

УДК 681.78

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ*

А. В. Климов, В. Г. Меледин, Ю. А. Аникин, Д. В. Куликов,
С. В. Кротов, И. К. Кабардин

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
E-mail: KlimovAntonNSU@yandex.ru*

Предложен спектральный метод детектирования сигналов лазерного доплеровского измерителя скорости турбулентных процессов. Метод основан на адаптированном под ширину спектральной плотности мощности сигнала оценивании соотношения сигнал/шум и сравнении его с порогом распознавания. В ходе численного моделирования показано, что величина неравномерности оценок сигнал/шум составляет 1 % при различных скоростях турбулентного процесса. В физических экспериментах по измерению аэродинамических турбулентных процессов показано, что предложенный метод позволил устранить ошибки вычисления среднего и разброса скоростей в 15 и 78 %, удалив из системы обработки сигналы с низким отношением сигнал/шум, и уменьшить величину неравномерности оценок сигнал/шум в сравнении с известным методом Троппа для широкого диапазона турбулентных скоростей.

Ключевые слова: детектирование сигнала, неравномерное детектирование, отношение сигнал/шум, спектральный метод, лазерный доплеровский измеритель скорости, турбулентный газожидкостный процесс.

DOI: 10.15372/AUT20180311

Введение. Повышение точности измерений кинематических параметров газожидкостных турбулентных потоков связано с развитием методов обработки сигналов лазерных доплеровских измерителей скорости (ЛДИС), определяющих локальную скорость потока по доплеровскому сдвигу частоты лазерного излучения, рассеянного увлекаемыми потоком малыми светорассеивающими частицами либо фазовыми неоднородностями [1–3].

В обработке сигналов лазерных доплеровских измерителей выделяют два основных этапа: детектирование и оценивание параметров сигнала [2]. Система детектирования распознаёт доплеровские сигналы на фоне шумов и передаёт их сигнальному процессору для спектрального оценивания. Основным этапом детектирования является оценка отношения сигнал/шум (ОСШ) обнаруженного сигнала и принятие решения о дальнейшей его обработке или отбраковке. В зарубежной литературе детектирование сигналов разделяется на "detection" — обнаружение светорассеивателя в измерительном объёме ЛДИС и "validation" — оценивание ОСШ выделенного сигнала [4]. Данная работа посвящена развитию validation-этапа обработки сложных доплеровских сигналов. Методы оценки существенно влияют на погрешности ЛДИС при измерениях скоростей и статистических параметров турбулентных процессов, что определяет актуальность развития существующих методов детектирования.

В детектировании сигналов ЛДИС обычно выделяют два класса методов и алгоритмов: временные и спектральные. На сегодняшний день временные методы обработки сигналов ЛДИС, основанные на сравнении амплитуды пьедестала либо огибающей сигнала с заданным порогом, используются достаточно редко из-за существенного влияния многих пара-

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-29-00093).

метров на точность их работы, а также из-за сложности оценки уровня составного шума во временной области. Хотя реализация этих методов отличается простотой, эффективность их невысока и сопровождается значительным уменьшением количества выделенных светорассеивателей, что критично при исследованиях турбулентных процессов [4, 5].

Наиболее популярны в настоящее время методы спектрального детектирования доплеровских сигналов, большая часть которых использует предположения о локальности доплеровского спектрального пика и равномерности распределения шума на всём спектральном диапазоне [6]. В классической работе по данной теме [7] и её обобщениях [8–10] предложены методы оценки сигнал/шум как отношения площади доплеровского пика к усреднённой интенсивности шума в спектре. В [11] оценивается максимальный уровень, отнесённый к среднему уровню шума в спектре с подстройкой под вычисленную частоту доплеровского сигнала. Спектральный метод отношения двух наибольших локальных максимумов реализован в распространённых за рубежом доплеровских сигнальных процессорах Dantec и TSI [6].

