

Определение скорости ветра в атмосфере по турбулентным искажениям видеоизображений лазерного пучка

А.Л. Афанасьев, В.А. Банах, А.П. Ростов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 5.04.2010 г.

Представлены результаты экспериментальной проверки метода определения интегральной по трассе скорости ветра, основанного на оценке дисперсии скорости смещений энергетического центра тяжести видеоизображений прошедшего трассу лазерного пучка. Метод сопоставляется с независимыми оптическими методами измерения интегральной скорости, основанными на использовании пространственного и временного вариантов корреляционного и спектрального анализа флуктуаций интенсивности в видеоизображениях лазерного пучка. Показано, что данные всех трех оптических методов хорошо коррелируют между собой и согласуются с результатами локальных измерений скорости 10 акустическими анемометрами, располагавшимися вдоль трассы зондирования.

Ключевые слова: скорость ветра, турбулентность, атмосфера, лазерное излучение, интенсивность, видеоизображение, пространственно-временная корреляция, энергетический центр тяжести, дисперсия, фазовый спектр; wind speed, turbulence, atmosphere, laser beam, intensity, video image, space-time correlation, image centroid, dispersion, phase spectrum.

Введение

Задача определения скорости ветра и структурной характеристики флуктуаций показателя преломления из измерений флуктуаций интенсивности оптического излучения в турбулентной атмосфере привлекает внимание исследователей с 1970-х гг. В исследованиях турбулентных полей ветра и показателя преломления в атмосфере лазерными скинтилляционными методами, наряду с восстановлением профилей измеряемых величин [1–3], значительный интерес представляет определение интегральных по трассе характеристик среды. В настоящее время известен ряд способов определения усредненной вдоль лазерного луча скорости движения среды. Так, в статье [4] и более ранних публикациях, в ней упомянутых, были предложены способы измерения усредненной по трассе поперечной составляющей скорости ветра из пространственно-временной корреляционной функции флуктуаций интенсивности прошедшего трассу оптического излучения. Задача определения скорости ветра по статистике флуктуаций интенсивности, рассеянного поверхностью наблюдаемого объекта, рассматривалась в [5], где были получены формулы для оценки усредненной вдоль трассы скорости ветра. Более детальные исследования возможностей определения интегрального поперечного к трассе вектора скорости из флуктуаций интенсивности отра-

женного излучения выполнены в работах [6, 7] на основе результатов подробного анализа статистических свойств интенсивности отраженного излучения, флуктуирующего как за счет атмосферной турбулентности, так и вследствие случайных вариаций коэффициента отражения шероховатой поверхности. В работе [8] предложен способ определения скорости ветра, основанный на когерентном анализе флуктуаций интенсивности оптического излучения, прошедшего через турбулентную атмосферу, в двух точках, пространственно разнесенных в приемной плоскости в пределах 1-й зоны Френеля $\sqrt{\lambda L}$. Информативной характеристикой в этом случае является наклон фазового спектра. Способ оценки интегральной скорости ветра на трассе по временному сдвигу взаимной корреляционной функции реализован в [9], где представлены результаты тестирования работы трассового кросскорреляционного оптического измерителя скорости на основе сравнения с результатами независимых измерений скорости ветра массивом акустических датчиков.

Таким образом, большинство известных оптических методов, основанных на регистрации временной задержки, измерении наклона корреляционной функции, измерении частотных спектров и применении когерентного анализа предполагают статистическую обработку сигналов в двух пространственно разнесенных точках в плоскости приемника, т.е., по существу, являются двухканальными. Указанные методы чувствительны лишь к среднему значению проекции скорости ветра на направление разности точек наблюдения и не пригодны для оценки

* Алексей Леонидович Афанасьев (afanasiev@iao.ru); Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Андрей Петрович Ростов (rostov@iao.ru).

турбулентных пульсаций скорости внутри временного интервала усреднения.

В [10] исследована возможность определения среднего значения и дисперсий флуктуаций компонент скорости ветра одноканальным методом из измерений скорости смещений турбулентных неоднородностей интенсивности в изображениях источника или подсвечиваемого объема в случайно-неоднородной среде. Было установлено, что дисперсии флуктуаций скорости смещения координат центра тяжести изображения связаны с компонентами средней поперечной скорости ветра и дисперсиями их флуктуаций линейными соотношениями, и получены простые аналитические выражения, учитывающие зависимость измеряемых величин от параметров спектра случайных неоднородностей среды, типа волны, схемы распространения и радиуса приемной апертуры. Данный метод позволяет судить и о флуктуационной составляющей скорости в пределах интервала статистического усреднения, т.е. делать оценку эффективной интегральной скорости

$$V_{\text{эфф}} = \sqrt{V_{0\perp}^2 + \sigma_{V_{\perp}}^2},$$

где $V_{0\perp} = \sqrt{V_{0y}^2 + V_{0z}^2}$ и $\sigma_{V_{\perp}}^2 = \sigma_{V_y}^2 + \sigma_{V_z}^2$ — соответственно перпендикулярная направлению распространения средняя скорость и дисперсия скорости. Данный метод также является более простым и быстрым с точки зрения обработки первичных данных, поскольку не требует расчетов взаимных пространственно-временных корреляций, спектральных характеристик и применения алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

Несмотря на обилие предлагаемых методов, практических реализаций оптических измерений скорости ветра в реальной атмосфере немного. В связи с этим представляет интерес проведение сравнения оценок интегральной скорости, получаемых различными методами из одних и тех же экспериментальных данных.

