

УДК 681.78

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЁХМЕРНОГО ВЕКТОРА СКОРОСТИ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НЕРАВНОМЕРНО ДИСКРЕТИЗИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТ*

А. В. Климов, С. В. Двойнишников, В. Г. Меледин, Д. В. Куликов,
С. В. Кротов, И. В. Щепихин

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

Предложен метод определения трёхмерного вектора скорости потока по данным лазерных доплеровских измерений неравномерно дискретизированных компонент. Метод основан на фильтрации и линейной интерполяции измеренных компонент скорости в каналах схемы. В численном моделировании и физическом эксперименте показано, что ошибка метода не превышает 2 % и в несколько раз улучшаются результаты метода интерполяции по ближайшим точкам.

Ключевые слова: лазерный доплеровский измеритель, трёхмерный вектор скорости, неравномерная дискретизация, фильтрация, многомерная интерполяция.

DOI: 10.15372/AUT20170303

Введение. Диагностика кинематических параметров потоков жидкостей и газов является сложной мультидисциплинарной проблемой, актуальной для энергетики, машиностроения, химии, транспорта и многих других областей науки и техники [1–3]. Развитие локальных и полевых методов измерения потоков во многом связано с совершенствованием бесконтактных лазерных доплеровских измерителей скорости (ЛДИС), принцип работы которых основан на определении доплеровского сдвига частоты лазерного излучения, рассеянного малыми частицами в потоке [1]. Трёхмерный вектор скорости потока в области измерения рассчитывают по ортогональным проекциям вектора скорости увлекаемой потоком светорассеивающей частицы. Эти проекции измеряют многоканальными оптико-электронными схемами, восстанавливающими значения компонент скорости по доплеровскому частотному сдвигу в когерентно-оптических сигналах (доплеровских вспышках), возникающих при прохождении светорассеивающей частицы через измерительный объём ЛДИС.

Дискретно-стохастический характер регистрации доплеровских вспышек в каналах измерительной схемы обусловлен случайным появлением светорассеивающих частиц в измерительном объёме. Неравномерная по времени дискретизация измеренных компонент скорости в каналах ЛДИС вносит дополнительную погрешность при восстановлении трёхмерного вектора скорости. Популярными моделями подобной неравномерной дискретизации в ЛДИС являются: периодическая дискретизация со случайными пропусками, периодическая дискретизация с дрожанием, аддитивная случайная дискретизация [4]. Для таких моделей разработан ряд адаптивных алгоритмов, позволяющих уточнить оценку спектральной плотности мощности компоненты скорости потока [5]. В вышеуказанных работах рассматривается случай однокомпонентных измерений.

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

С точки зрения современного эксперимента важнейшей является задача измерения трёхмерного вектора скорости. Решению этой проблемы посвящены публикации [6–8], однако в них неравномерность дискретизации измеренных компонент скорости в каналах ЛДИС не учитывалась.

Цель представленной работы — создание метода восстановления трёхмерного вектора скорости потока по неравномерно дискретизованным данным многоканального ЛДИС.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу определения трёхмерного вектора скорости по неравномерно дискретизованным данным ЛДИС, реализованного на основе многоканальной оптико-электронной измерительной схемы с комбинацией временного и поляризационного разделения каналов [1] (рис. 1). Схема состоит из двух лазерных измерителей скорости, оптические оси которых расположены под одинаковым углом к оси Z измерительной системы. Каждый измеритель имеет по два канала, в которых обрабатываются оптические сигналы горизонтальной и вертикальной компонент в системе координат измерителя. Независимость работы измерителей обеспечена за счёт поляризационного разделения рассеянных от частицы оптических сигналов, линейные поляризации которых ортогональны. Каналы внутри каждого измерителя функционируют в режиме временного разделения на основе коммутации ортогонально ориентированных акустооптических модуляторов лазерного излучения, работающих в режиме дифракции Брэгга [9].

