

ОПТИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 535.3; 535.8

Определение поперечной составляющей скорости ветра на основе анализа видеоряда изображений удаленных объектов. Часть 1. Смещение тонкого слоя турбулентных неоднородностей

В.В. Дудоров, А.С. Еремина*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 12.12.2016 г.

Методом численного моделирования исследуются возможности определения поперечной составляющей скорости ветра на трассе наблюдения за удаленным объектом на основе анализа турбулентных искажений в его изображениях. Рассмотрено искажающее влияние ограниченных участков турбулентной атмосферы, расположенных на трассе наблюдения, на изображение удаленного объекта; исследованы возможности определения скорости смещения данных участков на основе анализа вносимых ими искажений. Показано, что для случая смещения тонкого слоя турбулентных неоднородностей предлагаемый подход позволяет определять скорость смещения с высокой точностью.

Ключевые слова: скорость ветра, турбулентная атмосфера, некогерентное изображение; wind, turbulent atmosphere, incoherent image.

Введение

Методам дистанционного измерения скорости ветра посвящено множество научных публикаций. Для ряда прикладных задач, как, например, повышение безопасности взлета и посадки летательных аппаратов, корректировка линии прицеливания и др., важно определять составляющую вектора скорости ветра, поперечную к направлению наблюдения. Основной отличительной особенностью методов дистанционного определения поперечного ветра является анализ рефракционных (турбулентных) искажений оптических полей, прошедших через анализируемый участок атмосферы [1–16]. При этом различное влияние участков атмосферы, расположенных на разном расстоянии от наблюдателя, позволяет разрабатывать методы определения профиля скорости ветра. Среди них можно выделить активные (при прохождении лазерного пучка через наблюдаемый участок атмосферы) [1–8] и пассивные (при анализе искажений естественного излучения) [9–16] методы. Преимуществом пассивных методов является отсутствие собственных источников излучения, что позволяет не только упростить и удешевить устройство измерения, но и расширить область применения бесконтактных измерителей ветра на ситуации, когда невозможно разместить передатчик/приемник излучения на одном из концов анализируемого участка атмосферы.

Подходы к определению скорости ветра пассивными методами наблюдения можно разделить на два типа. Один из них основан на построении функции корреляции дрожания различных элементов объекта в его изображении либо одних и тех же элементов в различных (сформированных двумя приемными системами) изображениях [10]. Другой подход основан на анализе анизопланарных турбулентных искажений в изображениях неоднородных объектов, сформированных камерами с широким полем зрения [9]. Очевидным преимуществом второго подхода является высокое быстродействие в связи с отсутствием необходимости накапливать ряды наблюдений для построения корреляционных функций.

Настоящая работа посвящена оценке возможностей метода определения скорости поперечного ветра на основе анализа видеоряда некогерентных изображений, сформированных единственным телескопом [11–13, 16]. Алгоритм основан на решении двух основных задач. Во-первых, это определение связи между характером искажений в изображении объекта и местоположением атмосферных неоднородностей между объектом и наблюдателем. Во-вторых, это фильтрация искажений в изображении, которая позволяет различать искажения, вносимые турбулентными неоднородностями, располагающимися на различных расстояниях от наблюдателя, независимо от структуры наблюдаемого объекта. Исследование выполнено на основе метода численного моделирования, допускающего управление параметрами как наблюдаемого объекта, так и среды распространения.

* Вадим Витальевич Дудоров (dvv@iao.ru); Анна Сергеевна Еремина (an.s.eremina@gmail.com).

1. Модель формирования изображения

Распространение рассеянного наблюдаемым объектом излучения через турбулентную среду из плоскости объекта $z = z_{obj}$ в плоскость наблюдателя $z = 0$ моделировалось на основе решения уравнения для функции яркости B [17]:

$$-\frac{\partial B(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{r}, z, t)}{\partial z} + \boldsymbol{\theta} \nabla_{\mathbf{r}} B(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{r}, z, t) + \nabla_{\mathbf{r}} n(\mathbf{r}, z, t) \nabla_{\boldsymbol{\theta}} B(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{r}, z, t) = 0, \quad (1)$$

где z – координата вдоль оси приемной оптической системы; $\mathbf{r} = \{x, y\}$ – радиус-вектор в плоскости, перпендикулярной оптической оси; $\boldsymbol{\theta} = \{\theta_x, \theta_y\}$ – угловая координата; k – волновое число; t – время; n – возмущение показателя преломления среды. Граничные условия для уравнения (1), соответствующие объекту с ламбертовской поверхностью, имеют вид [17, 18]:

$$B(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{r}, z = z_{obj}, t) = cT(\mathbf{r})I(\mathbf{r}, z = z_{obj}, t). \quad (2)$$

Здесь T – коэффициент отражения поверхности объекта; I – интенсивность подсвечивающего объект некогерентного излучения (солнечного света); $c = 1/2\pi$. Кроме того, полагаем, что объект освещен равномерно, т.е. $I(\mathbf{r}, z = z_{obj}, t) = I_0$ (I_0 – некоторая константа, несущественная для данных исследований в связи с пренебрежением шумами в приемной системе и представлением результатов в относительных единицах измерения).

