

Определение скорости поперечного ветра по турбулентным флуктуациям изображения подсвеченной лазерным пучком диффузной мишени

Д.А. Маракасов¹, А.Л. Афанасьев¹, В.А. Банах¹, А.П. Ростов¹, В.В. Кусков¹
¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1

Аннотация

В статье представлен оптический метод оценки поперечного ветра, основанный на анализе турбулентных искажений изображения подсвеченной лазерным пучком диффузной мишени. Предложенный корреляционный алгоритм обработки видеоизображений позволяет в режиме реального времени делать оценку скорости поперечного ветра с использованием одного приемного объектива при подсветке мишени в видимом либо инфракрасном диапазоне. Проведена экспериментальная проверка метода на атмосферной трассе. Оптические оценки интегрального ветра сопоставлены с данными независимых локальных измерений шести ультразвуковых анемометров, расположенных вдоль трассы.

Ключевые слова: оптические технологии дистанционного зондирования, скорость ветра, турбулентность, обработка изображений.

Цитирование: Маракасов, Д.А. Определение скорости поперечного ветра по турбулентным флуктуациям изображения подсвеченной лазерным пучком диффузной мишени / Д.А. Маракасов, А.Л. Афанасьев, В.А. Банах, А.П. Ростов, В.В. Кусков // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 2. – С. 232-238. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1025.

Citation: Marakasov DA, Afanasiev AL, Banakh VA, Rostov AP, Kuskov VV. Crosswind speed estimation from turbulent fluctuations of laser beam illuminated diffuse target image. Computer Optics 2022; 46(2): 232-238. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1025.

Введение

Известные методы измерения поперечного ветра на основе оптического просвечивания и анализа турбулентных флуктуаций прошедшего излучения требуют либо разнесения приемника и передатчика на разные концы трассы (активные методы по флуктуациям интенсивности лазерного пучка), либо наличия в поле зрения приемника удаленного объекта наблюдения с хорошо различимыми контрастными границами (пассивные методы по дрожанию изображений неподвижных объектов). Оба варианта имеют свои недостатки, ограничивающие область их применения. Первый требует специальной организации оптической трассы и ограничен относительно короткими дистанциями, второй – наличия в изображении удаленного объекта контрастного участка с постоянной освещенностью, что не всегда возможно в дневное время и тем более ночью.

Методы пассивного оптического ветрового зондирования [1–9] базируются на корреляционном анализе турбулентных искажений изображений удаленных объектов при естественном солнечном освещении. Пассивные оптические системы позволяют достаточно точно оценивать поперечную к линии визирования компоненту скорости ветра. В их основе лежит измерение характеристик дрожания изображения удаленного контрастного объекта [1, 4], пространственная фильтрация изображений [5, 6]. Также известны методы, где в качестве измеряемой характеристики используются искажения волнового фронта [7–9]. Необходимым условием реализации этого подхода явля-

ется достаточная освещенность наблюдаемого объекта, либо сам объект должен быть источником некогерентного излучения. Такая ситуация реализуется далеко не всегда, например, в темное время суток освещенность мала. Отсутствие резких и контрастных границ в изображении также существенно затрудняет применение методов, основанных на статистике дрожания изображений.

Преодолеть естественное ограничение на работоспособность в темное время суток возможно путем анализа изображений объектов, подсвечиваемых лазерным излучением. Использование лазерного источника, расположенного рядом с точкой наблюдения, для освещения удаленного объекта позволяет сформировать контрастное изображение в любое время суток даже на однородной поверхности. Поэтому представляет интерес разработка способов оценивания поперечного ветра по рассеянному лазерному излучению.

В работах [3, 4] было показано, что рассеянное назад излучение содержит достаточно информации для оценки скорости ветра. Корреляционно-спектральный анализ флуктуаций интенсивности в изображении подсвеченного диффузного объекта, проведенный в [10], продемонстрировал принципиальную возможность селекции вкладов прямого и обратного участка трассы в пространственно-временной спектр интенсивности. Однако в экспериментах с помощью данной методики удавалось выделять только воздушные потоки, параметры которых (скорость ветра, структурная характеристика показателя преломления) имеют характер локальных возмущений,

т.е. достаточно сильно отличаются от средних на трассе. Возможность оценки интегральной вдоль трассы скорости поперечного ветра по рассеянному мишенью лазерному излучению требует дополнительного исследования.

В данной работе предложен алгоритм обработки видеоизображений, основанный на построении пространственно-временной корреляционной функции турбулентных флуктуаций интенсивности в изображении однородной диффузной мишени. Алгоритм позволяет в режиме реального времени давать оценку интегральной скорости ветра. Представлены результаты экспериментальной проверки предложенной методики. Оценки интегрального ветра сопоставляются с данными независимых измерений расположенной вдоль трассы линейки анемометров.