В физических экспериментах при измерениях параметров турбулентных потоков получение достоверных результатов детектирования доплеровских сигналов стандартными методами может значительно усложниться и приводить к неверным оценкам [12]. Ключевой проблемой является не столько отбраковка некачественных сигналов в анализируемой выборке, сколько равномерная отбраковка по всему диапазону турбулентного процесса, обеспечивающая малую параметрическую зависимость результатов детектирования от скорости светорассеивающих частиц. На практике подобное равномерное детектирование достаточно сложно обеспечить из-за особенностей времяпролётного спектрального уширения доплеровских сигналов [13]. При увеличении скорости частиц уменьшается время пролёта через измерительный объём ЛДИС и уширяется полоса доплеровского спектра. При этом у ряда спектральных методов детектирования нарушается однозначность оценки ОСШ для ансамбля однородных турбулентных частиц. При постоянном пороге распознавания это приводит к неравномерной отбраковке сигналов по всему турбулентному диапазону и существенным статистическим ошибкам определения параметров турбулентных потоков.

Целью данной работы является создание улучшенного спектрального метода детектирования доплеровских сигналов, рассеянных частицами турбулентного потока.

Постановка задачи. Для разработки и исследования методов детектирования доплеровских сигналов в условиях турбулентности диагностируемого процесса использовалась модель ЛДИС (рис. 1), построенная на принципах дифференциальной двухчастотной гетеродинной измерительной схемы [14].

Луч лазера проходит через акустооптический модулятор, работающий на опорной частоте системы в режиме дифракции Брэгга, расщепляется на два когерентных лазерных луча, из которых формируется измерительный объём ЛДИС с характерной интерференционной картиной. Светорассеивающая частица, взвешенная в турбулентном потоке, пролетая через измерительный объём, формирует оптический сигнал вида [14]

$$X_1(t) = P(t) + A(t) \sin(2\pi(f + \Delta f)t),$$

где $P(t)$ — так называемый пьедестал сигнала, $A(t)$ — амплитуда когерентной составляющей сигнала, f — частота опорного сигнала, Δf — доплеровский сдвиг частоты. Пьедестал сигнала является его низкочастотной составляющей и несёт информацию о доле некогерентно рассеянного света. Высокочастотная когерентная составляющая сигнала содержит информацию о скорости пролетевшей частицы и доплеровском сдвиге частоты зондирующего когерентного излучения. В условиях центральной предельной теоремы и гауссова поперечного распределения интенсивности лазерных пучков в измерительном объёме $P(t)$ и $A(t)$ с хорошим приближением можно аппроксимировать функциями Гаусса.

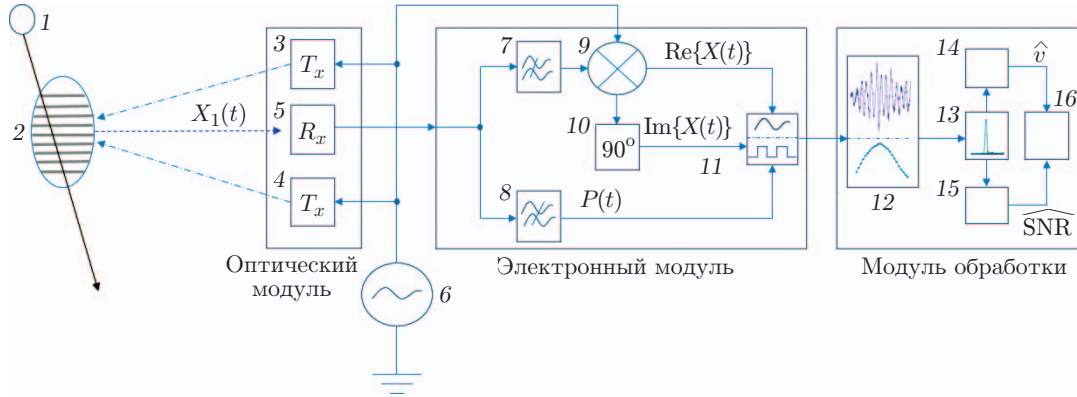


Рис. 1. Функциональная схема ЛДИС (1 — светорассеивающая частица, взвешенная в газожидкостном потоке; 2 — измерительный объём ЛДИС; 3, 4 — оптическая передающая система; 5 — фотоприёмник; 6 — генератор опорного сигнала; 7 — высокочастотный фильтр; 8 — низкочастотный фильтр; 9 — смеситель; 10 — фазовращатель; 11 — аналого-цифровой преобразователь; 12 — аппаратный детектор доплеровских сигналов; 13 — вычислитель спектральной плотности мощности сигнала; 14 — вычислитель скорости частицы; 15 — вычислитель ОСШ и спектральный детектор сигнала; 16 — результаты эксперимента)

Интерференционный сигнал поступает на фотоприёмник, преобразующий интенсивность света в электрический ток. Далее электрический сигнал с помощью низкочастотной и высокочастотной фильтрации разделяется на две части. Низкочастотная часть соответствует каналу пьедестала. Из высокочастотной когерентной части после смешения с опорным сигналом системы и квадратурного детектирования выделяются квадратурные составляющие доплеровского аналитического сигнала [15].

