

Т. В. Кудряшов, В. А. Гречихин*(Москва)***ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ
МЕТОДОМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА***

Рассмотрен метод вейвлет-анализа сигналов лазерного доплеровского анемометра (ЛДА), используемого для измерения скорости светорассеивающих частиц в заданной локальной области аэро- или гидродинамического потока. Проведен анализ погрешностей оценки скорости, связанных с параметрами измерительной установки, выбранными условиями наблюдения и характеристиками алгоритма обработки выходного сигнала схемы ЛДА. Выработаны рекомендации по проведению измерений.

Введение. Лазерные доплеровские анемометры (ЛДА) находят широкое применение при решении задач технологического контроля и в научном эксперименте как высокоточные бесконтактные устройства для измерений параметров движения различных объектов, в частности малоразмерных частиц в аэро- и гидродинамических потоках [1]. При пролете светорассеивающих частиц через область измерительного объема дифференциальной схемы ЛДА на выходе фотоприемника возникают электрические сигналы, анализ которых позволяет получить оценки скорости, концентрации и размеров рассеивателей. Спектральный анализ Фурье сигналов ЛДА является традиционным методом, широко используемым на практике, и его характеристики хорошо изучены [2]. Однако в двухфазных потоках данный метод не обеспечивает допустимые значения погрешности оценки доплеровской частоты. Это обусловлено искажениями формы спектра сигналов от частиц, размеры которых сравнимы либо существенно превышают пространственный период интерференционной картины в области измерительного объема ЛДА. Кроме того, фурье-базис анализирующих функций не является оптимальным для одновременного оценивания нескольких параметров сигнала: частоты Доплера, эффективной длительности, момента появления и других. Более подходящим для такого анализа является базис вейвлет-функций, которые хорошо коррелируют с моделями сигналов ЛДА [3]. Метод вейвлет-анализа сигналов ЛДА уже рассматривался в работах [4, 5], а погрешности

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования РФ (программа «Производственные технологии»).

оценки частоты Доплера для простейших моделей сигнала были исследованы в [6]. Новизна предлагаемого исследования состоит в использовании принципиально новой модели сигнала ЛДА и установлении непосредственной связи погрешностей измерений с параметрами физической установки.

Метод исследований и полученные результаты. По аналогии с [6] оценку частотно-временных параметров сигнала ЛДА предлагается находить путем анализа его вейвлет-спектра, вычисляемого при помощи соотношения [3]:

$$W_{\psi} s(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt,$$

где $W_{\psi} s(a, \tau)$ – вейвлет-спектр сигнала $s(t)$; $s(t)$ – исследуемый одномерный сигнал; $\psi(t)$ – материнский вейвлет; τ – параметр временного сдвига; a – масштабный коэффициент. Метод измерений основан на определении координат τ_{\max} и a_{\max} максимума модуля вейвлет-спектра, который соответствует наибольшей корреляции вейвлет-функции и исследуемого сигнала [5, 6]. Полученные значения τ_{\max} и a_{\max} позволяют связать известные параметры материнского вейвлета с оцениваемыми параметрами сигнала ЛДА. Сравнение фурье- и вейвлет-спектров ($F(f)$ и $W_{\psi} s(a, \tau)$) двухчастичного сигнала ЛДА показано на рис. 1.

Для анализа погрешностей оценивания проведены моделирование и обработка сигналов ЛДА при различных значениях параметров сигналов и анализирующих вейвлетов. В качестве модели одночастичного сигнала ЛДА была использована пуассоновская последовательность одноэлектронных импульсов фототока, протекающего через нагрузку фотодетектора. В предположении малости размера частиц среднее число импульсов в единицу времени определялось выражением

$$m_e(t) = \eta \frac{P\sigma}{h\nu w_0^2} \left[1 + M \cos\left(\frac{2\pi V_x}{\Lambda} t + \Phi\right) \right] \exp\left\{-2\left(\frac{V_x(t-t_0)}{w_0}\right)^2\right\},$$