Уравнение (1) решалось методом характеристик, при котором оно трансформируется в систему обыкновенных дифференциальных уравнений [17]:

$$\frac{d\mathbf{r}(z, t)}{dz} = \boldsymbol{\theta}(z, t), \quad \frac{d\boldsymbol{\theta}(z, t)}{dz} = -\nabla_{\mathbf{r}} n(\mathbf{r}, z, t), \quad (3)$$

описывающих траектории, вдоль которых сохраняется функция яркости.

Турбулентная среда моделировалась методом фазовых экранов со спектром флуктуаций показателя преломления фон Кармана следующего вида:

$$\Phi_n(\boldsymbol{\kappa}) = 0,033C_n^2(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{-11/6} e^{-\kappa^2/\kappa_m^2}, \quad (4)$$

где $\kappa_m = 5,92/l_0$, $\kappa_0 = 2\pi/L_0$, l_0 – внутренний, L_0 – внешний масштабы турбулентности. Структурная характеристика показателя преломления C_n^2 предполагалась постоянной на всей трассе наблюдения. Для повышения эффективности расчетных алгоритмов при решении лучевых уравнений (3) использовалась не сама фаза $S(\mathbf{r}, z, t) = kn(\mathbf{r}, z, t)\Delta z$ (Δz – шаг расчетной сетки по эволюционной переменной z), а ее градиенты по поперечным координатам $\nabla_{\mathbf{r}} S(\mathbf{r}, z, t) = k\Delta z \nabla_{\mathbf{r}} n(\mathbf{r}, z, t)$ [11–13]. Кроме того, с целью учета динамики турбулентных неоднородностей во время переноса воздушных масс ветром использовался алгоритм моделирования фазовых экранов с учетом временных флуктуаций

показателя преломления среды [19, 20]. В данном случае стандартный подход моделирования турбулентных экранов (градиентов фазы) на основе гипотезы Тейлора модифицируется к виду

$$\nabla_{\mathbf{r}} S(\mathbf{r}, t + \Delta t) = FT \left\{ \boldsymbol{\kappa} \sqrt{\Phi_S(\boldsymbol{\kappa})} f(t + \Delta t, \boldsymbol{\kappa}) \exp[i\boldsymbol{\kappa} \mathbf{V} \Delta t] \right\}, \quad (5)$$

где FT – Фурье-преобразование; отсутствие зависимости от z означает использование стандартного подхода статистической независимости фазовых экранов вдоль трассы наблюдения; $\Phi_S(\boldsymbol{\kappa}) = 2\pi k^2 dz \Phi_n(\boldsymbol{\kappa})$ – спектр флуктуаций фазы; $\mathbf{V} = \{V_x, V_y\}$ – вектор поперечной скорости ветра, а изменение комплексной функции f во времени задается следующим рекуррентным выражением [19, 20]:

$$f(t + \Delta t, \boldsymbol{\kappa}) = pf(t, \boldsymbol{\kappa}) + \sqrt{1 - p^2} \exp[i\tilde{\varphi}(t, \boldsymbol{\kappa})]. \quad (6)$$

Здесь $p = \exp(-\Delta t/\tau)$, Δt – шаг дискретизации задачи по времени, τ – параметр, характеризующий скорость эволюции экрана (скорость флуктуаций показателя преломления среды); $\tilde{\varphi}(t, \boldsymbol{\kappa})$ – случайный дельта-коррелированный во времени (по t) и в пространстве спектральных амплитуд (по $\boldsymbol{\kappa}$) фазовый множитель, равномерно распределенный в интервале $[0, 2\pi]$. Начальное выражение для функции f выбирается в виде

$$f(t = 0, \boldsymbol{\kappa}) = \exp[i\tilde{\varphi}(t = 0, \boldsymbol{\kappa})]. \quad (7)$$

Моделирование некогерентного изображения объекта выполнено с использованием гауссовой аппроксимации апертурной функции пропускания приемного телескопа радиуса a_t [21, 22]:

$$W(\mathbf{r}) = e^{-\frac{r^2}{2a_t^2}}. \quad (8)$$

В данном случае распределение интенсивности поля в плоскости изображения $z = z_{im}$ имеет вид

$$I(\mathbf{r}, z = z_{im}, t) = \frac{2k^2 a_t^2}{z_{im}^2} \int_{-\infty}^{\infty} d\mathbf{R}' e^{-\frac{R'^2}{a_t^2}} \int_{-\infty}^{\infty} d\boldsymbol{\kappa} e^{-\kappa^2 a_t^2} B(\mathbf{R}', \boldsymbol{\kappa}, \mathbf{r} - \boldsymbol{\kappa}, z = 0, t), \quad (9)$$

где $1/F_t = 1/z_{im} + 1/z_{obj}$, F_t – фокусное расстояние линзы приемного телескопа; $\boldsymbol{\kappa}_{\mathbf{r}} = k \left(\frac{\mathbf{R}'}{z_{obj}} + \frac{\mathbf{r}}{z_{im}} \right)$.

