



УДК 681.7.069

В.А. Гречихин

Московский энергетический институт (технический университет), Россия

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДОПЛЕРОВСКОЙ ЧАСТОТЫ В ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ

Дан обзор методов оценки мгновенных значений доплеровской частоты сигналов лазерных доплеровских анемометров и виброметров. Рассмотрены результаты использования методов преобразования Гильберта, дискретного счета и вейвлет-анализа для восстановления закона изменения мгновенной частоты от времени для различных математических моделей сигналов.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДОПЛЕРОВСКОЙ ЧАСТОТЫ, МГНОВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ, МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА, МЕТОД ДИСКРЕТНОГО СЧЕТА, МЕТОД ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

1. ВВЕДЕНИЕ. Лазерные системы экспериментального исследования потоков жидкостей и газов получили в настоящее время широкое распространение как при проведении научных экспериментов, так и в производственных технологиях, включая мониторинг и диагностику окружающей среды. Среди указанных систем можно выделить лазерные доплеровские измерители скорости, построенные по интерферометрической схеме. Так, измерение скоростей поступательного либо колебательного движения частиц в потоках с хорошей пространственно-временной локализацией проводится при помощи лазерных доплеровских анемометров (ЛДА) и виброметров (ЛДВ). Существующие лазерные системы оценивают параметры моделей доплеровских сигналов в режимах, когда скорость контролируемого объекта в области измерительного объема либо считается постоянной, либо описывается периодической функцией времени. В реальных условиях потребности практики требуют проведения высокоточных дистанционных измерений параметров нестационарных процессов в вихревых и турбулентных потоках, а также анализа характеристик виброоткликов в режиме случайных либо ударных возмущений. В этих условиях становится актуальной задача оценки параметров нестационарных моделей доплеровских сигналов, регистрируемых ЛДА и ЛДВ. Информационным параметром при этом является мгновенная частота, определение понятия и оценка которой в общем случае являются сложной задачей.

2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ. С появлением быстродействующих систем оцифровки и ввода в ЭВМ выходных сигналов оптико-электронных датчиков стало возможным, используя компьютерные алгоритмы обработки, перейти от измерения среднего значения доплеровской частоты к оценке её мгновенного значения.

Модель доплеровского сигнала в общем случае может быть описана выражением

$$u(t) = U_0(t) + U(t)\cos[\omega_0 t + \phi_s(t)] = U_0(t) + U(t)\cos\varphi_s(t), \quad (1)$$

где $U_0(t)$ – низкочастотная составляющая сигнала, $U(t)$ – огибающая, ω_0 – центральная частота, $\phi_s(t)$ – начальная фаза, а $\varphi_s(t)$ – полная фаза сигнала, равная

$$\varphi_s(t) = \omega_0 t + \phi_s(t). \quad (2)$$

Моделью (1) можно описать одночастичный сигнал ЛДА

$$u_{LDA}(t) = U_m [1 + M \cos(\omega_0 t + 2\pi v_x t / \Lambda + \phi_0)] \exp\{- (v_x t / w_0)^2\} \quad (3)$$

или сигнал гетеродинного

$$u_{LDV}(t) = U_m \cdot \{1 + M \cos[\omega_0 t + 2\pi(L/\Lambda)\sin(\Omega_v t + \varphi) + \beta]\} \quad (4)$$

либо гомодинного ЛДВ

$$u_{LDV}(t) = U_m \cdot \{1 + M \cos[2\pi(L/\Lambda)\sin(\Omega_v t + \varphi) + \beta]\}. \quad (5)$$

