

Ю. Г. ВАСИЛЕНКО, Ю. Н. ДУБНИЦЕВ, И. Г. ПАЛЬЧИКОВА
(Новосибирск)

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ЧАСТОТНАЯ СТРУКТУРА ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО АНЕМОМЕТРА

Структура оптического сигнала лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) в опубликованных работах [1—4] рассматривалась для дифференциальных схем. Полученные результаты переносились на схемы с опорным пучком [6]. Эта аналогия не является полной, поскольку в схемах с опорным пучком существенное значение имеют свойства фотоприемника как фильтра пространственных и временных частот. В статье проводится сравнительный анализ пространственного разрешения и структуры оптического сигнала в схемах с опорным пучком.

Расчетная оптическая схема ЛДА с опорным пучком представлена на рис. 1. Входные световые пучки $E_1(x_0, y_0)$ и $E_2(x_0, y_0)$ заданы в передней главной плоскости объектива 1:

$$\begin{aligned} E_1(x_0, y_0) &= A_1 \exp \{-\varepsilon [(x_0 - a)^2 + y_0^2]\} \exp(j(aK/d_0)x_0), \\ E_2(x_0, y_0) &= A_2 \exp \{-\varepsilon [(x_0 + a)^2 + y_0^2]\} \exp(-j(aK/d_0)x_0), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\varepsilon = (1/2)(1/\sigma^2 - jK/R)$, $A_{1,2}$ — амплитуда поля, $A_1 \gg A_2$, σ — гауссов параметр пучка, R — радиус кривизны волнового фронта, K — волновое число, d_0 — расстояние от точки расщепления пучков до главной плоскости объектива 1.

В плоскости пересечения пучков x_1, y_1 движутся рассеивающие частицы, которые моделируются диском диаметром b :

$$\begin{aligned} \text{circ} \{(b/2)^{-1} [(x_1 - x_1^0)^2 + (y_1 - y_1^0)^2]^{1/2}\}, \\ x_1^0 = V_x(t - t_0), \quad y_1^0 = V_y(t - t_0). \end{aligned} \quad (2)$$

Пользуясь методом расчета, изложенным в [2], можно показать, что для малой прямоугольной апертуры фотоприемника ($-\xi_0 \leq y_2 \leq \xi_0$, $x_2^0 - \xi_0 \leq x_2 \leq x_2^0 + \xi_0$, где x_2^0 — положение центра опорного пучка) амплитуда переменной составляющей фототока, нормированной на максимум, равна

$$I_{d_0}(x_1, y_1, z_1) = \exp \{- (K^2 \sigma^2 / 2) [(x + az/z_0)^2 + y^2]\} |\text{sinc}(\gamma \xi_0 / \pi F_2)|, \quad (3)$$

где $\gamma = Kz(x - az/z_0)$, $x = x_1/z_0$, $y = y_1/z_0$, $z = z_1/z_0$ — безразмерные координаты положения рассеивающей частицы, z_0 — расстояние от плоскости пересечения осей пучков до главной плоскости объектива 1.

Уравнение поверхности, ограничивающей измерительный объем, в котором амплитуда переменной составляющей фототока падает не более чем в $e^{-\nu}$ раз, получается из условия

$$I_{d_0}(x, y, z) = \exp(-\nu). \quad (4)$$

Отсюда

$$(x + az/z_0)^2 + y^2 - (2/K^2 \sigma^2) \times \times \ln |\text{sinc}(\gamma \xi_0 / \pi F_2)| = 2\nu / K^2 \sigma^2. \quad (5)$$

При $x \sim 10^{-4}$, $\xi_0 \sim 0,1$, что обычно имеет место на практике, $\gamma \xi_0 / F_2 \ll 1$ и уравнение (5) принимает вид

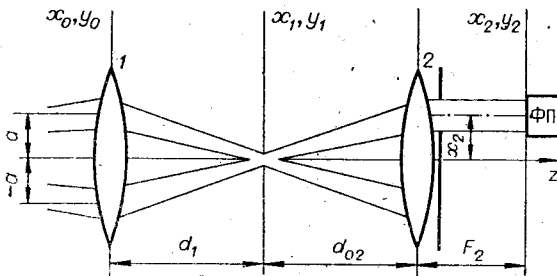


Рис. 1.

$$Ax^2 + Bxz + Cz^2 + y^2 = 2\nu/K^2\sigma^2. \quad (6)$$

Здесь $A = 1 + \mu^2/3$, $B = (2a/z_0)(1 - \mu^2/3)$, $C = (a^2/z_0^2)(1 + \mu^2/3)$, $\mu = (z_0\xi_0/F_2\sigma)$.