В статье представлены результаты экспериментальной проверки оптического метода измерения интегральной скорости ветра [10], основанного на оценке дисперсии скорости смещений энергетического центра тяжести (ЭЦТ) изображения лазерного пучка, с использованием для записи случайных реализаций распределений интенсивности лазерного излучения высокоскоростной цифровой видеокамеры Hot Shot 512 С [11]. Также представлены одновременные оценки скорости по методу [8] из измерения фазового спектра и по методу [9] — по смещению максимума взаимной пространственно-временной корреляционной функции интенсивности.

1. Описание эксперимента

С целью верификации рассматриваемых методов оценки интегральной скорости ветра были проведены натурные эксперименты в атмосфере.

В качестве оптического источника был использован твердотельный лазер с длиной волны 532 нм и средней мощностью 30 мВт. Диаметр пучка на выходе лазера составлял 0,4 мм, угловая расходимость

1,2 мрад. Измерительная трасса располагалась наклонно. Высота изменялась от 0,4 м вблизи источника до 4 м вблизи приемника. Длина трассы составляла 100 м.

Для визуализации распределения интенсивности в поперечном сечении пучка использовался экран, установленный в конце трассы. Изображение пучка на экране регистрировалось скоростной видеокамерой с частотой записи до 4 кГц с размерами кадра 512×512 пикселей и до 200 кГц при уменьшении размеров кадра.

Для получения независимых данных о скорости ветра при проведении атмосферных экспериментов был разработан и изготовлен массив из десяти одномерных ультразвуковых анемометров, объединенных в единую вычислительную сеть. В приборах реализован помехоустойчивый фазовый метод [12] измерения скорости распространения акустической волны. Вся работа приборов и управление ультразвуковыми приемопередатчиками были организованы программным способом в непрерывном режиме с частотой обновления информации 200 Гц. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

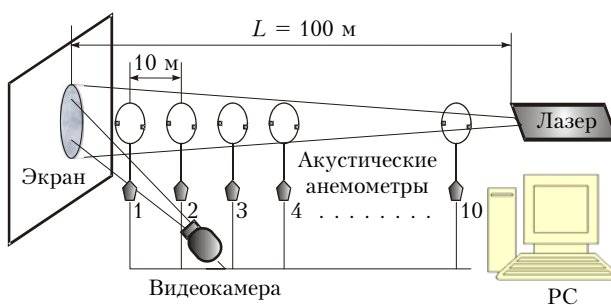


Рис. 1. Схема эксперимента

Изображение лазерного пучка, искаженного турбулентными неоднородностями показателя преломления воздуха, на экране, располагавшемся перпендикулярно к направлению распространения пучка, представляет собой временную последовательность мгновенных реализаций распределений интенсивности, перемещающихся со скоростью V_{\perp} (картина «бегающих теней»). Данные распределения интенсивности записывались с частотой кадров $f_d = f_{\text{frame}}$ в оперативную память видеокамеры. В результате были получены пространственно-временные ряды с частотой дискретизации 2000 Гц либо 4000 Гц для различных измерительных серий. Поскольку длительность выборки ограничивалась объемом оперативной памяти видеокамеры при размере кадра изображения 512×512 пс, видеозапись осуществлялась интервалами длительностью по 1018 кадров ($\sim 0,5$ с при частоте 2000 кадр/с). Промежутки между интервалами записи варьировались в различных сериях измерений от 1 до 100 с. После заполнения оперативной памяти информация с видеокамеры переписывалась в виде бинарных файлов на жесткий диск компьютера. На рис. 2 приведены примеры изображений отдельных кадров видеозаписей, полученных в различных сериях для различных атмосферных условий.

