

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

УДК 681.7.069.24 : 681.3(075)

В. А. Гречихин, Б. С. Ринкевичюс
(Москва)

**ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
В ЛАЗЕРНОЙ АНЕМОМЕТРИИ И ВИБРОМЕТРИИ**

Обсуждаются цифровые алгоритмы спектрального и кепстрального анализа, а также цифрового преобразования Гильберта, используемые при обработке сигналов компьютерными электронными процессорами в лазерной доплеровской анемометрии и виброметрии потоков жидкости и газа. Приведены результаты анализа погрешностей оценки скорости, амплитуды виброколебаний, размера и концентрации рассеивающих частиц в потоке.

Введение. Лазерные доплеровские анемометры (ЛДА) и виброметры (ЛДВ) в настоящее время широко применяются для измерения скоростей поступательного либо колебательного движения частиц в потоках жидкостей и газов. Информацию о среднем значении локальной скорости потока за малый интервал времени получают путем анализа излучения, рассеянного движущейся в потоке частицей, при просвечивании исследуемой области когерентными лазерными пучками. В целях повышения точности измерений, обеспечения их автоматизации, а также для унификации аппаратных и программных средств на практике все большее распространение получают компьютерные измерительные системы (КИС).

В ЛДА и ЛДВ сигналы, содержащие измерительную информацию и поступающие с выхода оптического датчика, вводятся при помощи высокопроизводительного стандартного интерфейса в компьютер, где обрабатываются с применением специализированных цифровых алгоритмов. МикроЭВМ как составная часть цифрового электронного процессора обработки сигнала позволяет реализовать сложные алгоритмы обработки и их адаптацию к принимаемому сигналу, характерные для интеллектуальных измерительных систем.

Применение дополнительных аппаратных средств в виде цифровых сигнальных процессоров дает возможность во многих случаях проводить анализ поступающих сигналов в реальном масштабе времени. За рубежом серийно выпускается несколько типов электронных процессоров, специально разработанных для анализа доплеровских сигналов и использующих идеологию КИС. В частности, известны варианты счетно-импульсных

систем (IFA 550 фирмы TSI, США); системы с адаптивной автокорреляционной обработкой (IFA 750 фирмы TSI, США); процессоры, в которых применяется периодограммный метод анализа доплеровских сигналов (импульсный цифровой спектральный анализатор BSA фирмы "Dantec", Дания), и другие. В настоящей работе обсуждается ряд цифровых алгоритмов обработки сигналов ЛДА и ЛДВ компьютерными электронными процессорами данного типа.

Спектральный метод анализа. Одним из наиболее распространенных в настоящее время методов анализа доплеровских сигналов является спектральный метод. С его помощью проводится, в частности, измерение доплеровского сдвига частоты сигналов ЛДА. Воспользуемся известной [1] интерференционной моделью дифференциальной схемы анемометра, согласно которой при прохождении рассеивающей частицы через центр измерительного объема, образованного областью пересечения двух когерентных пучков, сигнал на выходе фотоприемника (без учета шума) имеет вид

$$u(t) = U_m [1 + M \cos(\Omega_m t \pm 2\pi v_x t / \Lambda)] \exp\{-2(v_x t / w_0)^2\}, \quad (1)$$

где U_m – среднее значение сигнала в центре импульса; M – индекс амплитудной модуляции; Ω_m – разность частот интерферирующих пучков; v_x – измеряемая проекция вектора скорости частицы; Λ – период интерференционной картины; w_0 – эффективный радиус измерительного объема. Скорость рассеивающей частицы определяется косвенным путем по результатам измерений частоты заполнения радиоимпульса (1): $f_x = |\Omega_m / 2\pi \pm v_x / \Lambda|$, а погрешность оценки скорости складывается из погрешностей измерения величин Ω_m , Λ и f_x . При условии, что параметры Ω_m и Λ известны точно, относительная погрешность измерения скорости рассеивающей частицы может быть найдена из выражения