Выражение (6) является уравнением эллипсоида, повернутого в плоскости yz относительно оси y . Угол поворота эллипсоида

$$\operatorname{tg} 2\theta \approx (2az_0/(z_0^2 - a^2))(1 - 2\mu^2/3) \text{ при } \mu \ll 1 \text{ и } a/z_0 \ll 1, \theta \approx a/z_0. \quad (7)$$

Отсюда следует, что большая ось эллипсоида, ограничивающего измерительный объем в схеме ЛДА с опорным пучком, в случае точечной апертуры фотоприемника, помещенного в частотно-пространственную плоскость, ориентирована по направлению мощного пучка.

В новой системе координат уравнение (6) принимает вид

$$x^{*2}/r_x^2 + y^2/r_y^2 + z^{*2}/r_z^2 = 1, \quad (8)$$

где r_x, r_y, r_z — полуоси эллипсоида (рис. 2), $r_x = ((2\nu)^{1/2}/K\sigma)(1 - a^2/2z_0^2 - \mu/6)^{1/2} \approx (2\nu)^{1/2}/K\sigma$, $r_y = (2\nu)^{1/2}/K\sigma$, $r_z = ((2\nu)^{1/2}/K\sigma)[(4\mu^2/3) - (a^2/(z_0^2 - a^2))]^{1/2} = (z_0/aK\sigma\mu)(3\nu/2)^{1/2} = (F_2/aK\xi_0)(3\nu/2)^{1/2}$.

В абсолютных единицах $r_x^0 = r_y^0 = z_0(2\nu)^{1/2}/K\sigma$, $r_z^0 \approx (z_0F_2/aK\xi_0)(3\nu/2)^{1/2}$. Например, при $z_0 \sim 10^2$, $\nu = 2$, $a/z_0 \sim 0,1$, $K = 10^4$, $\sigma \sim 1$, $\xi_0 = 0,5$ получаем $r_x^0 = r_y^0 = 0,02$ мм, $r_z^0 = 0,34$ мм.

Для выбранного приближения измерительный объем в схеме с опорным пучком описывается эллипсоидом, большая ось которого ориентирована по направлению мощного пучка. В дифференциальной схеме большая ось эллипсоида направлена по биссектрисе угла, образованного падающими пучками. Продольный размер измерительного объема в схеме с опорным пучком обратно пропорционален апертуре фотоприемника. Размеры полуосей эллипсоидов в схеме с опорным пучком и дифференциальной схеме находятся в следующих соотношениях: $r_{xr}/r_{x \text{ dif}} = r_{yr}/r_{y \text{ dif}} = \sqrt{2}$, $r_{zr}/r_{z \text{ dif}} = (F_2\sigma/z_0\xi_0)\sqrt{3/2}$. Следовательно, измерительный объем в схеме с опорным пучком больше, чем измерительный объем дифференциальной схемы при прочих равных условиях. Это обусловлено тем, что в схеме с опорным пучком от положения рассеивающей частицы в измерительном объеме зависит интенсивность только одного рассеянного пучка. Интенсивность опорного пучка, попадающего на фотоприемник, практически постоянна. Поэтому амплитуда переменной составляющей выходного сигнала пропорциональна первой степени экспоненты, описывающей распределение поля мощного пучка в измерительном объеме. В дифференциальной схеме от положения рассеивающей частицы зависит интенсивность двух рассеивающих пучков, и амплитуда переменной составляющей выходного сигнала в этом случае пропорциональна квадрату соответствующей экспоненты [2].

Если фотоприемник в схеме с опорным пучком (см. рис. 1) расположен в плоскости изображения центрального сечения измерительного объема, то большая ось эллипсоида направлена, как и в дифференциальной схеме, по оси z . В этом случае продольный размер измерительного объема ограничивается изображением полевой диафрагмы (расположенной перед фотоприемником) в предметной плоскости и информация о скорости извлекается только из центральной части эллипсоида (8). Такая ситуация аналогична наклонной установке фотоприемной системы под углом θ (см. рис. 2) к продольной оси измерительного объема в дифференциальной схеме [5].