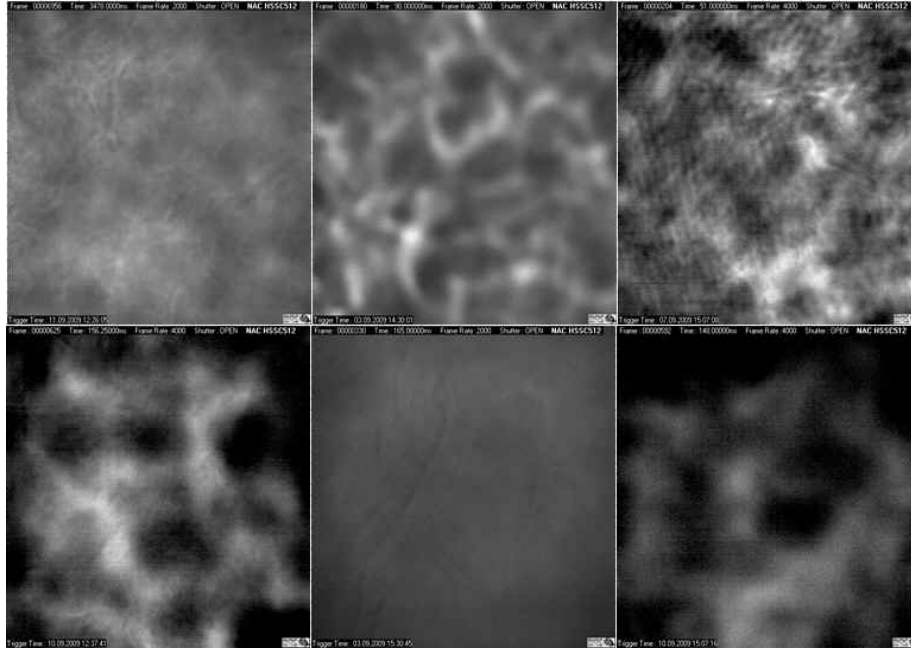


Рис. 2. Примеры изображений отдельных видеокладов при различных атмосферных условиях. Вариации метеопараметров: поперечный ветер 0,23–2,97 м/с, температура 13,77–21,54 °С, давление 739,5–747,8 мм рт. ст., относительная влажность 33,4–53,2%

Синхронно с началом каждого интервала видеозаписи изображения пучка мгновенные значения горизонтальной проекции перпендикулярной компоненты скорости ветра фиксировались 10 анемометрами, равномерно размещенными по трассе с интервалом 10 м. Полученные таким образом с помощью независимых измерений акустическими датчиками локальные значения скорости ветра использовались затем для сравнения со значениями интегральной скорости, найденными из оптических измерений.

2. Обработка экспериментальных данных

В процессе дальнейшей компьютерной обработки данных измерений методы корреляционного и когерентного анализа были использованы в двух пространственно-временных вариантах. Суть этих вариантов можно продемонстрировать с помощью рис. 3, где в окне программы обработки показаны два последовательных видеокадра изображения пучка.

В первом варианте, согласно классической схеме [8, 9], на площади видеокадра в пределах 1-й зоны Френеля (круг в центре обоих кадров диаметром $\sqrt{\lambda L} = 7,6$ мм) выделялись «точечные» площадки размером 2×2 пикселя ($0,3 \times 0,3$ мм), разнесенные в горизонтальном или вертикальном направлениях на расстояние $\rho = 4,9$ мм (аналог точечных диафрагм в [8, 9]). Временные ряды интенсивности в этих точках использовались для вычисления временных задержек τ сигналов $I_1(\rho_1, t)$ и $I_2(\rho_2, t + \tau)$ на базе $\rho = \rho_2 - \rho_1$ по пространственно-временным корреляционным функциям $B(\rho, \tau) = \langle I_1(\rho_1, t) I_2(\rho_1 + \rho, t + \tau) \rangle$,

а также сдвигов фазы $\varphi = \omega \tau$ частотных компонент сигналов по их фазовым спектрам $\varphi(\omega, \rho) = \arctg \frac{\text{Im} W_{12}(\omega, \rho)}{\text{Re} W_{12}(\omega, \rho)}$, где

$$W_{12}(\omega, \rho) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \langle I_1(\rho_1, t) I_2(\rho_1 + \rho, t + \tau) \rangle \exp(-i\omega \tau) dt$$

– взаимный спектр; $\omega = 2\pi f$, f – частота. Согласно [8] фазовый спектр $\varphi(\omega, \rho) = \pm \omega \rho / (k_\alpha V_\rho)$, где k_α зависит от расходимости пучка; V_ρ – проекция $V_{0\perp}$ на направление разноса точек наблюдения. Отсюда для горизонтального направления (по оси Y) $V_{0y} = \pm \omega \rho_y / [k_\alpha \varphi(\omega, \rho_y)]$. Скорость по вертикали (по оси Z) может быть рассчитана аналогично. Оценка скорости ветра по временной задержке максимума пространственно-временной корреляционной функции τ (метод [9]) осуществлялась по формуле $V_{0y} = \rho_y / \tau$. Подчеркнем, что в рассмотренной классической схеме для оценки скорости использовались измерения временных смещений сигналов при фиксированных пространственных разносах.

Использование при проведении измерений скоростной видеосъемки (матрицы фотоприемников 512×512) позволяет на основе полученных экспериментальных данных реализовать и другой вариант. Очевидно, что, определив усредненное пространственное смещение изображения между соседними кадрами, с учетом геометрии пучка и при известной частоте следования кадров можно оценить интегральную по трассе скорость движения среды. На рис. 3 для двух последовательных видеокладов вертикальной и горизонтальной линиями выделены столбец и строка изображения.