С целью минимизации ошибок определения скорости ветра, связанных со структурой наблюдаемого объекта, в данной работе использовался тестовый объект с шероховатой (ламбертовской) поверхностью и периодическим изменением коэффициента отражения:

$$T(\mathbf{r}) = \exp\{-[1 + \sin(x/b)]^{10}\} \quad (10)$$

(параметр b определяет ширину периодических полос наблюдаемого объекта). На рис. 1 представлено

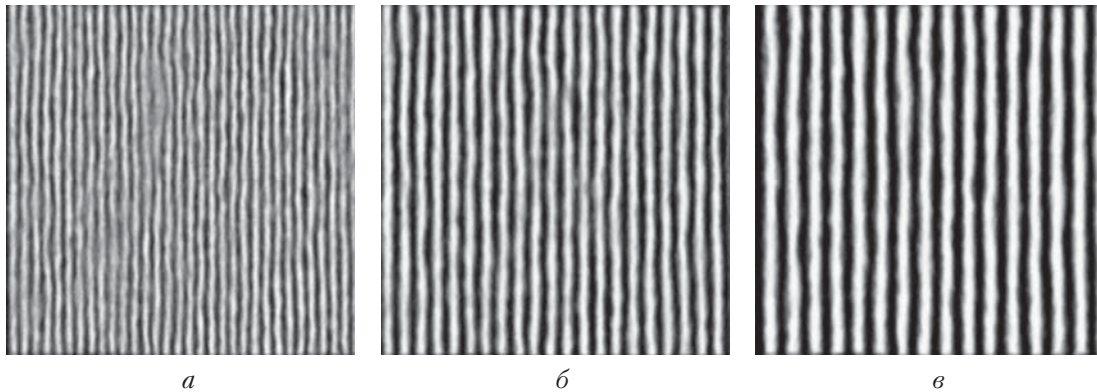


Рис. 1. Изображение объекта типа (10) при $b = 0,2a_t$ (а), $0,3a_t$ (б), $0,4a_t$ (в). Дистанция наблюдения $z_{obj} = 0,1ka_t^2$ разбивалась на $N_z = 10$ интервалов; поперечный размер объекта и фазовых экранов $R_{obj} = 40a_t$; число узлов расчетной сетки $N_R = 512$; параметр степени турбулентности $2a_t/r_0 = 4$, $r_0 = (0,423k^2C_n^2z_{obj})^{-3/5}$ – параметр Фрида

изображение данного объекта, искаженного турбулентными неоднородностями, для различных значений параметра b . Отметим, что выбранный тип объекта можно рассматривать как упрощенную модель естественного растительного покрова типа леса или травы.

2. Метод определения скорости смещения тонкого слоя турбулентных неоднородностей

Для определения профиля скорости поперечного ветра на основе анализа турбулентных искажений в изображении наблюдаемого объекта прежде всего необходимо определить связь между характером искажений в изображении и местоположением атмосферных неоднородностей на трассе между объектом и наблюдателем. Численное моделирование позволяет рассмотреть влияние слоя турбулентных неоднородностей на любом выделенном участке трассы наблюдения в предположении, что на остальных

участках распространение рассеянного объектом излучения происходит в свободном пространстве.

На рис. 2 показана схема формирования некогерентного изображения объекта при наличии единственного тонкого слоя турбулентных неоднородностей (фазового экрана), расположенного на различном расстоянии z_{ts} от наблюдателя, а также изображения объекта в этом случае. Видно, что турбулентные неоднородности, расположенные ближе к наблюдателю, вызывают крупномасштабные искажения, а при смещении фазового экрана от наблюдателя к объекту характерный размер искажений существенно уменьшается.

Очевидно, что при наличии ветра турбулентные неоднородности будут смещаться вместе с переносимыми ветром воздушными массами, вызывая смещение искажений в изображении наблюдаемого объекта [9, 12]. Следовательно, анализ динамики искажений в видеоряде изображений позволяет определить поперечную составляющую скорости ветра (скорости смещения турбулентных неоднородностей воздуха).