После аналого-цифрового преобразования с частотой дискретизации F_s доплеровский сигнал предварительно детектируется аппаратным процессором. Начало сигнала детектируется по превышению заданного порога восходящим фронтом пьедестала, конец сигнала — по его спаду. В результате аппаратного детектирования в систему обработки передаётся сигнал вида

$$X[t_n] = \exp\left(-\frac{(t_n - a)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \exp(2\pi i(\Delta f t_n + \varphi)), \quad n = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где a, σ определяют центр и ширину огибающей аналитического сигнала. Хорошим приближением является $a = T/2$ вследствие симметричности детектирования начала и конца сигнала и $\sigma = T/6$ в силу критерия «трёх сигм», где $T = (t_N - t_1)$.

Спектральная плотность мощности (СПМ) сигнала $X[t_n]$ представляется как [16]

$$S[f_k] = \sigma^2 e^{-\sigma^2(2\pi(f_k - \Delta f))^2}, \quad k = \overline{1, K}, \quad S[f_k] = F^2[f_k],$$

(здесь $F[f_k]$ — дискретное преобразование Фурье $X[t_n]$, f_k пробегает частоты от $-F_s/2$ до $F_s/2$). С учётом аддитивных помех в исходном доплеровском сигнале СПМ имеет вид

$$\check{S}[f_k] = S[f_k] + F[f_k]\xi_s[f_k] + \xi_s^2[f_k],$$

где $\xi_s[f_k]$ — дискретное преобразование Фурье аддитивных помех сигнала, $F[f_k]\xi_s[f_k]$ — интермодуляционная добавка к СПМ. Данная СПМ анализируется для детектирования доплеровских сигналов на основе вычисленного отношения сигнал/шум и определения скорости частицы. При высоком ОСШ вычисленная скорость частицы добавляется к резуль-