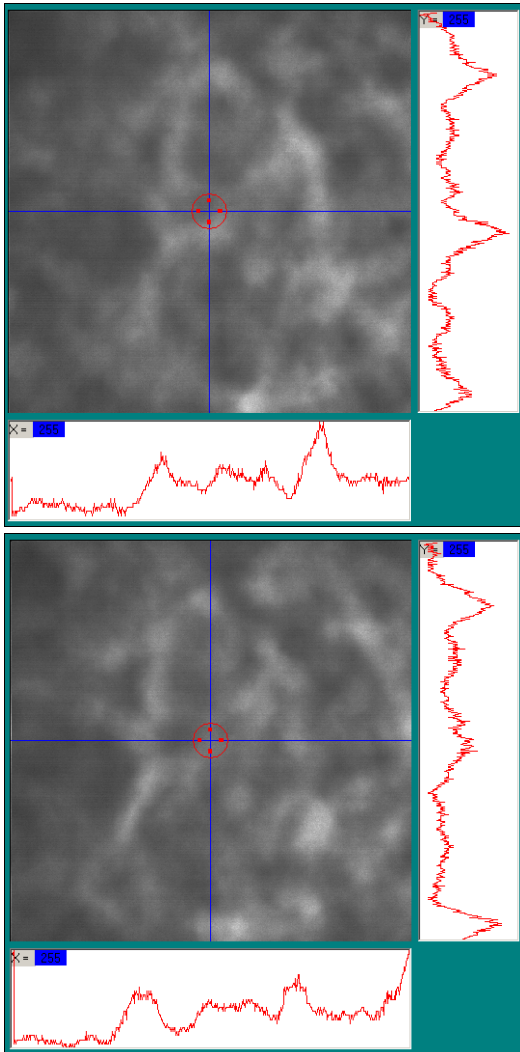


Рис. 3. Окно программы для обработки видеоизображения пучка методами корреляционного и когерентного анализа

Справа и внизу показаны соответствующие им одномерные распределения интенсивности. Используя в качестве анализируемых данных одномерные распределения интенсивности в выделенной строке изображений в двух соседних кадрах, по взаимной корреляции определяется горизонтальный пространственный сдвиг ρ_y . В отличие от классического варианта оценка скорости здесь производится не по временной задержке сигналов на заданной пространственной базе, а по величине пространственного смещения сигналов $I(\rho, t_1)$ и $I(\rho + \rho_y, t_2)$ при фиксированных временных задержках

$$t_1 - t_2 = 1/f_{frame} : V_{0y} = \rho_y f_{frame}.$$

Фазовый спектр в этом случае является функцией пространственной частоты κ и имеет вид

$$\varphi(\kappa, \tau) = \pm k_{\kappa} \kappa \tau V_{0y},$$

где $\tau = 1/f_{frame}$ – временной интервал между кадрами. При этом для оценки скорости $V_{0y} = \pm \varphi(\kappa, \tau) / k_{\kappa} \kappa \tau$ используется значительно больший объем данных

(вместо пары точек – массив точек всей строки) для каждого кадра изображения. За счет этого значения скорости могут быть получены на каждом межкадровом временном интервале (с частотой временной дискретизации $f_d = f_{frame}$). Для еще большего статистического усреднения оценок фазовых спектров и взаимных корреляционных функций на этапе вычисления взаимных спектров была использована процедура их накопления по всем строкам кадра.

На рис. 4 и 5 приведены примеры фазовых спектров и взаимных корреляционных функций интенсивности для обоих вариантов анализа одних и тех же трех экспериментальных реализаций распределения интенсивности и найденные на их основе значения скорости ветра. Значения интегральной скорости, рассчитанные из локальных измерений скорости ветра акустическими анемометрами, равнялись для этих реализаций соответственно 3,73; 0,62 и $-1,02$ м/с.

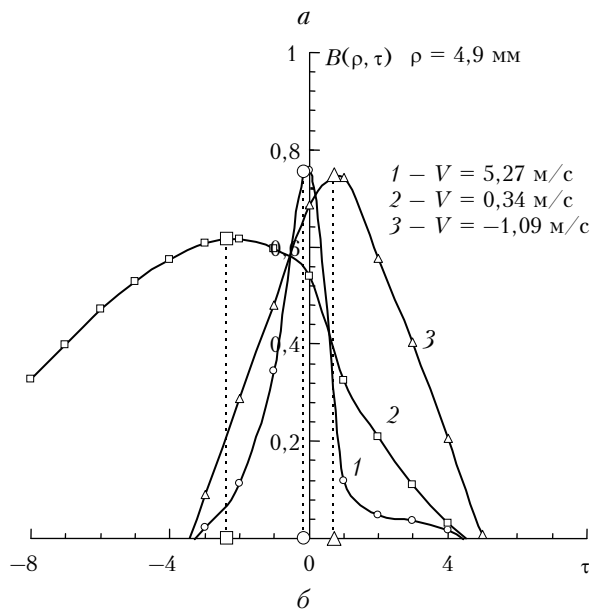
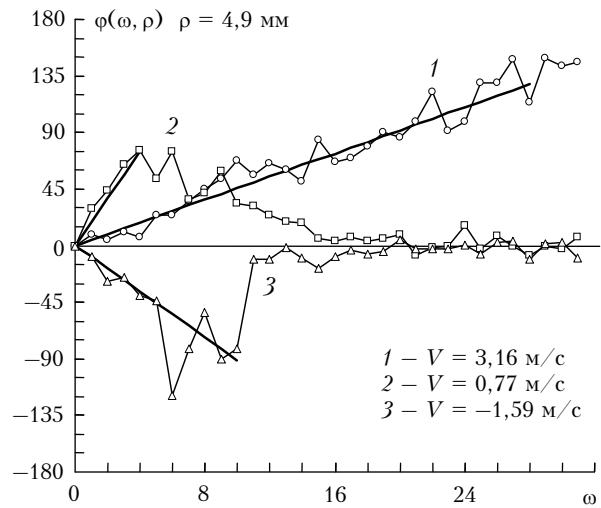