Каждый лазерный измеритель скорости принимает рассеянный от частицы оптический сигнал, преобразует его интенсивность в электрический сигнал и спектральными методами вычисляет доплеровскую частоту, пропорциональную проекции скорости пролетевшей частицы [10, 11], определяя горизонтальную и вертикальную компоненты скорости

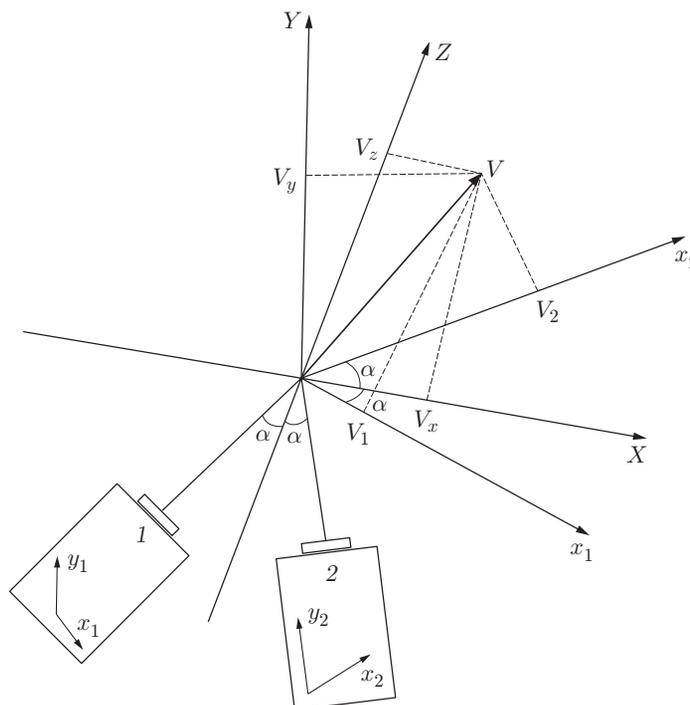


Рис. 1. Схема аппаратного комплекса для измерения трёхмерного вектора скорости потока: 1, 2 — поляризационно разделённые лазерные доплеровские измерители двух компонент скорости потока, оптические оси которых расположены под углом α к оси Z ; V — вектор скорости частицы; V_x , V_y , V_z — его проекции на осях X , Y и Z ; V_1 , V_2 — горизонтальные компоненты скорости, измеренные приборами 1, 2; x_1 , y_1 , x_2 , y_2 — координатные измерительные оси ЛДИС 1, 2; оси y_1 , y_2 совпадают с осью Y

ти в своей системе координат. Вертикальная ось измерителей совпадает с вертикальной осью Y измерительной системы, а горизонтальная ось находится под углом α к горизонтальной оси X системы. Тогда зависимость трёхмерного вектора скорости $V(t) = (V_x(t), V_y(t), V_z(t))$ от компонент скорости, измеряемых ЛДИС, имеет вид

$$\begin{aligned} V_x(t) &= (V_1(t) + V_2(t))/(2 \cos \alpha); & V_z(t) &= (V_1(t) - V_2(t))/(2 \sin \alpha); \\ V_y(t) &= V_{y_j}(t), & y_j &= \{y_1, y_2\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $V_{y_1}(t), V_{y_2}(t)$ — измеряемые вертикальные компоненты в системе координат первого и второго ЛДИС.

Метод определения трёхмерного вектора скорости должен учитывать, помимо неравномерной дискретизации измеренных компонент $V_1, V_2, V_{y_1}, V_{y_2}$, неизбежные погрешности их измерений, вызванные неравномерной дискретизацией. Малые погрешности в измерениях V_1, V_2 определяют большой уровень разброса оценок трёхмерного вектора скорости при малых характерных углах α . Эти два фактора являются основными источниками ошибок при измерениях трёхмерного вектора скорости.

Таким образом, для оценки трёхмерного вектора скорости необходим метод, устойчивый к неравномерной дискретизации измеренных компонент и наличию погрешностей в каналах ЛДИС.

Метод фильтрации и многомерной интерполяции. Для определения трёхмерного вектора скорости при неравномерной дискретизации данных ЛДИС был предложен метод, основанный на предварительной фильтрации и многомерной интерполяции (ФМИ-метод) измеряемых компонент скорости в каналах схемы. Фильтрация позволяет снизить разброс и погрешность, а интерполяция — уменьшить смещение при вычислении трёхмерного вектора скорости.