$$\delta_v = \frac{\delta_f}{|1 \pm \Omega_m / (2\pi f_x)|}. \quad (2)$$

Подробный анализ цифровых методов измерения f_x сигнала (1) и оценка их погрешностей проведены в [2–4]. Исходная информация о принятом сигнале содержится в выборке из N отсчетов x_k смеси сигнала и шума, взятых с интервалом T_0 . Спектральный алгоритм измерения частоты сигнала ЛДА, проанализированный в [2], использует в качестве оценки f_x координату максимума модуля спектральной плотности импульса (1), пропущенного через схему предварительной фильтрации. При этом спектральная плотность импульса определяется как дискретное преобразование Фурье (ДПФ) выборки, а положение максимума модуля спектральной плотности рассчитывается при помощи гауссовой аппроксимации огибающей дискретного спектра по трем наибольшим отсчетам. Формула для оценки f_x имеет вид

$$\hat{f}_x = \frac{\Omega}{2\pi} \left[r_0 - \frac{\ln(C_1 / C_3)}{2 \ln(C_2^2 / C_1 C_3)} \right], \quad (3)$$

где $C_1 = |C(r_0 \Omega - \Omega)|$, $C_2 = |C(r_0 \Omega)|$, $C_3 = |C(r_0 \Omega + \Omega)|$ – модули коэффициентов ДПФ выборки отсчетов сигнала с номерами $r_0 - 1$, r_0 и $r_0 + 1$ (r_0 –

номер максимального по модулю отсчета в окрестности частоты f_s), а $\Omega = 2\pi/(NT_0)$ – интервал дискретизации спектра.

Относительная погрешность измерения частоты f_s содержит систематическую и случайную составляющие. Систематическая составляющая погрешности носит методический характер и обусловлена фильтрацией и дискретизацией сигнала, а также неточностью используемой расчетной формулы (3). Погрешность фильтрации появляется вследствие деформации спектра исследуемого сигнала частотной характеристикой входного полосового фильтра. Причиной возникновения погрешности дискретизации являются искажения спектра дискретного сигнала по сравнению с исходным спектром, приводящие к смещению положения максимума модуля его спектральной плотности. Данные искажения становятся существенными при предельно малых значениях частоты дискретизации, близких к удвоенной верхней граничной частоте спектра сигнала (1). Последняя из составляющих методической погрешности обусловлена неточностью расчетной формулы (3), которая не учитывает влияния низкочастотной части спектра сигнала (1) на координату максимума модуля его спектральной плотности в окрестности частоты f_s . Расчетные формулы для вышеперечисленных составляющих погрешности и результаты расчетов приведены в [2–4].

Источниками возникновения случайной составляющей погрешности оценки доплеровской частоты являются неточность установки частоты дискретизации и погрешность расчета коэффициентов ДПФ выборки. При использовании высокостабильных генераторов опорных колебаний с цифровым контролем частоты выходного гармонического сигнала можно полагать, что случайная составляющая погрешности определяется отношением сигнал/шум на выходе фотоприемника, инструментальной погрешностью электронного блока и размером обрабатываемой выборки. Графики зависимости предельного значения случайной составляющей погрешности от параметров исходного сигнала приведены в [2, 4].

Алгоритмы цифрового спектрального анализа могут быть с успехом применены для решения задач виброметрии. В [5, 6] рассмотрены различные методы оценки амплитуды виброколебаний с применением ЛДВ. Показано, что при наличии сдвига частот интерферирующих пучков выходной сигнал ЛДВ представляет собой частотно-модулированное колебание вида

$$U(t) = U_0 \cos[\Omega_s t + 2\pi(L/\Lambda) \sin(\Omega_v t + \varphi) + \beta], \quad (4)$$

где U_0 – амплитуда сигнала; Ω_s – среднее значение частоты сигнала; L – амплитуда виброколебаний; Ω_v – частота вибрации; φ, β – начальные фазы.

