

Определение поперечной составляющей скорости ветра на основе анализа видеоряда изображений удаленных объектов. Часть 2. Смещение объема турбулентной среды

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 13.01.2017 г.

С помощью численного моделирования исследуются возможности нахождения профиля скорости ветра на трассе наблюдения за удаленным объектом на основе анализа видеоряда его изображений. Основным преимуществом предлагаемого метода определения скорости ветра, основанного на анализе двух соседних кадров видеоряда некогерентных изображений, перед аналогами является высокое быстродействие благодаря отсутствию необходимости накопления статистики анализируемых характеристик. Предложен метод фильтрации турбулентных искажений изображения по их характерным размерам, позволяющий оценить скорость смещения турбулентных неоднородностей на различных участках трассы наблюдения. Показано, что для ряда турбулентных условий и характеристик наблюдаемого объекта возможно определение скорости смещения нескольких (не меньше трех) слоев турбулентной атмосферы, расположенных на трассе наблюдения на разных расстояниях между объектом и приемной оптической системой.

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

Введение

Настоящая работа является продолжением исследований, связанных с разработкой способа определения профиля скорости ветра на основе анализа видеоряда изображений удаленных объектов. В первой части данной работы [1] было рассмотрено искажающее влияние ограниченных слоев турбулентных неоднородностей, расположенных вдоль трассы наблюдения, на изображения удаленных объектов, а также исследованы возможности определения скорости смещения данных слоев атмосферы на основе анализа вносимых ими искажений. Основной целью данной работы является разработка способа определения скорости смещения всего объема турбулентной среды, расположенной между приемной оптической системой и наблюдаемым объектом, для восстановления профиля ветра на участке наблюдения.

Исследование, так же как и первая часть работы, выполнено на основе метода численного моделирования [2–4], допускающего управление в широких диапазонах степенью проявления турбулентных искажений, числом и скоростью смещения различных участков атмосферы на трассе наблюдения, а также степенью неоднородности наблюдаемого

объекта. Анализ динамики турбулентных искажений при различных условиях наблюдения позволил определить оптимальные характеристики приемных оптических систем и способы снижения ошибок восстановления скорости ветра. С целью нахождения профиля ветра анализ влияния различных участков атмосферы на формируемые изображения выполнен на основе выделения (фильтрации) искажений различного масштаба [5] и управления размером наблюдаемой области [6].

1. Фильтрация турбулентных искажений, вносимых различными участками атмосферы

Как отмечалось ранее [1], для того чтобы в искаженных атмосферной турбулентностью изображениях разделить влияние разных слоев турбулентных неоднородностей (расположенных на различном расстоянии от наблюдателя), необходимо выполнить фильтрацию по характеру вносимых ими искажений. Как и в [1], анализ турбулентных искажений в изображении объекта будем вести на основе карты качества изображения

$$Q(\mathbf{r}, a_k, t) = |\nabla_{\mathbf{r}} I(\mathbf{r}, t)|^2 \otimes K(\mathbf{r}, a_k), \quad (1)$$

где $I(\mathbf{r}, t)$ – распределение интенсивности излучения в плоскости изображения приемного телескопа,

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

$\mathbf{r} = \{x, y\}$ – вектор в плоскости, перпендикулярной оси наблюдения OZ , t – время; $\nabla_{\mathbf{r}} = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y}$ – вектор-градиент; $|\nabla_{\mathbf{r}} I(\mathbf{r}, t)|^2$ – функционал резкости изображения;

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

– сглаживающая функция; a_k – коэффициент сглаживания.

На рис. 1 представлены изображения тестового объекта, а также карты качества его изображений (1) при наличии на трассе наблюдения одного и двух слоев турбулентных неоднородностей (фазовых экранов). Видно, что при достаточно большом значении a_k карта качества изображения практически не зависит от наличия дальнего фазового экрана (расстояние от наблюдателя до фазового экрана $z_{ts} = 0,5z_{obj}$). В то же время при малых значениях a_k карта качества изображения содержит информацию об обоих фазовых экранах – видны как крупномасштабные искажения, вызванные наличием ближнего к наблюдателю фазового экрана ($z_{ts} = 0,2z_{obj}$), так и мелкомасштабные, обусловленные наличием дальнего экрана ($z_{ts} = 0,5z_{obj}$).

В связи с выраженной зависимостью характерного масштаба искажений от местоположения слоя турбулентных неоднородностей [1, 7–10] очевидно, что фильтрацию искажений, вносимых разными слоями турбулентных неоднородностей, проще всего

выполнить на основе выделения искажений соответствующих масштабов.

1.1. Фильтрация по ширине сглаживающей функции

Мы предлагаем воспользоваться простым в реализации подходом, при котором вначале для определения скорости смещения близлежащих слоев неоднородностей выделяются крупномасштабные искажения с помощью широкой сглаживающей функции K . Затем данные искажения вычитаются из карты качества изображения, содержащей искажения всех масштабов, и на основе анализа динамики оставшихся искажений определяется скорость смещения дальних слоев неоднородностей.

