УДК 533.6.08 : 621.375.826

В. П. КУЛЕШ

(Москва)

О СМЕЩЕНИИ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ СКОРОСТИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДВУМЕРНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ МЕТОДОМ ЛДИС

Единичный отсчет ЛДИСа дает мгновенное значение u_i проекции вектора скорости **V** на направление вектора пространственной частоты интерференционного поля в измерительном объеме в случайные моменты времени прохождения частиц через измерительный объем [1]. Для адекватной статистической обработки результатов измерений необходимо знать функцию распределения числа отсчетов по скоростям. В общем случае эта функция неизвестна, поэтому приходится принимать недостаточно обоснованные допущения, в результате чего возникают случайные ошибки и смещения при определении среднего значения и дисперсии искомой скорости.

В работах [2—5] показано, что частота отсчетов скорости в ЛДИСе пропорциональна модулю вектора скорости. Поэтому простое усреднение по формуле

$$\bar{u} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} u_i, \tag{1}$$

где n — число отсчетов в выборке, дает смещенное среднее значение проекции вектора скорости. Предложен ряд способов устранения смещения при обработке данных путем введения весовых коэффициентов, обратно пропорциональных модулю вектора скорости и прямо пропорциональных длительности доплеровского сигнала или интервалу времени между последовательными сигналами. Эти способы позволяют уменьшить смещение среднего значения, обусловленное флуктуациями модуля вектора скорости и концентрации частиц в потоке, преимущественно в тех случаях, когда среднее направление вектора скорости близко к направлению вектора пространственной частоты интерференционного поля в измерительном объеме.

В работе [3] отмечено, что на величину измеренного среднего значения могут оказывать влияние флуктуации направления вектора скорости.

Целью данной статьи является рассмотрение этого явления для случая измерения скорости двумерного изотропного турбулентного течения с помощью дифференциального ЛДИСа без смещения частоты света, в котором измерение доплеровской частоты осуществляется измерением длительности и счетом числа периодов N_i сигнала от каждой частицы.

Полный измерительный объем ЛДИСа имеет форму эллипсоида вращения, сильно вытянутого вдоль оси OZ, совпадающей с биссектрисой угла между зондирующими пучками. Для ограничения длины измерительного объема изображение его в рассеянном свете проецируется под углом к оси OZ на полевую диафрагму, помещенную перед фотоприемником. Можно считать, что такой измерительный объем имеет форму кругового цилиндра [1]. На рис. 1 изображено сечение измерительного объема, граница которого определена приведенным порогом чувствительности счетчика. Пусть размеры рассеивающих частиц одинаковы и пороги срабатывания и отпускания электронного счетчика равны между собой. Обозначим через N_0 максимальное число периодов сигнала, т. е. число интерференционных плоскостей, пересеченных частицей, движущейся по оси OX через центр измерительного объема, а через N_1 минимальное число периодов, необходимое для измерения частоты.

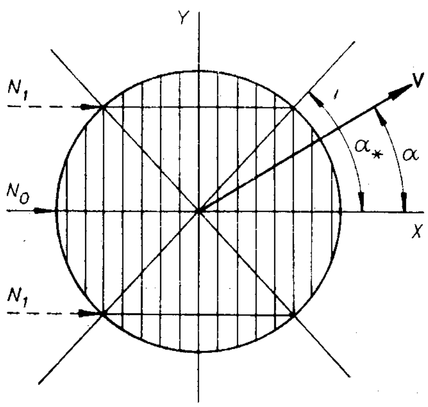

Рис. 1.

При постоянной концентрации рассеивающих частиц в потоке число отсчетов в единицу времени пропорционально модулю вектора скорости потока $V = |\mathbf{V}|$ и эффективному сечению измерительного объема $S(\alpha)$, при пересечении которого частицей формируется сигнал с достаточным для измерения числом периодов $N > N_1$. Из рис. 1 видно, что частицы, пересекающие измерительный объем под углом α, большим, чем $\alpha_* = \arccos k$, где $k = N_1/N_0$, не дадут отсчета скорости. Можно показать, что зависимость эффективного сечения измерительного объема от угла α при $\alpha \leqslant \alpha_*$ выражается функцией $S(\alpha) = (1 - k^2/\cos^2\alpha)^{1/2}$.