1. Корреляционная функция интенсивности в изображении подсвеченного диффузного объекта

Пусть лазерный источник с длиной волны λ (волновое число $k=2\pi/\lambda$), находящийся в плоскости $x=0$ декартовой системы координат (x, y, z) , освещает диффузную поверхность, находящуюся в плоскости $x=L$. Рассеянное излучение в плоскости источника проходит через приемный объектив и регистрируется матрицей фотоприемников (видеокамерой) на расстоянии l от объектива. Будем считать, что приемный объектив и источник разнесены на некоторое расстояние в плоскости $x=0$ (рис. 1), что, как показано в [10], позволяет пренебречь корреляцией неоднородностей оптического поля, порождаемых флуктуациями показателя преломления на прямом (от лазера до мишени) и обратном (от мишени до объектива) участках трассы.

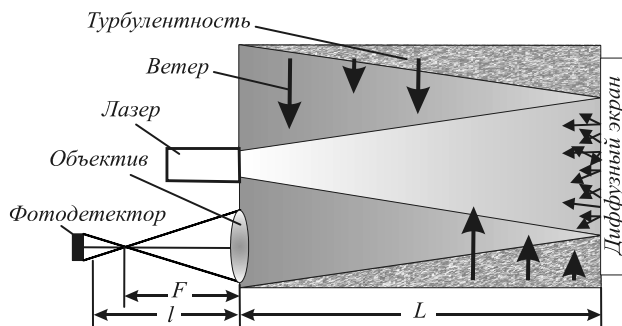


Рис. 1. Схема измерений

Информация о скорости ветра $V(x)$ на трассе между источником и диффузной поверхностью извлекается с помощью корреляционного анализа из двумерных распределений интенсивности в плоскости регистрации.

В [11] получено выражение для пространственно-временной корреляционной функции флуктуаций интенсивности

$$K_I(\mathbf{R}, \mathbf{p}, \tau) = \langle I(\mathbf{R} + \mathbf{p} / 2, t) I(\mathbf{R} - \mathbf{p} / 2, t + \tau) \rangle - \langle I(\mathbf{R} + \mathbf{p} / 2, t) \rangle \langle I(\mathbf{R} - \mathbf{p} / 2, t) \rangle \quad (1)$$

в плоскости регистрации в виде

$$K_I(\mathbf{R}, \mathbf{p}, \tau) = K_0 e^{-\frac{2R^2 + p^2 / 2}{a^2}} \operatorname{Re} \int_0^1 d\xi \int d\mathbf{k} C_n^2(L\xi) \times \Phi_n(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k}V(L\xi)\tau} \sum_{m=1}^2 \left(e^{-\operatorname{Re}\beta_m \kappa^2 - 2\operatorname{Re}\gamma_m \mathbf{R}\mathbf{k}} - e^{-\beta_m \kappa^2 + \gamma_m \mathbf{p}\mathbf{k}} \right). \quad (2)$$

Здесь \mathbf{R}, \mathbf{p} – вектора в плоскости регистрации, $\xi = x/L$ – нормированная координата вдоль трассы, \mathbf{k} – двумерный вектор пространственных частот, ортогональный оси x , K_0 – амплитудный множитель, a – эффективный радиус усредненного по времени изображения подсвеченной мишени, комплексные величины β_m, γ_m ($m=1,2$) зависят от координаты точки на трассе, характеристик подсвечивающего пучка и приемной системы. Для описания атмосферной турбулентности используется степенная модель Колмогорова [12] со спектром флуктуаций показателя преломления $\Phi_n(\mathbf{k}) = 0,033 C_n^2 \kappa^{-11/3}$ и структурной характеристикой $C_n^2(x)$.

При выводе формулы (2) флуктуации интенсивности считались слабыми. Для описания освещающего пучка, приемного объектива и диффузной мишени использовались Гауссовы модели

$$f_j(r) = A_j \exp \left\{ - \left(\frac{1}{a_j^2} + i \frac{k}{F_j} \right) \frac{r^2}{2} \right\}, \quad j=1,2,3. \quad (3)$$

Здесь индекс $j=1$ соответствует комплексной амплитуде поля освещающего пучка в плоскости источника $U_0(\mathbf{r}) = f_1(\mathbf{r})$ (амплитуда A_1 , радиус a_1 , фокусное расстояние F_1), индекс $j=2$ – функции пропускания приемного объектива $T(\mathbf{r}) = f_2(\mathbf{r})$ (амплитуда A_2 , радиус a_2 , фокусное расстояние F_2), а индекс $j=3$ – амплитуде коэффициента рассеяния диффузной поверхности $A(\mathbf{r}) = f_3(\mathbf{r})$ (амплитуда в центре рассеивателя A_3 , радиус $a_3, F_3 = \infty$).

