

**В. С. Соболев, А. А. Столповский, А. М. Щербаченко,
Г. А. Кашеева, Е. Н. Уткин**

(Новосибирск)

**СЛЕДЯЩАЯ ЛАЗЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ СИСТЕМА
НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ОЦЕНОК
МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ**

Представлены новые подходы к построению высокоточных лазерных доплеровских измерительных систем (ЛДИС), основанные на понятии мгновенной частоты аналитического доплеровского сигнала, алгоритмах максимально правдоподобных ее оценок и принципах следящей фильтрации. Дано описание ЛДИС, созданной на основе указанных принципов, и приведены результаты ее метрологических исследований и применений в аэродинамическом эксперименте. Представлено обоснование принятых технических решений.

Введение. Повышенные требования к точности измерений локальной скорости потоков жидкостей и газов в гидроаэродинамическом эксперименте, скорости и длины твердых диффузно отражающих объектов в промышленности стимулируют поиск новых путей развития лазерных доплеровских измерительных систем (ЛДИС). Отметим, что успехи в совершенствовании лазерной техники, микроэлектроники и теории сигналов создают для этого весьма благоприятную ситуацию. Яркими примерами достижений могут служить новые технические решения, реализованные в ЛДИС для исследования турбулентности атмосферы с борта летательных аппаратов, когда в качестве источников зондирующего излучения применяются два мощных синхронизированных по фазе полупроводниковых лазера [1] или новая система обработки доплеровских сигналов с использованием двухступенчатого быстрого фурье-преобразования, первая ступень которого оценивает отношение сигнал/шум, а вторая – производит оценку скорости по положению спектрального пика на оси частот [2]. Следует упомянуть также достижения теории в области оптимальных оценок доплеровской частоты (скорости) по критерию максимального правдоподобия для ЛДИС, работающих в одностатистическом [3] и многочастичном режимах [4].

Предлагаемая работа посвящена решению задачи повышения точности ЛДИС и представляет новые подходы, основанные на понятиях мгновенной частоты аналитического сигнала, алгоритмах оптимальных ее оценок в присутствии фазового шума и принципах следящей фильтрации. Кроме этого даны краткий анализ особенностей доплеровского сигнала и сопровождающих его шумов, описание ЛДИС, созданной на новых принципах, результаты

ее метрологических испытаний и применения при исследовании струйных течений.

Шумы и помехи, ограничивающие точность ЛДИС. Обратим внимание на особенности доплеровского сигнала и сопровождающих его помех с тем, чтобы показать трудности, возникающие при решении задач повышения точности ЛДИС. Сигнал доплеровского интерферометра в отличие, скажем, от сигнала интерферометра Майкельсона даже при постоянной скорости исследуемого объекта не является чисто периодическим процессом. Чтобы проиллюстрировать его особенности, на рис. 1 представлены графики компонент сигнала, полученные компьютерным моделированием ситуации, когда в измерительном объеме в среднем присутствует 20 частиц (по оси абсцисс отложено текущее время в единицах доплеровского периода): полный сигнал $I_{\Sigma}(t)$ с выхода фотоприемника и его начальная часть в увеличенном масштабе (*a*); полезная доплеровская компонента $I_C(t)$ и ее начальная часть в увеличенном масштабе (*b*); огибающая $A(t)$ доплеровской компоненты сигнала (*c*); относительная мгновенная частота f/f_D этой же компоненты (*d*). Полезная доплеровская компонента сигнала при большом числе рассеивающих центров может быть представлена в виде комплексного узкополосного случайного процесса с нормальным распределением:

$$I_{D_{\text{вч}}} = A(t) \exp \{j[\omega_D t + \varphi(t)]\}, \quad (1)$$

где $A(t)$ – распределенная по Рэлею случайно флуктуирующая амплитуда, а $\varphi(t)$ – случайная фаза с равномерным распределением в диапазоне $[-\pi \dots +\pi]$.

Из рисунка видно, что сигнал подвержен глубокой амплитудной модуляции, а его мгновенная частота, определяемая как производная фазы по времени, сильно флуктуирует. Эти флуктуации, известные как фазовый шум [5, 6], обусловлены случайным положением рассеивающих центров в пространстве и являются сильнейшей помехой при работе ЛДИС.

Его спектральная плотность известна [7]:

$$S(\omega) = \xi \omega_D \sqrt{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-3/2} \exp \left[-\frac{1}{4n} \left(\frac{\omega}{\xi \omega_D} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