Принимая во внимание то, что при изотропной турбулентности распределения компонент скорости $V\cos\alpha$ и $V\sin\alpha$ подчиняются нормальному закону с дисперсией σ^2 и сред-

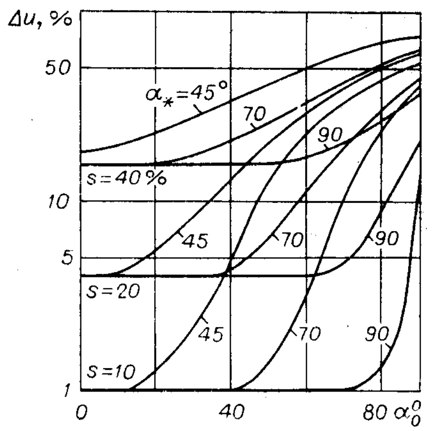

Рис. 2.

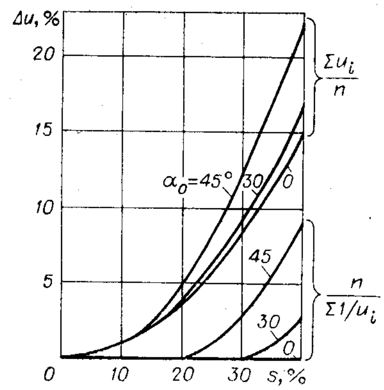

Рис. 3.

ними значениями a и b соответственно, получим совместную функцию распределения модуля вектора скорости V и угла потока α

$$w_2(v,\ \alpha) = \mathrm{const}\ v \exp\{-[v-\cos(\alpha-\alpha_0)]^2/2s^2\} \exp\{\cos^2(\alpha-\alpha_0)/2s^2\},$$

где $v = V/V_0$, $s = \sigma/V_0$ — степень турбулентности, $V_0 = \sqrt{a^2+b^2}$ — среднее значение модуля вектора, $\alpha_0 = \operatorname{arctg}(b/a)$ — среднее направление потока.

Из этого выражения с учетом зависимости $S(\alpha)$ и пропорциональности частоты отсчетов модулю V получим функцию распределения плотности вероятности отсчетов ЛДИСа

$$w(v,\alpha) = \mathrm{const}\ vS(\alpha)\, w_2(v,\alpha) = \mathrm{const}\ v^2 \sqrt{1-k^2/\cos^2\alpha}\, \exp\left\{-[v-\cos(\alpha-\alpha_0)]^2/2s^2\right\}\times$$
$$\times\exp\left\{\cos^2(\alpha-\alpha_0)/2s^2\right\}. \qquad (2)$$

Относительное смещение $\Delta u = (\overline{V\cos\alpha} - V_0\cos\alpha_0)/V_0$ среднего значения $\overline{V\cos\alpha}$ результатов измерения проекции вектора скорости на ось OX, полученного при статистической обработке большого числа n отсчетов по формуле (1), определяется выражением

$$\Delta u = \frac{\int\limits_{-\alpha_*}^{\alpha_*} \cos\alpha \int\limits_0^{\infty} v w(v,\alpha)\, dv d\alpha}{\int\limits_{-\alpha_*}^{\alpha_*}\int\limits_0^{\infty} w(v,\alpha)\, dv d\alpha} - \cos\alpha_0.$$

На рис. 2 приведены графики зависимостей относительного смещения Δu от среднего направления скорости α_0, рассчитанных на ЭВМ при различных значениях s и α_*. Из графиков следует, что при малых α_0 относительное смещение среднего значения близко к величине $\Delta u \approx s^2$, обусловленной флуктуациями только модуля вектора скорости, что согласуется с результатами работы [4]. При $\alpha_0 \to \alpha_*$ смещение резко возрастает до величины $\Delta u \approx s$, и при $\alpha_0 > \alpha_*$ увеличивается почти линейно:

$$\Delta u \approx s + (\alpha_0 - \alpha_*),$$

где α_* и α_0 выражены в градусах, а s и Δu — в процентах.