Рассмотрим более детально ФМИ-метод. Измеряемые скорости $V_1(t)$ и $V_2(t)$ в каждом канале фильтруются по критерию $|V(t) - M| \leq L\sigma$, где M — среднее значение, σ — разброс измеряемой скорости, вычисленные по окну в окрестности данной точки t , L — заданный уровень порога для канала. Уровень порога фильтрации выбирается таким образом, чтобы можно было снизить разброс шумов в окне фильтрации, не привнося ошибки в вычисление среднего. Большой уровень порога ($L \geq 3$) пропускает данные в полосе среднеквадратичного отклонения шумов, что не уменьшает величину разброса. Малый уровень порога ($L \leq 0,1$) уменьшает разброс шума, но приводит к смещению среднего значения при переходных режимах процесса. В экспериментах рекомендуется выбирать порог в диапазоне $[0,5-2]$. Более гладкие процессы стоит обрабатывать с меньшим значением порога, что приводит к уменьшению разброса и сохранению несмещённого тренда. Уменьшение разброса скоростей V_1, V_2 влечёт значительное снижение разброса при вычислении компоненты V_z . После фильтрации вычисление компонент V_x и V_z происходит путём линейной интерполяции: при измеренных $V_1(t_1), V_2(t_2), V_1(t_3), t_1 < t_2 < t_3$, находятся

$$V_x(t_2) = (\tilde{V}_1(t_2) + V_2(t_2))/(2 \cos \alpha); \quad V_z(t_2) = (\tilde{V}_1(t_2) - V_2(t_2))/(2 \sin \alpha), \quad (2)$$

где

$$\tilde{V}_1(t_2) = V_1(t_1) + (V_1(t_1) - V_1(t_3))/(t_1 - t_3)(t_2 - t_1) \quad (3)$$

— интерполированное значение на прямой, проходящей через $V_1(t_1), V_1(t_3)$. Формула (3) уже является несмещённой с точностью до второго порядка малости величины $(t_3 - t_1)$.

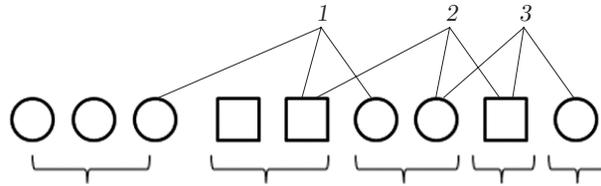


Рис. 2. Фрагмент очереди работы алгоритма (круги — измеренные скорости в одном канале, квадраты — в другом; фигурные скобки — разбиение очереди на группы скоростей; цифры — номера вычисляемой синтезированной компоненты, а соединяющие их с фигурами отрезки показывают, какие именно элементы в очереди будет использовать алгоритм для расчёта)

При этом для вычисления трёхмерного вектора скорости (V_x, V_y, V_z) в момент времени t_2 выполняется интерполяция также и для компоненты V_y :

$$\tilde{V}_y(t_2) = V_y(t_{01}) + (V_y(t_{01}) - V_y(t_{03})) / (t_{01} - t_{03})(t_2 - t_{01}), \quad (4)$$

где t_{01}, t_{03} — ближайшие к t_2 времена измеренных скоростей V_y , $t_{01} < t_2 < t_{03}$.

Общий алгоритм определения трёхмерного вектора скорости при реализации ФМИ-метода следующий.

1. Предварительно отфильтровываем все данные в каналах измерителей по критерию $|V(t) - M| \leq L\sigma$.

2. Все измеренные отфильтрованные скорости V_1, V_2 сортируем по времени и помещаем в очередь.

3. Разбиваем очередь на группы (рис. 2), так что каждую группу образуют измеренные скорости в одном из каналов, между которыми нет отсчётов измеренных скоростей из другого канала.

4. Задаём $i = 1$.

5. Выбираем группы $i, i + 1, i + 2$. Возьмём в группах $i, i + 1$ последние элементы, в группе $i + 2$ первый элемент. Пусть данные скорости были измерены в моменты времени $t_1 < t_2 < t_3$. Вычисляем $V_x(t_2), V_z(t_2)$ — синтезированные компоненты по формулам (2), (3).