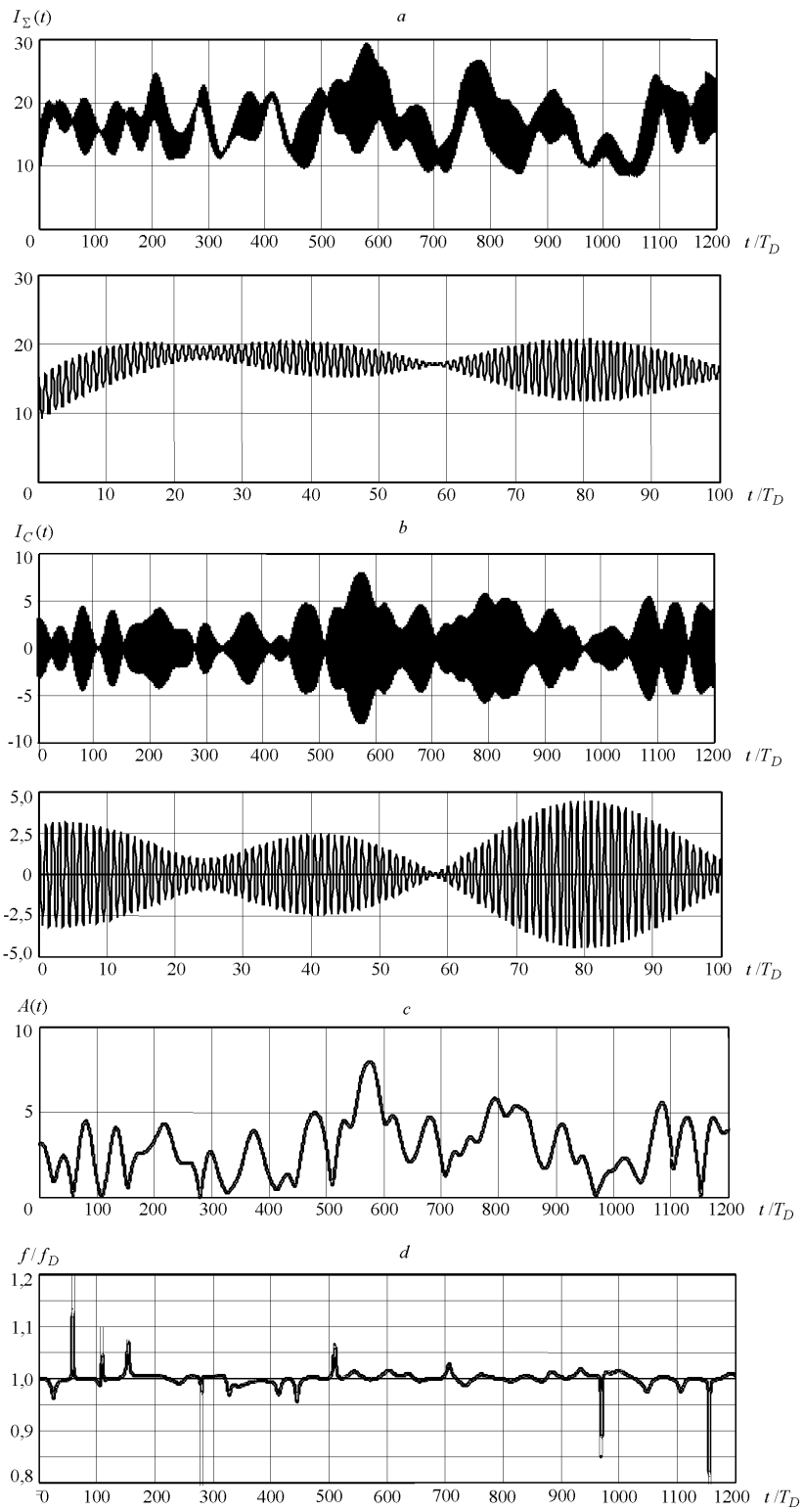
Здесь ω_D – круговая доплеровская частота; $\xi = 1/(2\pi M)$ – параметр оптической схемы; $2M$ – число интерференционных полос на уровне e^{-1} огибающей сигнала одиночной частицы.

Важно иметь в виду, что дисперсия фазового шума не ограничена и измерение скорости возможно только после соответствующей фильтрации значений мгновенной частоты доплеровского сигнала.

Кроме фазового шума – основной помехи – доплеровский сигнал сопровождается неизбежным дробовым шумом, представляющим собой нестационарный случайный процесс со спектральной плотностью

$$S(\omega, t) = 2eI_D(t), \quad (3)$$

где e – заряд электрона, а $I_D(t)$ – полный доплеровский сигнал на выходе фотодетектора. Дисперсия дробового шума, как известно, пропорциональна



Puc. 1

полосе пропускания F детектора и при широкой полосе может достигать больших значений:

$$\sigma_{\text{дш}}^2 = 2eI_D(t)F. \quad (4)$$

Важными особенностями дробового шума являются его нестационарность и зависимость дисперсии от мгновенных значений самого сигнала.

Таким образом, отметим, что для решения задачи повышения точности ЛДИС необходимо найти пути подавления фазовых и дробовых шумов, а также учесть глубокую и случайную амплитудную модуляцию доплеровского сигнала.

Принципы организации ЛДИС повышенной точности.

1. В качестве меры скорости принимается мгновенная частота аналитического доплеровского сигнала (1), определяемая как производная его фазы по времени:

$$\omega_D(t) = \frac{d}{dt} \left[\arctg \frac{U(t)}{V(t)} \right] = \frac{U'(t)V(t) - V'(t)U(t)}{U^2(t) + V^2(t)}, \quad (5)$$

где $V(t)$ и $U(t)$ – реальная и мнимая части сигнала (1).

2. Аналитический доплеровский сигнал формируется за счет смещения частоты одного из зондирующих пучков с помощью акустооптической ячейки путем преобразования сигнала с выхода фотоприемника двумя радиочастотными смесителями, гетеродинные входы которых питаются квадратурными напряжениями той же частоты, что и акустооптическая ячейка.