В случае, когда в модели (1) $U_0(t) \equiv 0$, а функции $U(t)$ и $\phi_s(t)$ являются медленно меняющимися во времени по сравнению с $\cos\omega_0 t$, сигнал $u(t)$ называют узкополосным или квазигармоническим. Мгновенной частотой сигнала называется при этом скорость изменения его полной фазы, равная

$$\omega_s(t) = d\varphi_s(t)/dt = \omega_0 + d\phi_s(t)/dt. \quad (6)$$

Задача восстановления огибающей и полной фазы сигнала по заданному массиву отсчетов его мгновенных значений в общем случае не имеет однозначного решения. Одним из способов ликвидации неоднозначности является использование обобщения векторного представления гармонического колебания на случай узкополосных сигналов. При этом полная фаза и мгновенная частота могут быть найдены по формулам:

$$\begin{aligned} \varphi_s(t) &= \omega_0 t + \phi_s(t) = \text{Arctg}[\dot{\mathbf{u}}(t)/u(t)], \\ \omega_s(t) &= \omega_0 + d\phi_s(t)/dt = d/dt\{\text{Arctg}[\dot{\mathbf{u}}(t)/u(t)]\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где функция $\dot{\mathbf{u}}(t)$ находится как преобразование Гильберта от исходного сигнала [1].

На рис. 1 приведен пример использования метода цифрового преобразования Гильберта (ЦПГ) для оценки мгновенной частоты сигнала ЛДА при рассеянии зондирующего излучения на «большой» частице, размер которой сравним с периодом интерференционной картины в области измерительного объема [2]. Видно, что в центральной части импульса ЛДА полная фаза доплеровского сигнала претерпевает скачок, которому соответствует выброс мгновенной частоты, приводящий к смещению оценки её среднего значения,

т.е. появлению дополнительной погрешности измерения скорости. Используя отсчеты мгновенной частоты, расположенные за пределами указанного выброса, можно устранить данную погрешность, повысив в итоге точность измерений.

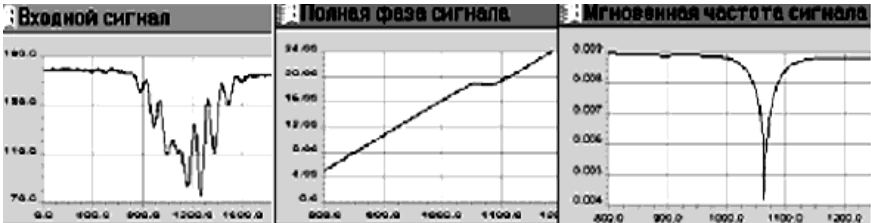


Рис. 1. Результаты обработки сигнала ЛДА от «большой» частицы

На рис. 2 приведены результаты обработки сигнала тестовых виброколебаний, создаваемых диффузором динамической головки громкоговорителя, на которую подавалось возбуждающее напряжение в виде суммы двух гармонических колебаний с частотами 1 и 2 кГц и амплитудами 40 и 35 мВ соответственно. В качестве рассеивателя зондирующего оптического излучения использовался заостренный край приклеенной к диффузору тонкой металлической пластинки. Средняя частота сигнала составляла $f_0 = 10$ кГц. На рис. 2а показана временная диаграмма значений мгновенной частоты сигнала, регистрируемого измерительной системой DISA55A, а на рис. 2б – соответствующая ей спектральная диаграмма [3]. Из анализа спектральной диаграммы видно, что частоты и амплитуды гармоник дискретного спектра мгновенной частоты сигнала с высокой точностью соответствуют параметрам напряжения, управляющего источником виброколебаний.

В тех случаях, когда условие узкополосности сигнала $u(t)$ нарушается, необходимо использовать иные методы оценки $\omega_s(t)$. Одним из них является метод дискретного счета (МДС), заключающийся в определении периодов высокочастотного заполнения сигнала (1) T_s по временному интервалу между "нулями" центрированного процесса. Суть алгоритма состоит в подсчете числа периодов T_d тактовой частоты АЦП, укладывающихся в интервале между моментами перехода через нулевой уровень (с положительным знаком производной) сигнала

$$u(t) = U(t)\cos[\omega_0 t + \phi_s(t)],$$

полученного из (1) путем фильтрации низкочастотной части спектра. Оценка периода T_s находится при этом из соотношения