При наличии двух слоев турбулентных неоднородностей на трассе наблюдения данный алгоритм выглядит следующим образом. Вычисляется карта качества изображения $Q(\mathbf{r}, a_{\min})$ при минимальном значении ядра свертки $a_k = a_{\min}$, позволяющем отфильтровать только структуру наблюдаемого объекта. Далее для определения скорости смещения ближнего к объекту фазового экрана вычисляется карта качества изображения $Q(\mathbf{r}, a_{\text{filtr}}, t)$ с широкой сглаживающей функцией $a_k = a_{\text{filtr}} > a_{\min}$, которая позволяет отфильтровать мелкомасштабные искажения, вносимые дальним фазовым экраном. При этом предпочтительно выбирать значение a_{filtr} , близкое к максимально возможному значению a_k^{\max} [1]. На основе данной карты качества крупномасштабных искажений $Q(\mathbf{r}, a_{\text{filtr}}, t)$ можно вычислить скорость

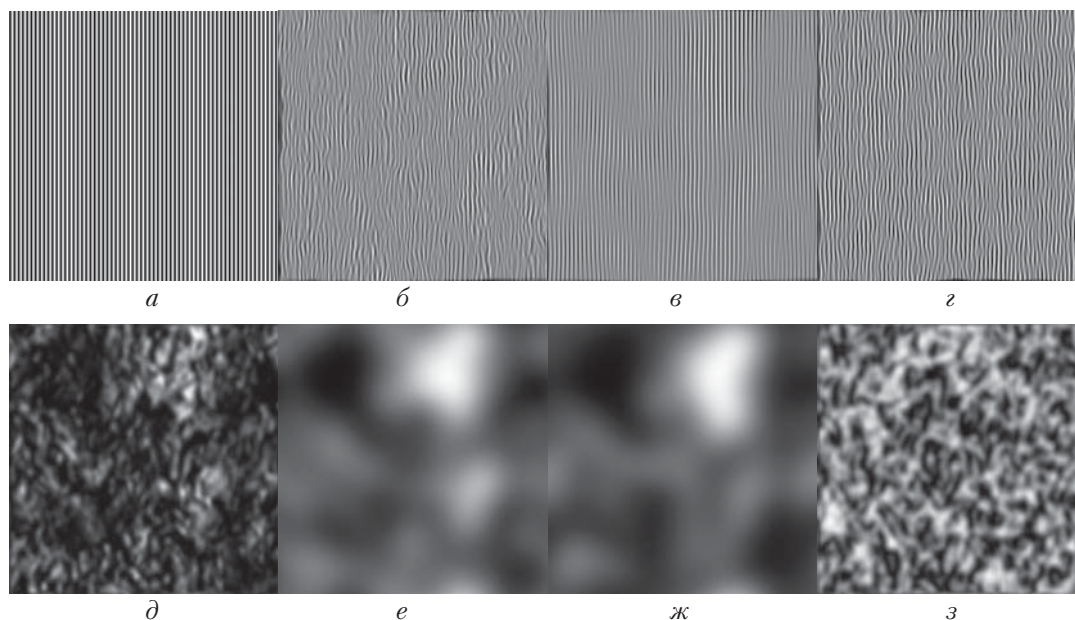


Рис. 1. Объект (а), его изображения (б–г), а также карты качества изображений (д–з). На трассе наблюдения протяженностью $z_{obj} = 0,1ka_t^2$ (k – волновое число, a_t – радиус приемной апертуры) расположены два фазовых экрана на расстояниях $z_{ts1} = 0,2z_{obj}$ и $z_{ts2} = 0,5z_{obj}$ (б, д, е) либо один из них на расстоянии $z_{ts1} = 0,2z_{obj}$ (в, ж), $z_{ts2} = 0,5z_{obj}$ (г, з). Статистические характеристики фазовых экранов одинаковые; параметр степени турбулентности $2a_t/r_0 = 10$; параметр Фрида $r_0 = (0,423k^2 C_n^2 z_{obj})^{-3/5}$; поперечный размер объекта и фазовых экранов $R_{obj} = 40a_t$; число узлов расчетной сетки $N_R = 512$; коэффициент отражения объекта $T(x, y) = \exp\{-[1 + \sin(x/b)]^{10}\}$, $b = 0,1a_t$; коэффициенты сглаживания $a_k = 5a_t$ (е, ж), $0,5a_t$ (д, з)

смещения первого фазового экрана $\mathbf{V}_1 = \{V_{1x}, V_{1y}\}$ с использованием выражений [1]:

$$\mathbf{V}(t) = \frac{\Delta \mathbf{r}(t)}{\Delta t} \frac{z_{ts}}{z_{obj}}; \quad (2)$$

$$\Delta \mathbf{r}(t) = \arg \max[R(\mathbf{r}, t)]; \quad (3)$$

$$R(\mathbf{r}, a_k, t) = \int d\mathbf{r}' Q(\mathbf{r}, a_k, t) Q(\mathbf{r} + \mathbf{r}', a_k, t + \Delta t). \quad (4)$$

Для определения скорости смещения второго (дальнего от наблюдателя) фазового экрана в выражении (4) вместо Q необходимо использовать разность карт качества изображения

$$\Delta Q(\mathbf{r}, t) = Q(\mathbf{r}, a_{\min}, t) - Q(\mathbf{r}, a_{\text{filtr}}, t). \quad (5)$$

В рассматриваемом случае при вычитании карты качества крупномасштабных искажений $Q(\mathbf{r}, a_{\text{filtr}}, t)$ из карты качества изображения $Q(\mathbf{r}, a_{\min}, t)$, содержащей информацию о всех искажениях, мы получим карту мелкомасштабных искажений, вызванных неоднородностями дальнего слоя. На рис. 2 представлены рассчитанные карты качества $Q(\mathbf{r}, a_{\min}, t)$, $Q(\mathbf{r}, a_{\text{filtr}}, t)$, а также их разность $\Delta Q(\mathbf{r}, t)$ при фиксированном положении первого фазового экрана в плоскости $z_{ts1} = 0,2z_{obj}$ и двух различных положениях второго фазового экрана – в плоскостях $z_{ts2} = 0,5z_{obj}$ и $z_{ts2} = 0,8z_{obj}$.

Видно, что в карте качества изображения, вычисленного с большим значением параметра сглаживания $a_k = a_{\text{filtr}}$, отсутствуют мелкомасштабные искажения, вызванные вторым фазовым экраном. В то же время в разности ΔQ , как и ожидалось, видны преимущественно мелкомасштабные искажения.