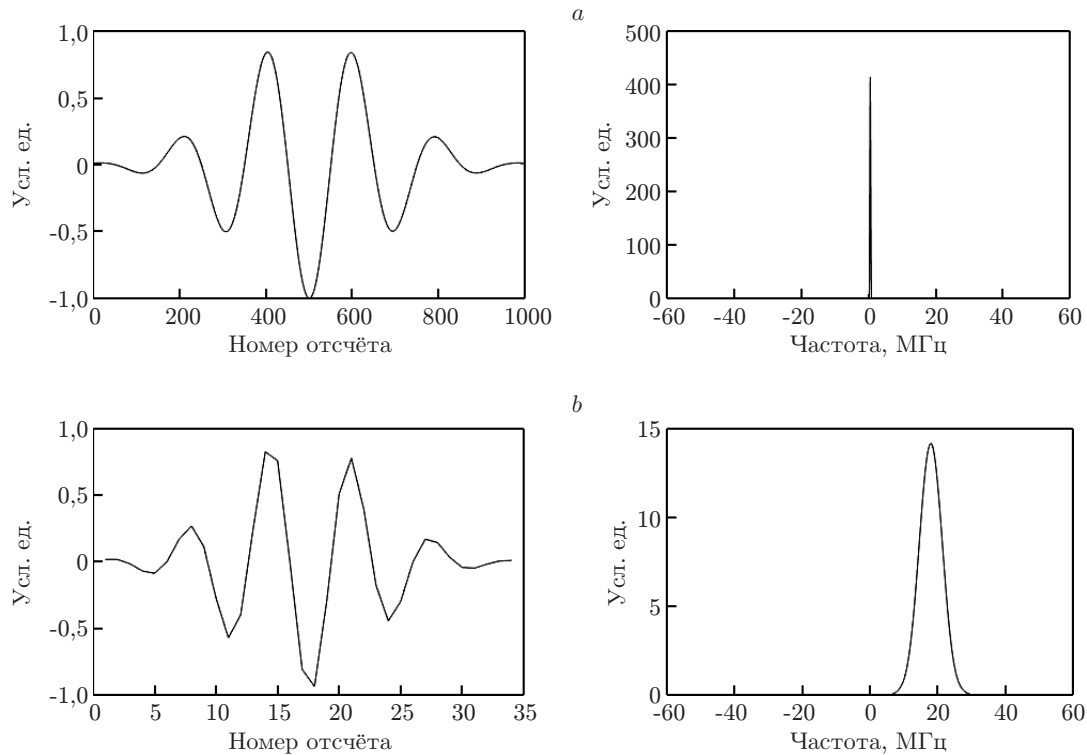


Рис. 2. Доплеровские сигналы (слева) и их СПМ (справа) при различном времени пролёта частиц: *a* — большое, *b* — малое время. Уменьшение времени пролёта при постоянной частоте дискретизации приводит к сокращению числа точек на период сигнала и к эффекту уширения его спектра

татам эксперимента, по которым рассчитываются статистические параметры турбулентного потока.

Ширина полосы сигнала $\check{S}[f_k]$ определяется коэффициентом σ , зависящим от времени пролёта частицы T . При турбулентных процессах, характеризующихся большой пульсационной составляющей скорости, через измерительный объём ЛДИС пролетают частицы с различными скоростями, что приводит к различным времени пролёта T и ширине СПМ $\check{S}[f_k]$ (рис. 2). Всё это в совокупности влияет на оценку ОСШ и приводит к неравномерному характеру детектирования доплеровских сигналов.

Таким образом, для решения задачи требуется создание спектрального метода детектирования доплеровских сигналов турбулентного процесса на основе оценивания спектрального ОСШ $\widehat{\text{SNR}} = \widehat{\text{SNR}}(\check{S}[f_1], \dots, \check{S}[f_K])$, адаптированного к ширине доплеровского спектра.

Особенности подхода к оценке ОСШ при детектировании доплеровских сигналов. Для оценивания спектрального ОСШ предложен следующий подход. Пусть f_m — частота максимума в СПМ доплеровского сигнала. Полуширина основного лепестка доплеровского сигнала в СПМ согласно [14] имеет вид $\delta_f/2 \approx 2(N_f/N_t)$, где N_t — количество отсчётов доплеровского сигнала, N_f — количество отсчётов в его СПМ. Пусть $f_L = f_m - \delta_f/2$, $f_R = f_m + \delta_f/2$. Тогда $[f_L, f_R]$ — полоса доплеровского сигнала в СПМ. Пусть частотам $[f_L, f_R]$ соответствуют индексы L, R в отсчётах СПМ. Введём

$$P_{\text{all}} = \sum_{k=1}^K \check{S}[f_k] / N_f, \quad P_{\text{noise}} = \sum_{k: f_k \notin [f_L, f_R]} \check{S}[f_k] / (N_f + L - R).$$

Тогда предлагаемая оценка отношения сигнал/шум

$$\widehat{\text{SNR}} = (P_{\text{all}} - P_{\text{noise}})/P_{\text{noise}}. \quad (2)$$

В соответствии с теоремой Парсеваля [15] знаменатель в (2) представляет собой мощность шума при условии, что он является белым, числитель — разность мощности исходного доплеровского сигнала и мощности шума. Данное соотношение совпадает с классическим определением ОСШ, равным отношению мощности полезного сигнала к мощности шума, с той поправкой, что в числителе и знаменателе выражения (2) содержатся интермодуляционные составляющие полезного сигнала и шума.

Доплеровский сигнал детектируется, если $\widehat{\text{SNR}} > \text{Tr}$, где Tr — заданный порог распознавания. В физических экспериментах, как правило, нормированный порог Tr задают в диапазоне 2–10. Для сигналов, полученных от частиц газожидкостного потока с плохой оптической разрешимостью, следует выбирать меньшее значение порога, а для потоков с хорошей оптической разрешимостью — большее значение.