где η – квантовая эффективность фотодетектора; P – мощность излучения лазера; h – постоянная Планка; ν – частота электромагнитного излучения лазера; w_0 – эффективный радиус зондирующего пучка; σ – когерентное сечение рассеяния частицы; M – коэффициент амплитудной модуляции, определяемый видностью интерференционной картины и размером частицы; Φ – на-

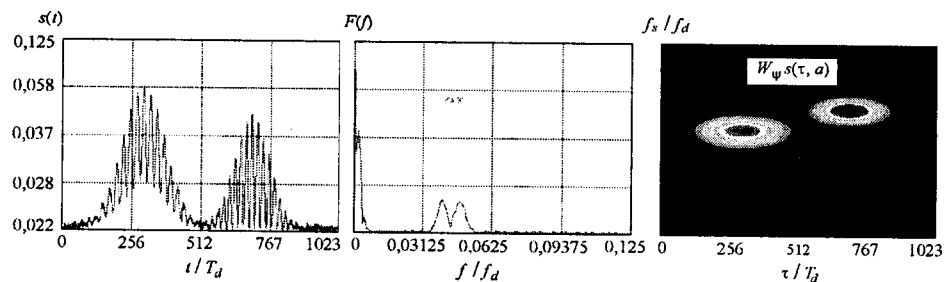


Рис. 1. Сравнение фурье- и вейвлет-спектров двухчастичного сигнала ЛДА

чальная фаза колебаний; V_x – измеряемая компонента скорости частицы; Λ – пространственный период интерференционного поля в области измерительного объема ЛДА; t_0 – момент пролета частицы через центр измерительного объема ЛДА. Модель одноэлектронного импульса фототока имела вид

$$i_e(t) = \begin{cases} 0, & t < t_K, \\ i_0 \exp\left\{-\frac{t-t_K}{\tau_F}\right\}, & t \geq t_K, \end{cases}$$

где i_0 – амплитуда импульса; t_K – момент появления импульса; τ_F – постоянная времени фотодетектора. Таким образом, моделью выходного сигнала ЛДА является профильтрованный пуассоновский поток, статистические характеристики которого полностью определялись законом изменения $m_e(t)$ и формой одноэлектронного импульса. При анализе погрешностей были введены дополнительные параметры модели сигнала ЛДА, связь которых с характеристиками анемометра и скоростью частицы определялась следующими выражениями:

$$f_s = \frac{V_x}{\Lambda}$$

– доплеровский сдвиг частоты;

$$T_e = \frac{\sqrt{2}w_0}{V_x}$$

– эффективная длительность одночастичного сигнала ЛДА;

$$N_T = \frac{\sqrt{2}w_0}{\Lambda}$$

– число периодов колебаний в пределах эффективной длительности одночастичного сигнала ЛДА и вместе с тем число пространственных периодов интерференционного поля в пределах измерительного объема ЛДА.

При моделировании сигнал ЛДА и функции вейвлет-базиса были представлены массивами своих отсчетов, взятых с периодом дискретизации T_d (частота дискретизации – f_d). В этих дискретных моделях использовались безразмерные параметры: f_s/f_d , t_0/T_d , T_e/T_d , T_w/T_d и f_w/f_d . Число отсчетов сигнала и вейвлета в обрабатываемых массивах выбрано $N = 1024$. В качестве материнского вейвлета использован вейвлет Морле [3]:

$$\psi(t) = \exp\left(j\omega_w t - \frac{t^2}{T_w^2}\right),$$

где j – мнимая единица; $\omega_w = 2\pi f_w$ – частотный параметр; T_w – эффективная длительность вейвлет-функции. Значения параметров материнского вейвлета: $f_w/f_d = 0,01$, $T_w/T_d = 400$.

В соответствии с [6] погрешность оценивания частоты сигнала ЛДА, а соответственно и скорости частицы зависит от параметров сигнала, выбранных условий наблюдения и характеристик алгоритма обработки. Использование при анализе сигнала дискретной выборки данных ведет к появлению дополнительных источников погрешности измерений.