Можно отметить, что для различных положений второго экрана в разности карт качества изображений ΔQ (5), определяющей вызванные им мелкомасштабные искажения, наблюдается заметное снижение амплитуды искажений в областях, соответствующих сильным крупномасштабным искажениям, вызванным первым фазовым экраном (темные области на рис. 2, б, е). Очевидно, это может проявиться во влиянии первого фазового экрана на точность определения скорости смещения второго. Для более тщательной фильтрации искажений близлежащих слоев турбулентности можно использовать дополнительный параметр – размер анализируемой области изображения [6].

1.2. Фильтрация по размеру анализируемой области

Для дополнительной фильтрации крупномасштабных искажений при расчете их смещения в изображении (карте качества изображения (1)) объекта мы предлагаем уменьшать размер анализируемой области до значений меньше характерного размера искажений, которые необходимо отфильтровать. В этом случае карта качества анализируемого фрагмента изображения вычисляется в виде

$$Q_{\Omega}(\mathbf{r}, a_k, t) = |\nabla_{\mathbf{r}} I(\mathbf{r}, t)|^2 \otimes K(\mathbf{r}, a_k), \quad \mathbf{r} \in \Omega, \quad (6)$$

где Ω – анализируемая область. Для повышения эффективности численных алгоритмов обработки изображений данную область целесообразно задавать в форме квадрата, размер которого в пикселях фотоприемной матрицы N_{Ω} , так же как и общий размер анализируемой области изображения (число

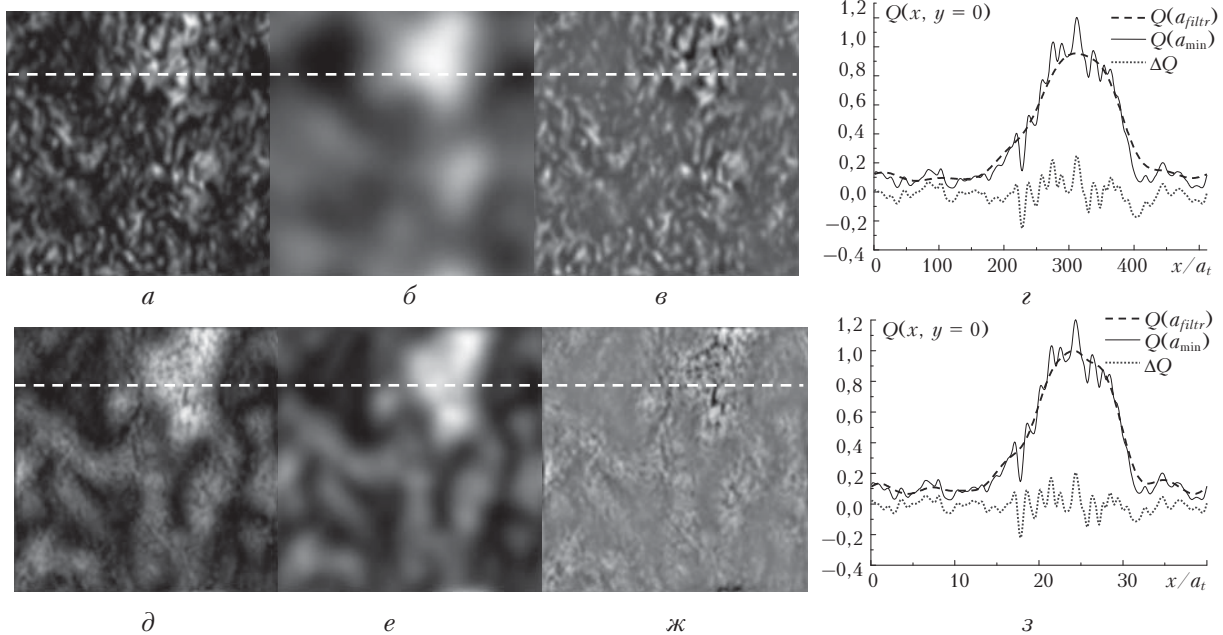


Рис. 2. Карты качества $Q(\mathbf{r}, a_{\min}, t)$ (а, д), $Q(\mathbf{r}, a_{\text{filtr}}, t)$ (б, е), а также их разность ΔQ (в, ж). Сечения (z, з) соответствуют горизонтальным штриховым линиям; $z_{obj} = 0,1ka_t^2$, два фазовых экрана расположены на расстояниях $z_{ts1} = 0,2z_{obj}$ и $z_{ts2} = 0,5z_{obj}$ (а–z); $z_{ts2} = 0,8z_{obj}$ (д–з); статистические характеристики фазовых экранов одинаковые; $2a_t/r_0 = 10$; $R_{obj} = 40a_t$; $N_R = 512$; $b = 0,1a_t$; коэффициенты сглаживания $a_{\text{filtr}} = 5a_t$, $a_{\min} = 0,5a_t$ (а–z), $a_{\text{filtr}} = 2a_t$, $a_{\min} = 0,5a_t$ (д–з)

узлов расчетной сетки в численном моделировании) N_R , задается в виде 2^n (рис. 3). Это связано с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье при моделировании и анализе изображений. Кроме того, в данной ситуации в пределах всей анализируемой области изображения Ω_1 помещается несколько непересекающихся областей Ω_m , что дает возможность выполнять пространственное усреднение корреляционной функции по этим областям и, следовательно, уменьшить случайную ошибку вычисления скорости смещения дальних экранов.