Результаты проверки работоспособности предложенного метода. Моделировались 100000 доплеровских сигналов вида (1) в широком диапазоне $F_s/70 \dots F_s/3$ доплеровских частот Δf , соответствующих скоростям процесса с высокой степенью турбулентности. При этом число наблюдаемых периодов доплеровского сигнала задавалось равным 10, соответственно длина сигнала случайно менялась в пределах 30–700 отсчётов. К сигналам добавлялся белый нормальный шум порядка $N(0, \sigma^2)$, так что ОСШ составляло $P_s/\sigma^2 \approx 29,5$, где P_s — мощность сигнала без шума. Спектральная плотность мощности сигналов вычислялась на основе быстрого преобразования Фурье с дополнением нулями до 4096 отсчётов, что соответствует требованиям обработки сигналов в режиме реального времени. Кроме предложенного метода, применялся стандартный метод Тропия, рассмотренный в оригинальной работе [7] и её обобщениях [8–10], также адаптированный под ширину спектра:

$$\widehat{\text{SNR}}_{\text{Тропия}} = \frac{\hat{\sigma}_s^2 - m\hat{\sigma}_n^2}{(N/2 - m)\hat{\sigma}_n^2},$$

где $\hat{\sigma}_s^2$ — площадь основного лепестка СПМ, $\hat{\sigma}_n^2$ — средний уровень шума вне основного лепестка шириной m отсчётов, N — количество отсчётов СПМ.

Результаты моделирования приведены в табл. 1 и на рис. 3. В качестве критериев работоспособности алгоритмов использовались относительные разброс, погрешность и неравномерность оценок. Неравномерность определялась как разброс средних оценок ОСШ, полученных в различных интервалах доплеровских частот.

На рис. 3 видно, что предложенный метод, как и метод Тропия, показал результаты, сравнимые с истинным значением ОСШ на всём диапазоне модельных доплеровских частот. При этом погрешность предложенного метода оказалась на 1 % больше, а степень

Таблица 1

Относительные разброс и погрешность вычисления сигнал/шум для алгоритмов

Алгоритм	Относительный разброс, %	Относительная погрешность, %	Относительная неравномерность, %
Предложенный метод	8	4	0,7
Метод Тропия	9	3	2

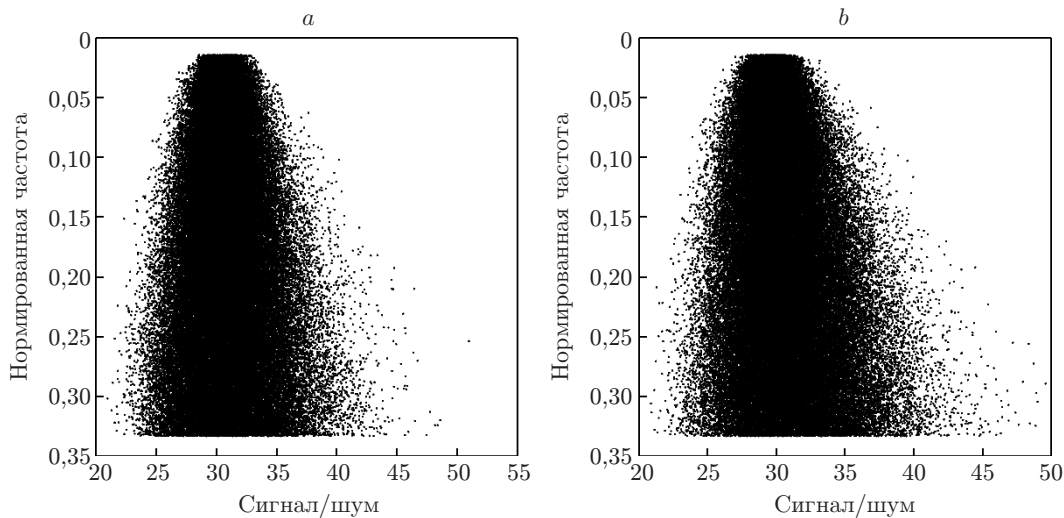


Рис. 3. Оценка ОСШ в зависимости от нормированной частоты сигнала $\Delta f/F_s$: *a* — предложенный метод, *b* — метод Тропия. Наблюдается визуальная идентичность результатов и характерная неравномерность оценок ОСШ в диапазоне модельных доплеровских частот

неравномерности — на 1 % меньше. Отметим, что разброс оценок известного метода Тропия и предложенного метода растёт с увеличением частоты сигнала, так как при этом уменьшается время пролёта частицы через измерительный объём и расширяется доплеровский спектр, что сужает полосу шума и уменьшает количество точек, используемых для вычислений, а также приводит к повышению дисперсии оценки мощности шума.

