

УДК 681.7.069.211 : 681.3(025)

В. А. Гречихин, О. А. Евтихиева, М. В. Есин, Б. С. Ринкевичюс
(Москва)

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА МОДЕЛЕЙ СИГНАЛОВ
В ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ***

Возможность применения вейвлет-анализа ЛДА для селекции доплеровских сигналов лазерного анемометра, определения скорости, концентрации и сравнения частиц по размерам в двухфазных потоках исследованы методом численного моделирования. Показано, что вейвлет-анализ позволяет оценить параметры двухфазного потока в тех случаях, когда традиционные методы исследования оказываются малоэффективными.

Введение. Анализ и обработка сигналов лазерных доплеровских анемометров (ЛДА) играют большую роль как при создании измерительной аппаратуры, так и при интерпретации результатов эксперимента [1, 2].

В представленной работе исследуется возможность применения метода вейвлет-преобразований для анализа сигналов ЛДА, характерных для двухфазных потоков. Особенностью таких потоков является наличие в них рассеивающих полидисперсных частиц размерами от 0,1 до 100 мкм и более. Поскольку в таких потоках частицы чаще всего присутствуют естественным образом, их размеры и диэлектрические параметры оказываются различными. Скорость больших частиц в ускоряющихся потоках обычно меньше скорости малых частиц, а в замедляющихся потоках – наоборот. При движении частицы могут взаимодействовать друг с другом, изменяя свои траектории, скорости и размеры. Важным измеряемым параметром двухфазных потоков является концентрация частиц, которая также изменяется в пространстве.

Как показано в [1–5], в случае рассеяния на нескольких частицах одновременно либо на одной большой частице наблюдаются искажения амплитуды и фазы доплеровских сигналов, а спектры сигналов имеют сложную форму, что приводит к погрешностям оценки доплеровской частоты.

Вейвлет-преобразование. В [6] сделан небольшой обзор по применению вейвлет-анализа для изучения структуры турбулентных полей. Возможность использования вейвлет-анализа сигналов ЛДА для исследования двухфазных потоков рассмотрена в [4]. Поскольку вейвлет-преобразование является двухпараметрическим (частотно-временным в нашем случае), оно

* Работа частично финансировалась Министерством образования РФ.

позволяет получить одновременные оценки как доплеровского сдвига частоты, так и момента пролета частиц через измерительный объем. Эти параметры, в свою очередь, несут информацию о скорости и концентрации частиц в потоке. Вейвлет-анализ можно использовать также и для селекции доплеровских сигналов (например, по амплитуде, фазе или форме).

Алгоритм непрерывного вейвлет-преобразования имеет вид [7]

$$WU(\tau, q) = \int_{-\infty}^{\infty} w\left(\frac{t-\tau}{q}\right) \frac{u(t)}{q} dt, \quad (1)$$

где $WU(\tau, q)$ – вейвлет-спектр сигнала; $u(t)$ – исследуемый сигнал; $w(t)$ – базисный вейвлет; q – масштабный множитель; τ – параметр временного сдвига. В качестве исходных базисных вейвлетов будем использовать такие известные вейвлеты, как [7]

$$w_1(t) = (1-t^2) \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} \quad (2)$$

– "Mexican Hat"-вейвлет и

$$w_2(t) = \exp\left\{ik_0\left(t - \frac{t^2}{2}\right)\right\} \quad (3)$$

– вейвлет Морле. Здесь i – мнимая единица; k_0 – частотный параметр. Реальная и мнимая часть вейвлета Морле имеет форму отфильтрованного одночастичного доплеровского сигнала. Отношение значений параметра k_0 и масштабного множителя q , при котором имеет место наибольшая корреляция между смещенным вейвлетом Морле и исследуемым сигналом, дает искомую оценку доплеровской частоты. Значение параметра временного сдвига τ служит при этом оценкой временного интервала между началом отсчета и моментом пролета частицы через центр измерительного объема.

Вейвлет-анализ доплеровских сигналов. Рассмотрим сначала результаты вейвлет-анализа одночастичного доплеровского сигнала, модель которого имеет вид:

$$u(t) = U_0 [1 + M \cos(\Omega_0 t + \varphi)] \exp\{-\alpha^2 (t - t_0)^2\}, \quad (4)$$

где U_0 – амплитуда сигнала в момент времени t_0 ; M – индекс амплитудной модуляции; Ω_0 – частота доплеровского сигнала; φ – начальная фаза; α – коэффициент, определяющий длительность доплеровского сигнала. Оцениваемыми параметрами являются частота Ω_0 и момент пролета частицы через центр измерительного объема t_0 . Осциллограмма сигнала вида (4) приведена на рис. 1, *a*, а модуль его спектра Фурье – на рис. 1, *b*.