Если при статистической обработке результатов измерения скорости вводить, как рекомендуется в работах [2—5], весовой множитель, обратно пропорциональный мгновенному значению измеряемой компоненты скорости $1/u_i = 1/V\cos\alpha$, т. е. находить среднее значение по формуле

$$\bar{u} = n\Big/\sum_{i=1}^{n} 1/u_i, \qquad (3)$$

то относительное смещение среднего значения определяется выражением

$$\Delta u = \frac{\int\limits_{-\alpha_*}^{\alpha_*}\int\limits_0^{\infty} w(v,\alpha)\, dv d\alpha}{\int\limits_{-\alpha_*}^{\alpha_*}\int\limits_0^{\infty} [w(v,\alpha)/V\cos\alpha]\, dv d\alpha} - \cos\alpha_0.$$

На рис. 3 приведены зависимости от степени турбулентности s относительного смещения среднего значения Δu, возникающего при том и другом способах статистической обработки. Из сравнения результатов следует, что для уменьшения систематической составляющей погрешности определения средней скорости турбулентного течения целесообразно ориентировать вектор пространственной частоты интерференционного поля в измерительном объеме ЛДИСа ближе к среднему направлению потока так, чтобы $\alpha_0 \approx 0$, и статистическую обработку результатов измерения проводить по алгоритму (3).

Более полное устранение смещения средней скорости может быть достигнуто при измерении двух проекций вектора скорости и статистической обработке результатов с учетом функции распределения (2).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кулеш В. П.** Анализ оптической системы ЛДИСа методом Фурье.— Труды ЦАГИ, 1976, вып. 1750, с. 70—82.
2. **McLaughlin D. K., Tiederman W. G.** Baising correction for individual realization of laser anemometer measurements in turbulent flows.— Phys. Fluids, 1973, vol. 16, N 12.
3. **Хезель В., Роди В.** Новый метод устранения смещения при статистической обработке данных от лазерного измерителя скорости.— Приборы для науч. исслед., 1977, № 7.
4. **Соболев В. С., Шмойлов Н. Ф.** Погрешности осреднения случайных профилей скорости лазерным доплеровским измерителем.— В кн.: Методы лазерной доплеровской диагностики в гидродинамике: (Материалы междунар. школы-семинара). Минск: Ин-т тепло- и массообмена АН БССР, 1978.
5. **Буххаве П., Касперсон К.** Обработка информации о дискретных частицах, полученной с помощью лазерного доплеровского анемометра.— В кн.: Материалы VIII конгресса ИМЕКО. М., 1979.

Поступило в редакцию 5 ноября 1979 г.;
окончательный вариант — 25 марта 1980 г.

УДК 519.281.1

В. Л. ГОРОХОВ

(Ленинград)

РАНГОВЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ СБОЕВ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При автоматизированной цифровой обработке изображений, например, в астрономии часто возникает задача выявления и устранения хаотических импульсных помех типа сбоев. Такие помехи возникают в случаях хаотических сдвигов разрядов в регистрах цифровых устройств. Учитывая возможное разнообразие шумовой обстановки, при обнаружении сбоев целесообразно обратиться к методам непараметрической статистики [1]. Будем описывать обрабатываемые массивы данных X, задаваясь достаточно широким классом распределений шума $F(x)$, имеющих плотность $f(x)$, для которой практически выполняются условия, предложенные в [1].

В такой ситуации возможно описание сбоев с помощью параметра сдвига Δ в классе распределений, обладающих сдвиговым свойством. Уточним дальнейшие предпосылки.

Пусть для обнаружения сбоя изображение анализируется двумя интервалами разрешения $(x_1, \ldots, x_m)$ и $(x_{m+1}, \ldots, x_N)$, где x_i — независимые отсчеты случайного процесса соответственно для первой (чисто шумовой) и второй (проверяемой) выборок. Плотность распределения отсчетов в отсутствие сбоя одинакова при любом $i = \overline{1, N}$, удовлетворяет условиям [1] и неизвестна. Теперь задача обнаружения сбоя состоит в проверке сложных статистических гипотез

$$H_0 : \Delta \neq 0, \quad H_1 : \Delta > 0 \tag{1}$$

на базе совместных плотностей

$$f(x) = \prod_{i=1}^{N} f(x_i),$$

$$g(x) = \prod_{i=1}^{m} f(x_i) \prod_{i=m+1}^{N} f(x_i - \Delta)$$