3. Для подавления влияния фазового шума используется алгоритм максимально правдоподобных оценок значений мгновенной частоты (5) [4]:

$$\hat{\omega}_D(t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \omega_D(t) dt, \quad (6)$$

где T – время измерения. Предполагается, что за время T скорость и соответственно доплеровская частота существенно не изменяются.

Отметим, что эта оценка не смещена, а ее дисперсия определяется следующим выражением:

$$\sigma^2 = \frac{2,306\xi\omega_D}{T} \left[1 - \frac{1}{\alpha T} (1 - e^{-\alpha T}) \right], \quad (7)$$

где α – постоянная времени фотодетектора. Обычно $\alpha T \gg 1$, и тогда относительная среднеквадратичная ошибка составляет

$$\frac{\sigma}{\hat{\omega}_D} = \sqrt{\frac{2,306\xi}{\omega_D T}}. \quad (8)$$

Если, например, $\xi = 0,01$, т. е. число полос в измерительном объеме, определяемое как $1/(\pi\xi)$, равно 30, а $\omega_D T = 10000$, то $\sigma/\omega_D = 0,15\%$.

4. Для подавления влияния дробового шума используется узкополосная фильтрация. Известно, что спектральная плотность доплеровского сигнала

имеет гауссову форму. Реализовать на практике оптимальный фильтр с частотной характеристикой такой формы точно невозможно, поэтому в систему включается квазиоптимальный фильтр третьего порядка с характеристикой, близкой к гауссоиду.

5. Для обеспечения работоспособности системы в большом динамическом диапазоне изменения измеряемых скоростей используется принцип следящей фильтрации с переносом спектра доплеровского сигнала в область нулевых частот.

Функциональная схема высокоточной ЛДИС. В качестве излучателя в оптической схеме ЛДИС (рис. 2) применяется мощный (до 100 мВт) полупроводниковый лазер, стабилизированный по температуре, с длиной волны 0,67 мкм. Для расщепления лазерного пучка и смещения одного из них по частоте используется акустооптическая ячейка типа МЛ-201, работающая на частоте 80 МГц. Чтобы согласовать размеры лазерного пучка с активной зоной акустооптической ячейки, параллельный пучок после коллиматора фокусируется цилиндрической линзой в ее центр. Угол между основным и дифрагированным пучками на выходе ячейки составляет 1°. Далее эти два пучка попадают на перископическое устройство, позволяющее разводить их на расстояние до 120 мм и изменять угол пересечения, что дает возможность изменять число интерференционных полос в измерительном объеме и адаптировать систему к размерам рассеивающих частиц и условиям эксперимента.

Далее каждый из разнесенных пучков двумя фокусирующими линзами направляется в исследуемую точку потока или на твердый диффузно рассеивающий объект, скорость или длина которого подлежит измерению. Набор сменных линз позволяет производить измерения с дальностью до 5 м.

Расстояние от центра акустооптической ячейки до фокусирующих линз и угол поворота пучков выбраны так, чтобы их перетяжки совпали с точкой пересечения. Таким образом обеспечивается равномерность интерференционной картины в измерительном объеме и соответственно высокая точность

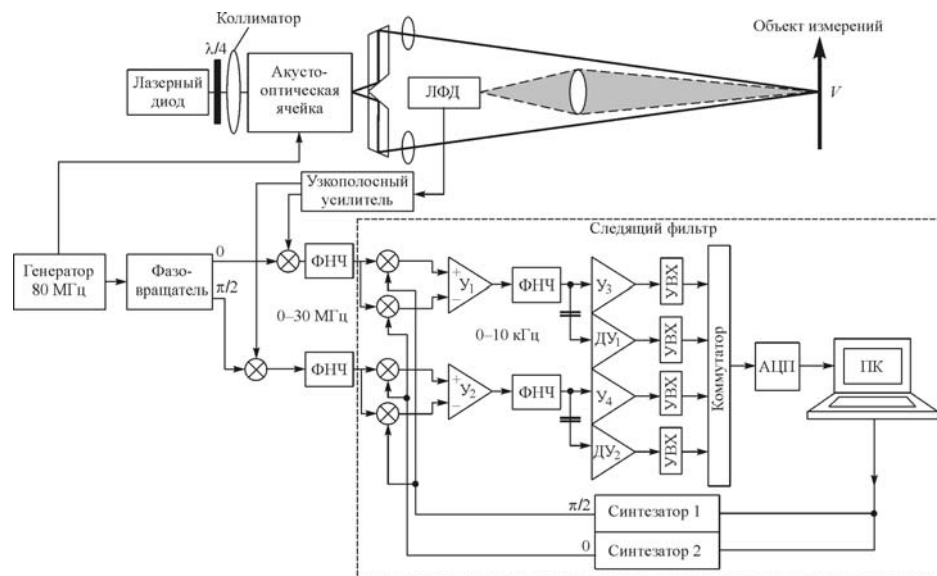


Рис. 2

ЛДИС. В варианте системы, предназначенной для измерения скорости и длины твердых тел, когда не требуется высокого пространственного разрешения, расстояния от ячейки, где расположена перетяжка лазера, до передающих линз равны их фокусному расстоянию. Зондирующие пучки при этом практически не расходятся. Их пересечение в измерительном объеме осуществляется поворотом призм перископа.