Таким образом, размер анализируемой области N_Ω связан с размером расчетной сетки N_R выражением

$$N_{\Omega_m} = N_R / 2^m. \quad (7)$$

В данном случае для оценки смещения искажений характерного размера, определяемого параметром

a_k , коэффициент корреляции карт качества вычисляется для каждого фрагмента изображения Ω_m^i :

$$R_{\Omega_m^i}(\mathbf{r}, a_k, t) = Q_{\Omega_m^i}(\mathbf{r}, a_k, t) \otimes Q_{\Omega_m^i}(-\mathbf{r}, a_k, t + \Delta t), \quad (8)$$

и далее производится усреднение по всем возможным фрагментам Ω_m^i данного размера:

$$R_m(x, y; a_k, t) = \langle R_{\Omega_m^i}(x, y; a_k, t) \rangle_i. \quad (9)$$

Отметим, что при определении скорости смещения дальних от наблюдателя слоев неоднородностей в правой части выражения (8) вместо карты качества $Q_{\Omega_m^i}$ необходимо использовать соответствующую разность $\Delta Q_{\Omega_m^i}$, рассчитанную аналогично (5).

На рис. 4 представлены характерные сечения корреляционной функции (9) для разных значений

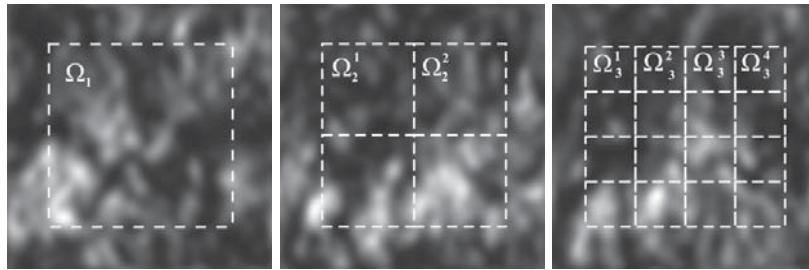


Рис. 3. Карта качества изображений и области анализируемых фрагментов

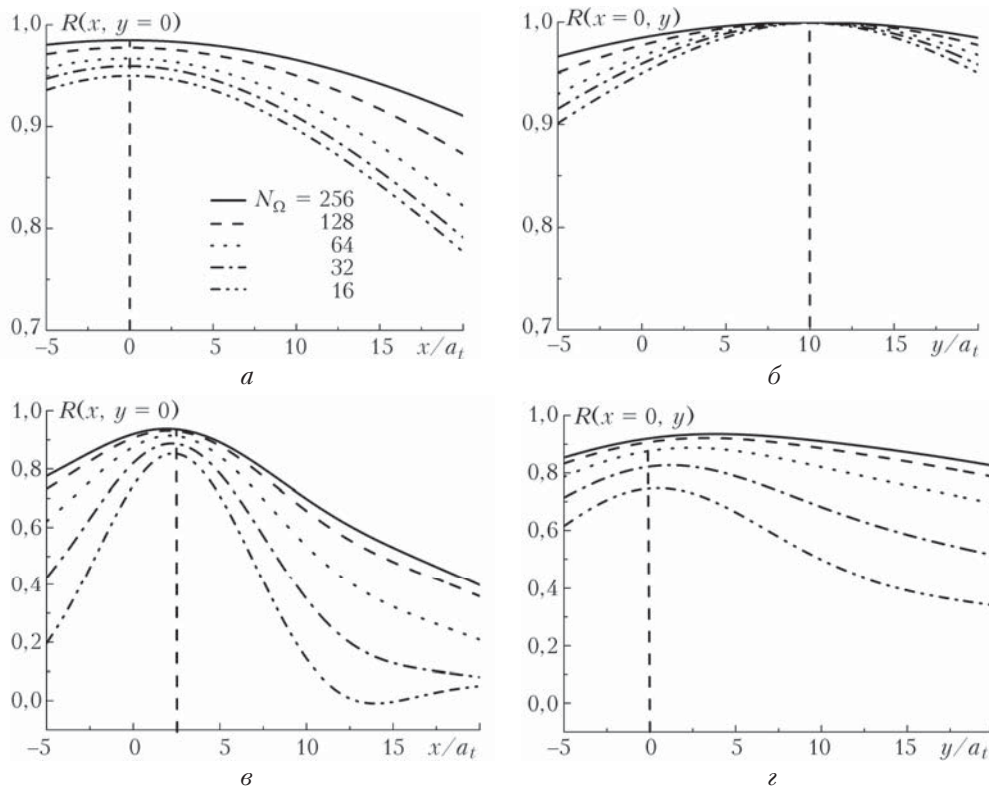


Рис. 4. Сечения функции взаимной корреляции $R(x, y)$ (9) для различных значений N_Ω . Два фазовых экрана в плоскостях $z_{ts1} = 0, 2z_{obj}$ и $z_{ts2} = 0, 8z_{obj}$ смещались со скоростью $\mathbf{V}_{01} = \{0, 2R_{obj}/(N_R \Delta t)\}$ и $\mathbf{V}_{02} = \{2R_{obj}/(N_R \Delta t), 0\}$ соответственно; $z_{obj} = 0, 1ka_t^2$; $2a_t/r_0 = 2, 2$; $R_{obj} = 40a_t$; $N_R = 512$; $b = 0, 1a_t$; коэффициенты сглаживания $a_{filtr} = 5a_t$, $a_{min} = 0, 6a_t$. Вертикальной штриховой линией показано смещение, соответствующее безошибочному восстановлению скорости ветра

размера анализируемой области N_Ω . При моделировании изображения объекта использовались два турбулентных экрана, расположенных на дистанциях $z_{ts1} = 0,2z_{obj}$ и $z_{ts2} = 0,8z_{obj}$; первый экран смещался вдоль координаты y , второй – вдоль x .