Амплитуда вибрации определяется из (4) по измеренному значению индекса частотной модуляции $m = 2\pi(L/\Lambda)$. Измерение m при малых значениях амплитуды $L \ll \Lambda$ можно провести спектральным методом, оценивая относительный уровень боковых гармоник спектра сигнала относительно гармоники частоты Ω_s . При использовании компьютерного электронного процессора оценка уровней гармоник спектра сигнала проводится по значениям модулей коэффициентов ДПФ выборки. Перед спектральной обработкой данных целесообразно увеличить число элементов выборки в 2–4 раза, дополнив ее соответствующим числом нулевых отсчетов. Следует отметить также, что при низкой частоте вибрации Ω_v интервал наблюдения может содержать малое число периодов виброколебаний или даже менее одного периода. В этих случаях для оценки уровней гармоник можно вос-

пользоваться параметрическими методами цифрового спектрального анализа [7].

Метод цифрового преобразования Гильберта. На практике при решении задач анемометрии и виброметрии достаточно часто приходится иметь дело с процессами, которые описываются более сложными моделями обрабатываемых сигналов. Такая ситуация, в частности, возникает в случаях, когда закон изменения фазы сигнала по тем или иным причинам становится нелинейным. При этом измерительная информация оказывается заключенной в значении одного или нескольких параметров узкополосного сигнала.

Известно, что произвольный узкополосный сигнал может быть представлен в следующем виде:

$$U(t) = U_0(t) \cos[\omega_0 t + \phi_s(t)] = U_0(t) \cos \varphi_s(t), \quad (5)$$

где $U_0(t)$ – огибающая; ω_0 – центральная частота; $\phi_s(t)$ – начальная фаза; $\varphi_s(t)$ – полная фаза сигнала, которая определяется соотношением

$$\varphi_s(t) = \omega_0 t + \phi_s(t),$$

а мгновенная частота сигнала –

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

При компьютерной реализации цифровых алгоритмов обработки узкополосных сигналов последние представлены в дискретной форме массивом из N отсчетов мгновенных значений $\{U_k\}$, где $U_k = U(kT_0)$, $k = 1, \dots, N$, T_0 – интервал дискретизации. Задача восстановления отсчетов 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 векторного представления гармонического колебания для узкополосных сигналов. Узкополосному сигналу соответствует вектор (точка на комплексной плоскости) $\dot{Z}(t) = U(t) + j\dot{U}(t)$, где $\dot{U}(t)$ – преобразование Гильберта от исходного сигнала. Длина вектора (модуль комплексной функции $\dot{Z}(t)$) принимается за огибающую сигнала $U_0(t)$:

$$U_0(t) = [U^2(t) + \dot{U}^2(t)]^{1/2}.$$

Полная фаза $\varphi_s(t)$ и мгновенная частота $\omega_s(t)$ определяются выражениями:

$$\varphi_s(t) = \omega_0 t + \phi_s(t) = \arctg[\dot{U}(t)/U(t)],$$

$$\omega_s(t) = \omega_0 + d\phi_s(t)/dt = d/dt \{ \arctg[\dot{U}(t)/U(t)] \}.$$

При цифровой обработке вычисление отсчетов сопряженного по Гильберту сигнала $\dot{U}(t)$ может быть проведено спектральным методом. Вначале с использованием дискретного преобразования Фурье находится массив отсчетов дискретного спектра исходного сигнала. Спектральная плотность сопря-

женного сигнала $S_U(\omega)$ связана со спектром исходного сигнала $S_U(\omega)$ известным соотношением

$$S_U(\omega) = \begin{cases} jS_U(\omega), & \omega < 0, \\ -jS_U(\omega), & \omega > 0. \end{cases}$$