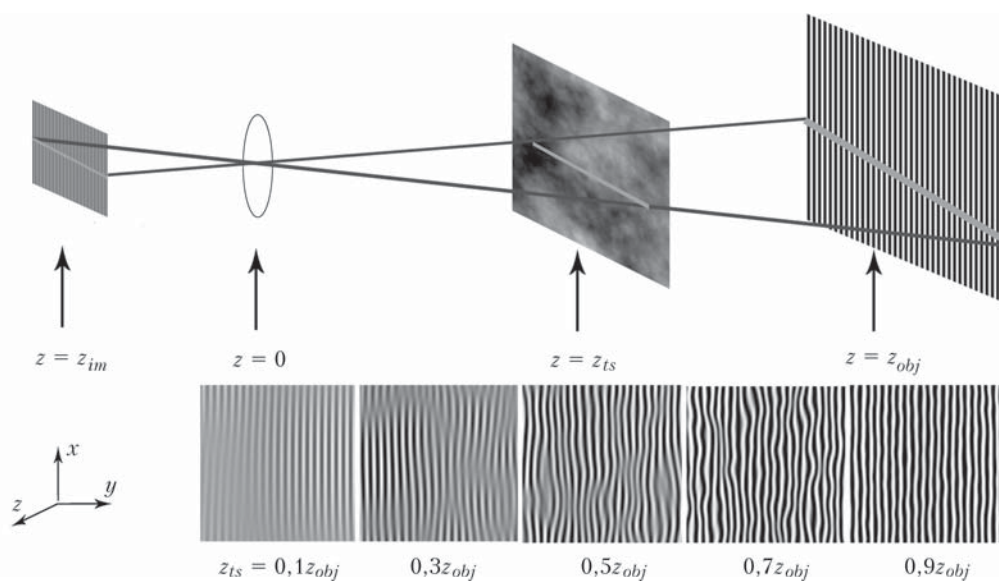


Рис. 2. Влияние местоположения экрана турбулентности на характер искажений. Расчетные параметры аналогичны представленным на рис. 1. Для единственного фазового экрана, расположенного в плоскости z_{ts} , $2a_t/r_0 = 10$

2.1. Определение скорости смещения искажений в изображении

Суть метода определения поперечной скорости смещения турбулентных неоднородностей воздуха заключается в нахождении скорости смещения искажений в изображении наблюдаемого объекта на основе корреляции двух (или более) кадров изображения. При этом чтобы отфильтровать информацию о структуре наблюдаемого объекта, необходимо определить так называемую карту качества изображения, содержащую информацию лишь об атмосферных искажениях [11–13]. Мы предлагаем использовать следующее выражение для вычисления карты качества изображения:

$$Q(\mathbf{r}, a_k, t) = \left| \nabla_{\mathbf{r}} I(\mathbf{r}, t) \right|^2 \otimes K(\mathbf{r}, a_k), \quad (11)$$

где $\nabla_{\mathbf{r}} = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y}$ – вектор-градиент; $\left| \nabla_{\mathbf{r}} I(\mathbf{r}, t) \right|^2$ – функционал резкости изображения; a_k – коэффициент сглаживания; $K(\mathbf{r}, a_k)$ – сглаживающая функция, которая в нашем случае задается следующим образом:

$$K(\mathbf{r}, a_k) = \frac{1}{\pi a_k^2} \exp(-r^2/a_k^2). \quad (12)$$

Стоит отметить, что при отсутствии турбулентных искажений карта качества изображения (11) будет определяться структурой наблюдаемого объекта. Однако, как показали результаты численного моделирования для объектов типа (10), пространственный спектр которых характеризуется выраженной частотой $\omega = 2\pi/b$, при достаточно слабых турбулентных искажениях и выборе коэффициента сглаживания $a_k > \pi b(z_{im}/z_{obj})$ карта качества изображения позволяет отфильтровать структуру объекта, сохранив информацию об атмосферных искажениях.

На рис. 3 представлена карта качества изображения наблюдаемого объекта для различных значений коэффициента сглаживания. Видно, что, изменяя

параметр a_k , можно управлять характерным размером искажений при анализе их динамики в видеоряде изображений наблюдаемого объекта. Результаты моделирования показали, что при слабой турбулентности, когда турбулентные искажения становятся соизмеримыми с дифракционными, амплитуда изменения значений карты качества изображения $A_Q = \max(Q(\mathbf{r})) - \min(Q(\mathbf{r}))$, при условии фильтрации структуры объекта $a_k > \pi b(z_{im}/z_{obj})$, стремится к нулю. Это свидетельствует о проблематичности анализа турбулентных искажений при значениях $2a_t/r_0 < 2$. Влияние параметра $2a_t/r_0$ на ошибку восстановления скорости ветра будет рассмотрено в части 2 нашей работы. Здесь же ограничимся рассмотрением общих принципов определения скорости смещения турбулентных неоднородностей на основе анализа динамики вносимых ими искажений.