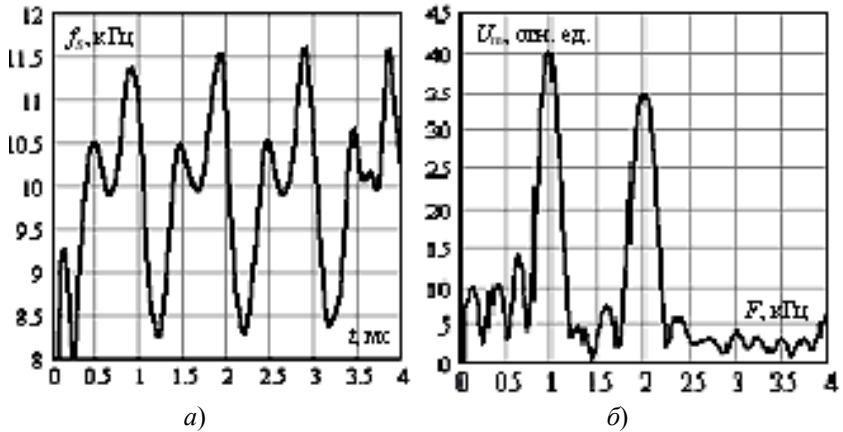


Рис. 2. Результаты оценки мгновенной частоты вибросигнала при бигармоническом возбуждении
 а) временная диаграмма; б) спектральная диаграмма

$$T_s = m T_d + h, \quad (8)$$

где m – число отсчетов в интервале между двумя соседними "нулями", а h – поправочная величина, определяемая по известным координатам двух соседних "нулей" процесса. Результаты измерений мгновенной частоты сигнала ЛДА методами МДС и ЦПГ показаны на рис. 3. Видно, что два метода дают близкие результаты, расхождение между которыми много меньше разброса результатов измерений соседних периодов колебаний.

Для получения оценок мгновенной частоты доплеровских сигналов и параметров закона ее изменения во времени может быть использован метод вейвлет-анализа. Непрерывный вейвлет-спектр $W_U(\tau, q)$ сигнала $u(t)$ определяется соотношением [4]:

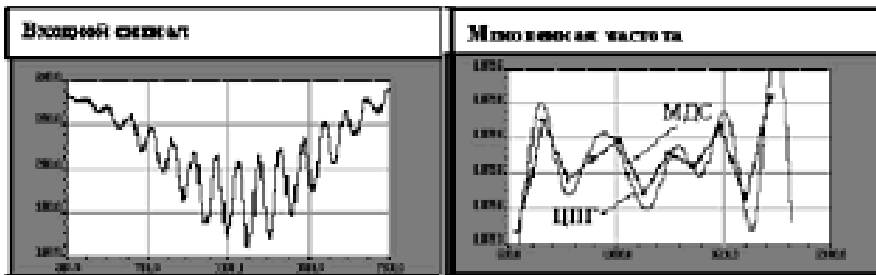


Рис. 3. Результаты измерений мгновенной частоты сигнала ЛДА методами МДС и ЦПГ

$$W_U(\tau, q) = \int_{-\infty}^{\infty} w\left(\frac{t-\tau}{q}\right) \cdot \frac{u(t)}{q} \cdot dt, \quad (9)$$

где $u(t)$ – исследуемый сигнал, $w(t)$ – базисный вейвлет, q – масштабный множитель, τ – параметр временного сдвига. В алгоритме оценки мгновенной частоты сигналов ЛДА и ЛДВ при вычислении вейвлет-спектров целесообразно использовать вейвлет Морле [4]:

$$w(t) = \exp\left\{ik_0t - \frac{t^2}{2}\right\}, \quad (10)$$

где i – мнимая единица, k_0 – частотный параметр. 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. Пример использования метода вейвлет-анализа для обработки двухчастичного сигнала ЛДА приведен на рис. 4.