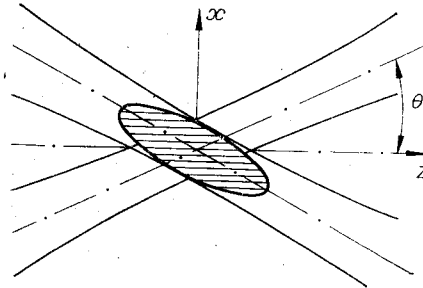


Рис. 2.

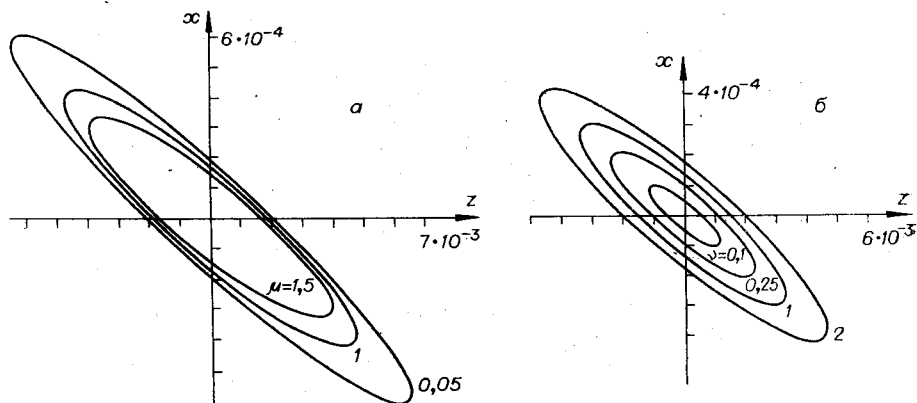


Рис. 3.

На рис. 3, а показано сечение плоскостью $(0, y, z)$ поверхности, ограничивающей измерительный объем на уровне $\exp(-2)$. Эти сечения построены ЭВМ согласно уравнению (5) при различных значениях апертуры фотоприемника ξ_0 . С увеличением апертуры продольный размер измерительного объема значительно уменьшается. На этом же рисунке видна зависимость угла поворота эллипсов от μ (7). На рис. 3, б показана зависимость пространственного разрешения от ν -уровня ограничения выходного сигнала фотоприемника при $\mu = 1$.

Как известно, в дифференциальной схеме пространственная частота интерференционного поля непостоянна в пределах измерительного объема, что дает существенный вклад в дисперсию доплеровской частоты [2—4]. В схеме с опорным пучком также существует зависимость частоты переменной составляющей фототока от положения рассеивателя в области измерения. Для определения этой зависимости исследуем фазу переменной составляющей выходного сигнала фотоприемника:

$$\varphi = 2aKx(1 - zQ) - Kx^2zQ, \quad (9)$$

$$Q = (1/(1+z))[1 + (K^2\sigma^4/mz(1+z))(\Delta + z/z_0(1+z))],$$

$$\Delta = (R - d_0)/Rd_0, \quad m = 1 + K^2\sigma^4(z/z_0(1+z) + \Delta)^2.$$

Пространственная частота зондирующего поля $W = d\varphi/dx$, нормированная на ее значение в центральном сечении измерительного объема $W_0 = 2Ka/z_0$, при $z \ll 1$ и $z_0\Delta/z \ll 1$ равна

$$W_n = W/W_0 = 1 - z^2K^2\sigma^4/2z_0^2 - xzK^2\sigma^4/2az_0. \quad (10)$$

Здесь учтено условие оптимальной настройки схемы $\Delta = z_0/K^2\sigma^4$, при котором плоскости пересечения осей лазерных пучков и их перетяжек совпадают [2—4, 6].

Второй член выражения (10), как и в дифференциальной схеме, описывает квадратичную зависимость пространственной частоты измерительного объема от z . Третий член определяет асимметрию пространственной частоты относительно плоскости x, y .

На рис. 4 показано рассчитанное на ЭВМ распределение эквивалентных интерференционных полос согласно выражению (10), которое

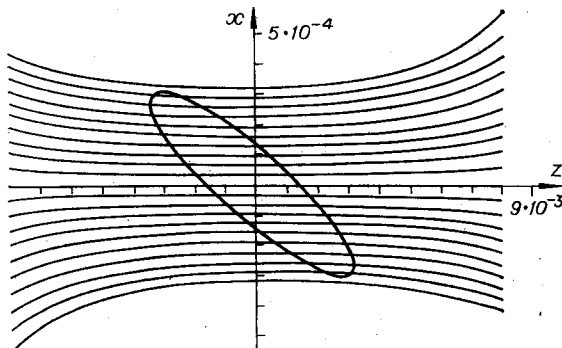


Рис. 4.