Рис. 4. Оценки скорости ветра из анализа временных рядов флуктуаций интенсивности в двух точках с фиксированным пространственным разномом ρ : а – по наклону фазового спектра; б – по временному смещению τ максимума взаимной корреляционной функции

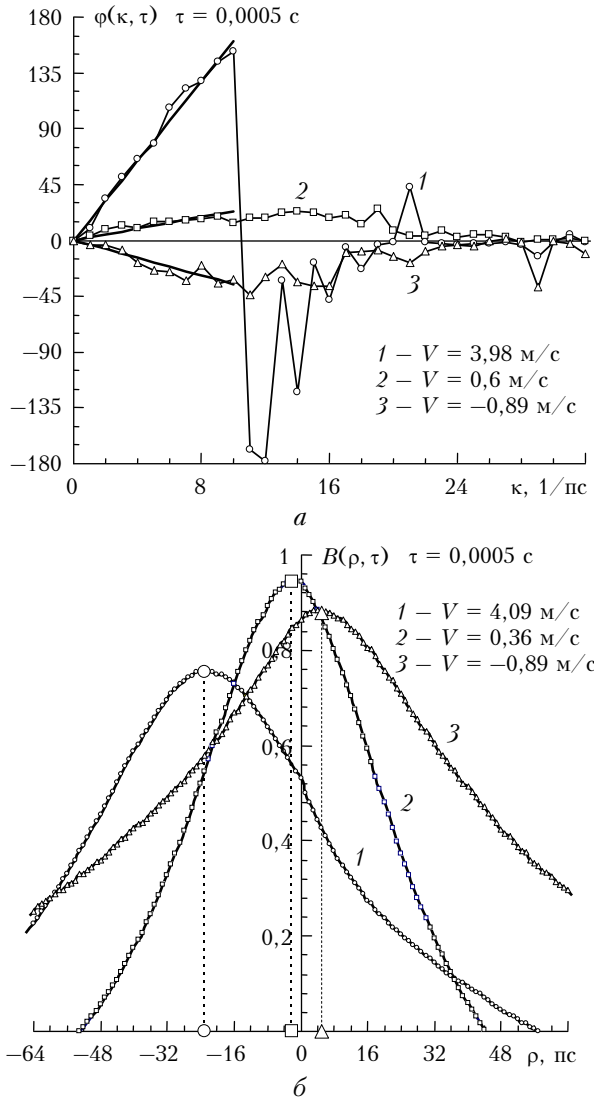


Рис. 5. Оценки скорости ветра из анализа одномерных пространственных рядов флуктуаций интенсивности с фиксированным временным разносом $\tau = 1/f_{frame}$: а – по наклону фазового спектра; б – по величине пространственного сдвига ρ максимума взаимной корреляционной функции

Наклон фазовых спектров определялся на основе линейной аппроксимации начальных участков по методу наименьших квадратов (прямые линии). С ростом частоты фаза выходит за границы интервала $-\pi \div \pi$, наступает «срыв» фазы. Из-за погрешности в оценке фазового спектра определение его наклона и оценка скорости становятся практически невозможными в некоторой окрестности значений $\pm \pi$. Для первого варианта расчета фазового спектра (по временным рядам флуктуаций интенсивности на рис. 4) наклон спектра обратно пропорционален абсолютной величине скорости. Таким образом, для больших скоростей наклон спектра мал, образуется протяженный линейный участок, пригодный для оценки скорости. Для второго варианта расчета (по пространственным рядам флуктуаций интенсивности на рис. 5) ситуация обратная – наклон спектра пропор-

ционален скорости. Поэтому линейный участок спектра с малым наклоном, пригодный для оценки скорости, имеет место, наоборот, при малых скоростях.