6. Полагаем $i = i + 1$, переходим на шаг 5, пока не пройдем таким образом все тройки групп.

7. Для определения трёхмерного вектора скорости находим значения V_y по формуле (4) в моменты времени, использованные для вычисления синтезированных компонент V_x, V_z .

Отметим, что на работоспособность предлагаемого метода оказывают слабое влияние свойства оптической системы ЛДИС и частиц исследуемого потока. Чем больше размер частицы, тем больше рассеянного на ней света и меньше погрешность вычисления компонент в каналах ЛДИС, что приводит к более точной оценке трёхмерного вектора скорости. Полидисперсное распределение размеров приводит к неравномерному распределению погрешностей в каналах ЛДИС, что немного снижает эффективность фильтрации по сравнению с монодисперсным распределением размеров. Чем больше концентрация частиц и/или размер зондируемого объёма, тем более густая сетка измеренных компонент в каналах ЛДИС, что повышает эффективность фильтрации и интерполяции и улучшает точность измерения трёхмерного вектора скорости.

Численное моделирование. Для проверки предложенного алгоритма, реализующего ФМИ-метод определения трёхмерного вектора скорости по неравномерно дискретизованным данным ЛДИС, были проведены численные эксперименты.

В экспериментах компоненты вектора скорости моделировались функциями

$$V(t) = (V_x(t), V_y(t), V_z(t)) = \\ = (\sin(2\pi 0,25t) \cdot \cos(2\pi 0,15t), \cos(2\pi 0,25t) \cdot \cos(2\pi 0,15t), \sin(2\pi 0,15t)),$$

причём норма вектора V равна единице в любой точке t . Данный вектор скорости проецировался на измерительные каналы модельной схемы ЛДИС:

$$V_1(t) = V_x(t) \cos(\alpha) - V_z(t) \sin(\alpha), \quad V_2(t) = V_x(t) \cos(\alpha) + V_z(t) \sin(\alpha),$$

$$V_{y_j}(t) = V_y(t), \quad y_j = \{y_1, y_2\}, \quad \alpha = 4^\circ.$$

Неравномерная сетка в каждом канале измерителя моделировалась на основе пуассоновского процесса, обусловленного пролётом частиц потока через измерительный объём со средней интенсивностью $\lambda = 15000$ частиц/с. Общее количество обработанных частиц в каждом канале задавалось случайной величиной с равномерным распределением в диапазоне $[10000, 20000]$. К каждой скорости в каналах измерителя добавлялся нормальный шум.

К моделированным данным в каналах применялся вышеописанный ФМИ-алгоритм для восстановления синтезированных компонент скорости $(V_{x_s}(t), V_{y_s}(t), V_{z_s}(t))$. Для сравнения к тем же данным применялся алгоритм вычисления синтезированной компоненты по ближайшим точкам (БТ-алгоритм) без линейной интерполяции и фильтрации. Вычислялось восемь типов погрешностей: $\bar{\varepsilon}_x, \bar{\varepsilon}_y, \bar{\varepsilon}_z, \bar{\varepsilon}$ — средние погрешности вычисления компонент V_x, V_y, V_z, V ; $\max(\varepsilon_x), \max(\varepsilon_y), \max(\varepsilon_z), \max(\varepsilon)$ — максимальные погрешности вычисления компонент V_x, V_y, V_z, V . Все погрешности определялись относительно известного значения скорости. Было проведено три эксперимента с различным СКО нормального шума $\sigma = 0,005, 0,01, 0,02$, что соответствует минимальным погрешностям в каналах ЛДИС (0,5, 1 и 2 %). Уровень порога фильтрации L задавался 0,5 на основе вышеуказанных рекомендаций, размер окна фильтрации — равным 30 отчётам. Результаты представлены в табл. 1.