Рассеянный частицами потока свет собирается приемным объективом и направляется на апертуру лавинного фотодиода. Поскольку один из зондирующих пучков смещен по частоте на 80 МГц, сигнал на выходе фотодиода имеет частоту $80 \text{ МГц} \pm f_D$, где знак доплеровской частоты f_D зависит от направления движения исследуемого объекта. После усиления и фильтрации пьедестала сигнал попадает на входы двух смесителей-преобразователей частоты, вторые входы которых питаются квадратурными напряжениями той же частоты, что и акустооптическая ячейка. Таким образом, частота смещения вычитается и спектр сигнала фотоприемника переносится на доплеровскую частоту. Соответственно на выходах смесителей получают два квадратурных напряжения, образующие аналитический доплеровский сигнал. После низкочастотной фильтрации обе компоненты этого сигнала попадают на плату следящего фильтра (см. рис. 2) [8]. Его входная часть состоит из четырех аналоговых перемножителей (смесителей). На первые входы смесителей подаются обе компоненты доплеровского сигнала, а на вторые – два квадратурных напряжения местного гетеродина (двух синтезаторов частот типа AD9850). Выходы смесителей попарно поступают на входы дифференциальных усилителей ($У_1, У_2$). Схема соединена таким образом, что на выходах этих усилителей остаются только компоненты разностной частоты, а компоненты суммарной частоты взаимно компенсируются. Таким образом обеспечивается возможность измерения скорости знакопеременных потоков, когда доплеровская частота переходит через нуль. Сигналы разностной частоты проходят через узкополосные низкочастотные фильтры (ФНЧ) третьего порядка, где происходит фильтрация дробовых шумов. Далее эти сигналы попадают на входы двух усилителей ($У_3, У_4$) и дифференцирующих усилителей $ДУ_1, ДУ_2$, а затем на входы четырех устройств выборки-хранения (УВХ). Соответствующие выходы УВХ через коммутатор поступают на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Следящим фильтром управляет встроенный в доплеровскую систему персональный компьютер (ПК), снабженный специальным драйвером. Работа следящего фильтра начинается с операции захвата частоты доплеровского сигнала. По команде оператора компьютер подает на управляющие входы синтезаторов последовательность кодов, заставляющих синтезаторы генерировать два квадратурных сигнала с линейно нарастающей во времени частотой. Одновременно начинает функционировать программа, которая запускает схемы УВХ, коммутатор и аналого-цифровой преобразователь. В результате в оперативную память компьютера на каждом такте работы программы попадают четыре мгновенных значения квадратурных сигналов разностной частоты и их производных. Вначале под управлением программы вычисляется сумма квадратов этих сигналов, дающая значение квадрата амплитуды аналитического сигнала. Эта величина сравнивается с заранее заданным пороговым значением квадрата амплитуды. Как только сигнал разностной частоты попадает в полосу пропускания фильтров и квадрат его амплитуды превышает заданный порог, система переходит в режим слежения за доплеровской частотой. В соответствии с программой компьютер вычисляет

мгновенное значение разностной частоты и суммирует его с кодом, управляющим частотой синтезатора, осуществляя таким образом режим слежения. При вариациях скорости исследуемого объекта и адекватном изменении доплеровской частоты происходит соответствующее изменение разностной частоты, которое по алгоритму оценки мгновенной частоты (6) вычисляется ПК и преобразуется в управляющий код синтезатора. После каждого такта работы программы частота синтезатора становится равной доплеровской частоте. Таким образом, осуществляется точное слежение синтезатора за частотой доплеровского сигнала. При достаточно высокой тактовой частоте в сравнении с наивысшей частотой спектра изменений скорости следящий фильтр отслеживает не только частоту, но и фазу сигнала. Коды управления синтезатором, пропорциональные текущей доплеровской частоте, накапливаются в памяти компьютера, образуя временную последовательность значений доплеровской частоты (скорости). Чтобы обеспечить оптимальную по точности работу доплеровской системы, в программе предусмотрена установка заданного времени осреднения согласно выражению (6). Это время, естественно, выбирается исходя из компромисса между необходимыми точностью и быстродействием системы. Универсальная математическая система MathCAD позволяет с заданным интервалом времени выводить на экран монитора средние значения скорости, среднеквадратичные значения ее отклонений (турбулентность), временную реализацию скорости и все

