_{s2} — амплитуда поля светового пучка, рассеянного от падающего пучка с волновым вектором k_2 и ограниченного апертурой оптико-волоконного зонда 12. Волновой вектор этого рассеянного пучка $k_2 = -k_1$. После частотной демодуляции на выходе первого канала, как следует из (4), получаем частоту

$$\omega_1 = \Omega - \omega_{D1}. \quad (9)$$

Согласно (8), на выходе второго канала имеем

$$\omega_2 = \Omega + \omega_{D1}. \quad (10)$$

Отсюда с учетом (5) находим разность частот ω_1 и ω_2 :

$$\omega_{12} = \omega_1 - \omega_2 = 2\omega_{D1} = 2v(k_1 + k_2) = 2vK_z. \quad (11)$$

Следовательно, разностная частота ω_{12} пропорциональна проекции вектора скорости v на вектор чувствительности $2K_z$, задающий направление координа-

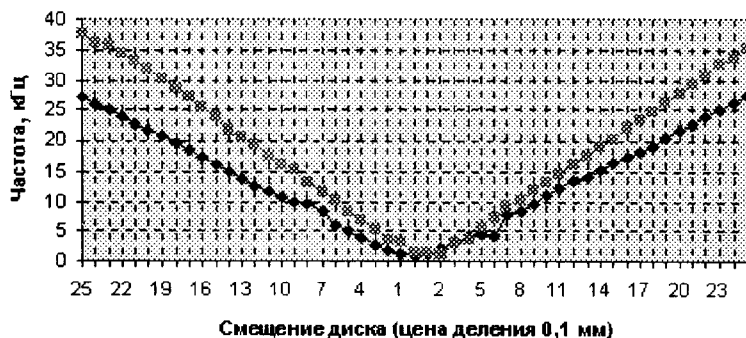


Рис. 4. Результаты измерения z -компоненты вектора скорости в зависимости от смещения диска по оси x :
 квадраты — частота вращения 45 об./мин, ромбы — частота вращения 33 об./мин, радиус диска 155 мм

тной оси z . В результате чувствительность при измерении z -компоненты вектора скорости удваивается. Это особенно важно при измерении вибраций. Так, при малом угле θ $2K_z \approx 8\pi/\lambda$. Отсюда виброскорости в один микрон в секунду при $\lambda \approx 0,5$ мкм соответствует частота $f_{D12} = \omega_{12}/\pi \approx 8$ Гц. С такой чувствительностью можно выполнять измерения виброскоростей в субмикронном диапазоне.

Заключение. Предложен и экспериментально обоснован метод селекции ортогональных компонент $2D$ -вектора скорости в оптико-волоконной доплеровской анемометрии с использованием двухпучковой конфигурации оптической измерительной схемы. Ортогональный координатный базис задается суммой (ось z) и разностью (ось x) волновых векторов лазерных пучков, образующих зондирующее поле. Сигнал, несущий информацию о z -компоненте вектора скорости, формируется за счет гетеродинного преобразования рассеянного исследуемой средой света, а x -компонента скорости определяется в дифференциальном канале оптико-волоконного анемометра.

Расширение функциональных возможностей $1D$ оптико-волоконных ЛДА на измерение $2D$ -вектора скорости достигается без изменения двухпучковой конфигурации оптических датчиков. Разработанный метод $2D$ оптико-волоконной анемометрии ориентирован на широкое применение в экспериментальной гидродинамике и газодинамике, в исследовании многофазных сред, измерении вибраций, а также в промышленных технологиях, связанных с необходимостью невозмущающих дистанционных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хотяинцев С. И. Волоконно-оптическая техника диагностики потоков // Изв. СО АН СССР. Сер. Техн. науки. 1990. № 4. С. 38.
2. Дубнищев Ю. Н. Методы селекции вектора скорости в лазерной доплеровской анемометрии // Автометрия. 1996. № 2. С. 13.
3. Dubnistchev Yu. N., Koronkevitch V. P., Sobolev V. S. et al. Laser Doppler meter of turbulent flow parameters // Fluid Dynamic Meas. Ind. and Med. Environ.: Proc. DISA Conf. Leicester. 1972. 1. P. 79.

Поступила в редакцию 8 декабря 1997 г.