Проведены численные эксперименты по определению ОСШ в зависимости от модельного уровня шума и от диапазона доплеровских частот (рис. 4). Параметры эксперимента были заданы такими же, как и в предыдущем случае. Видно, что результаты рассматриваемых методов соответствуют модельному уровню ОСШ, при этом ошибка предложенного метода меньше в диапазоне 17–28 дБ, а ошибка метода Тропия — в диапазоне 5–16 дБ. Для модельного ОСШ 10 дБ ошибка предложенного метода больше на всём диапазоне доплеровских частот при меньшем разбросе. Неравномерность оценки ОСШ по всему диапазону доплеровских частот оказалась меньше у предложенного метода (0,5 %), чем у метода Тропия (2 %), что является важным результатом с точки зрения повышения точности работы пороговой системы детектирования доплеровских сигналов.

Экспериментальная проверка предложенного метода выполнялась при измерениях скоростей потока воздуха на срезе сопла при скоростях 3–15 м/с с высокой степенью турбулентности. В качестве светорассеивающих частиц использовался аэрозоль, образующийся при распылении смеси глицерина и воды (1/1), генератор аэрозоля TSI 9306.

Доплеровские сигналы детектировались при условии $\widehat{\text{SNR}} > 2$. На рис. 5 продемонстрировано существенное улучшение точности измерения скоростей турбулентных потоков при применении предложенного метода детектирования при включённом и отключённом порогах распознавания. В результате работы системы детектирования на основе предложенного метода из системы обработки были удалены шумовые сигналы, которые привели бы к ошибочно вычисленным скоростям вне диапазона 3–15 м/с. На рис. 5, с также хорошо видно, что шумовые сигналы отделяются от сигналов процесса при использованном значении порога распознавания равного 2. В табл. 2 показано, что при включённом пороге распознавания были исправлены ошибки вычисления среднего значения (15 %) и разброса измеренных скоростей (78 %).

В табл. 3 приведена неравномерность вычисленного ОСШ для предложенного метода и метода Тропия. Видно, что данный показатель на 3 % меньше для предложенного мето-