При расчете взаимной пространственно-временной корреляционной функции по первому варианту (см. рис. 4) величина временной задержки максимума корреляции так же, как и наклон фазового спектра, обратно пропорционален скорости. Это приводит к тому, что при больших значениях измеряемой скорости временная задержка максимума корреляционной функции может оказаться меньше временного интервала между последовательными кадрами видеозаписи $\tau = 1/f_{frame}$, поскольку пространственный разнос точек измерения ρ , в силу особенностей метода [9], не должен превышать радиус первой зоны Френеля $\sqrt{\lambda L}$. Точность оценки больших значений скорости при этом оказывается низкой. Во втором «пространственном» варианте (см. рис. 5) положения максимумов корреляционных функций четко определяются как для больших, так и для малых скоростей. Указанные особенности могут быть использованы для повышения точности определения скорости путем выбора того либо другого варианта анализа в зависимости от диапазона измеряемых скоростей.

Данные, полученные в ходе эксперимента, также были использованы для проверки способа оценки интегральной скорости ветра, основанного на полученных в [10] теоретических соотношениях. В каждом видеокadre вычислялись координаты ЭЦТ изображения

$$R_i = \frac{\sum_{i,j} iI(i,j)}{\sum_{i,j} I(i,j)}, \quad R_j = \frac{\sum_{i,j} jI(i,j)}{\sum_{i,j} I(i,j)},$$

где $I(i,j)$ – значение яркости пикселя изображения с координатами i, j . Затем вычислялись ряды скорости изменения координат ЭЦТ $dR_i/dt, dR_j/dt$ и дисперсии

$$\sigma_y^2 = \langle (R_i - \langle R_i \rangle)^2 \rangle, \quad \sigma_z^2 = \langle (R_j - \langle R_j \rangle)^2 \rangle,$$

$$\sigma_{y'}^2 = \langle ((dR_i/dt) - \langle dR_i/dt \rangle)^2 \rangle,$$

$$\sigma_{z'}^2 = \langle ((dR_j/dt) - \langle dR_j/dt \rangle)^2 \rangle.$$

В [10] показано, что дисперсии флуктуаций скорости смещения координат центра тяжести изображения σ_y^2 и σ_z^2 связаны с компонентами средней поперечной скорости ветра и дисперсиями их флуктуаций соотношениями вида

$$\sigma_{y'}^2 = K \left[\frac{3}{4} (V_{0y}^2 + \sigma_{V_y}^2) + \frac{1}{4} (V_{0z}^2 + \sigma_{V_z}^2) \right],$$

$$\sigma_{z'}^2 = K \left[\frac{1}{4} (V_{0y}^2 + \sigma_{V_y}^2) + \frac{3}{4} (V_{0z}^2 + \sigma_{V_z}^2) \right]. \quad (1)$$

Коэффициент K , учитывающий, согласно [10], влияние размера приемной апертуры, параметров спектра турбулентности $\Phi_n(k)$, типа волны и схемы

распространения, при условии постоянства этих параметров за время измерений, может быть определен экспериментально при калибровке.

Из отношений дисперсий скорости изменения координат к дисперсиям флуктуаций координат ЭЦТ, которые с точностью до коэффициентов K совпадают с правыми частями равенств (1), но позволяют избавиться, как показано в [10], от необходимости задания C_m^2 , определялась эффективная поперечная скорость ветра для каждого из временных интервалов видеозаписи изображения пучка. Полученные значения сравнивались со скоростями, найденными методами корреляционного и когерентного анализа, а также с синхронно измеренными ультразвуковыми анемометрами. Для сравнения использовалось среднее значение скорости по 10 анемометрам как величина, наиболее близкая к интегральной по трассе скорости.

3. Результаты измерений

На рис. 6 приведены значения скорости ветра, измеренные ультразвуковыми анемометрами, размещенными вдоль трассы (кривые 10–100 соответствуют расстоянию в метрах от приемной плоскости).

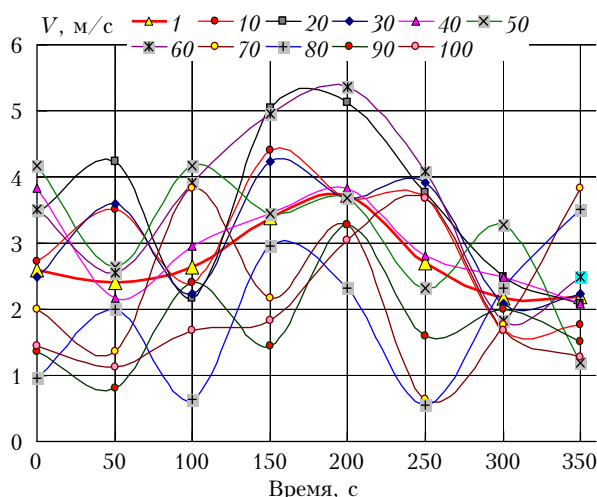


Рис. 6. Пространственно-временная изменчивость поперечной скорости ветра вдоль оптической трассы из акустических измерений: 1 – усредненное по всем анемометрам значение (интегральная скорость); 10–100 – показания анемометров, расположенных от приемной плоскости на 10–100 м соответственно

Пример демонстрирует пространственно-временную изменчивость поперечной скорости ветра в данном эпизоде измерений. Видно, что в различных пространственных точках трассы скорость ветра изменялась во времени различным образом. Кривая 1 отображает временной ход средней по всем анемометрам (интегральной) скорости.