На рис. 2, *a, b* изображены зависимости среднего значения относительной погрешности оценки скорости частицы δ_{V_x} и ее среднеквадратического отклонения (СКО) σ_{V_x} от значений скорости при выбранных параметрах анемометра и частоте дискретизации сигнала $f_d = 10$ МГц. Видно, что для различных значений периода интерференционных полос существует свой диапазон скоростей, в котором погрешность оценки скорости минимальна и меняется незначительно. При уменьшении скорости частицы эффективная длительность сигнала ЛДА увеличивается и начинает превышать установленный интервал времени наблюдения, равный NT_d . В результате этого число наблюдаемых периодов колебаний, несущих информацию о частоте Доплера, уменьшается и погрешность измерений резко возрастает. Аналогичный рост погрешностей происходит в случае, когда скорость частицы уве-

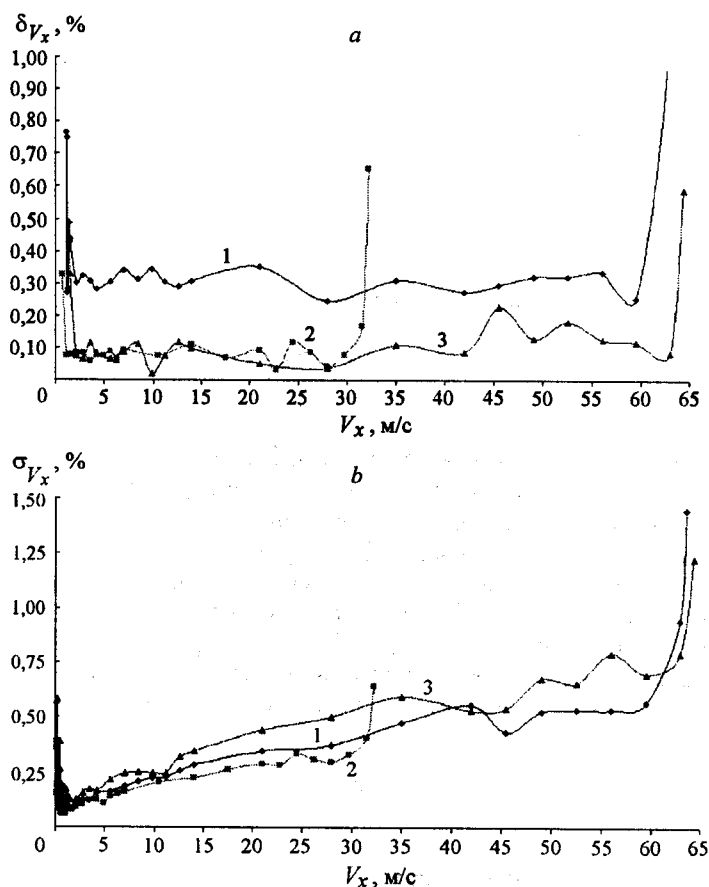


Рис. 2. Зависимость погрешностей оценки скорости частиц от абсолютных значений измеряемой скорости: кривые 1 – $w_0 = 80$ мкм, $\Lambda = 14$ мкм ($N_T = 8$); кривые 2 – $w_0 = 80$ мкм, $\Lambda = 7$ мкм ($N_T = 16$); кривые 3 – $w_0 = 160$ мкм, $\Lambda = 14$ мкм ($N_T = 16$)