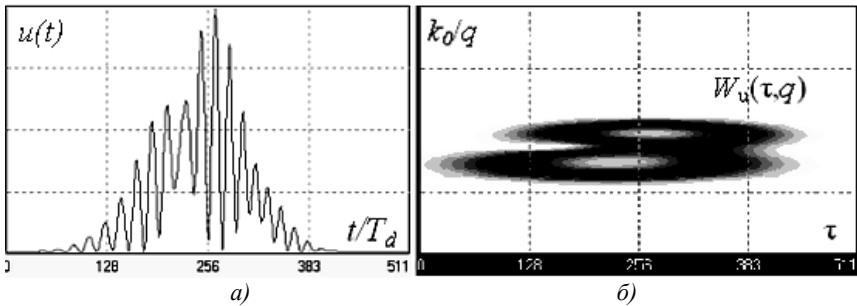


Рис. 4. Вейвлет-анализ двухчастичного сигнала ЛДА
а) двухчастичный сигнал ЛДА; б) вейвлет-спектр сигнала

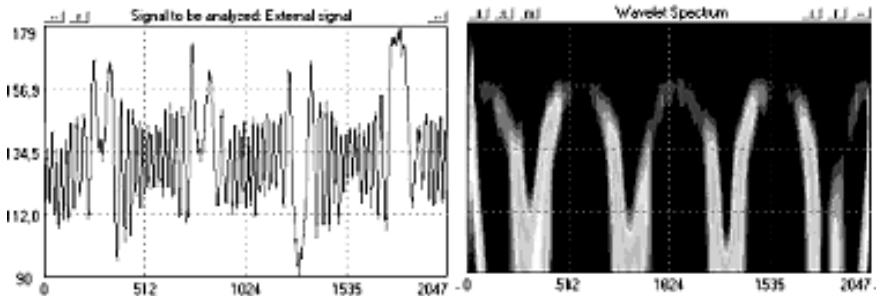


Рис. 5. Вейвлет-анализ экспериментального сигнала гомодинного ЛДВ

На рис. 5 приведены результаты вейвлет-анализа экспериментального сигнала, полученного с установки гомодинного волоконно-оптического ЛДВ. Видно, что закон изменения мгновенной частоты от времени может быть восстановлен и использован для оценки параметров виброколебаний.

3. ВЫВОДЫ. Показано, что представленные алгоритмы позволяют восстанавливать закон изменения мгновенной частоты от времени как для модельных, так и для экспериментальных доплеровских сигналов, повышая тем самым достоверность и информативность результатов измерений. С их помощью может быть восстановлен закон изменения от времени полной фазы сигнала, линейно связанной в интерферометрических системах с законом пространственного перемещения рассеивающего объекта.

4. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вайнштейн Л.А., Вакман Д.Е.** Разделение частот в теории колебаний и волн. М.: Наука. 1983. 233 с.
2. **Complex structure of Doppler spectrum of a single large particle / Grechikhin V.A., Rinkevichius B.S., Stepanov A.V. et. al. / Optical Methods and Data Processing in Heat and Fluid Flow.** London: Mechanical Engineering Publications Limited, 1996, P. 393-402.
3. **Гречихин В.А., Толкачев А.В.** Оценка амплитуды гидроакустических колебаний с использованием ЛДВ // Оптические методы исследования потоков. Труды 9-й Международной НТК / Под. ред. Ю.Н.Дубнищева, Б.С.Ринкевичюса. М.: Издательский дом МЭИ. 2007. С. 288-292.
4. **Reshnikoff H., Wells R.** Wavelet-analysis. New York: Springer, 1998.

V.A. Grechikhin

Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Russia

THE METHODS OF DOPPLER FREQUENCY ESTIMATION FOR LASER SYSTEMS OF FLOWS INVESTIGATION

The methods of an estimation of Doppler frequency instant values of the laser Doppler anemometer and vibrometer signals are discussed. The use results of the Hilbert transformation, the discrete count and the wavelet-analysis methods for restoration of dependence of instant frequency from time for various mathematical models of signals are considered.

METHODS OF DOPPLER FREQUENCY ESTIMATION, INSTANT VALUES, HILBERT TRANSFORMATION METHOD, DISCRETE COUNT METHOD, WAVELET-ANALYSIS METHOD