Видно, что при разных размерах анализируемых фрагментов изображения N_Ω точность определения смещения фазовых экранов за время между двумя соседними кадрами видеоряда Δt отличается. При определении смещения первого фазового экрана (рис. 4, а, б) значение $\arg \max R(\mathbf{r})$ практически не зависит от размера анализируемой области N_Ω ; смещение искажений вдоль координаты x (вдоль которой первый экран не смещался), определяемое $\arg \max_x R(\mathbf{r})$, отсутствует, а смещение искажений вдоль координаты y , определяемые $\arg \max_y R(\mathbf{r})$,

практически совпадает со значением, соответствующим безошибочному восстановлению скорости смещения данного фазового экрана. Анализируя кривизну представленных зависимостей, можно отметить, что вторая производная корреляционной функции в точке максимума увеличивается с уменьшением N_Ω , что делает предпочтительным выбор малых значений N_Ω при наличии шумов. Минимальную ошибку определения скорости смещения второго фазового экрана (рис. 4, в, г) обеспечивает малый размер анализируемой области $N_\Omega = 16$, позволяющий практически полностью отфильтровать остаточные искажения, вносимые первым фазовым экраном. Из рис. 4, в видно, что $\arg \max_x R(\mathbf{r})$, оп-

ределяющий смещение второго экрана, для всех значений N_Ω практически совпадает со значением, соответствующим безошибочному восстановлению скорости смещения данного фазового экрана. Однако восстановленная скорость смещения второго экрана вдоль координаты y (рис. 4, г), по которой смещается только первый экран, при значениях $N_\Omega \geq 32$ будет ненулевой (соответствует ненулевым значениям $\arg \max_y R(\mathbf{r})$).

Таким образом, модификация метода определения скорости смещения турбулентных неоднородностей атмосферы (2)–(5), основанная на введении дополнительного параметра – размера анализируемой области изображения N_Ω (7), позволяет осуществить дополнительную фильтрацию крупномасштабных неоднородностей. А соответствующее такому подходу пространственное усреднение функции корреляции турбулентных искажений на двух соседних кадрах видеоряда (9) способствует снижению случайной ошибки метода.

2. Метод восстановления профиля скорости ветра

Для определения профиля скорости ветра на произвольном участке атмосферы предлагается всю трассу наблюдения между объектом и приемной

оптической системой разбивать на N_z участков, вклад каждого из которых считается аналогичным вкладу бесконечно тонкого фазового экрана. В таком случае алгоритм определения профиля скорости ветра на трассе наблюдения объекта будет следующий:

- определяется число слоев турбулентных неоднородностей N_z , для которых будет восстанавливаться скорость ветрового сноса;
- вычисляются параметры сглаживания

$$a_{filtr}^{(j)} = \frac{A}{z_{ts}^{(j)} / z_{obj}}$$

для каждого j -го слоя неоднородностей с центром в плоскости $z_{ts(j)}$ [1] (размерный параметр A зависит от атмосферных условий и характеристик приемной системы);

- вычисляется карта качества изображения

$$Q(\mathbf{r}, a_{min}, t) = |\nabla_{\mathbf{r}} I(\mathbf{r}, t)|^2 \otimes K(\mathbf{r}, a_{min}),$$

позволяющая отфильтровать только структуру наблюдаемого объекта, оставив при этом информацию об искажениях. Ядро свертки можно взять в виде

$$K(\mathbf{r}, a_k) = \exp(-r^2 / a_k^2);$$

- вычисляется функция

$$Q_{\Omega_i}(\mathbf{r}, a_{filtr}^{(1)}, t) = \nabla_{\mathbf{r}}^2 I(\mathbf{r}, t) \otimes K(\mathbf{r}, a_{filtr}^{(1)}),$$

позволяющие отфильтровать мелкомасштабные искажения, вносимые турбулентными неоднородностями, расположенными дальше первого слоя;

- рассчитывается скорость смещения первого слоя \mathbf{V}_1 на основе выражений (2)–(5) с учетом выбора оптимального размера анализируемой области (7) и усреднения функции корреляции (8), (9);
- вычисляется разность

$$\Delta Q_{\Omega_i}^{(1)}(\mathbf{r}, t) = Q(\mathbf{r}, a_{min}, t) - Q_{\Omega_i}(\mathbf{r}, a_{filtr}^{(1)}, t),$$

позволяющие отфильтровать искажения, вносимые первым слоем турбулентных неоднородностей;

- вычисляется функция

$$Q_{\Omega_i}(\mathbf{r}, a_{filtr}^{(2)}, t) = \Delta Q_{\Omega_i}^{(1)}(\mathbf{r}, t) \otimes K(\mathbf{r}, a_{filtr}^{(2)}),$$

позволяющая отфильтровать мелкомасштабные искажения, вносимые турбулентными неоднородностями, расположенными дальше второго слоя;

- рассчитывается скорость смещения второго слоя \mathbf{V}_2 на основе выражений (2)–(5) с учетом выбора оптимального размера анализируемой области (7) и усреднения функции корреляции (8), (9);
- вычисляется разность

$$\Delta Q_{\Omega_i}^{(2)}(\mathbf{r}, t) = \Delta Q_{\Omega_i}^{(1)}(\mathbf{r}, t) - Q_{\Omega_i}(\mathbf{r}, a_{filtr}^{(2)}, t);$$

– повторяются три последние операции до расчета \mathbf{V}_{N_z} .

Алгоритм позволяет последовательно определять скорости смещения искажений, вносимых ка-

ждым слоем турбулентных неоднородностей (фазовым экраном), начиная с ближнего от наблюдателя слоя. Заметим, что при фильтрации структуры объекта со сглаживающим параметром a_{\min} происходит фильтрация (потеря) искажений, вносимых дальними от наблюдателя слоями турбулентности, для которых угловой размер искажающих неоднородностей $\frac{l_{turb}}{z_{ts}} \leq \frac{a_{\min}}{z_{obj}}$. Для большинства практических ситуаций это соответствует невозможности определения скорости ветра на расстояниях $z_{ts} > 0,8z_{obj}$.