Пусть матрица фотоприемников расположена в плоскости резкого изображения ($1/l + 1/L = 1/F_2$), освещающий пучок коллимированный ($F_1 = \infty$), радиусы освещающего пучка и объектива значительно превосходят радиус первой зоны Френеля ($a_m^2 k/L \gg 1$), и радиус рассеивателя многократно превосходит радиус освещающего пучка ($a_3 \gg a_1$). В этом случае для параметров β_m, γ_m в (2) справедливы следующие выражения

$$\beta_1 = i \frac{L}{k} (1 - \xi), \quad \beta_2 = i \frac{a_2^2}{2} (1 - \xi)^2, \quad \gamma_1 = -i \frac{L}{l}, \quad \gamma_2 = -i \frac{L}{l} \xi. \quad (4)$$

Подстановка (4) в (2) обращает слагаемое с $m=2$ в ноль, а в оставшемся слагаемом пропадает зависимость от суммарной координаты \mathbf{R} под знаком интеграла:

$$K_I(\mathbf{R}, \mathbf{p}, \tau) = K_0 e^{-\frac{2R^2 + p^2 / 2}{a^2}} \operatorname{Re} \int_0^1 d\xi \int d\mathbf{k} C_n^2(L\xi) \times \Phi_n(\mathbf{k}) \operatorname{Re} e^{i\mathbf{k}V(L\xi)\tau + \gamma_m \mathbf{p}\mathbf{k}} (1 - e^{-\beta_1 \kappa^2}). \quad (5)$$

Предположим, что скорость ветра и структурная характеристика не зависят от координаты вдоль трассы ($\mathbf{V}(x) = \mathbf{V}$, $C_n^2(x) = C_n^2$). После вычисления интегралов корреляционную функцию (5) можно выразить через вырожденную гипергеометрическую функцию (функцию Куммера первого рода) $M(a, b, z)$ [13]:

$$K_l(\mathbf{R}, \boldsymbol{\rho}, \tau) = 0,033\pi K_0 C_n^2 (L/k)^{5/6} \times \exp\left(-\frac{2R^2 + \rho^2/2}{a^2}\right) \times \operatorname{Re} \left[\Gamma\left(\frac{-5}{6}\right) / \Gamma\left(\frac{11}{6}\right) \left(\frac{D}{2}\right)^{5/3} + (6) + i^{-5/6} \Gamma(-11/6) M(-11/6, 1; -iD^2/4) \right],$$

где D – нормированный разнос:

$$D = \sqrt{\frac{k}{L}} \left| \frac{L}{l} \boldsymbol{\rho} - \mathbf{V}\tau \right|. \tag{7}$$

Экспоненциальный множитель в (6) можно устранить посредством нормировки интенсивности в каждой точке изображения на ее усредненное по времени значение. В результате единственной переменной, от которой будет зависеть корреляционная функция

$$B(D) = B_0 \operatorname{Re} \left[\Gamma(-5/6) / \Gamma(11/6) (D/2)^{5/3} + (8) + i^{-5/6} \Gamma(-11/6) M(-11/6, 1; -iD^2/4) \right],$$

остается нормированный разнос D .

Функция (8) имеет максимум при нулевом значении нормированного разнosa полушириной $\delta D = 0,7$ (рис. 2).

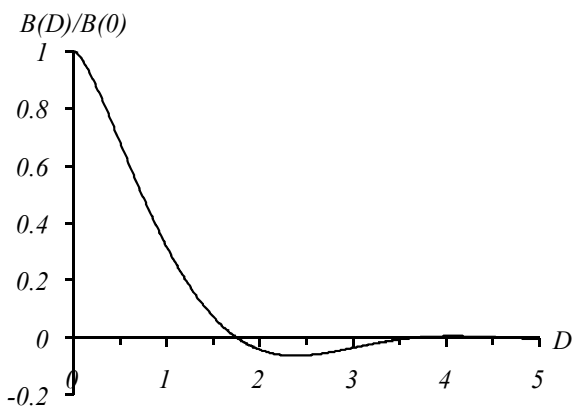


Рис. 2. Нормированная корреляционная функция при постоянных вдоль трассы структурной характеристике показателя преломления и скорости ветра

В рамках задачи измерения поперечного ветра у поверхности Земли, когда его вертикальная составляющая невелика, можно рассмотреть два варианта оценки скорости – при фиксированном пространственном разнose $\boldsymbol{\rho} = \rho_0 \mathbf{e}_0$ и при фиксированной временной задержке τ_0 . В последнем случае разнос $\boldsymbol{\rho}$ меняется вдоль горизонтальной оси \mathbf{e}_0 .