Графики вейвлет-спектров данного сигнала, полученные с использованием вейвлетов "Mexican Hat" и Морле и представляющие собой построенные в координатах (τ, q) линии уровня функции $WU(\tau, q)$, приведены соответственно на рис. 1, *c* и *d*. Положение максимума функции $WU(\tau, q)$ позволяет оценить частоту и временной сдвиг доплеровского сигнала. По результатам численного моделирования при изменении масштабного множителя q

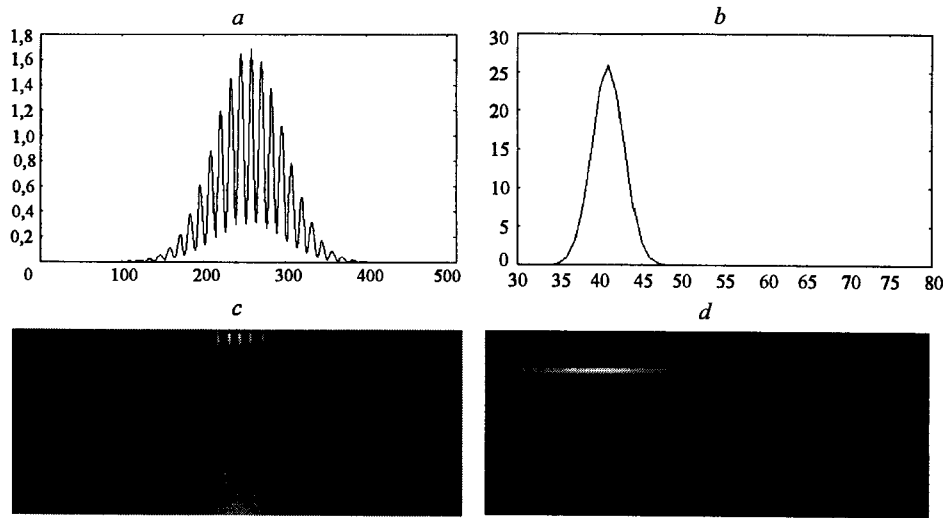


Рис. 1. Одночастичный доплеровский сигнал

в интервале от 1 до 5 и параметра временного сдвига τ в пределах всего интервала наблюдения (общее число точек расчета значений вейвлет-спектра равно 20000) методические погрешности оценок доплеровской частоты и момента пролета, возникающие за счет дискретизации, не превышают 1 %.

Существенно более сложным оказывается анализ доплеровского сигнала, образованного путем рассеяния зондирующего излучения одновременно двумя частицами. Модель такого сигнала описывается выражением вида

$$u(t) = U_1 [1 + M_1 \cos(\Omega_1 t + \varphi_1)] \exp\{-\alpha_1^2 (t - t_1)^2\} + U_2 [1 + M_2 \cos(\Omega_2 t + \varphi_2)] \exp\{-\alpha_2^2 (t - t_2)^2\}, \quad (5)$$

где U_1 , M_1 , Ω_1 , φ_1 , α_1 , t_1 и U_2 , M_2 , Ω_2 , φ_2 , α_2 , t_2 – амплитуда сигнала, индекс амплитудной модуляции, частота доплеровского сигнала, начальная фаза, коэффициент, определяющий длительность доплеровского сигнала и начальный момент времени для первого и второго сигналов соответственно. Оцениваемыми параметрами являются доплеровская частота, амплитуда, индекс амплитудной модуляции, фазовый сдвиг и момент появления частицы в измерительном объеме.

Осциллограмма сигнала, полученного от двух одинаковых рассеивающих частиц, движущихся одна за другой с равными скоростями, приведена на рис. 2, *a*. Спектр Фурье такого сигнала, содержащий расщепленную доплеровскую линию, изображен на рис. 2, *b*. При этом вейвлет-спектр, рассчитанный с использованием базисного вейвлета "Mexican Hat", в области достаточно больших значений масштабного коэффициента q имеет два ярко выраженных максимума, соответствующих значениям временного сдвига τ парциальных сигналов от каждой из двух частиц (рис. 2, *c*). Вейвлет-спектр Морле, в свою очередь, оказывается расщепленным подобно спектру Фурье (рис. 2, *d*).