сопоставлено с ориентацией и размером измерительного объема при $\nu = 1$ и $\mu = 1$.

Из выражения (10) легко получить связь параметров измерительного объема с допустимой погрешностью κ (для случая равномерного распределения рассеивателей по размеру и пространству). Относительное среднеквадратичное отклонение пространственной частоты, усредненной по измерительному объему, определяется выражением

$$\langle (\Delta W/W_0)^2 \rangle^{1/2} = 0,6 (\nu^2 z_m / Kr_\nu^2) (1 + 0,9\mu^2). \quad (11)$$

Отсюда для $z_m = (z_0^2 / K\sigma\mu a) \sqrt{(3/2)\nu}$ и $r_\nu = (z_0 / K\sigma)(2\nu)^{1/2}$ получаем

$$0,22(\nu\sigma^2/\mu^2 a^2)(1 + 0,9\mu^2) \leq \kappa. \quad (12)$$

Соотношения (11) и (12) связывают пространственное разрешение и допустимую погрешность измерения скорости с параметрами оптической схемы и лазерного излучения.

Поворот измерительного объема в схеме с опорным пучком проверялся экспериментально. Для этого была собрана оптическая схема, которая одновременно работала в дифференциальном режиме и в режиме с опорным пучком. Центры измерительных объемов двух типов схем пространственно совмещены. При прохождении рассеивателя в центральном сечении измерительных объемов сигналы, соответствующие дифференциальной схеме и схеме с опорным пучком, совмещены во времени (рис. 5, а). Если частица проходит вне центральной плоскости, то в одном случае (смещение влево) сигнал в дифференциальной схеме опережает сигнал в схеме с опорным пучком (рис. 5, б), а во втором случае (смещение вправо) отстает от него (рис. 5, в).

На фотографиях хорошо видно, что сигнал в дифференциальной схеме более узкий (короткий), чем сигнал в схеме с опорным пучком. Это свидетельствует о том, что измерительный объем в схеме с опорным пучком больше измерительного объема в дифференциальной схеме.

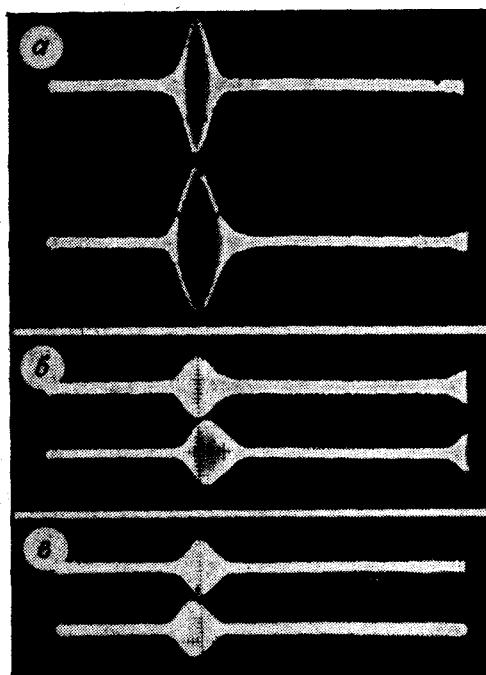


Рис. 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adrian R. J., Goldstein R. J. Analysis of Laser Doppler Anemometer.— J. Phys. E. Sci. Instrum., 1971, vol. 4, N 7, p. 505—511.
2. Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. Н., Журавель Ф. А. О пространственном разрешении и точности лазерных доплеровских измерителей скорости.— Опт. и спектр., 1976, т. 41, вып. 2.
3. Кулеш В. П. Анализ оптической схемы ЛДИСа методом Фурье.— Труды ЦАГИ, 1976, вып. 1750.
4. Скворцов В. В. Интерференция когерентных гауссовых пучков в лазерных доплеровских измерителях скорости.— Опт. и спектр., 1979, т. 47, вып. 4.
5. Гродзовский Г. Л. Анализ точности измерений ЛДИС.— Труды ЦАГИ, 1976, вып. 1750.
6. Lading L. A Fourier Optical Model for the Laser Doppler Velocimeter.— Opto-Electronics, 1972, vol. 4, p. 385—398.

Поступила в редакцию 4 января 1981 г.