В первом случае поперечная горизонтальная компонента скорости ветра V_{\perp} определяется по времени

задержки τ_{\max} , соответствующей максимуму корреляционной функции (8), в виде

$$V_{\perp} = L\rho_0 / l\tau_{\max}. \tag{9}$$

Оценивая ошибку оценки интегральной скорости ветра по полуширине максимума, найдем

$$\frac{\delta V_{\perp}}{V_{\perp}} = \delta D \frac{l}{\rho_0 \sqrt{kL}}. \tag{10}$$

Таким образом, относительная ошибка оценки поперечного ветра не зависит от его величины и определяется количеством радиусов первой зоны Френеля, укладываемых в разнос ρ_0 (с учетом масштабирования изображения в плоскости регистрации).

Для второго варианта справедливо соотношение

$$V_{\perp} = \frac{L\rho_{\max}}{l\tau_0}, \tag{11}$$

где ρ_{\max} – пространственное смещение положения максимума корреляционной функции (8). При этом абсолютная ошибка также не зависит от величины поперечной компоненты скорости и определяется отношением радиуса первой зоны Френеля к временному разносу.

$$\delta V_{\perp} = \sqrt{\frac{L}{k}} \frac{\delta D}{\tau_0}. \tag{12}$$

Из соотношения (12) видно, что для трасс длиной до 1 км и подсветки в видимом диапазоне временной задержке τ_0 порядка 0,1 с будет соответствовать ошибка оценки скорости в несколько сантиметров в секунду. Это вполне приемлемо для практических целей.

Отметим, что вариант с фиксированной временной задержкой предпочтителен при слабом ветре, а при его усилении меньшую ошибку будет давать вариант с фиксированным пространственным разносом.

2. Численные исследования возможности определения интегрального поперечного ветра

Возможность оценки поперечного ветра из флуктуаций интенсивности в изображениях подсвечиваемых лазером объектов проверялась в серии численных экспериментов по замкнутой схеме. Для получения последовательности изображений диффузной мишени, подсвеченной лазером, был разработан и реализован в виде комплекса программ в среде LabView алгоритм моделирования, основанный на методе расщепления по физическим факторам [14–17]. Схема численного эксперимента соответствует геометрии, описанной в п.1 при выводе соотношений для корреляционной функции интенсивности (рис. 1). Моделирование атмосферных неоднородностей осуществлялось посредством возмущений распространяющейся волны равноотстоящими друг от друга случайными фазовыми экранами с Колмогоровским

спектром флуктуаций фазы [17, 18]. Поперечная составляющая скорости ветра $V(x)$ на трассе моделировалась поперечными смещениями положений фазовых экранов при переходе к следующему кадру на расстояние $V(x)\Delta t$, где $\Delta t = 1/f$, f – частота съемки.

Интенсивность в плоскости фотоприемника можно представить в форме интеграла по плоскости рассеивателя ($x=L$) [19]

$$I(l, \rho) = \frac{1}{\pi l^2} \int d\mathbf{r} |A(\mathbf{r})|^2 I_i(\mathbf{r}) I_t(\mathbf{r}, \rho), \quad (13)$$

где $I(\mathbf{r})$ – интенсивность первичного лазерного пучка, $I_t(\mathbf{r}, \rho)$ – интенсивность пучка, порождаемого точечным источником, находящимся в точке ρ плоскости регистрации ($x=-l$). Данное выражение можно интерпретировать как «опрос» различных участков освещенной области на рассеивающей поверхности с помощью «вторичного» пучка, «формируемого» приемным объективом (телескопического пучка [19]). Таким образом, алгоритм расчета интенсивности в одной точке плоскости регистрации должен быть следующим: моделируется распространение двух пучков в прямом направлении методом расщепления по физическим факторам, рассчитываются их интенсивности, перемножаются и суммируются по всей освещенной области. В отличие от работ [10, 11], где для моделирования телескопического пучка использовались приближенные соотношения, не учитывающие влияния атмосферной турбулентности, здесь этот алгоритм был реализован в полном объеме, т.е. для каждого пикселя изображения моделировалось распространение своего телескопического пучка под соответствующим углом к оптической оси приемного объектива через последовательность фазовых экранов, имитирующих турбулентность на атмосферной трассе.

Из полученных в ходе численного моделирования последовательностей изображений рассчитывалась корреляционная функция (8) в двух вариантах (при фиксированном пространственном или временном разnose), рассмотренных в предыдущем параграфе.