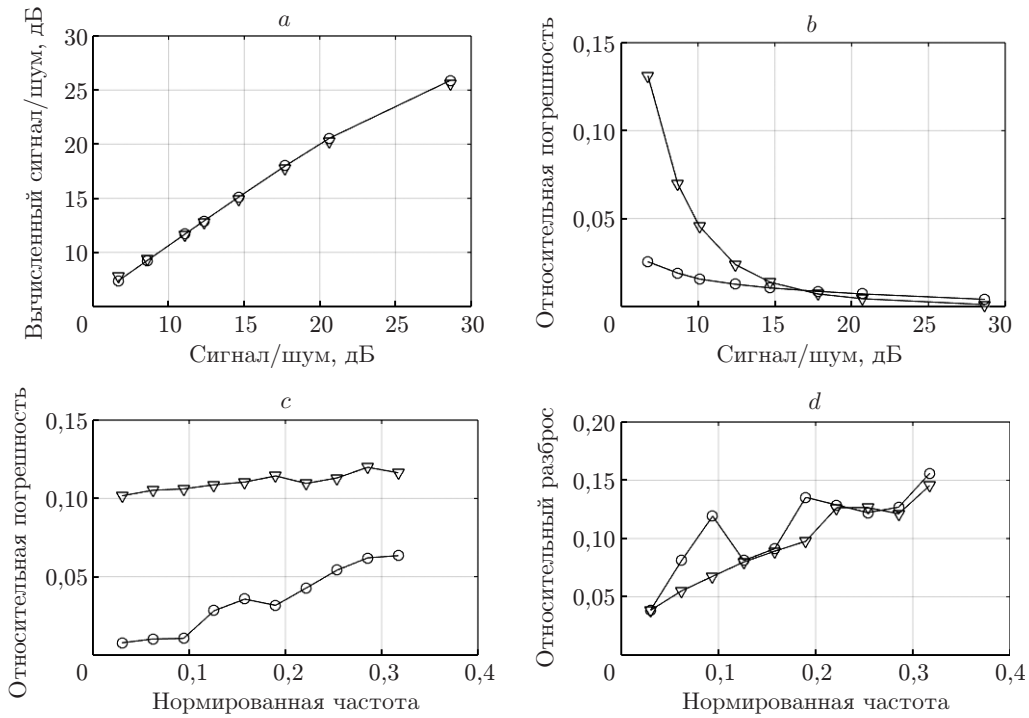


Рис. 4. Результаты вычисления ОСШ предложенным методом (∇) и методом Троиа (\circ): зависимость вычисленного ОСШ от модельного значения (a) и его относительная погрешность (b); относительная погрешность вычисленного ОСШ для различных диапазонов доплеровских частот при модельном ОСШ 10 дБ (c) и его относительный разброс (d)

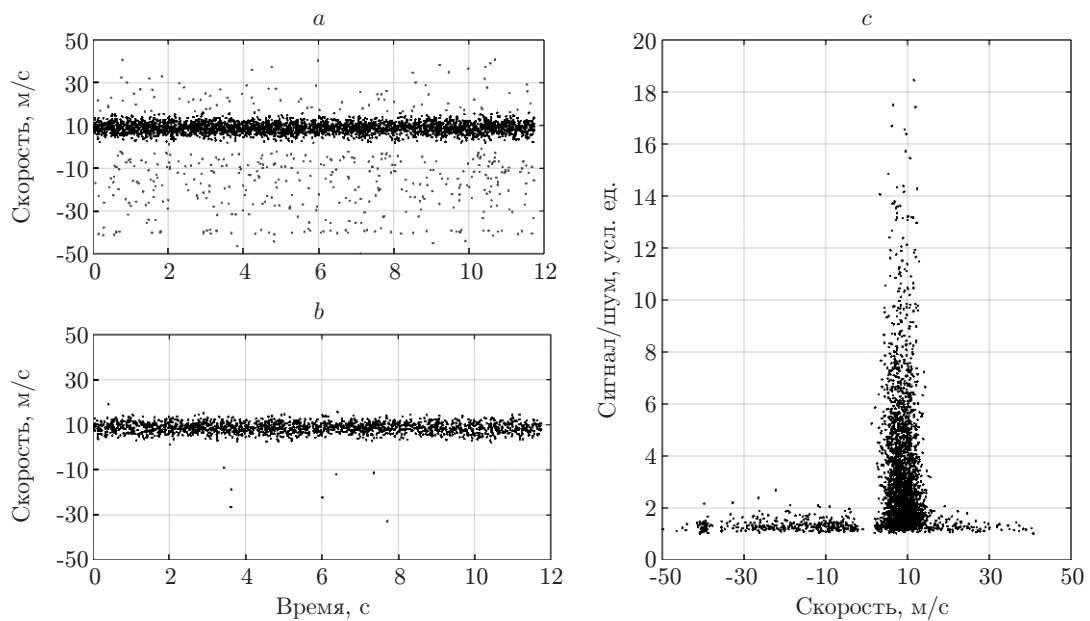


Рис. 5. Уточнение измерения скоростей при применении предложенного метода детектирования сигналов: a — измерение скоростей при отключённом пороге распознавания; b — измерение скоростей при включённом пороге распознавания; c — зависимость ОСШ от вычисленной скорости при отключённом пороге распознавания

Таблица 2

Среднее и разброс измеренных скоростей турбулентного процесса при включённом и отключённом порогах распознавания

Порог распознавания	Среднее	Разброс
Отключён	7,3	4,1
Включён	8,6	2,3

Таблица 3

Относительная неравномерность вычисленного ОСШ в диапазоне скоростей турбулентного процесса

Алгоритм	Относительная неравномерность, %
Предложенный	15
Тропия	18

да, и это позволяет улучшить точность пороговой системы детектирования сигналов при использовании предложенного метода вместо метода Тропия.

Таким образом, в численных экспериментах предложенный метод показал в целом согласованные результаты с методом Тропия, улучшив показатели относительного разброса и неравномерности оценок ОСШ в широком диапазоне доплеровских частот. В физических экспериментах применение предложенного метода позволило существенно уточнить определение статистических параметров турбулентных процессов. Полученные результаты подтвердили перспективность использования предложенного метода в отечественных системах обработки сигналов лазерных доплеровских измерителей скорости турбулентных процессов.