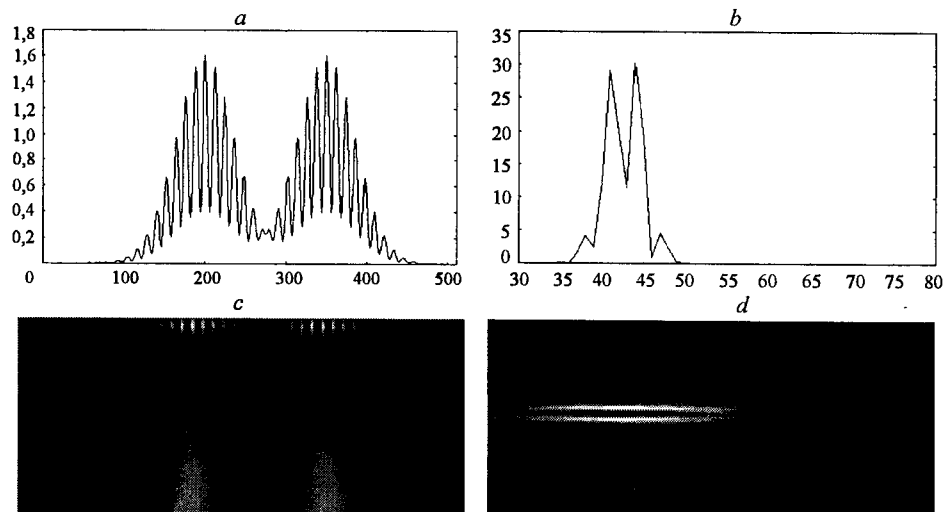


Рис. 2. Сигнал от двух одинаковых частиц

Осциллограмма сигнала, имеющего разные амплитуды U_1, U_2 , индексы модуляции M_1, M_2 , доплеровские частоты Ω_1, Ω_2 , начальные фазы φ_1, φ_2 , коэффициенты, определяющие длительность доплеровского сигнала, α_1, α_2 , а также разные моменты пролета через центр измерительного объема t_1, t_2 , приведена на рис. 3, *a*. График вейвлет-спектра данного сигнала, полученного с использованием вейвлета Морле, изображен на рис. 3, *d*. Из анализа рисунка видно, что вейвлет-спектр двухчастичного сигнала имеет два локальных максимума. Численное моделирование подтвердило тот факт, что значения каждого из максимумов пропорциональны амплитудам высокочастотных составляющих сигналов соответствующих частиц. При изменении масштабного множителя q в интервале от 1 до 5 и параметра временного сдвига τ в пределах всего интервала наблюдения (общее число точек расчета