Массив отсчетов сопряженного сигнала $\hat{U}(t)$ можно теперь найти при помощи обратного ДПФ. Отсчеты полной фазы $\varphi_s(kT_0)$ и частоты $\omega_s(kT_0)$ той огибающей методами цифрового спектрального анализа (ЦСА) и цифрового преобразования Гильберта (ЦПГ) от отношения сигнал/шум в центре импульса q , полученные в [4, 8] для двух значений числа отсчетов n на периоде доплеровских колебаний, приведены на рис. 1. Сравнение графиков показывает, что при малом отношении сигнал/шум более высокую точность измерений обеспечивает метод ЦСА. Достоинством метода ЦПГ является то, что он позволяет получить оценки мгновенных значений частоты сигнала при предельно малом числе отсчетов на периоде доплеровских колебаний. Возможности применения метода ЦПГ для оценки параметров сигналов ЛДВ и погрешности оценки амплитуды виброколебаний были подробно исследованы в [9]. Было показано, что амплитуда колебаний рассеивающих частиц при использовании вышерассмотренной модели сигнала (4) определяется соотношением

$$L = (\Lambda/2\pi) \Delta\Omega/\Omega_v, \quad (6)$$

где $\Delta\Omega$ – девиация частоты сигнала (4). Измерение параметра $\Delta\Omega$ проводится путем квадратурной обработки последовательности отсчетов мгновенной

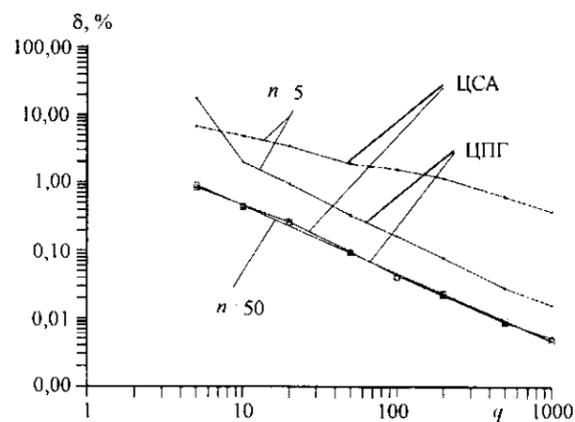


Рис. 1. Погрешности оценки среднего значения частоты одночастичного сигнала ЛДА методами ЦСА и ЦПГ

частоты сигнала (4) при условии, что частота виброколебаний точно известна либо определена другими методами.

Относительная погрешность оценки амплитуды складывается из погрешности калибровки периода интерференционного поля и погрешности измерения девиации частоты: $\delta_I = \delta_\Lambda + \delta_{\Delta\Omega}$. В [9] показано, что погрешность измерения девиации частоты связана с недостаточной узкополосностью сигнала (4), конечной длительностью интервала наблюдения, ограниченным числом отсчетов в выборке и наличием шума. Графики зависимости случайной составляющей относительной погрешности оценки амплитуды от величины нормированной амплитуды колебаний для различных значений отношения сигнал/шум, полученные методом численного моделирования, приведены на рис. 2. Из графиков видно, что погрешность измерений резко возрастает как при увеличении амплитуды колебаний свыше некоторого уровня, так и при ее значительном уменьшении. В первом случае это связано с нарушением узкополосности сигнала, а во втором – с наличием шума, который ограничивает чувствительность метода.

Кепстральный анализ. В одночастичном режиме работы ЛДА при малых размерах рассеивающих частиц сигнал на выходе фотоприемника имеет вид (1). Спектр данного элементарного сигнала состоит из низкочастотной и высокочастотной компонент гауссовой формы. Рассмотрим двухфазный поток с концентрацией частиц, при которой появление двух рассеивающих центров в измерительном объеме ЛДА наиболее вероятно. Доплеровский сигнал можно представить суммой двух гауссовых радиоимпульсов с той или иной степенью перекрытия. В [10–12] показано, что в этом случае спектр доплеровского сигнала оказывается изрезанным и в нем имеется несколько локальных максимумов. Число таких максимумов и их положение на оси частот зависит от временного интервала между перекрывающимися импульсами. Анализ показывает, что наличие пульсаций спектра сигнала ЛДА в двухчастичном режиме работы анемометра на практике может приводить к значительной дополнительной погрешности спектральной оценки доплеровской частоты. Аналогичная ситуация возникает при обработке доплеровских сигналов, рассеянных одиночной частицей больших размеров.