Заключение. Предложен спектральный метод детектирования сигналов лазерного доплеровского измерителя скорости турбулентных процессов, основанный на оценивании ОСШ, адаптированном под ширину спектральной плотности мощности сигнала, и сравнении его с порогом распознавания. Сигнал/шум находится как отношение разности мощности исходного сигнала и шума к мощности шума, где мощность шума определяется вне полосы главного лепестка сигнала. Порог распознавания задавался в диапазоне 2–10 в зависимости от оптической разрешимости диагностируемого потока.

Проведено сравнение предложенного спектрального метода оценивания сигнал/шум с известным методом Тропия. Продемонстрировано, что на модельных сигналах методы показывают результаты с высокой степенью идентичности, однако представленный метод даёт в 2 раза меньший показатель неравномерности оценок сигнал/шум, критичный для высокоточной работы пороговой системы детектирования доплеровских сигналов в условиях турбулентности диагностируемого процесса. Неравномерность оценок метода составила порядка 1 % для широкого диапазона доплеровских частот. В физических экспериментах по измерению скоростей турбулентных процессов показано, что предложенный спектральный метод детектирования доплеровских сигналов позволил устранить ошибки вычисления среднего и разброса скоростей в 15 и 78 %, удалив из системы обработки шумовые сигналы, не прошедшие порог распознавания.

Полученные результаты доказали перспективность использования предложенного метода в системах обработки лазерных доплеровских измерителей скорости при определении параметров турбулентных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меледин В. Г. Информационная оптоэлектронная диагностика. Наука и инновационные промышленные технологии. Новосибирск: Академиздат, 2015. 173 с.
2. Соболев В. С. Оптимальные оценки параметров оптических сигналов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. 135 с.

3. **Соболев В. С., Кашеева Г. А., Журавель Ф. А.** Сравнительный анализ качества лазерных доплеровских систем методами максимального правдоподобия и приращений фазы // Автометрия. 2016. **52**, № 6. С. 29–33.
4. **Qiu H.-H., Sommerfeld M., Durst F.** Two novel Doppler signal detection methods for laser Doppler and phase Doppler anemometry // Meas. Sci. Technol. 1994. **5**, N 7. P. 769–778.
5. **Le Duff A., Plantier G., Sourice A.** Particle detection and velocity measurement in laser Doppler velocimetry using Kalman filters // Proc. of the IEEE Intern. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing. Montreal, Canada, May 17–21, 2004. Vol. 2. P. 365–368.
6. **Boutier A.** Laser Velocimetry in Fluid Mechanics. London: John Wiley & Sons, 2013. 432 p.
7. **Matovic D., Tropea C.** Spectral peak interpolation with application to LDA signal processing // Meas. Sci. Technol. 1991. **2**, N 11. P. 1100–1106.
8. **Albrecht H. E., Damaschke N., Borys M., Tropea C.** Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 738 p.
9. **Tropea C., Yarin A., Foss J. F.** Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 1557 p.
10. **Muste M., Aberle J., Admiraal D. et al.** Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management. N. Y.: Taylor & Francis, 2017. 906 p.
11. **Harteveld W. K., Mudde R. F., van den Akker H. E. A.** Dual burst wavelet LDA processor implemented and tested on real flows // Proc. of the 12th Intern. Symp. Applied Laser Techn. Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal, 2004. 12 p. [CD].
12. **Benedict L. H., Nobach H., Tropea C.** Estimation of turbulent velocity spectra from laser Doppler data // Meas. Sci. Technol. 2000. **11**. P. 1089–1104.
13. **Оппенгейм А. В., Шафер Р. В.** Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2006. 856 с.
14. **Дубницев Ю. Н., Коронкевич В. П., Соболев В. С.** Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука, 1983. 216 с.
15. **Баскаков С. И.** Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. шк., 1983. 536 с.
16. **Климов А. В., Главный В. Г., Бакакин Г. В., Меледин В. Г.** Спектральный метод обработки сигнала лазерного дальномера повышенной точности // Автометрия. 2016. **52**, № 6. С. 42–49.

Поступила в редакцию 15 июня 2017 г.