В случае наличия единственного турбулентного слоя на трассе наблюдения поперечную скорость смещения атмосферных неоднородностей $\mathbf{V} = \{V_x, V_y\}$ можно вычислить по формуле

$$\mathbf{V}(t) = \frac{\Delta \mathbf{r}(t)}{\Delta t} \frac{z_{ts}}{z_{obj}}, \quad (13)$$

где z_{ts} – расстояние от наблюдателя до слоя неоднородностей (фазового экрана в модельном эксперименте) (см. рис. 2), а смещение искажений на двух соседних кадрах видеоряда изображений рассчитывается на основе выражений

$$\Delta \mathbf{r}(t) = \arg \max [R(\mathbf{r}, t)]; \quad (14)$$

$$R(\mathbf{r}, a_k, t) = \int d\mathbf{r}' Q(\mathbf{r}, a_k, t) Q(\mathbf{r} + \mathbf{r}', a_k, t + \Delta t). \quad (15)$$

Здесь функция $R(\mathbf{r}, a_k, t)$ есть коэффициент корреляции карт качества двух соседних кадров изображения в видеоряде в моменты времени t и $t + \Delta t$, Δt – время между кадрами.

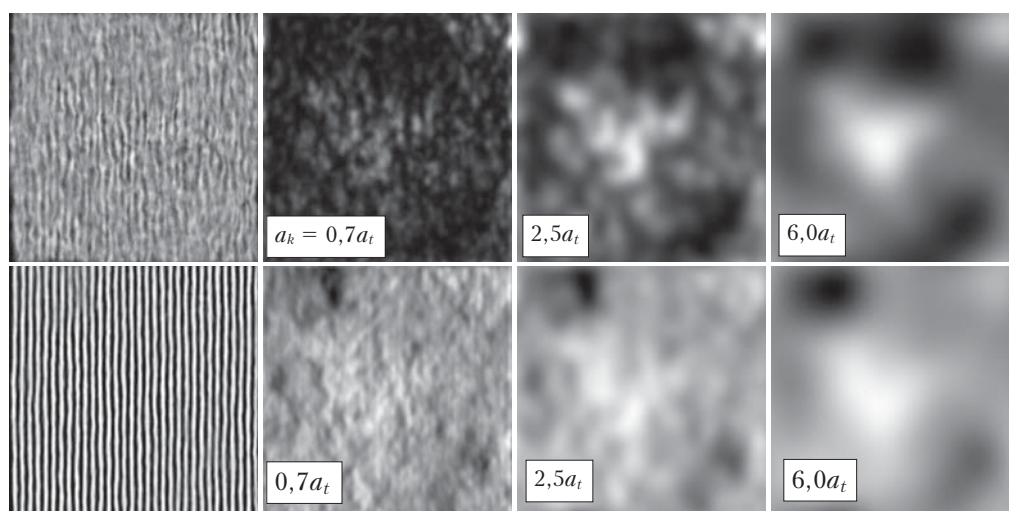


Рис. 3. Изображение объекта и его карта качества в турбулентной среде при различном параметре сглаживания a_k . Расстояние до объекта $z_{obj} = 0,1ka_t^2$; $b = 0,2a_t$; $N_z = 5$; $R_{obj} = 40a_t$; $N_R = 512$; отношение диаметра приемной апертуры к параметру Фрида $2a_t/r_0 = 16$ (вверху), 4 (внизу). Шкала яркости для всех случаев соответствует диапазону от минимального до максимального значения

2.2. Выбор параметров для построения карты качества изображения

Как отмечалось выше (см. рис. 2), местоположение слоя турбулентных неоднородностей $z = z_{ts}$ существенным образом влияет на характерный масштаб и интенсивность искажений в изображении наблюдаемого объекта [11–13]. В связи с этим можно предположить, что ширина сглаживающей функции (параметр a_k), используемой при построении карты качества изображения, должна влиять на точность определения скорости смещения турбулентных неоднородностей на трассе наблюдения.

На рис. 4 представлены характерные зависимости восстановленной скорости смещения V единственного фазового экрана, расположенного в плоскости $z = z_{ts}$, и амплитуды изменения значений карт качества изображения A_Q от ширины сглаживающей функции a_k .