Было проведено численное моделирование прямого и обратного распространения оптического излучения на трассе длиной 500 м, имитирующей условия полигона БЭК ИОА СО РАН. Моделирование проводилось на сетке 512×512 узлов с шагом 1 мм, с частотой следования кадров $f = 100$ Гц, длина записи 0,5 с. Освещающий пучок – коллимированный, начальный радиус $a_1 = 10$ см, длина волны $\lambda = 0,5$ мкм. Радиус приемного объектива $a_2 = 2,5$ см, его фокусное расстояние $F_2 = 25$ см. Плоскость регистрации находилась позади фокальной плоскости на расстоянии $l - F_2 = 0,1$ мм, что соответствует фокусировке телескопического пучка на расстоянии 600 м. Небольшое отклонение от плоскости резкого изображения обеспечивает достаточно большое (5 шагов сетки) значение радиуса телескопического пучка в конце трассы и

позволяет провести его моделирование без масштабирования расчетной сетки. Рассеивающая поверхность принята неограниченной ($a_3 = \infty$). Изображение подсвеченной диффузной мишени рассчитывалось на сетке 20×20 пикс. с разрешением 5 мкм, что соответствует шагу 1 см на мишени. Турбулентность моделировалась несколькими (5–10) равномерно разнесенными по трассе фазовыми экранами, структурная характеристика флуктуаций показателя преломления $C_n^2 = 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$, что соответствует режиму слабой оптической турбулентности. Значения поперечных к трассе компонент скорости ветра задавались в диапазоне от $-1,5$ до $1,5$ м/с.

Корреляционные функции с хорошо выраженным максимумом формируются при разносах, не превосходящих 10–15 пикселей (или кадров). При этом положение их максимума хорошо соответствует интегральной скорости ветра. Результаты восстановления скорости ветра по корреляционным функциям для временных и пространственных разносов представлены на рис. 3. Расчет проведен для скорости ветра, линейно убывающей вдоль трассы от 1 м/с до 0,6 м/с. Интегральная скорость 0,8 м/с представлена на рисунке прямой линией.

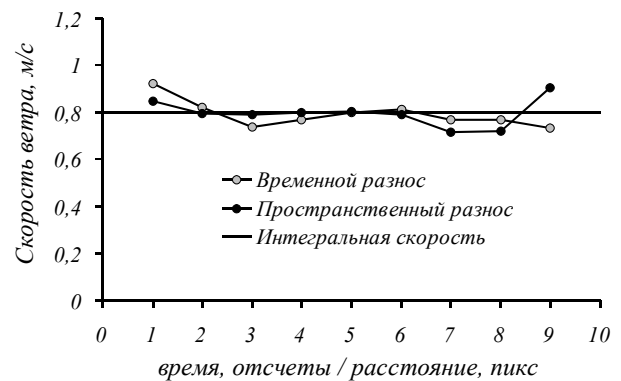


Рис. 3. Оценки интегральной скорости ветра в численном эксперименте при различных значениях временного либо пространственного разноса

Результаты расчетов показывают, что оба варианта алгоритма дают оценки интегральной скорости, отличающиеся от истинного значения не более чем на 10%.

3. Эксперимент

Экспериментальная проверка возможности оценки интегральной скорости поперечного ветра из статистики интенсивности в изображении подсвеченной мишени была проведена на полигоне БЭК ИОА СО РАН летом 2019 г. Схема эксперимента соответствует представленной на рис. 1. Измерения проводились на приземной трассе (высота над поверхностью 1–4 м) длиной $L = 184$ м. Диффузный рассеиватель (стена здания) подсвечивался лазерным пучком. Источником служил лазер GLM-10 (длина волны

$\lambda = 0,532$ мкм, мощность 0,5–10,5 Вт). Также проверялась работа алгоритма при ИК-подсветке. Для этого использовался лазер ИЛИ-1-50 (длина волны $\lambda = 1,06$ мкм, мощность – до 50 Вт).

Радиусы пучка в начале трассы и на мишени практически совпадали ($r = 5$ см), так что его можно рассматривать как коллимированный. Регистрация видеоизображений проводилась с частотой $f = 300$ Гц ($\Delta\tau = 3,33$ мс) видеокамерой Basler acA720-520um с интерфейсом USB3.0, матрица которой была расположена в плоскости резкого изображения объектива МТО-100 (фокусное расстояние 1 м). Размер одного элемента матрицы $\Delta\rho = 6,9$ мкм позволял оцифровать изображение мишени с шагом $\Delta r = 1,3$ мм. Независимое метеосопровождение осуществлялось с помощью линейки из 6 акустических анемометров, развернутой вдоль трассы с шагом 25 м.

Корреляционные функции (8) рассчитывались по сериям из $N = 90$ последовательных кадров, что соответствует интервалу измерений длительностью 0,3 с. Результаты расчетов для различных значений сдвига ρ_0 и временного разнеса t_0 представлены на рис. 4а, б. Промежутка длительностью 0,3 с достаточно для формирования корреляционной функции с хорошо выраженным максимумом, абсцисса которого смещается пропорционально пространственному (рис. 4а) или временному (рис. 4б) разнесу, что соответствует близким оценкам скорости ветра, практически не зависящим от величины разнеса.