Видно, что средняя ошибка ФМИ-алгоритма в 3 раза меньше, чем у БТ-алгоритма для разных уровней шума и разных компонент скорости. При этом максимальная ошибка предложенного ФМИ-алгоритма также меньше в 2–3 раза, чем ошибка БТ-алгоритма

Таблица 1

Средние и максимальные погрешности вычисления компонент скорости при разных уровнях шума модельных процессов

Алгоритм	$\bar{\varepsilon}_x / \max(\varepsilon_x)$	$\bar{\varepsilon}_y / \max(\varepsilon_y)$	$\bar{\varepsilon}_z / \max(\varepsilon_z)$	$\bar{\varepsilon} / \max(\varepsilon)$
$\sigma = 0,005$				
ФМИ	0,001/0,008	0,001/0,011	0,013/0,110	0,013/0,110
БТ	0,004/0,014	0,003/0,023	0,040/0,206	0,041/0,206
$\sigma = 0,01$				
ФМИ	0,002/0,012	0,002/0,015	0,026/0,124	0,025/0,125
БТ	0,006/0,027	0,008/0,037	0,081/0,404	0,083/0,404
$\sigma = 0,02$				
ФМИ	0,004/0,027	0,005/0,038	0,051/0,369	0,052/0,370
БТ	0,011/0,072	0,016/0,081	0,161/0,795	0,165/0,796

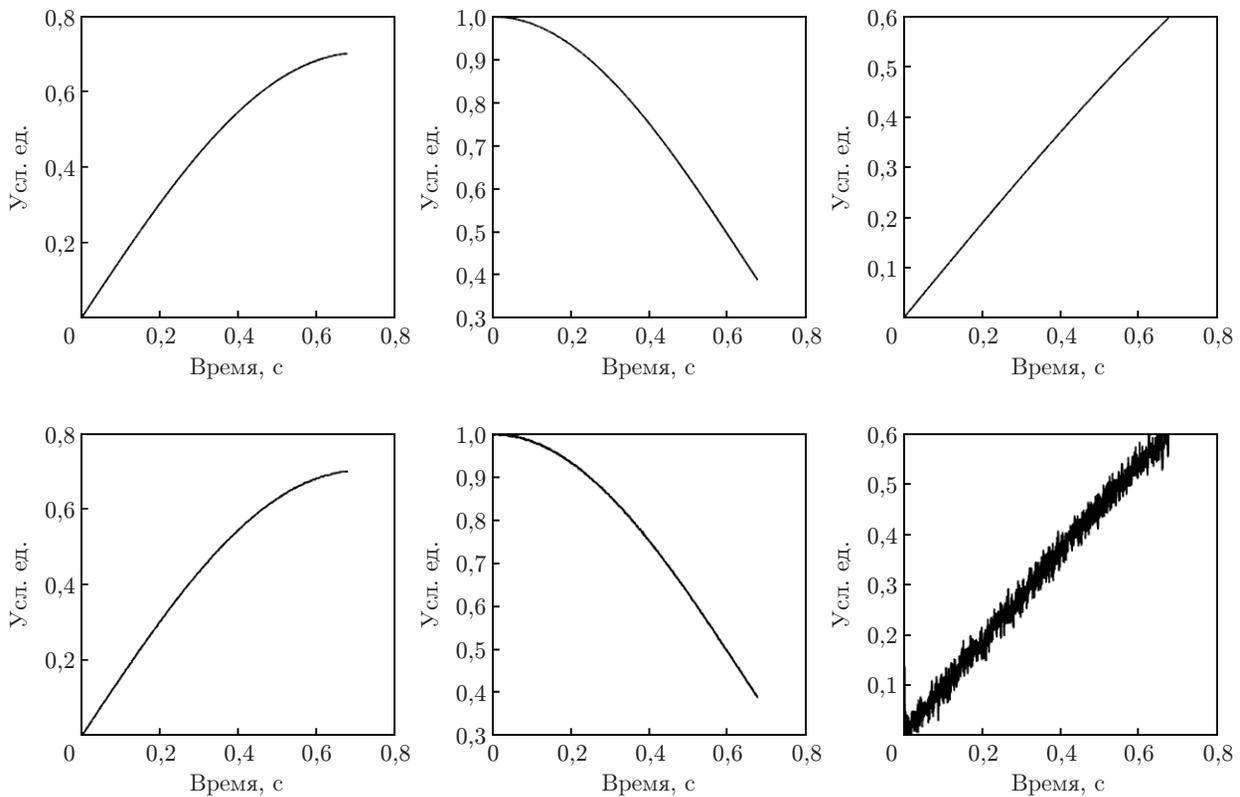


Рис. 3. Примеры моделированных сигналов: 1-я строка — идеальные компоненты V_x , V_y , V_z (слева направо), 2-я строка — синтезированные компоненты V_x , V_y , V_z предложенным ФМИ-методом (слева направо)