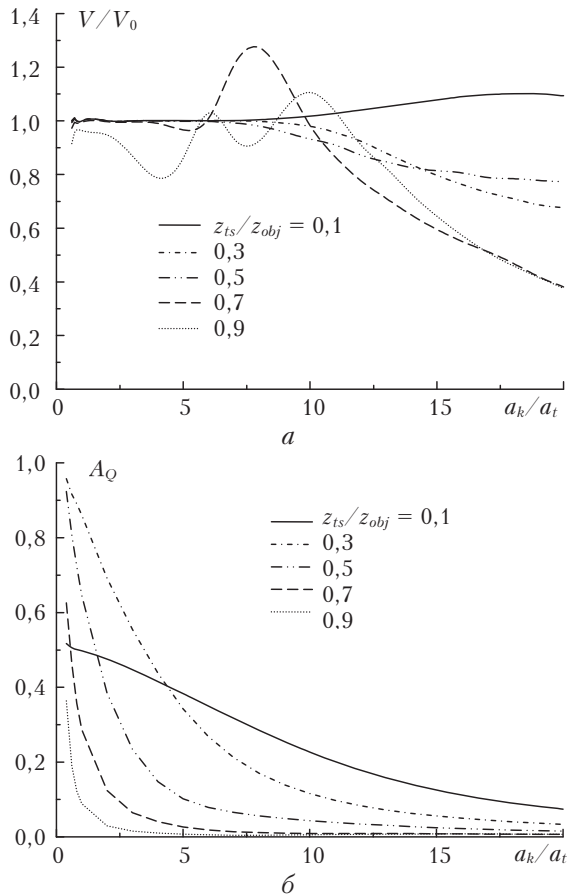


Рис. 4. Зависимость рассчитанной на основе выражений (13)–(15) скорости смещения неоднородностей V , нормированной на скорость смещения фазового экрана $V_0(a)$, а также амплитуды изменения значений карты качества изображения A_Q от параметра сглаживания a_k (б). Усреднение выполнено по $N_{turb} = 100$ реализациям случайных фазовых экранов; $z_{obj} = 0,1ka_t^2$; $b = 0,1a_t$; $R_{obj} = 40a_t$; $N_R = 512$; $2a_t/r_0 = 2$; $\mathbf{V}_0 = \{V_0, 0\}$, $V_0 = R_{obj}/(N_R \Delta t)$

Видно, что ошибка восстановления скорости смещения фазового экрана минимальна для значений a_k , близких к $a_k^{min} = \pi b(z_{im}/z_{obj})$, позволяющих

отфильтровать только структуру объекта в его изображении, и растет с ростом a_k . Существенное увеличение ошибки происходит, когда a_k превосходит некоторое значение a_k^{max} : амплитуда изменения значений карты качества изображения $A_Q(a_k^{max})$ уменьшается в два раза по сравнению с $A_Q(a_k^{min})$, т.е.

$$a_k^{max} = \arg[A_Q(a_k) = 0,5A_Q(a_k^{min})].$$

Для $a_k < a_k^{max}$ среднеквадратичное отклонение отношения V/V_0 лежит в пределах 0,01–0,1 и, соответственно, относительная ошибка восстановления скорости смещения единственного экрана

$$\sigma = \frac{\sqrt{\langle |V - V_0|^2 \rangle_{turb}}}{V_0}$$

составляет менее 10%.

Для каждого местоположения фазового экрана существует свое максимальное значение параметра сглаживания, которое хорошо аппроксимируется функцией вида

$$a_k^{max} = \frac{A}{z_{ts}/z_{obj}}, \quad (16)$$

где размерный параметр A , являющийся функцией атмосферных условий и приемной системы, может быть получен на основе численных экспериментов (для результатов, представленных на рис. 4, $A = a_t$).

Таким образом, если на трассе наблюдения присутствует единственный слой выраженной турбулентности, то скорость его смещения с высокой точностью можно определить на основе выражений (13)–(15) с учетом выбора параметра сглаживающей функции (16).

2.3. Влияние искажений, вызываемых турбулентными неоднородностями на различных участках наблюдаемой трассы, на точность определения скорости смещения тонкого слоя турбулентных неоднородностей

В реальных атмосферных условиях на окологоризонтальных трассах турбулентные неоднородности распределены по всей трассе наблюдения. Очевидно, что при наличии нескольких фазовых экранов карта качества изображения (11) будет содержать информацию о всех искажениях. При этом в случае несовпадения угловой скорости смещения разных фазовых экранов максимальное значение коэффициента корреляции (14) будет определяться главным образом скоростью смещения того экрана, который будет вносить искажения в карту качества изображения наибольшей амплитуды A_Q .

С целью определения взаимного влияния разных участков турбулентной атмосферы на точность измерения скорости ветра на данных участках рассмотрим, как точность определения скорости смещения одного слоя турбулентных неоднородностей (фазового экрана) зависит от наличия другого неподвижного слоя. На рис. 5 представлена зависимость восстановленной скорости смещения тонкого

слоя турбулентных неоднородностей от местоположения данного слоя z_{ts} , когда неподвижный слой неоднородностей (фазовый экран) располагался строго посередине между приемной оптической системой и наблюдаемым объектом, а также ближе и дальше от наблюдателя.