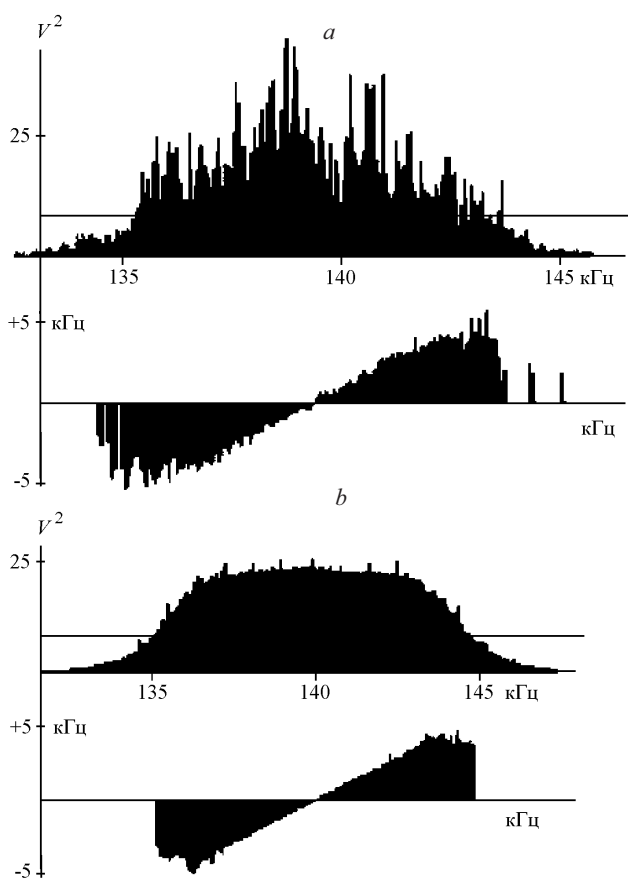


Рис. 3

требуемые ее статистические характеристики, например спектральную плотность.

Рис. 3, *a* иллюстрирует работу следящей системы в режиме захвата частоты доплеровского сигнала. По оси абсцисс отложены значения частоты синтезатора, а по оси ординат – значения квадрата амплитуды сигнала на выходе фильтра (верхний рисунок) и значения отклонений мгновенной частоты синтезатора от частоты доплеровского сигнала (*S*-кривая) для случая, когда полоса фильтра равна ± 5 кГц (нижний рисунок). Верхний график, по существу, есть результат свертки спектра мощности доплеровского сигнала и частотной характеристики следящего фильтра. Неравномерность ординат объясняется сильной амплитудной модуляцией доплеровского сигнала. При подаче на вход следящего фильтра чисто синусоидального сигнала кривая амплитуды существенно сглаживается, как показано на рис. 3, *b*. Горизонтальная линия на рис. 3, *a* соответствует установленному заранее амплитудному порогу. Таким образом, как только частота синтезатора достигнет значения 136 кГц (см. рис. 3, *a*), квадрат амплитуды превысит значение порога и следящая система включится в работу. Она оценит значение частотной ошибки, равной разности текущей доплеровской частоты и частоты синтезатора, и скорректирует ее, сведя ошибку к нулю. Далее, если скорость измеряемого объекта изменится, следящая система на каждом такте работы программы соответствующим образом изменит частоту синтезатора и его частота будет точно следовать за доплеровской частотой. В памяти ПК при этом накапливается ее реализация, пропорциональная значениям измеряемой скорости.

Результаты метрологических исследований ЛДИС. Метрологические исследования ЛДИС проводились с помощью специально созданного стенда. Образцовой мерой служила скорость боковой поверхности массивного металлического диска с приводом, стабилизированной системой фазовой автоподстройки частоты его вращения. Стабильность скорости вращения составляла при этом примерно 0,01 %. Лазерные пучки направлялись на

Скорость, м/с	f_D , кГц	Относительный порог	Время осреднения, мс				
			0,15	1	5	10	100
			σ , %				
10	1067	0,2	0,10	0,030	0,010	0,006	0,0013
		0,4	0,07	0,015	0,009	0,005	0,0015
		0,6	0,06	0,015	0,007	0,003	0,0009
3	322	0,2	0,20	0,080	0,050	0,035	0,0050
		0,4	0,15	0,070	0,045	0,030	0,0040
		0,6	0,12	0,055	0,030	0,020	0,0070
1	106,7	0,2	0,25	0,100	0,080	0,072	0,0170
		0,4	0,20	0,090	0,070	0,060	0,0110
		0,6	0,14	0,075	0,055	0,045	0,0060

боковую поверхность диска, и таким образом имитировались реальные условия работы ЛДИС.

Исследования проводились для трех значений скоростей: 10, 3 и 1 м/с; трех значений полосы пропускания фильтров: 2, 10 и 30 кГц; пяти значений