На основании изложенного становится ясно, что при обработке доплеровских сигналов необходимо учитывать сложную структуру их спектра, что

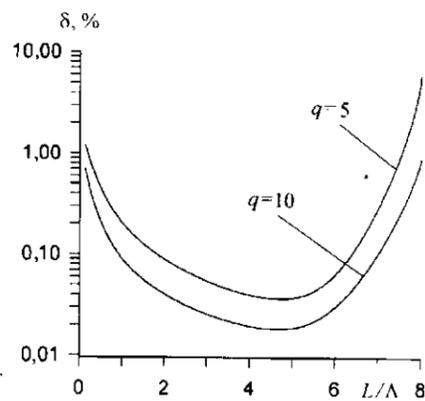


Рис. 2. Погрешность оценки амплитуды виброколебаний

позволяет уменьшить погрешность оценки скорости частиц и получить дополнительную информацию об их размерах или концентрации. Одним из методов восстановления спектра одиночного импульса и оценки временного интервала между импульсами является кепстральный анализ, предложенный впервые как эвристический метод определения моментов прихода отражений составного сигнала [13]. Возможности данной методики для оценки параметров сигналов ЛДА были исследованы в [12, 14] методом численного моделирования. Компьютерная модель учитывала параметры оптической схемы анемометра, количество частиц в измерительном объеме ЛДА, их размеры и траектории движения. Цифровая кепстральная обработка была использована для уменьшения погрешности оценки скорости путем восстановления спектра элементарного доплеровского сигнала, а также для определения режима работы ЛДА, размеров частиц и расстояния между ними. Алгоритм обработки предусматривал предварительную фильтрацию сигнала и расчет кепстров его высокочастотной и низкочастотной составляющих. При наличии пиков в кепстре низкочастотной составляющей делается вывод о том, что источником сигнала является совокупность нескольких частиц или одна частица, пролетающая вблизи границ измерительного объема. В отсутствие пиков регистрировался одночастичный режим работы ЛДА. Пики в кепстре высокочастотной составляющей наблюдались при обработке сигналов как от нескольких частиц, так и от одной большой частицы. При этом координата первого максимума в кепстре в двухчастичном режиме соответствовала временному интервалу между частицами, а в одночастичном режиме – диаметру частицы.

Исследования влияния кепстральной обработки на погрешность оценки доплеровской частоты сигнала ЛДА спектральным методом показали, что фильтрация кепстра дает заметные результаты, если размеры большой частицы либо расстояния между малыми частицами превышают $1,5w_0$. При малых уровнях шума (отношение сигнал/шум не менее 20 дБ) погрешность измерений уменьшается за счет кепстральной обработки в 50–100 раз. Осциллограмма и график модуля спектральной плотности двухчастичного сигнала ЛДА приведены на рис. 3.

Задача определения режима работы ЛДА (одночастичный или двухчастичный режимы) путем кепстрального анализа решается с достаточно боль-

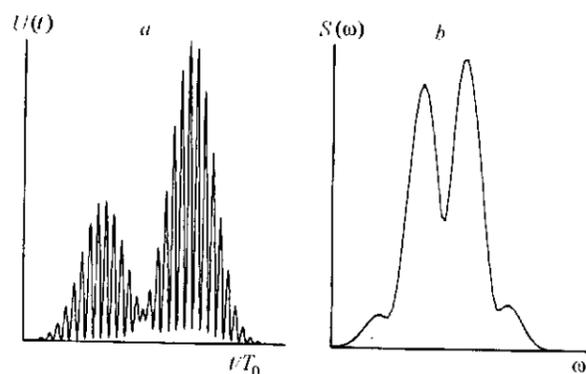


Рис. 3. Осциллограмма (а) и график модуля спектральной плотности двухчастичного сигнала ЛДА (б)

шой вероятностью при отношении сигнал/шум в центре доплеровского импульса не менее 25 дБ. При большем шуме определить с достаточной вероятностью режим работы пока не удается.