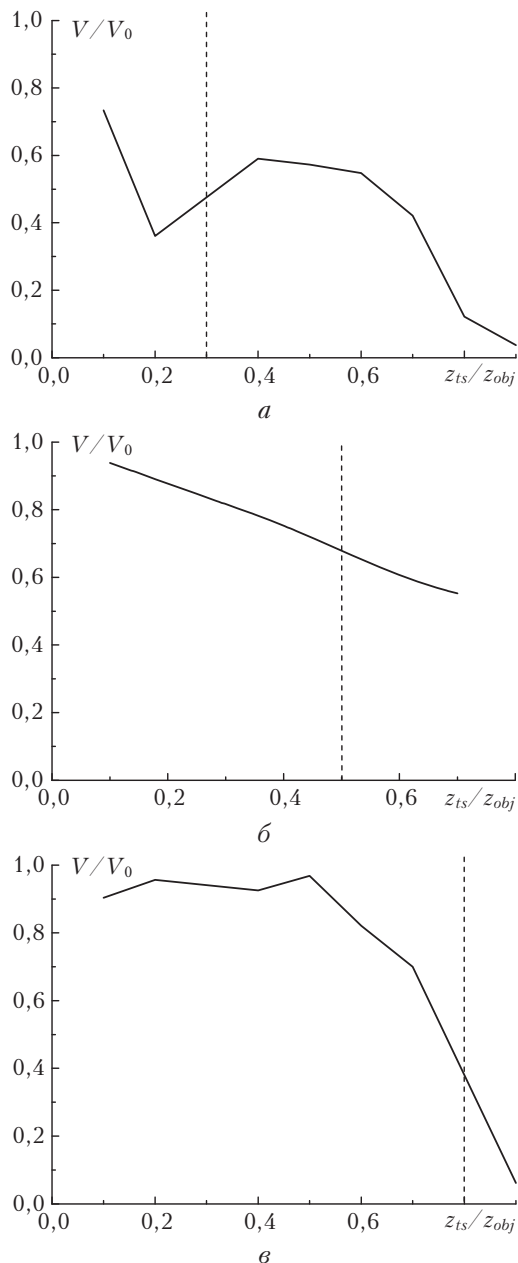


Рис. 5. Зависимость рассчитанной на основе выражений (13)–(15) скорости смещения неоднородностей V , нормированной на скорость смещения фазового экрана V_0 , от относительного местоположения данного слоя (экрана) z_{ts}/z_{obj} . Расположение второго неподвижного экрана в плоскости $z_{ts2} = 0,3z_{obj}$ (а), $0,5z_{obj}$ (б), $0,8z_{obj}$ (в) отмечено штриховой линией. Статистические характеристики движущегося и неподвижного экранов одинаковые; $z_{obj} = 0,1ka_t^2$; $b = 0,1a_t$; $R_{obj} = 40a_t$; $N_R = 512$; $2a_t/r_0 = 2$; $N_{turb} = 100$; $V_0 = R_{obj}/(N_R\Delta t)$

Видно, что для различных положений движущегося экрана относительно неподвижного откло-

нение среднего значения восстановленной скорости смещения экрана от заданной существенно отличается. При этом среднеквадратичное отклонение восстановленной скорости от среднего значения практически совпадает с $\langle V - V_0 \rangle_{turb}$. Высокую точность восстановления скорости смещения ближних к наблюдателю экранов можно объяснить тем, что чем ближе слой турбулентности располагается к приемной оптической системе, тем более крупномасштабные и интенсивные искажения он вызывает в изображении. Следовательно, выбор широкой сглаживающей функции $K(\mathbf{r}, a_k)$ позволяет отфильтровать влияние более удаленного неподвижного слоя неоднородностей, амплитуда искажений которого для больших a_k незначительна (см. рис. 4). Однако при сближении двух турбулентных слоев (фазовых экранов) вносимые ими искажения становятся соизмеримыми и в определение скорости смещения подвижного слоя также вносят вклад «статические» искажения, вызванные неподвижным слоем неоднородностей, что приводит к увеличению ошибки измерения. В случае, когда движущийся экран расположен за неподвижным, определение скорости смещения неоднородностей с помощью выражений (13)–(15) выполняется с большой погрешностью из-за искажений, вносимых неподвижным экраном, поскольку их амплитуда существенна для любых значений a_k (см. рис. 4). Значит, для определения скорости смещения удаленных от наблюдателя атмосферных неоднородностей необходимо выполнять фильтрацию крупномасштабных искажений, вносимых близлежащими неоднородностями.

Заключение

Представленный алгоритм позволяет определять скорость ветрового сдвига атмосферных неоднородностей по двум кадрам видеоряда искаженных изображений заданного объекта. При этом с высокой точностью может быть определена скорость ветра вблизи приемной оптической системы. Для определения профиля скорости ветра вдоль трассы наблюдения необходимо выполнять фильтрацию искажений различного масштаба, вызванных неоднородностями, располагающимися на разном расстоянии от наблюдателя. Разработка алгоритмов фильтрации искажений с различными характерными размерами с целью определения профиля скорости ветра на трассе наблюдения является основной задачей части 2 нашей работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-8199.2016.5.

1. Banakh V.A., Marakov D.A., Vorontsov M.A. Cross-wind profiling based on the scattered wave scintillations in a telescope focus // Appl. Opt. 2007. V. 46, N 33. P. 8104–8117
2. Banakh V.A., Marakov D.A. Wind velocity profile reconstruction from intensity fluctuations of a plane wave propagating in a turbulent atmosphere // Opt. Lett. 2007. V. 32, N 15. P. 2236–2238.