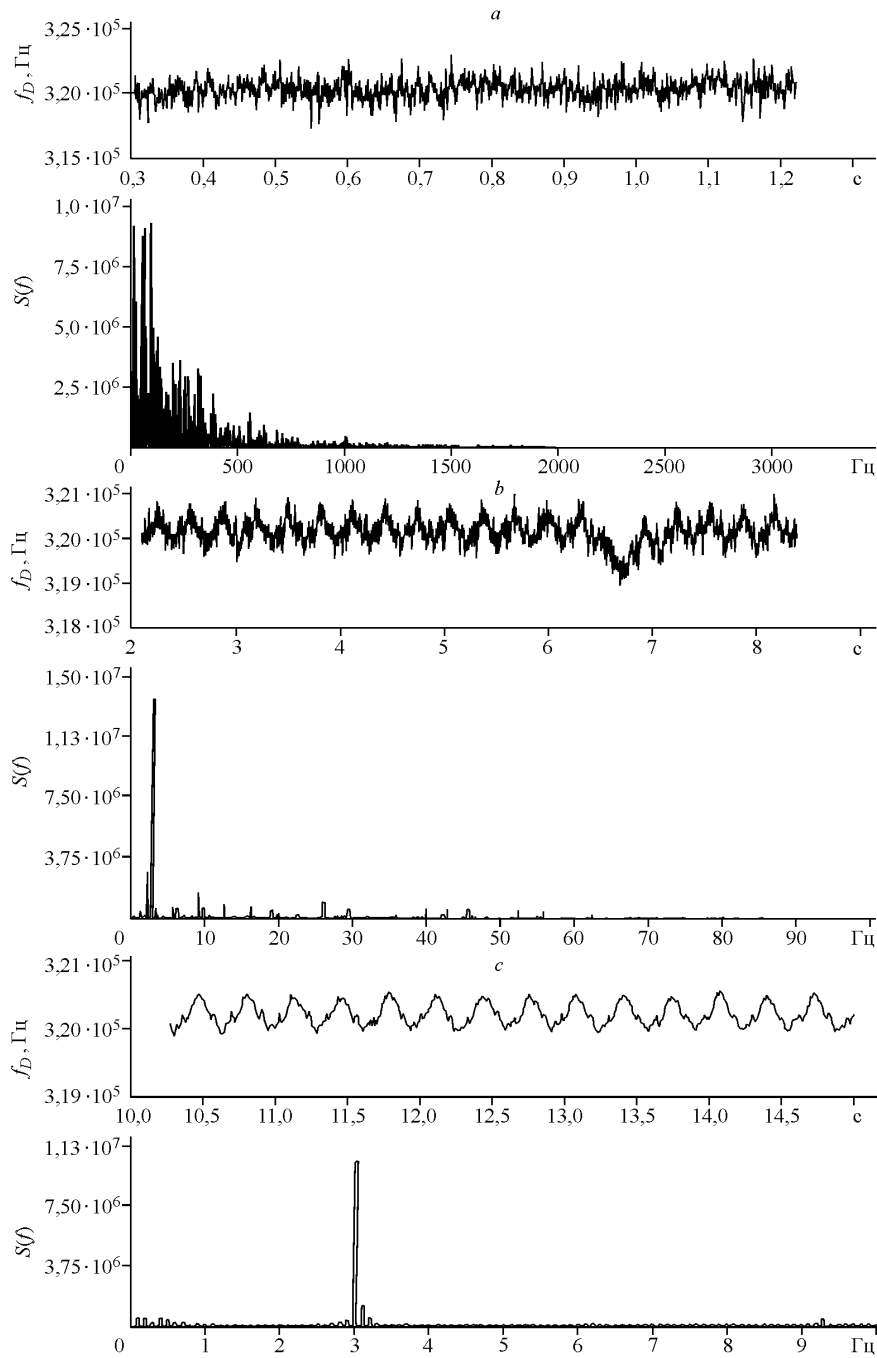


Рис. 4

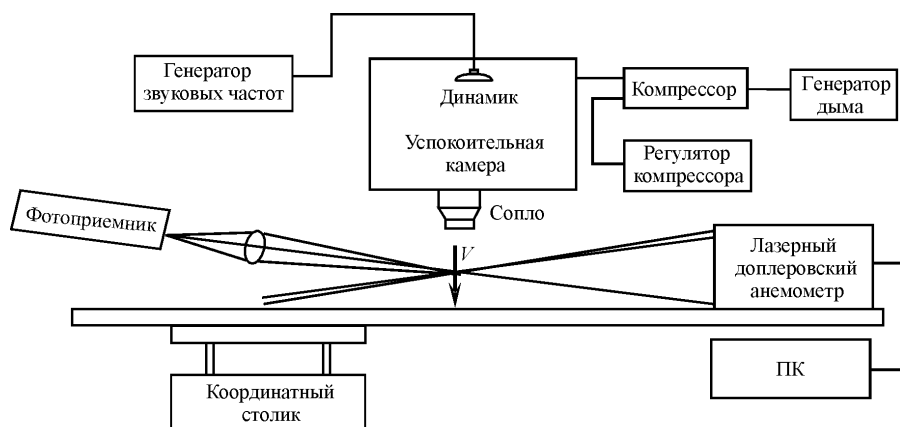


Рис. 5

времени осреднения: 0,15, 1, 5, 10 и 100 мс и трех значений относительного амплитудного порога: 0,2, 0,4 и 0,6. В таблице представлены результаты измерений для трех скоростей (1, 3, 10 м/с) при полосе пропускания фильтра 10 кГц. Анализ этих данных позволяет утверждать, что они достаточно хорошо совпадают с предсказаниями теории оптимальных оценок [4]. Среднеквадратичные ошибки уменьшаются обратно пропорционально корню квадратному из времени осреднения и доплеровской частоты. Повышение порога в 3 раза вызывает снижение ошибок примерно в 1,5 раза. Среднеквадратичная ошибка при скорости порядка 10 м/с и времени осреднения 100 мс составляет величину порядка 0,001 %.

Далее, как пример возможностей созданной ЛДИС, на рис. 4, *a – c* представлены реализации доплеровской частоты (скорости) для трех значений времени осреднения ($T = 0,15(a)$; $1,0(b)$; $5,0$ мс (c)) при скорости диска 3 м/с в полосе фильтрации 10 кГц и соответствующие им спектральные плотности. Видно, что с ростом времени осреднения падают шумы измерения, проявляются биения диска, в спектрах исчезает шумовая часть и появляются линии, соответствующие частоте вращения диска.