Цифровой кепстральный анализ использовался также для оценки расстояния между частицами в двухчастичном режиме работы. Численное моделирование показало, что при интервале между частицами менее $1,5w_0$ фиксируется одночастичный режим. При расстояниях между частицами более $2w_0$ погрешность оценки расстояния составляет менее 0,1 % при отношении сигнал/шум 40 дБ.

Методом численного моделирования была также исследована зависимость погрешности измерения радиуса r большой частицы от его отношения к радиусу пучка. При $r/w_0 < 0,5-0,7$ используемый алгоритм не позволял распознавать большую частицу либо давал оценку радиуса с большой погрешностью. В случае $r/w_0 > 1$ погрешность оценки радиуса составляла доли процента.

Заключение. Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод, что в настоящее время имеется достаточно широкий набор цифровых алгоритмов обработки сигналов лазерных доплеровских анемометров и виброметров. Обсуждаемые в статье алгоритмы полезны для решения таких задач, как измерение периода интерференционного поля [4], исследование тонкой структуры доплеровского сигнала от большой частицы [10-12], оценка параметров сигнала ЛДВ при изучении акустических колебаний пузырьков газа в жидкости [15].

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 // Измер. техника. 1993. № 10. С. 43.
3. Буренков Ю. А., Гречихин В. А., Ринкевичюс Б. С. Анализ погрешностей цифровых алгоритмов измерения частоты сигнала ЛДА методом численного моделирования // Измер. техника. 1995. № 7. С. 36.
4. Гречихин В. А. Разработка компьютерных алгоритмов обработки одночастичных сигналов лазерных доплеровских анемометров: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ (ТУ), 1996.
5. Karasik A. Ya., Rinkevichius B. S., Zubov V. A. Laser Interferometry Principles /Ed. by B. S. Rinkevichius. Moscow-Voca Raton: Mir Publishers and CRC Press, 1995.
6. Дубнищев Ю. И., Ринкевичюс Б. С. Методы лазерной доплеровской интерферометрии. М.: Наука, 1982.
7. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
8. Гречихин В. А. Оценка полной фазы узкополосного сигнала с использованием цифрового преобразования Гильберта // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы радиоэлектроники» (Москва, 19-21 апреля 1995 г.). М.: Магистр, 1995. № 2. С. 3.
9. Grechikhin V. A., Rinkevichius B. S. Digital Hilbert transform for processing of laser Doppler vibrometer signals // Second Internat. Conf. on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications /Ed. E. P. Tomasini // Proc. SPIE. 1996. 2868. P. 89.

10. Толкачев А. В., Гагина Н. М., Гречихин В. А. и др. Экспериментальное исследование доплеровского сигнала от большой частицы // Оптические методы исследования потоков. М.: Изд-во «Валанг», 1997. С. 10.
11. Tolkachev A., Gagina N., Grechikhin V. et al. Experimental research of LDA signals from a large particle // Laser Anemometry: Advances and Applications: Proc. of the 7th Internat.
14. Aleksandrov S. A., Grechikhin V. A., Rinkevichius B. S. The cepstral analysis of LDA signals // Modern Techniques and Measurements in Fluid Flows // Proc. 3rd Internat. Conf. on Fluid Dynamic Measurement and its Applications. Beijing, China, 1997. P. 112.
15. Grechikhin V. A., Rinkevichius B. S., Stepanov A. V. et al. The research on oscillations of gas bubbles in an underwater ultrasonic field // Optical Methods in Research of Flows Dynamic. L., 1998. P. 351.

Поступила в редакцию 21 сентября 1998 г.

Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!