для разных компонент скорости и уровней шума. Ввиду того что норма смоделированного трёхмерного вектора скорости в каждой точке равна единице, погрешность $\bar{\varepsilon}$ является относительной ошибкой определения трёхмерного вектора скорости. Как следует из таблицы, основной вклад в данную погрешность вносит погрешность вычисления V_z из-за малого угла между оптическими осями ЛДИС и осью Z . При этом для $\sigma = 0,005$, что соответствует минимальной погрешности измерения скоростей $0,5\%$ и техническим характеристикам современных ЛДИС, средние погрешности $\bar{\varepsilon}_z$ и $\bar{\varepsilon}$ предложенного алгоритма равны всего $1,3\%$ для достаточно малого угла $\alpha = 4^\circ$.

На рис. 3 приведён пример скоростей $(V_x(t), V_y(t), V_z(t))$ и $(V_{x_s}(t), V_{y_s}(t), V_{z_s}(t))$ при $\sigma = 0,005$. Шумовая дорожка синтезированной компоненты $V_{z_s}(t)$ больше дорожек компонент $V_{x_s}(t), V_{y_s}(t)$ из-за малого угла α между моделируемыми ЛДИС.

Экспериментальная проверка метода. Для экспериментальной проверки предложенного ФМИ-метода был создан стенд по измерению вектора скорости вращающегося стеклянного диска в заданной точке. На поверхность диска были нанесены метки с хорошей светорассеивающей способностью, моделирующие светорассеивающие частицы, движущиеся в потоке. Измерительный комплекс настраивался так, чтобы обеспечить существенную неравномерность регистрируемых доплеровских сигналов в каналах измерительного комплекса (в каналах одного измерителя поток данных в 5 раз больше, чем в каналах другого). Угол α между оптическими осями ЛДИС и осью Z составил $\approx 4^\circ$. Скорость вращения диска была постоянной, величины проекции скорости $(V_x(t), V_y(t), V_z(t)) \approx (0,9, -0,47, -0,8)$ м/с. Отрицательные значения скорости для компонент V_y, V_z связаны с выбором системы отсчёта.

Таблица 2

**Относительная погрешность среднего и относительный разброс
вычисления компонент скорости поверхности вращающегося диска**

Алгоритм	$\bar{\varepsilon}_x/\sigma(\varepsilon_x), \%$	$\bar{\varepsilon}_y/\sigma(\varepsilon_y), \%$	$\bar{\varepsilon}_z/\sigma(\varepsilon_z), \%$	$\bar{\varepsilon}/\sigma(\varepsilon), \%$
ФМИ	0,15/2,8	0,9/5,3	0,6/46	2/16
БТ	2/50	0,25/7,4	44/803	124/512

Результаты вычисленных трёхмерных векторов скорости с использованием ФМИ- и БТ-алгоритмов приведены в табл. 2. Для сравнения использовались относительные погрешности средних $\bar{\varepsilon}_x, \bar{\varepsilon}_y, \bar{\varepsilon}_z, \bar{\varepsilon}$ и относительные разбросы $\sigma(\varepsilon_x), \sigma(\varepsilon_y), \sigma(\varepsilon_z), \sigma(\varepsilon)$ для компонент V_x, V_y, V_z и V . Как и в численных экспериментах, погрешность среднего и разброс трёхмерного вектора скорости определяются характеристиками вычисленной компоненты V_z из-за малого угла между оптическими осями ЛДИС и осью Z . Видно, что погрешность $\bar{\varepsilon}_z$ ФМИ-метода составляет всего 0,6 %, в то время как для БТ-алгоритма $\bar{\varepsilon}_z = 44$ %. Хотя относительный разброс $\sigma(\varepsilon_z)$ ФМИ-метода достигает 46 %, это на порядок меньше аналогичной величины БТ-метода (800 %). Подобные результаты $(\bar{\varepsilon}, \sigma(\varepsilon))$ наблюдаются для трёхмерного вектора скорости: 2 и 16 % для ФМИ-метода против 124 и 512 % для БТ-метода.