3. *Banakh V.A., Marakasov D.A.* Wind profiling based on the optical beam intensity statistics in a turbulent atmosphere // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2007. V. 24, N 10. P. 3245–3254.
4. *Маракасов Д.А.* Алгоритм восстановления профиля ветра по турбулентным флуктуациям интенсивности рассеянной волны в приемном телескопе // *Оптика атмосфер. и океана.* 2007. Т. 20, № 12. С. 1110–1114.
5. *Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П.* Дифференциальный метод в измерении параметров турбулентности и скорости ветра датчиком волнового фронта // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21, № 1. С. 75–80.
6. *Маракасов Д.А., Рычков Д.С., Фалиц А.В.* Восстановление профилей ветра и структурной характеристики показателя преломления по турбулентным флуктуациям интенсивности лазерного пучка // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 1. С. 82–85.
7. *Маракасов Д.А.* Восстановление профиля скорости ветра по флуктуациям интенсивности лазерного пучка в приемном телескопе. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 4. С. 304–307.
8. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П.* Определение скорости ветра в атмосфере по турбулентным искажениям видеоизображений лазерного пучка // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 8. С. 723–729; *Afanas'ev A.L., Banakh V.A., Rostov A.P.* Estimate of wind velocity in the atmosphere based on an analysis of turbulent distortions of laser beam images registered by video camera // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 1. P. 88–94.
9. *Holmes R.B.* Passive optical wind profilometer. Patent N 5469250 USO05469250A. Nov. 21, 1995.
10. *Belenkii M.* Passive crosswind profiler. Patent Application Publication US 2010/0128136 A1. May 27, 2010.
11. *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Determination of atmospheric turbulent inhomogeneity wind drift from sequence of incoherent images // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9292. P. 1–6. DOI: 10.1117/12.2075640.
12. *Еремина А.С., Дудоров В.В.* Способ фильтрации и определения скорости смещения турбулентных искажений в видеоряде оптических изображений при ветровом сносе атмосферных неоднородностей // *Изв. вузов. Физ.* 2015. Т. 58, № 8/2. С. 192–194.
13. *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Filtration of optical image distortions for retrieving the drift velocity of atmospheric turbulence inhomogeneities // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9680. P. 1–8. DOI: 10.1117/12.2206195.
14. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П.* Оценка интегральной скорости ветра и турбулентности в атмосфере по искажениям видеоизображений естественно освещенных объектов // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 4. С. 285–293; *Afanasiev A.L., Banakh V.A., Rostov A.P.* Estimation of the integral wind velocity and turbulence in the atmosphere from distortions of optical images of naturally illuminated objects // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 5. P. 422–430.
15. *Маракасов Д.А.* Оценка средней скорости ветра из корреляции смещений центров тяжести изображений некогерентных источников в турбулентной атмосфере // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 4. С. 294–299.
16. *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Possibilities of crosswind profiling based on incoherent imaging // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. P. 1–7. DOI: 10.1117/12.2249489.
17. *Vorontsov M.A., Kolosov V.V.* Target-in-the-loop beam control: basic considerations for analysis and wave-front sensing // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2005. V. 22. P. 126–141.
18. *Dudorov V.V., Vorontsov M.A., Kolosov V.V.* Speckle field propagation in "frozen" turbulence: Brightness Function Approach // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2006. V. 23, N 8. P. 1924–1936.
19. *Дудоров В.В., Колосов В.В., Филимонов Г.А.* Алгоритм формирования бесконечных турбулентных экранов для задачи моделирования долговременных лазерных экспериментов в атмосфере // *Изв. Томск. политехн. ун-та.* 2006. Т. 309, № 8. С. 85–89.
20. *Dudorov V.V., Filimonov G.A., Kolosov V.V.* Algorithm for formation of an infinite random turbulent screen // *Proc. SPIE.* 2005. V. 6160. CID:61600R.
21. *Lachinova S.L., Vorontsov M.A., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Valley M.T.* Anisoplanatic imaging through atmospheric turbulence: Brightness function approach // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6708. P. 67080E.
22. *Dudorov V.V., Kolosov V.V.* Anisoplanatic turbulence correction in incoherent imaging by using reference sources with different wavelengths // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 5. P. 353–358.

V.V. Dudorov, A.S. Eremina. Retrieval of crosswind velocity based on the analysis of remote object images. Part 1. Drift of a thin layer of turbulent inhomogeneities.

Numerical simulation is carried out in order to evaluate possibilities of crosswind velocity determination along an observation path between distant object and observer. The proposed simulation method is based on the analysis of atmospheric distortions in the object images. The influence of limited atmospheric areas on the object image distortion and possibilities of the drift velocity retrieval in these areas are investigated. A new method for filtration of turbulent distortions by their characteristic sizes is suggested with the aim to determine the wind velocity at different segments of the observation path. It is demonstrated that the evaluation method allows one to determine crosswind velocity with high accuracy when it is applied to a thin layer of atmospheric inhomogeneities.