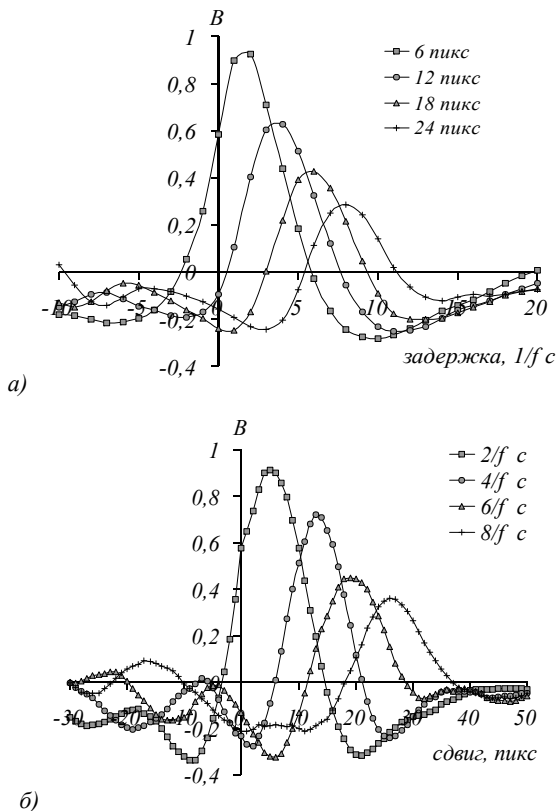


Рис. 4. Корреляционные функции (8) для фиксированного пространственного а) и временного б) разнесов

Отметим, что форма кривых близка к теоретической (см. рис. 2), полуширина главного максимума также близка к теоретическим оценкам, как в случае фиксированного временного

$$\delta\rho = \frac{l\delta D}{\sqrt{kL}} = 6,9\Delta\rho, \tag{14}$$

так и пространственного разнеса

$$\delta\tau = \frac{\delta D}{V_{\perp}} \sqrt{\frac{L}{k}} = 2,6\Delta\tau. \tag{15}$$

Полученные из соотношений (9, 11) оценки скорости ветра были сопоставлены с данными, полученными с помощью линейки из 6 акустических анемометров, расположенных вдоль трассы. Расстояние между соседними анемометрами составляло 25 м. На рис. 5 приведено сравнение оценки интегральной скорости ветра оптическим методом с интервалом усреднения 2 с и показаний анемометров, усредненных по всей линейке при подсветке в видимом (рис. 5а) и инфракрасном (рис. 5б) диапазоне.

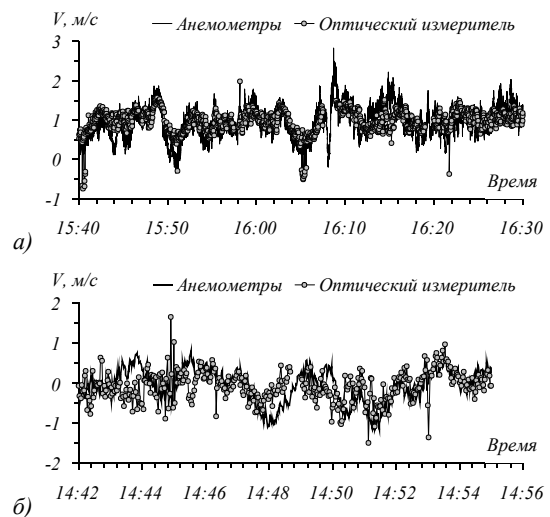


Рис. 5. Оценка интегрального ветра оптическим и акустическим методом при подсветке в видимом а) и в инфракрасном б) диапазоне

Прослеживается хорошее совпадение как по среднему значению, так и по динамике флуктуаций с временными масштабами от 10 с. Количественно степень совпадения можно характеризовать среднеквадратическим отклонением разности оптических и акустических оценок. При подсветке в видимом диапазоне СКО составляет 0,35 м/с, а в инфракрасном – 0,44 м/с. Незначительное увеличение ошибки возможно объясняется повышением относительного уровня шумов на краю полосы чувствительности матриц используемых видеокамер.

Заключение

Разработан и протестирован в численном и натурном экспериментах алгоритм оценки интегральной

скорости ветра на основе корреляционного анализа последовательности изображений подсвеченной лазером однородной диффузной мишени. Алгоритм основан на построении пространственно-временной корреляционной функции флуктуаций интенсивности излучения, рассеянного на мишени.

Метод работоспособен в темное время суток, при подсветке как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне и в отличие, например, от пассивного метода [2] не требует наличия двух приемных объективов.

Использование усреднения корреляционной функции по плоскости изображения позволяет значительно (в 10–20 раз) сократить время, необходимое для ее формирования по сравнению с аналогичной процедурой, используемой при оценке ветра по корреляции дрожания энергетических центров тяжести выделенных участков изображений. Экспериментальная проверка алгоритма показала, что при регистрации видеоизображений с частотой 300 к/с для формирования корреляционных функций с выраженным максимумом и оценки поперечной скорости ветра достаточно интервала наблюдения в несколько десятых секунды. Таким образом, частота оптических измерений ветра на основе предложенного алгоритма может достигать нескольких Гц.