На рис. 7 кроме акустических данных 1 представлены оценки эффективной интегральной скорости оптическим методом [10] по скорости изменения координат энергетического центра изображения – кривая 4, а также кривые 5 и 6, иллюстрирующие «временной» и «пространственный» варианты оценки скорости ветра по методу [8] из наклона фазовых спектров.

Коэффициенты корреляции между данными анемометров 1 и ходом кривых 4, 5, 6 равны соответственно: $b_{14} = 0,58$, $b_{15} = 0,72$, $b_{16} = 0,93$.

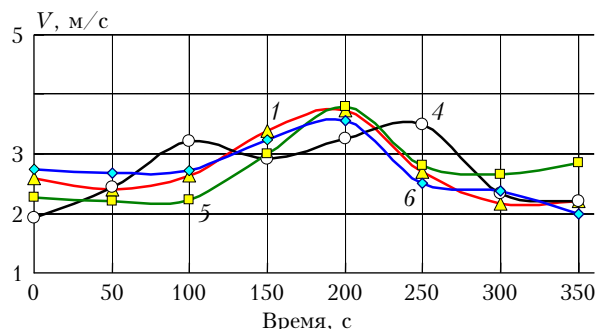


Рис. 7. Сравнение оценок скорости ветра различными методами: 1 – данные акустических анемометров; 4 – оценки эффективной интегральной скорости по измерению скорости изменения координат ЭЦТ [10]; 5 и 6 – «временной» и «пространственный» варианты оценки скорости ветра методом когерентного анализа [8] из наклона фазовых спектров

На рис. 8 и 9 для двух других эпизодов измерений также показаны сравнительные оценки скорости ветра различными методами.

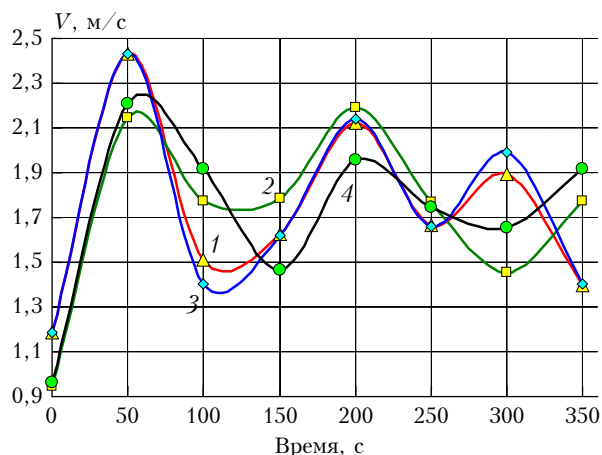


Рис. 8. Сравнение оценок скорости ветра различными методами: 1 – усредненные данные по линейке акустических анемометров; 4 – оценки эффективной интегральной скорости из временной статистики ЭЦТ [10]; 2 и 3 – варианты оценки скорости ветра по смещению максимумов взаимных корреляционных функций по временным (метод [9]) и пространственным рядам флуктуаций интенсивности соответственно. Вариации метеопараметров на трассе во время измерений: поперечный ветер 0,96–3,92 м/с, температура 17,24–19,03 °С, давление 748,8–749,5 мм рт. ст., относительная влажность 31,4–34,6%

Здесь кривыми 1 и 4, по-прежнему, обозначены данные, усредненные по линейке акустических анемометров, и эффективная интегральная скорость, найденная из временной статистики ЭЦТ [10]. Кривыми 2 и 3 представлены оценки скорости по смещению максимумов взаимных корреляционных функций по временным и пространственным рядам флуктуаций интенсивности соответственно. Коэффициенты корреляции между кривыми на рис. 8 $b_{14} = 0,7$, $b_{12} = 0,74$, $b_{13} = 0,99$ и на рис. 9 $b_{14} = 0,65$, $b_{12} = 0,66$, $b_{13} = 0,92$.

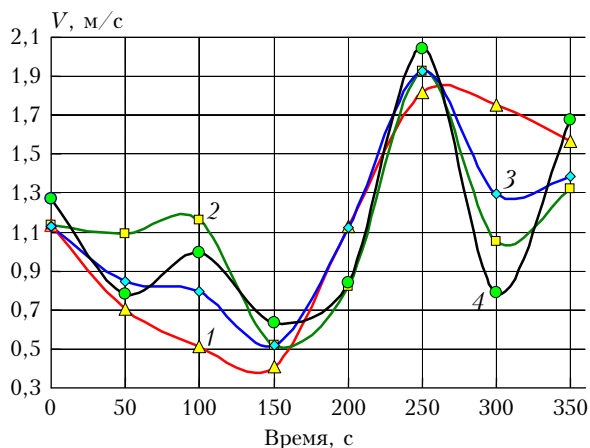


Рис. 9. То же, что и на рис. 8, для эпизода измерений при других значениях атмосферных метеопараметров: поперечный ветер 0,03–1,84 м/с, температура 16,46–18,71 °С, давление 746,6–749,2 мм рт. ст., относительная влажность 32,0–35,1%

Во всех случаях (рис. 7–9) наблюдается хорошее соответствие значений интегральной скорости ветра, полученных из оптических и акустических измерений. Максимальную корреляцию дают оценки, основанные на измерениях пространственных смещений рядов флуктуаций интенсивности при фиксированном временном разnose. Имеющиеся отклонения можно объяснить как погрешностями самих оптических измерений, так и неполным соответствием скорости, усредненной по всем анемометрам, интегральному по трассе значению скорости ветра.