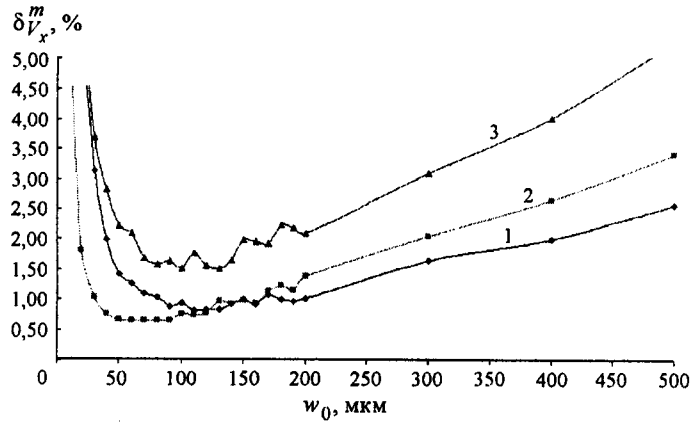


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности оценки скорости от радиуса пучка: кривая 1 – $\Lambda = 14$ мкм, $M = 1$; кривая 2 – $\Lambda = 7$ мкм, $M = 1$; кривая 3 – $\Lambda = 14$ мкм, $M = 0,5$

личивается и начинает приближаться к значению $V_{x_{\max}} = \frac{f_d \Lambda}{2}$. При этом частота Доплера f_s увеличивается и приближается к предельно допустимому значению $f_{s_{\max}} = 0,5 f_d$, определяемому условиями теоремы отсчетов. Значение погрешности также возрастает с уменьшением числа периодов N_T . Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными в работах [2, 6] для более грубой модели сигнала ЛДА.

Графики зависимости предельной погрешности измерений скорости δV_x^m от эффективного радиуса пучка при неизменной мощности лазера для различных значений видности и пространственного периода интерференционного поля изображены на рис. 3. Видно, что существует некоторый оптимальный радиус пучка, при котором погрешность измерений минимальна. При уменьшении радиуса пучка рост погрешности связан с уменьшением числа периодов колебаний на интервале эффективной длительности импульса. В случае широких пучков погрешность измерения скорости возрастает из-за уменьшения плотности мощности излучения в пределах измерительного объема, ведущего к уменьшению отношения сигнал/шум в наблюдаемой центральной части сигнала ЛДА.

На рис. 4 показаны зависимости предельной погрешности измерения скорости от отношения сигнал/шум. При этом отношение сигнал/шум определяется выражением

$$\frac{P_s}{P_n} = m_{e_{\max}} \tau_F, \quad \text{или} \quad \left(\frac{P_s}{P_n} \right)_{\text{дБ}} = 10 \lg(m_{e_{\max}} \tau_F),$$

где $m_{e_{\max}} = \eta \frac{P \sigma}{h \nu w_0^2}$. Из графиков видно, что погрешность измерений зависит

от коэффициента амплитудной модуляции сигнала M . При заданных значениях параметров анемометра погрешность не превышает единиц процентов в случае $P_s/P_n = 2 - 5$ дБ.

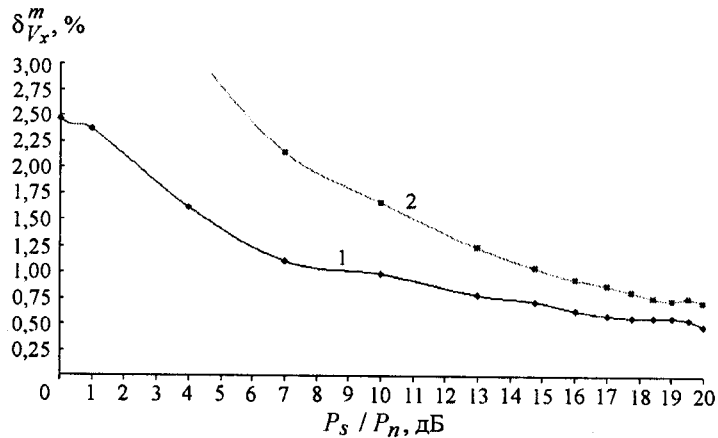


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности оценки скорости от отношения сигнал/шум: кривая 1 – $M = 1$, кривая 2 – $M = 0,5$

Исследование влияния на погрешность измерений условий наблюдения выходного сигнала ЛДА показало, что наиболее существенными являются зависимости погрешности от частоты дискретизации сигнала f_d и от положения центра импульса t_0 в наблюдаемом временном окне. С увеличением частоты дискретизации интервал наблюдения NT_d уменьшается и становится меньше эффективной длительности импульса ЛДА. Это ведет к уменьшению числа периодов N_T на интервале наблюдения, вследствие чего погрешность оценки скорости возрастает. К такому же результату приводит и значительное уменьшение частоты дискретизации, поскольку при этом значение относительной частоты f_s/f_d приближается к предельно допустимому максимуму, определяемому теоремой отсчетов. Результаты моделирования показали, что значение f_d должно удовлетворять следующему условию:

$$2,5f_s < f_d < \frac{N}{N_T} f_s.$$

При этом погрешность измерений не превосходит единиц процентов.