Полученные в эксперименте оптические оценки интегральной вдоль трассы поперечной компоненты скорости ветра согласуются с результатами независимых акустических измерений.

Благодарности

Работа выполнена по госзаданию ИОА СО РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в части организации и проведения экспериментальных работ и частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Томской области (проект № 18-42-700005 р_а) в части выполнения аналитических и численных расчетов и анализа результатов.

References

- [1] Porat O, Shapira J. Crosswind sensing from optical-turbulence-induced fluctuations measured by a video camera. *Appl Opt* 2010; 49(28): 5236-5244. DOI: 10.1364/AO.49.005236.
- [2] Afanasiev AL, Banakh VA, Rostov AP. Estimation of the integral wind velocity and turbulence in the atmosphere from distortions of optical images of naturally illuminated objects. *Atmos Ocean Opt* 2016; 29(5): 422-430. DOI: 10.1134/S102485601605002X.
- [3] Clifford SF, Ochs GR, Wang T-I. Optical wind sensing by observing the scintillations of a random scene. *Appl Opt* 1975; 14(12): 2844-2850. DOI: 10.1364/AO.14.002844.

- [4] Walters DL. Passive remote crosswind sensor. *Appl Opt* 1977; 16(10): 2625-2626. DOI: 10.1364/AO.16.002625.
- [5] Dudorov VV, Eremina AS. Retrieval of crosswind velocity based on the analysis of remote object images: Part 2 – Drift of turbulent volume. *Atmospheric Ocean Opt* 2017; 30(6): 596-603. DOI: 10.1134/S1024856017060069.
- [6] Afanas'ev AL, Dudorov VV, Mikhailov YuT, Nasonova AS, Rostov AP, Shestakov ShO. Retrieval of crosswind velocity based on the analysis of remote object images: Part 3 – Experimental test. *Atmospheric Ocean Opt* 2020; 33(6): 690-695. DOI: 10.1134/S1024856020060020.
- [7] Antoshkin LV, Lavrinov VV, Lavrinova LN, Lukin VP. Differential method for wavefront sensor measurements of turbulence parameters and wind velocity. *Atmospheric Ocean Opt* 2008; 21(01): 64-68.
- [8] Antoshkin LV, Lavrinov VV, Lavrinova LN, Lukin VP. Measurement of crossing wind transfer of atmospheric turbulence by Shack-Hartmann sensor. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)* 2009; 17(12): 129-133.
- [9] Avila R, Valdes-Hernandez O, Sanchez LJ, Cruz-Gonzalez I, Aviles JL, Tapia-Rodriguez JJ, Zuniga CA Simultaneous generalized and low-layer SCIDAR turbulence profiles at San Pedro Martir observatory. *Mon Notices Royal Astron Soc* 2019; 490(1): 1397-1405. DOI: 10.1093/mnras/stz2672.
- [10] Banakh VA, Marakasov DA, Vorontsov MA. Cross-wind profiling based on the scattered wave scintillations in a telescope focus. *Appl Opt* 2007; 46(33): 8104-8117. DOI: 10.1364/AO.46.008104.
- [11] Banakh VA, Marakasov DA. Reconstruction of the wind velocity profile by the intensity fluctuations of a scattered wave in a receiving telescope. *Quantum Electron* 2008; 38(9): 889-894. DOI: 10.1070/QE2008v038n09ABEH013706.
- [12] Tatarskii VI. The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations; 1971.
- [13] Abramovitz M, Stigun IA, eds. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables: reference book. Washington DC: National Bureau of Standards; 1964.
- [14] Coles WA, Filice JP, Frehlich RG, Yadlowsky M. Simulation of wave propagation in three-dimensional random media. *Appl Opt* 1995; 34(12): 2089-2101. DOI: 10.1364/AO.34.002089.
- [15] Fleck JA Jr, Morris JR, Feit MD. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere. *Appl Phys* 1976; 10(2): 129-160. DOI: 10.1007/BF00882638.
- [16] Martin JM, Flatte SM. Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random media. *Appl Opt* 1988; 27(11): 2111-2126. DOI: 10.1364/AO.27.002111.
- [17] Kandidov VP. Monte Carlo method in nonlinear statistical optics. *Physics-Uspekhi* 1996; 39(12): 1243-1272. DOI: 10.1070/ps1996v039n12abeh000185.
- [18] Banakh VA, Falits AV. Turbulent statistics of laser beam intensity on ground-to-satellite optical link. *Proc SPIE* 2001; 4678: 132-143. DOI: 10.1117/12.458432.
- [19] Banakh VA. Image simulation of a laser-illuminated scattering layer in turbulent atmosphere. *Atmospheric Ocean Opt* 2007; 20(04): 271-274.