3. Результаты и обсуждения

Представим результаты работы данного алгоритма в случае ветрового сноса нескольких слоев неоднородностей ($N_z = 2$ и 3).

3.1. Два слоя неоднородностей

На рис. 5 приведена зависимость восстановленных скоростей смещения двух слоев турбулентных неоднородностей от степени проявления турбулентных эффектов для различных радиусов апертуры приемного телескопа a_t и параметра b , характеризующего распределение коэффициента отражения объекта. При моделировании изображения объекта были использованы два турбулентных экрана, расположенные на дистанциях $z_{ts1} = 0,2z_{obj}$ и $z_{ts2} = 0,5z_{obj}$ и смещающиеся вдоль оси OX со скоростью V_0 .

Стоит отметить, что одинаковая линейная скорость смещения турбулентных неоднородностей, расположенных на различном расстоянии от наблюдателя, проявляется в разной угловой скорости их смещения и, следовательно, в разной скорости смещения соответствующих искажений в изображении объекта, что требует их фильтрации. Видно, что при слабой турбулентности ($D/r_0 < 3$) предложенный метод не позволяет определить скорость ветра из-за отсутствия необходимых искажений в изображении наблюдаемого объекта. Однако в широком диапазоне D/r_0 от 4 до 20 относительная ошибка определения скорости смещения неоднородностей

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

для всех выбранных параметров

не превышает 25% для первого слоя и 30% для второго, что является удовлетворительным для большинства практических задач. Случайная ошибка (СКО отношения восстановленной скорости ветра к заданной V/V_0) для первого слоя лежит в пределах 20%, в то время как для второго слоя неоднородностей она несущественна.

Малые значения случайной ошибки определения скорости смещения удаленных от наблюдателя неоднородностей среды можно объяснить особенностью представленного алгоритма, использующего усреднение по площади анализируемой области изображения Ω . Можно отметить, что при наблюдении за удаленными объектами в реальных усло-

виях угол поля зрения приемных оптических систем существенно превосходит угол изопланатизма турбулентности, что и обеспечивает возможность усреднения по площади изображения наблюдаемого объекта.

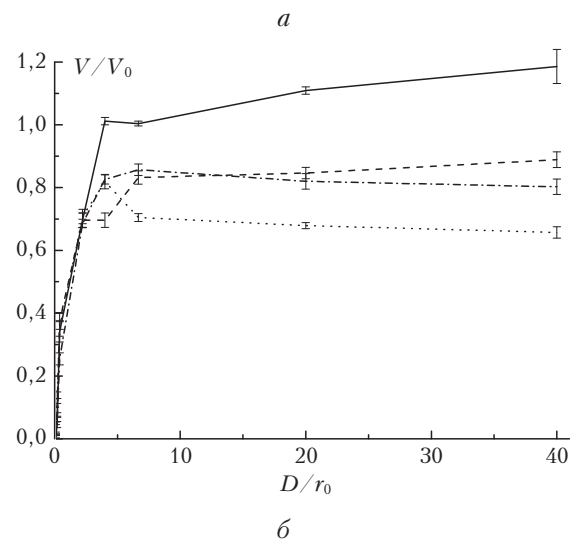
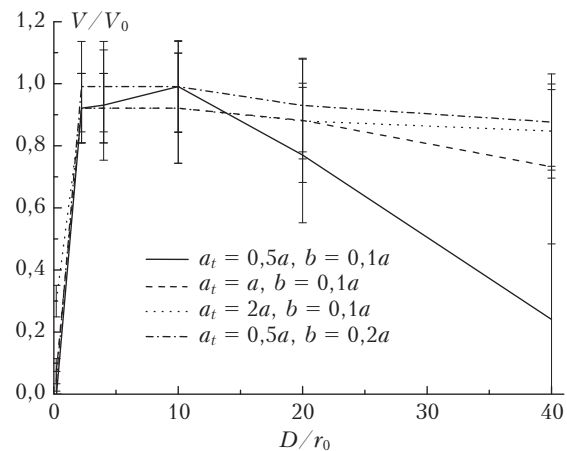
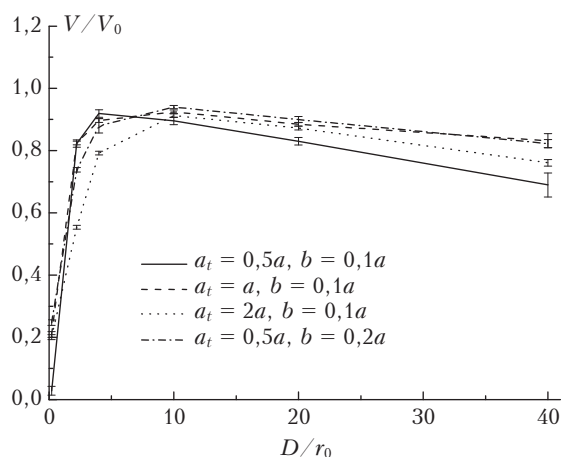


Рис. 5. Зависимость рассчитанной скорости смещения слоя неоднородностей V , нормированной на скорость смещения фазового экрана V_0 , от D/r_0 для разных радиусов приемной апертуры $a_t = 0,5a$; a ; $2a$. $D = 2a$; $z_{ts1} = 0,2z_{obj}$ (а) и $z_{ts2} = 0,5z_{obj}$ (б); расстояние до наблюдаемого объекта $z_{obj} = 0,1ka^2$; $R_{obj} = 40a$; $N_R = 512$; $b = 0,1a$; a – нормировочный параметр; усреднение выполнено по 100 реализациям турбулентных неоднородностей. Вертикальными линиями показаны СКО