Синтезированные ФМИ- и БТ-методами процессы $V_x(t), V_y(t), V_z(t)$ также показаны на рис. 4. Визуально данные процессы подтверждают результаты, представленные в табл. 2. Видно, что применение ФМИ-метода позволило значительно уменьшить разброс и по-

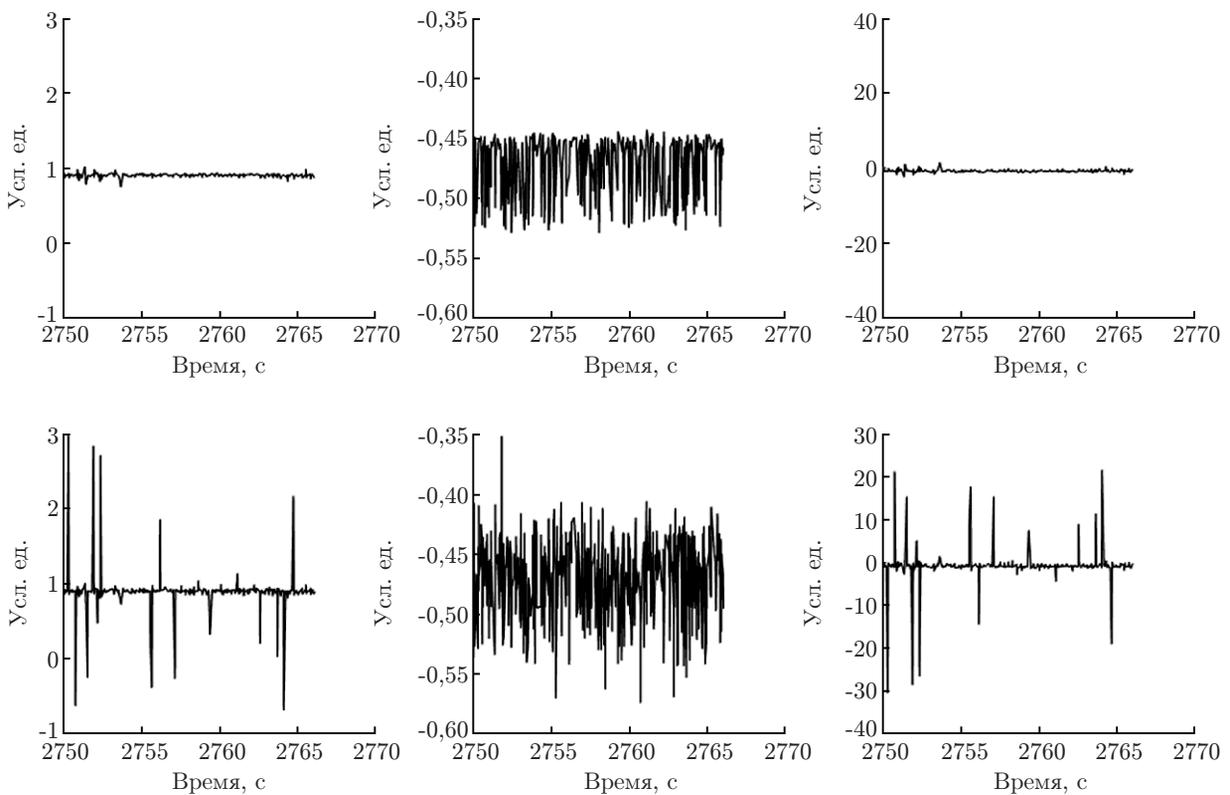


Рис. 4. Вычисленные проекции скорости по трём компонентам (слева направо X, Y, Z): верхние рисунки соответствуют ФМИ-алгоритму, нижние — БТ-алгоритму

грешности определения для компонент V_x, V_z . Таким образом, помимо существенного повышения точности, ФМИ-метод обеспечивает более правильное визуальное представление о характере исследуемого процесса, поскольку устраняет ложные резкие пики на графиках скорости.