Сведения об авторах

Маракасов Дмитрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института оптики атмосферы СО РАН. Область научных интересов: изучение атмосферных турбулентных

движений естественного и антропогенного происхождения на основе пространственно-временной статистики интенсивности просвечивающего оптического излучения. E-mail: mda@iao.ru.

Афанасьев Алексей Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института оптики атмосферы СО РАН. Область научных интересов: разработка и развитие дистанционных оптических методов измерения ветровых и турбулентных параметров атмосферы, основанных на анализе пространственно-временной структуры поля флуктуаций оптического излучения. E-mail: afanasiev@iao.ru.

Банах Виктор Арсентьевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института оптики атмосферы СО РАН. Область научных интересов: исследование турбулентных флуктуаций лазерных полей в атмосфере, разработка методов дистанционного зондирования и изучение турбулентности пограничного слоя атмосферы. E-mail: banakh@iao.ru.

Ростов Андрей Петрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института оптики атмосферы СО РАН. Область научных интересов: экспериментальные исследования распространения волн в турбулентной атмосфере, автоматизация эксперимента, аппаратура обработки данных, разработка и создание средств автоматизации научных приборов. E-mail: rostov@iao.ru.

Кусков Василий Вадимович, инженер Института оптики атмосферы СО РАН. Область научных интересов: исследование способов повышения эффективности транспортировки лазерной энергии в атмосфере на основе адаптивных оптических систем и систем формирования лазерных пучков с сингулярным начальным волновым фронтом. E-mail: yvk@iao.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 10 августа 2021 г. Окончательный вариант – 6 октября 2021 г.

Estimation of the cross-wind speed from turbulent fluctuations of the image of a diffuse target illuminated by a laser beam

D.A. Marakasov¹, A.L. Afanasiev¹, V.A. Banakh¹, A.P. Rostov¹, V.V. Kuskov¹

¹ V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS,
634055, Tomsk, Russia, Academician Zuev Square 1

Abstract

The article presents an optical method for assessing the transverse wind, based on the analysis of turbulent distortions of the image of a diffuse target illuminated by a laser beam. The proposed correlation algorithm for processing video images allows one to assess in real time the crosswind speed using one receiving lens when the target is illuminated in the visible or infrared range. An experimental check of the method on the atmospheric path has been carried out. The optical estimates of the integral wind are compared with the data of independent local measurements of six ultrasonic anemometers located along the sensing path.

Keywords: optical remote sensing technologies, wind speed, turbulence, image processing.

Citation: Marakasov DA, Afanasiev AL, Banakh VA, Rostov AP, Kuskov VV. Estimation of the cross-wind speed from turbulent fluctuations of the image of a diffuse target illuminated by a laser beam. *Computer Optics* 2022; 46(2): 232-238. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1025.

Acknowledgements: In this work, the analytical and numerical studies were funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences). Organization and implementation of the experimental measurements was funded by the Russian Foundation for Basic Research and Tomsk region authorities (project No. 18-42-700005 r_a).

Authors' information

Dmitriy Anatolievich Marakasov, (b. 1975) Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Currently he works as leader staff scientist at V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch. Research interests: study of atmospheric turbulent motions of natural and anthropogenic origin on the basis of spatio-temporal statistics of the intensity of transilluminating optical radiation. E-mail: mda@iao.ru.

Alexey Leonidovich Afanasiev, (b. 1959) Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Currently he works as senior staff scientist at V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch. Research interests: development of remote optical methods for measuring wind and turbulent parameters of the atmosphere, based on the analysis of the spatio-temporal structure of the field of fluctuations of optical radiation. E-mail: afanasiev@iao.ru.

Viktor Arsentievich Banakh, (b. 1947) Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Currently he works as main staff scientist at V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch. Research interests: study of turbulent fluctuations of laser fields in the atmosphere, development of remote sensing methods and study of turbulence in the atmospheric boundary layer. E-mail: banakh@iao.ru.

Andrey Petrovich Rostov, (b. 1950) Candidate of Technical Sciences. Currently he works as leader staff scientist at V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch. Research interests: experimental study of wave propagation in the turbulent atmosphere, experiment automation, apparatus for data processing, development and building the automation scientific devices. E-mail: rostov@iao.ru.

Vasily Vadimovich Kuskov, (b. 1990) graduated from Tomsk State University in 2021. Currently he works as engineer at V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch. Research interests: investigation of ways to increase the efficiency of laser energy transportation in the atmosphere based on adaptive optical systems and systems for the formation of laser beams with a singular initial wavefront. E-mail: vyk@iao.ru.

Received August 10, 2021. The final version – October 6, 2021.