Пример практического применения ЛДИС. Примером успешного использования созданной ЛДИС являются результаты исследований совместно со специалистами Института теоретической и прикладной механики СО

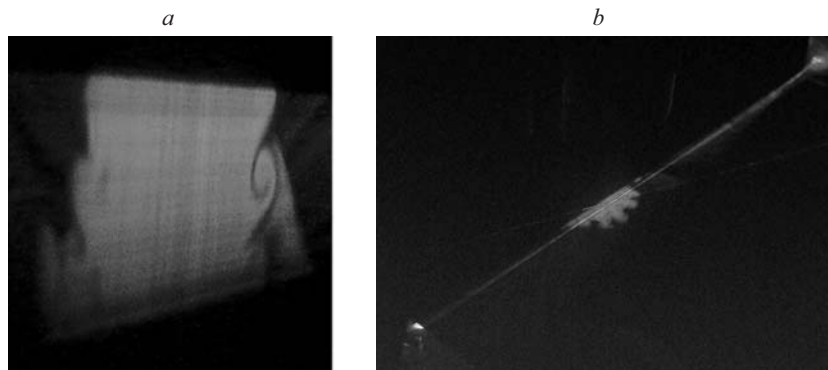


Рис. 6

РАН струйного течения под акустическим воздействием, что имеет не только академическое, но и практическое значение, например с точки зрения поиска путей снижения шумности авиационных двигателей. Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рис. 5. На рис. 6, *a, b* показаны визуализированные с помощью лазерного ножа продольное и поперечное сечения струи соответственно. На рис. 6, *a* хорошо виден кольцевой вихрь, а на рис. 6, *b* просматриваются «лучи» вторичных когерентных структур и зондирующие лазерные пучки доплеровской системы. На рис. 7 представлены профили средних скоростей (*a*) и интенсивности турбулентных пульсаций (*b*) по сечению струи на расстоянии 65 мм от среза сопла (без звука – сплошная линия и со звуком – пунктирная). (*R* – радиальная координата; *d* – диаметр сопла; V_0 – скорость (частота) при $R = 0$; $V_{ак}$ – скорость (частота) при акустическом воздействии; σ – интенсивность турбулентности; $\sigma_{ак}$ – интенсивность турбулентности при акустическом воздействии.) На рис. 8, *a-c* приведены спектральные плотности флуктуаций скорости в точке с координатами $x/d = 1$, $y/d = 0,3$ (без акустического воздействия (*a*); с воздействием 140 Гц (*b*); с воздействием 160 Гц (*c*)). Анализ полученных данных показал, что акустическое воздействие вызывает некоторое снижение средних скоростей на краях струи и повышение интенсивности турбулентности. Что касается спектров, то воздействие звука на резонансной частоте струи 140 Гц вызывает уменьшение ширины спектральной линии (см. рис. 8, *a, b*). Увеличение частоты звука вызывает появление субгармоники на половинной частоте