Результаты анализа влияния временного сдвига сигнала ЛДА относительно центра интервала времени наблюдения на относительную погрешность оценки скорости подтвердили достаточно очевидный вывод [6], что значения погрешностей оценивания минимальны и практически не изменяются до тех пор, пока большая часть сигнала находится в пределах наблюдаемого интервала. При перемещении центра импульса к границе интервала наблюдения погрешность возрастает примерно до 2 %.

Численный анализ влияния параметров вейвлет-базиса Морле на погрешность измерений показал, что с ростом длительности базисного вейвлета, а следовательно, и числа периодов колебаний на интервале T_w погрешность оценки скорости в диапазоне относительных значений частоты Доплера $f_s/f_d = 0,3-0,5$ уменьшается.

Заключение. Анализ влияния параметров анемометра и скорости частицы на погрешность измерений показал, что она оказывается минимальной в

случае, когда измеряемая скорость лежит в пределах диапазона $1,5 \frac{w_0 f_d}{N} < V_x < 0,45 \Lambda f_d$. Для выбранных значений параметров анемометра $w_0 =$

Существует оптимальный радиус лазерного пучка при фиксированных значениях угла между пучками и мощности лазера. Минимальные значения погрешностей оценки скоростей наблюдаются в диапазоне $5\Lambda < w_0 < 16\Lambda$.

Увеличение мощности лазера ведет к росту отношения сигнал/шум и уменьшению погрешности измерений. При этом для малых значений коэффициента модуляции M влияние шума проявляется сильнее.

Исследование влияния условий наблюдения на погрешность измерений показало, что частота дискретизации сигнала должна выбираться из диапазона $2,5 \frac{V_x}{\Lambda} < f_d < 0,7 N \frac{V_x}{w_0}$. При этом сигнал занимает большую часть интервала

наблюдения, незначительно выходя за его пределы. Момент начала наблюдения должен быть выбран так, чтобы обеспечить симметричное расположение сигнала относительно центра наблюдаемого временного окна.

Показано, что в широком диапазоне частот использование вейвлет-функций с большим числом периодов колебаний на интервале эффективной длительности вейвлета обеспечивает меньшие значения погрешности оценки частоты Доплера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ринкевичюс Б. С. Лазерная диагностика потоков /Под ред. В. А. Фабриканта. М.: Изд-во МЭИ, 1990.
2. Гречихин В. А., Ринкевичюс Б. С. Погрешности цифровых методов измерения частоты одночастичного сигнала ЛДА // Измерит. техника. 1993. № 10. С. 43.
3. Чуи К. Введение в вейвлеты: Пер. с англ. М.: Мир, 2001.
4. Yesin M. V., Grechikhin V. A., Rinkevichius B. S. The wavelet analysis of LDA signals for two-phase flows // Proc. of Intern. conf. "Laser Anemometry Advances and Applications". Roma, 1999. P. 207.
5. Гречихин В. А., Евтихиева О. А., Есин М. В., Ринкевичюс Б. С. Применение вейвлет-анализа моделей сигналов в лазерной доплеровской анемометрии // Автометрия. 2000. № 5. С. 51.
6. Кудряшов Т. В., Гречихин В. А. Исследование погрешностей оценки частоты сигналов ЛДА методом вейвлет-анализа // Измерит. техника. 2002. № 7. С. 38.

Московский энергетический институт
(технический университет),
E-mail: GrechikhinVA@mtu-net.ru

Поступила в редакцию
29 апреля 2003 г.