Несколько меньше корреляция акустических данных с оценками на основе анализа временных рядов с пространственным разномом. Как отмечалось, это может быть обусловлено погрешностями при определении наклонов спектров и смещений корреляционных максимумов при недостаточно высокой для данных скоростей переноса частоте дискретизации временных рядов флуктуаций интенсивности. Путем выбора пространственного либо временного вариантов анализа в области больших либо малых скоростей ветра точность измерений может быть повышена.

Коэффициенты корреляции эффективной скорости $V_{эф} = \sqrt{V_{0y}^2 + \sigma_{V_y}^2}$ (кривые 4) с независимыми акустическими данными в среднем равны 0,6–0,7. Очевидно, основной причиной расхождений является наличие добавки, характеризующей флуктуационную компоненту скорости. В то же время корреляция с другими оптическими методами достаточно высокая, например, с кривой 3 на рис. 9 $b_{43} = 0,84$. Это косвенно говорит о том, что в рассмотренных примерах измерений основной вклад в $V_{эф}$ давала

средняя скорость переноса, а флуктуации скорости были малы.

Возможность учета флуктуаций скорости в пределах интервала статистического усреднения может быть полезной во многих практических случаях и является достоинством метода [10]. Этот метод более прост с точки зрения обработки первичных данных, поскольку не требует расчетов взаимных пространственно-временных корреляций, спектральных характеристик и применения алгоритмов БПФ, как фазовый и корреляционный методы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 09-05-00054-а.

1. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П. Локализация турбулентных потоков по флуктуациям интенсивности просвечивающего лазерного излучения // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 7. С. 640–647.
2. Банах В.А., Фалищ А.В. Визуализация поля скоростей в атмосфере по рассеянному излучению // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 890–896.
3. Банах В.А., Фалищ А.В. Визуализация поля скоростей в слое турбулентной атмосферы по просвечивающему слой оптическому излучению // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22. № 12. С. 1135–1141.
4. Ting-I Wang, Ochs G.R., Lawrence S. Wind measurements by the temporal cross-correlation of the optical scintillations // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 23. P. 4073–4081.
5. Clifford S.F., Ochs G.R., Wang Ting-I. Optical wind sensing by observing the scintillations of a random scene // Appl. Opt. 1975. V. 14. N 12. P. 2844–2850.
6. Holmes J.F., Lee M.H., Fossey M.E. Remote crosswind measurement utilizing the interaction of a target-induced speckle field with the turbulent atmosphere // J. Opt. Soc. Amer. A. 1980. V. 70. N 12. P. 1586.
7. Holmes J.F., Amzajerdian F., Gudimetla Rao V.S., Hunt J.M. Remote crosswind measurement using speckle-turbulence interaction and optical heterodyne detection // J. Opt. Soc. Amer. A. 1985. V. 2. N 13. P. 104.
8. Безверхний В.А., Гурвич А.С., Показов В.В. Применение когерентного анализа для определения скорости ветра из оптических измерений // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1978. Т. 14. № 1. С. 102.
9. Ростов А.П., Иванов А.П., Афанасьев А.Л. Экспериментальное сравнение трассового оптического измерителя воздушного потока с массивом ультразвуковых датчиков в приземном слое атмосферы // Тезисы докл. IX Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 2002. С. 121.
10. Afanasiev A.L., Banakh V.A., Rostov A.P. Estimate of wind velocity from optical measurements in atmosphere // Proc. SPIE. 2002. V. 5027. P. 136–144.
11. www.photo-sonics.co.uk
12. Ростов А.П. Массив одномерных акустических анемометров-термометров // Восьмое Сибирское совещание по климатологическому мониторингу: Мат-лы Рос. конф. / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Аграф-Пресс, 2009. С. 368–370.

A.L. Afanasiev, V.A. Banakh, A.P. Rostov. Estimate of wind velocity in the atmosphere based on the analysis of turbulent distortions of laser beam images registered by video camera.

The results of experimental prove of the method of estimate of the integral along a wind velocity path based on the determination of the variance of speed of the energy centroid displacements in the images of a laser beam, passed through the path, are presented. The method is compared with the optical methods of the integral velocity estimation based on “temporal” and “spatial” variants of the correlation and spectral analysis of intensity fluctuations in the laser beam images. It is shown that the results of the integral wind velocity estimation by all three optical methods are in agreement with each other and with the results of local measurements of wind velocity by ten sonic anemometers, placed along the sounding path.