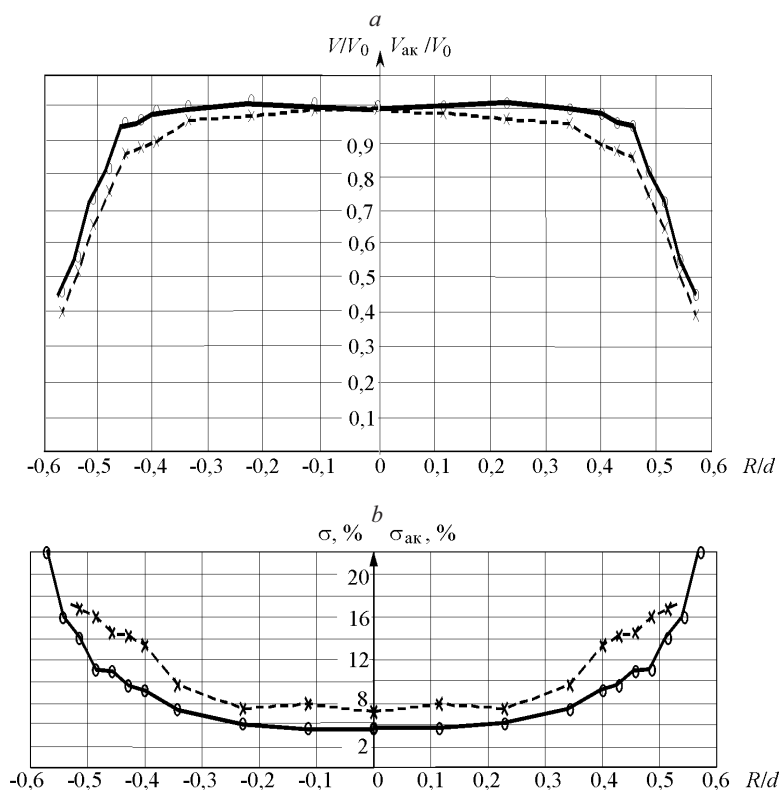


Рис. 7

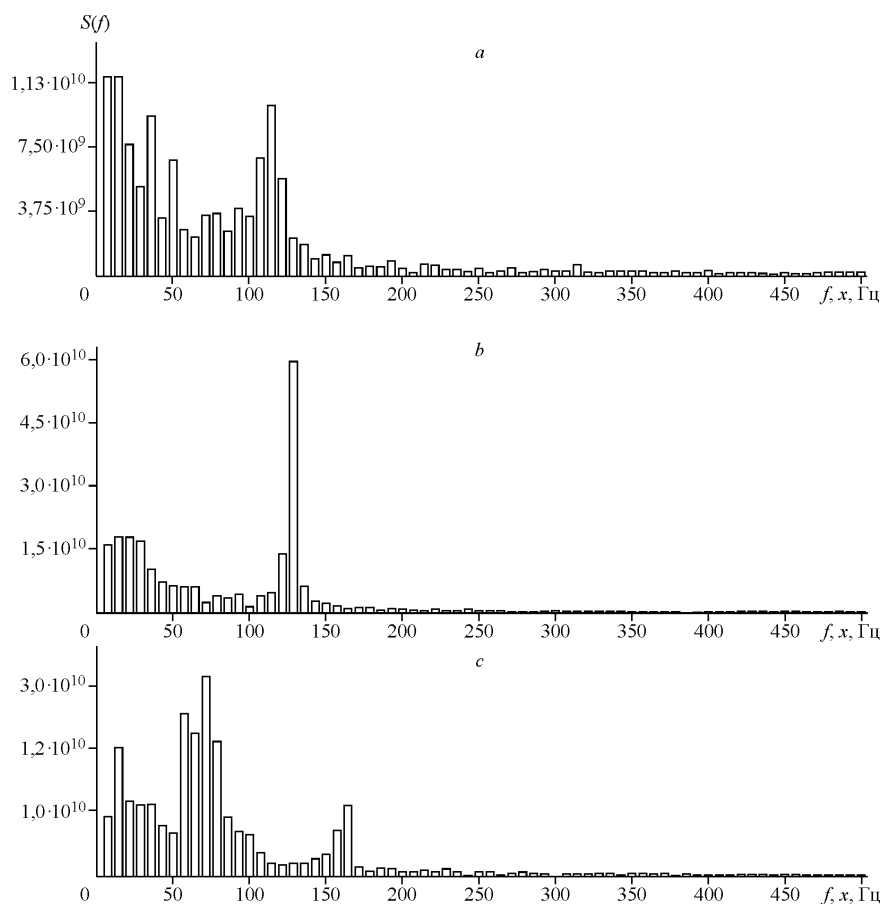


Рис. 8

акустического воздействия (см. рис. 8, *c*). Анализ характеристик струи в области когерентных структур (лучи на рис. 6, *b*), показывает, что профили скорости вдоль луча идут несколько выше, чем между лучами, а спектральные плотности отличаются тем, что по линии луча четко виден пик на частоте акустического воздействия, а между лучами он отсутствует. Турбулентная энергия при этом сосредоточена в зоне между лучами. Полученные данные позволяют заключить, что созданная система хорошо проявила себя в реальном аэродинамическом эксперименте и позволила получить новые результаты.

Заключение. Предложены, исследованы и реализованы новые пути повышения точности лазерных доплеровских измерительных систем, основанные на алгоритмах оптимальных оценок мгновенной частоты аналитического доплеровского сигнала и принципах его следящей фильтрации с переносом спектра в область нулевых частот. Метрологические исследования созданной ЛДИС, проведенные на специальном стенде с вращающимся диском, показали, что среднеквадратичная ошибка измерений в диапазоне скоростей 1–10 м/с при времени осреднения 0,1 с составляет всего лишь 0,01–0,001 %. Использование персонального компьютера, встроенного в систему, позволило успешно реализовать достаточно сложный алгоритм оценки

мгновенной частоты и построить высокоточный следящий фильтр-демодулятор доплеровского сигнала с широким динамическим диапазоном. Таким образом, удалось заменить дорогостоящий специализированный доплеровский процессор одной платой следящего фильтра, вставляемой в слот ПК. Последний не только управляет работой фильтра, но одновременно накапливает в памяти реализацию мгновенной доплеровской частоты (скорости) и “on-line” вычисляет и выдает на экран монитора ее среднее значение и интенсивность турбулентности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dopheide D., Müller H., Többen V., Strunck V.** New laser-Doppler measuring techniques for aerodynamic applications using high power tuneable diode lasers and optical amplifiers // Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Fluid Dynamic Measurements and its Applications. Beijing, China: International Academic Publishers, 1997. P. 3.
2. **Ibrahim K. M., Bacahlo W. D.** A real-time Fourier analysis LDV signal processor; another step towards reliable turn-key flow diagnostics // Proc. of 41st Intern. Instrumentation Symposium Holiday Inn/Denver Southeast. Aurora, Colorado, 1988.
3. **Соболев В. С., Прокопенко М. Н.** Максимально правдоподобные оценки частоты и других параметров сигналов лазерных доплеровских измерительных систем, работающих в режиме одночастичного рассеяния // Квантовая электроника. 2000. **30**, № 12(342). С. 1109.
4. **Соболев В. С.** К оценке частоты сигнала лазерного доплеровского анемометра // Автометрия. 2000. № 5. С. 108.
5. **Соболев В. С.** О спектре «фазового» шума на выходе лазерного доплеровского измерителя скорости потоков // Автометрия. 1974. № 6. С. 111.
6. **Коронкевич В. П., Соболев В. С., Дубнищев Ю. Н.** Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука, 1983.
7. **Тихонов В. И.** Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966.
8. **Пат. 2177159 РФ.** Следящий фильтр-процессор для обработки сигналов лазерного доплеровского измерителя скорости /В. С. Соболев, А. М. Щербаченко. Опубл. 2001, ОИПОТЗ № 35.

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
E-mail: sobolev@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
6 мая 2004 г.*