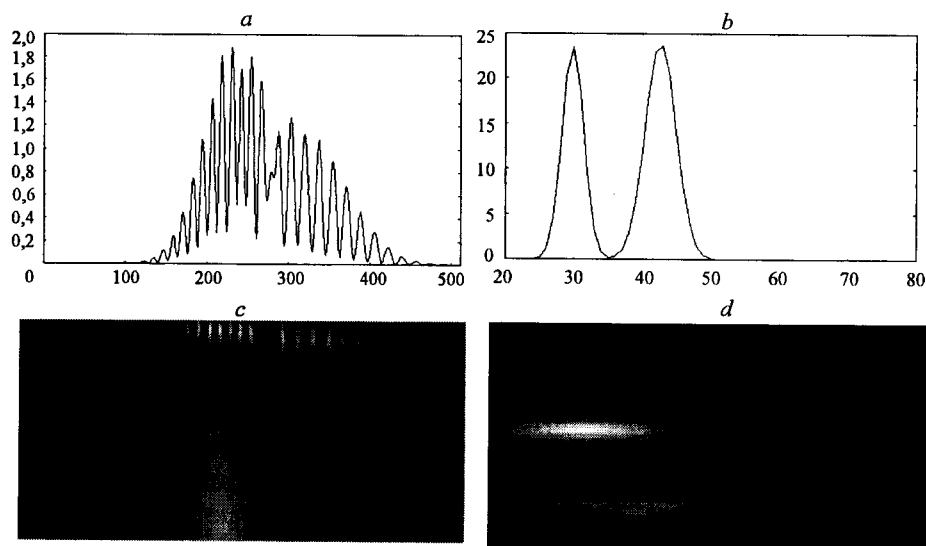


Рис. 3. Двухчастичный сигнал в замедляющемся потоке

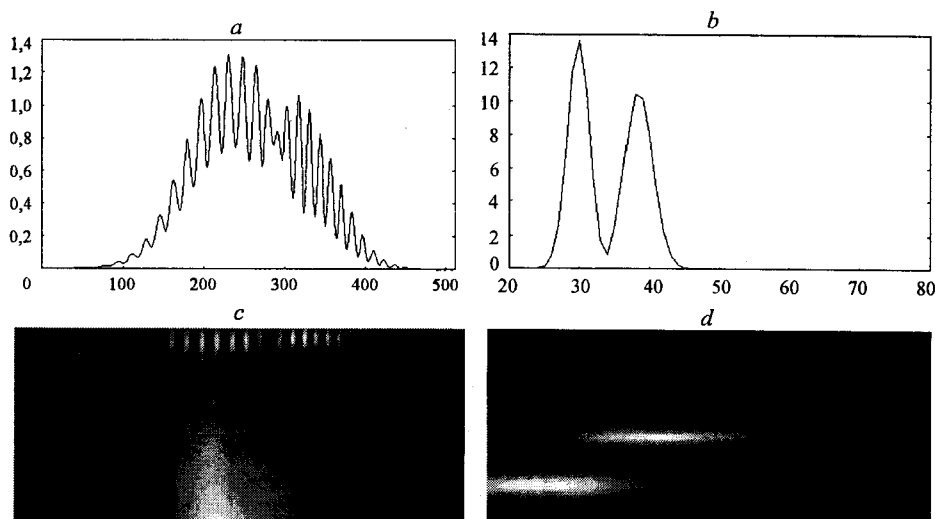


Рис. 4. Двухчастичный сигнал в ускоряющемся потоке

значений вейвлет-спектра равно 20000) методические погрешности оценок доплеровских частот и моментов пролета частиц, возникающие за счет дискретизации, не превышают 2 %. Разница значений моментов пролета частиц, умноженная на их скорость, равна расстоянию между частицами, которое, в свою очередь, дает оценку их концентрации.

Особый интерес представляет сравнение характеристик двухчастичных доплеровских сигналов, приведенных на рис. 3, $a-d$ и 4, $a-d$, которые соответствуют частицам с различными размерами и скоростями. То, что спектры Фурье этих сигналов имеют две близко расположенные спектральные линии, свидетельствует либо о наличии в сигналах двух составляющих с близкими частотами, либо о присутствии в них участков с равными частотами, но противоположными фазами. Указанные особенности спектра Фурье могут иметь место либо при рассеянии на двух частицах, имеющих разные скорости, либо при рассеянии на одной большой частице [2, 3]. Таким образом, модуль спектра Фурье не позволяет однозначно оценить параметры рассеивающей частицы и скорость потока. Данная задача может быть решена путем совместного анализа вейвлет-спектров сигналов. Вейвлет-преобразование, проведенное с использованием вейвлета "Mexican Hat", выделяет низкочастотную составляющую исследуемых сигналов. Наличие в представленных на рисунке вейвлет-спектрах этого типа двух ярко выраженных областей позволяет сделать вывод о двухчастичном характере сигналов. Более светлые участки вейвлет-спектра соответствуют более высоким уровням низкочастотных компонент, а следовательно, частицам с большими размерами. Анализ рис. 3 и 4 позволяет сделать вывод, что более мелкая частица следует за более крупной. Для получения информации о скорости частиц следует провести анализ вейвлет-спектров Морле, которые хорошо выделяют высокочастотные компоненты доплеровских сигналов. На модуле вейвлет-спектра Морле (см. рис. 3, d) хорошо видны две области, соответствующие разным частотно-временным параметрам рассеивающих частиц. Верхняя из областей соответствует меньшим значениям масштабного множителя q и параметра временного сдвига τ , т. е. более высокой скорости частицы и более раннему моменту ее появления. Таким образом, совместное изучение представ-