В итоге как в численных, так и физических экспериментах показано, что предложенный ФМИ-метод позволяет восстанавливать трёхмерный вектор скорости потока более точным и устойчивым образом по сравнению со стандартным БТ-алгоритмом. Погрешности ФМИ-метода не превышают 1–2 %, что подтверждает перспективность использования его в составе прецизионного лазерного доплеровского измерителя.

Заключение. Предложен метод определения трёхмерного вектора скорости потока по неравномерно дискретизованным данным многоканального ЛДИС. Метод основан на предварительной фильтрации и многомерной линейной интерполяции измеренных компонент скорости в каналах схемы и позволяет существенно уменьшить погрешности вычисляемого трёхмерного вектора скорости. В численных экспериментах установлено, что представленный метод обеспечивает погрешность измерения трёхмерного вектора скорости и его компонент в 3 раза меньше, чем известный метод синтеза скоростей по ближайшим точкам. Показано, что при стандартном уровне погрешностей 0,5 %, соответствующем техническим характеристикам каналов лазерных доплеровских измерителей, погрешность метода составляет всего 1,3 % при чрезвычайно малом угле в 4° между оптическими осями измерителей и осью Z . В физических экспериментах по измерению трёхмерного вектора скорости на поверхности вращающегося диска при малом угле в 4° между оптическими осями измерителей и осью Z установлено, что предложенный метод обеспечивает восстановление трёхмерного вектора скорости с погрешностью 2 %, что почти на два порядка лучше результата синтеза скорости по ближайшим точкам. Выполненные численные и физические эксперименты доказали перспективность использования разработанного метода в составе прецизионного лазерного доплеровского анемометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меледин В. Г. Информационная оптоэлектронная диагностика. Наука и инновационные промышленные технологии /Отв. ред. С. В. Алексеенко. Новосибирск: Академиздат, 2015. 173 с.
2. Naumov I. V., Dvoynishnikov S. V., Kabardin I. K., Tsoy M. A. Vortex breakdown in closed containers with polygonal cross sections // *Phys. Fluids*. 2015. **27**, Is. 12. P. 124103–124111.
3. Наумов И. В., Рахманов В. В., Окулов В. Л. и др. Диагностика течения за моделью ротора трехлопастной турбины // *Теплофизика и аэромеханика*. 2012. **19**, № 3. С. 267–278.
4. Гапонов В. А., Томсонс Я. Я. Цифровая обработка сигналов ЛДИС с учетом неравномерной дискретизации // *Автометрия*. 1982. № 3. С. 51–58.
5. Benedict L. H., Nobach H., Tropea C. Estimation of turbulent velocity spectra from laser Doppler data // *Meas. Sci. Technol.* 2000. **11**, N 8. P. 1089–1104.
6. Mikami O., Fujikawa C. 3-Beam laser Doppler velocimeter for 3-D velocity measurement // 2016 IEEE 6th International Conference on Photonics (ICP). IEEE, 2016. P. 1–3. DOI: 10.1109/ICP.2016.7510010.
7. Belousov P., Dubnistchev Yu., Meledin V., Pavlov V. Laser-Doppler anemometer with adaptive temporal selection of the velocity vector // *Opt. Applicata*. 1990. **20**, N 3. P. 187–197.
8. Наумов И. В., Окулов В. Л., Майер К. Е. и др. LDA-PIV-диагностика и трехмерный расчет пульсирующего закрученного потока в закрытой цилиндрической камере // *Теплофизика и аэромеханика*. 2003. **10**, № 2. С. 151–156.

9. Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н., Меледин В. Г., Павлов В. А. Лазерный доплеровский анемометр с временной селекцией ортогональных компонент вектора скорости // Автометрия. 1988. № 2. С. 43–49.
10. Соболев В. С., Журавель Ф. А., Кащеева Г. А. Сравнительный анализ качества доплеровских систем методами максимального правдоподобия и приращения фазы // Автометрия. 2016. 52, № 6. С. 29–33.
11. 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 1 февраля 2017 г.