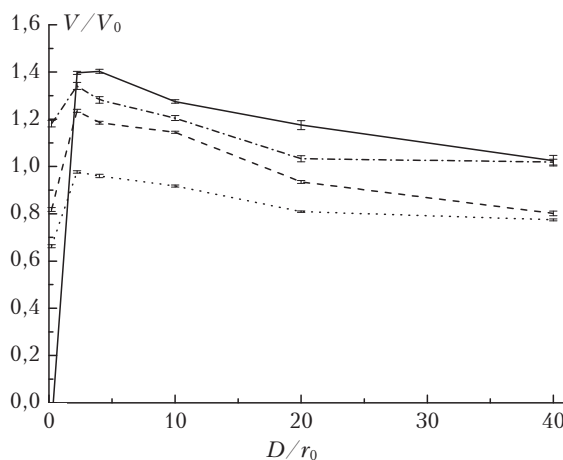
Из анализа результатов на рис. 5 также следует, что размер приемной апертуры влияет на точность восстановления скорости ветра. При этом основной особенностью данного влияния является уменьшение случайной ошибки восстановления скорости ветра при увеличении размера приемной апертуры, в то время как регулярная ошибка при увеличении апертуры может существенно возрастать. Кроме того, видно, что изменение пространственной частоты объекта наблюдения (параметра b) в определенных пределах несущественно влияет на определение скорости смещения искажений в его изображении.

Однако необходимо подчеркнуть, что для эффективной работы алгоритма размер деталей объекта (определяемый в нашем случае параметром b) должен быть меньше характерного размера турбулентных искажений, соответствующих дальним слоям атмосферных неоднородностей.

Аналогичные результаты для скорости смещения двух фазовых экранов, расположенных на дистанциях $z_{ts1} = 0,5z_{obj}$ и $z_{ts2} = 0,8z_{obj}$, представлены на рис. 6.



a



б

Рис. 6. Зависимость рассчитанной скорости смещения слоя неоднородностей V , нормированной на скорость смещения V_0 , от D/r_0 для разных радиусов приемной апертуры $a_t = 0,5a$; a ; $2a$; $z_{ts1} = 0,5z_{obj}$ (a) и $z_{ts2} = 0,8z_{obj}$ ($б$); $z_{obj} = 0,1ka^2$; $V_0 = R_{obj}/(N_R\Delta t)$

Здесь также можно заметить, что для слабой турбулентности ($D/r_0 < 3$) ошибка определения скорости ветра существенная. Однако для умеренной и сильной турбулентности (D/r_0 от 4 до 40) средняя относительная ошибка определения скорости смещения обоих слоев неоднородностей лежит в пределах 25%. При этом СКО величины V/V_0 для обоих слоев неоднородностей является несущественным во всем диапазоне изменения D/r_0 . Это

можно объяснить тем, что неоднородности турбулентной атмосферы, расположенные ближе к объекту (дальше от наблюдателя), проявляются в мелко-масштабных искажениях его изображения независимо от силы турбулентности. В этом случае происходит хорошее усреднение по всей площади анализируемой области изображения, приводящее к уменьшению случайной ошибки.

Зная пространственные характеристики наблюдаемого объекта и условия распространения, можно уменьшать ошибку восстановления скорости ветра с помощью оптимального выбора размеров приемной апертуры и коэффициентов сглаживания при построении карт качества изображения. При этом, как показали результаты численного моделирования, относительная ошибка восстановления скорости смещения двух слоев неоднородностей, расположенных на расстояниях $0,1z_{obj} < z_{ts} < 0,9z_{obj}$, при $3 < D/r_0 < 20$ составляет менее 25%.

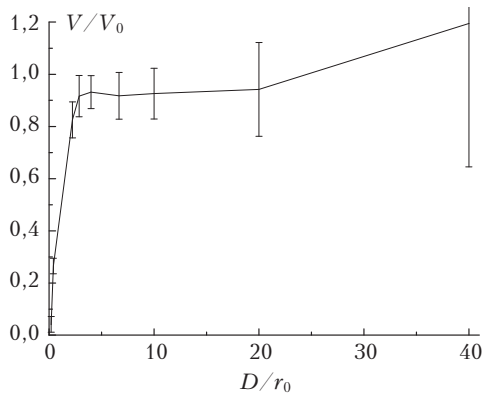
3.2. Три слоя неоднородностей

На рис. 7 показаны результаты работы предложенного алгоритма восстановления профиля скорости ветра для случая смещения трех слоев атмосферных неоднородностей, расположенных в плоскостях $z_{ts1} = 0,2z_{obj}$, $z_{ts2} = 0,5z_{obj}$ и $z_{ts3} = 0,8z_{obj}$.

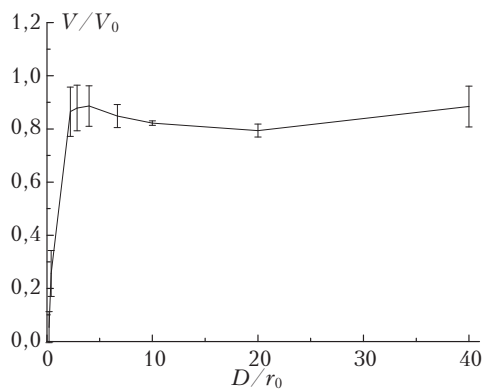
Видно, что как и в случае с двумя слоями, скорость смещения близлежащего к наблюдателю слоя вычисляется с наибольшей случайной ошибкой (СКО величины V/V_0 порядка 20–40%). Относительная ошибка определения скорости смещения разных слоев неоднородностей для $4 < D/r_0 < 20$ лежит в пределах 20–25%.

Зависимости ошибок определения скорости смещения всех трех слоев неоднородностей аналогичны зависимостям, полученным для двух слоев, которые расположены на соответствующих расстояниях от наблюдателя. Это говорит о хорошей фильтрации искажений в изображении объекта, связанных с определенными слоями неоднородностей, независимо от наличия еще одного (третьего) слоя.