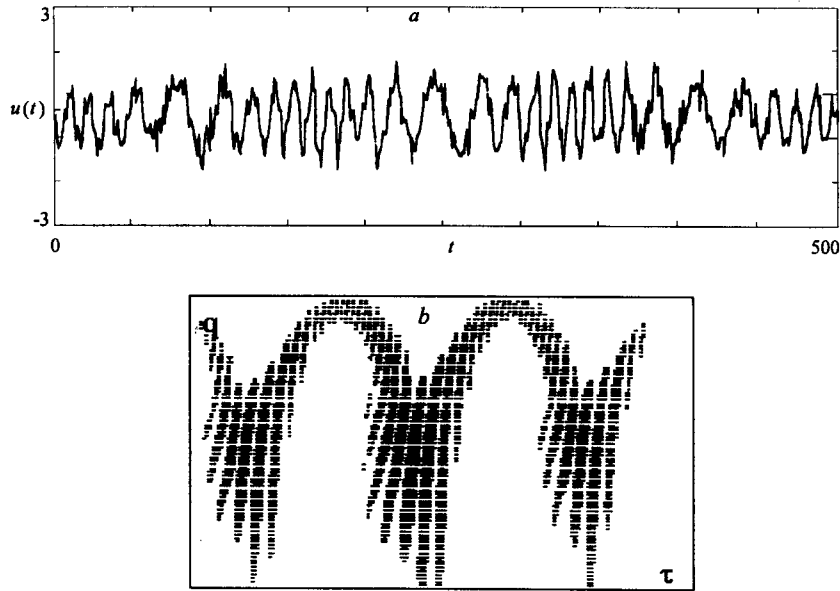


Рис. 5. Сигнал от колеблющейся частицы

ленных на рис. 3, *c*, *d* вейвлет-спектров позволяет сделать вывод о том, что более крупная частица имеет более высокую скорость, т. е. поток замедляющийся. Аналогичный анализ вейвлет-спектров, изображенных на рис. 4, *c*, *d*, позволяет говорить о том, что в этом случае более мелкая частица имеет более высокую скорость, т. е. поток ускоряющийся.

Вейвлет-анализ сигналов от колеблющихся частиц. При исследовании аэро- и гидродинамических потоков встречаются случаи, когда вследствие механических вибраций примыкающих к потоку конструкций частицы, присутствующие в потоке, находятся под действием акустического поля. При этом составляющая скорости частиц, направленная по нормали к фронту акустической волны, оказывается промодулированной с частотой акустического воздействия. Выражение для доплеровского сигнала в этом случае имеет вид:

$$u(t) = U_0 \{1 + M \cos[\Omega_0 t + m \sin(\Omega_a t + \varphi)]\} \exp\{-\alpha^2 (t - t_0)^2\}, \quad (6)$$

где m – индекс частотной модуляции; Ω_a – частота акустических колебаний. Осциллограмма сигнала с широкополосным шумом приведена на рис. 5, *a*, а график его вейвлет-спектра Морле – на рис. 5, *b*. Анализ графиков показывает, что вейвлет-спектр хорошо отражает частотно-временную структуру исследуемого сигнала, позволяя оценить его основные параметры.

Заключение. Применение метода вейвлет-анализа при обработке доплеровских сигналов в лазерной анемометрии представляется перспективным для исследования двухфазных потоков, поскольку структура таких сигналов является существенно более сложной, чем для однофазных потоков, и традиционные методы обработки оказываются малоэффективными. Рассмотренный метод позволяет существенно повысить информативность лазерных доплеровских измерительных систем. Анализ вейвлет-спектров дает возможность сделать вполне определенный вывод о двухчастичном характере

сигналов, сравнить между собой размеры частиц, а также оценить значения доплеровской частоты (или скорости) и временного интервала между частицами (или расстояния).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rinkevichius B. S. Laser Diagnostics in Fluid Mechanics. N. Y.: Begell House, Inc., 1998.
2. Дубнищев Ю. Н. Влияние размеров рассеивающих частиц на сигнал в лазерных измерителях скорости с зондирующим полем // Квантовая электроника. 1995. 22, № 12. С. 1262.
3. Tolkachev A. V., Gagina N. M., Grechikhin V. A. et al. Experimental research of LDA signals from a large particle // Laser Anemometry. Advances and Applications /Eds. B. Ruck, A. Leder, D. Dopheide. Karlsruhe, 1997. P. 371.
4. Yesin M. V., Grechikhin V. A., Rinkevichius B. S. The Wavelet analysis of LDA signals for two-phase flows // Laser Anemometry. Advances and Applications /Eds. A. Cenedese, D. Pietrogiaconi. Roma, 1999. P. 207.
5. Aleksandrov S. A., Grechikhin V. A., Rinkevichius B. S. The cepstral analysis of LDA signals // Ibid. P. 112.
6. Li H., Takei M., Ochi M. et al. Coherent structure visualization of two-dimensional vortex flow by wavelet autocorrelation technique // Modern Techniques and Measurements in Fluid Flows: Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Fluid Dynamic Measurement and its Applications /Eds. X. Shen, X. Sun. Beijing, China: Intern. Acad. Publ., 1997. P. 197.
7. Reshnikoff H. L., Wells R. O. Wavelet-Analysis. N. Y.: Springer, 1998.

*Московский энергетический институт
(Технический университет),
E-mail: Rinkev@deans.mpei.ac.ru*

*Поступила в редакцию
21 декабря 1999 г.*