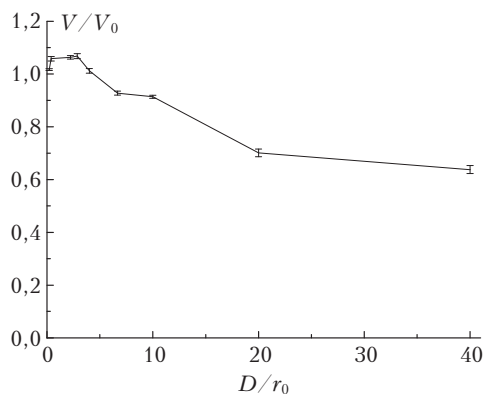
Анализ относительной ошибки определения скорости смещения нескольких слоев неоднородностей на трассе наблюдения показал, что в широком диапазоне турбулентных искажений (D/r_0 от 4 до 20) наблюдается хорошее согласие заданной V_0 и восстановленной V скорости ветра (относительная ошибка меньше 25%). При этом можно отметить, что полностью устранить ошибку восстановления профиля ветра на основе предложенного метода невозможно, поскольку она объясняется естественными физическими причинами. Очевидно, что в каждом турбулентном слое присутствуют неоднородности разных масштабов. При формировании изображений в турбулентной атмосфере искажения определенного масштаба могут быть вызваны неоднородностями воздуха, располагающимися на различном расстоянии от наблюдателя. В таком случае при использовании предложенного метода происходит не полная, а частичная фильтрация искажений, вносимых различными турбулентными слоями.



а



б



в

Рис. 7. Зависимость рассчитанной скорости смещения слоя неоднородностей V , нормированной на скорость смещения фазового экрана V_0 , от D/r_0 ; $a_t = a$; $z_{ts1} = 0,2z_{obj}$ (а), $z_{ts2} = 0,5z_{obj}$ (б) и $z_{ts3} = 0,8z_{obj}$ (в), $z_{obj} = 0,1ka^2$; $V_0 = R_{obj}/(N_R \Delta t)$

Описанный метод характеризуется малыми значениями случайной ошибки благодаря усреднению функции корреляции искажений на соседних кадрах видеоряда по площади анализируемой области изображения (9), обычно существенно превосходящей размер изопланатизма турбулентности.

Заключение

В заключение отметим, что основным преимуществом предлагаемого метода определения скорости

сти ветра, основанного на анализе двух соседних кадров видеоряда некогерентных изображений, перед аналогами [11, 12] является высокое быстродействие, обусловленное отсутствием необходимости накопления статистики анализируемых характеристик. При разработке метода восстановления профиля скорости ветра, поперечного оси наблюдения, на основе численного моделирования найдены оптимальные параметры фильтрации искажений в регистрируемых изображениях, минимизирующие погрешность метода.

Показано, что для широкого диапазона турбулентных условий и характеристик наблюдаемого объекта возможно определение скорости смещения нескольких (не меньше трех) слоев турбулентной атмосферы, расположенных на различных расстояниях на трассе между наблюдаемым объектом и приемной оптической системой. При этом относительная ошибка определения скорости смещения каждого слоя не превышает 25%.

Дальнейшее развитие данного направления мы видим в разработке универсальных методов фильтрации структуры произвольных объектов в искаженных изображениях с целью адаптации представленного в статье метода к реальным условиям наблюдения.

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

1. Дудоров В.В., Еремина А.С. Определение поперечной составляющей скорости ветра на основе анализа видеоряда изображений удаленных объектов. Часть 1. Смещение тонкого слоя турбулентных неоднородностей // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 4. С. 274–280.
2. 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.
3. 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.
4. Dudorov V.V., Filimonov G.A., Kolosov V.V. Algorithm for formation of an infinite random turbulent screen // Proc. SPIE. 2005. V. 6160. P. 61600R.
5. Holmes R.B. Passive optical wind profilometer. Patent N 5,469,250. USO05469250A. Nov. 21, 1995.
6. Belenkii M. Passive crosswind profiler. Patent Appl. Publ. US 2010/0128136 A1. May 27, 2010.
7. Dudorov V.V., Eremina A.S. Determination of atmospheric turbulent inhomogeneity wind drift from sequence of incoherent images // Proc. SPIE. 2014. V. 9292. P. 92921F.
8. 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. Физика. 2015. Т. 58, № 8/2. С. 192–194.
9. 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. CID: 9680 2E.

10. *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Possibilities of crosswind profiling based on incoherent imaging // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. CID: 100351Q.
11. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П.* Оценивание интегральной скорости ветра и турбулентности в атмосфере по искажениям видеоизображений естественно освещенных объектов // Оптика атмосф. 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.
12. *Маракасов Д.А.* Оценка средней скорости ветра из корреляции смещений центров тяжести изображений некогерентных источников в турбулентной атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 4. С. 294–299.

V.V. Dudorov, A.S. Eremina. **Retrieval of crosswind velocity based on the analysis of remote object images. Part 2. Drift of turbulent volume.**

Possibilities of the crosswind profiling along an observation path of a distant object from the analysis of distortions of atmospheric object images are studied in this work by numerical simulation. The proposed method for wind velocity determination is based on the analysis of two adjacent incoherent images and exhibit higher performance in comparison with counterparts, which is explained by the absence of accumulation of analyzed statistical characteristics. A new method for filtration of turbulent distortions of an image by their characteristic sizes is suggested with the aim of determining the wind velocity at different segments of an observation path. The work shows a possibility of determining the motion velocity under certain turbulent conditions for several (no less than three) layers of turbulent atmosphere, which are located at different positions between observed object and optical system.