

Визуализация поля скоростей в слое турбулентной атмосферы по просвечивающему слой оптическому излучению

В.А. Банах, А.В. Фалиц*

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

Поступила в редакцию 13.02.2009 г.

Проведен анализ возможности визуализации 2-D-поля скоростей в слое турбулентной атмосферы по флуктуациям интенсивности просвечивающего слой оптического излучения. Рассмотрена схема, в которой просвечивающее лазерное излучение после прохождения турбулентного слоя рассеивается на диффузной поверхности и обратно рассеянное излучение принимается на телескоп, с помощью которого формируется изображение освещенной области рассеивающей поверхности. Показано, что корреляционное сравнение крупномасштабной структуры флуктуаций интенсивности в когерентных изображениях рассеивающей поверхности, полученных в различающиеся моменты времени, позволяет визуализировать двумерное поле скоростей в просвечиваемом турбулентном слое.

Ключевые слова: турбулентная атмосфера, просвечиваемый слой, флуктуации интенсивности, лазерное излучение, когерентное изображение, визуализация поля скоростей, диффузная поверхность; *turbulent atmosphere, sounded layer, intensity fluctuations, laser, coherent image, visualization of the velocity fields, diffuse surface.*

Введение

Для исследований динамики поля скоростей в потоках жидкости или газа широко используются методы определения скорости, основанные на регистрации лазерного излучения, рассеянного находящимися в потоке микрочастицами. Это либо доплеровские методы (лазерные доплеровские анемометры) [1], либо методы, основанные на регистрации изображений частиц, находящихся в потоке (particle image velocimetry (PIV)), или спекл-структуры поля, рассеянного на этих частицах (laser speckle velocimetry) [2–5]. В отличие от доплеровских анемометров, PIV-измерители позволяют оперативно визуализировать 2-D-поля скоростей в потоках, не прибегая к сканированию.

Возможность осуществлять оперативную визуализацию 2-D-поля скоростей в протяженных областях пространства делает PIV-методы привлекательными для атмосферных применений, например для индикации областей повышенной турбулентности или вихревых организованных структур. В частности, в работе [6] PIV-установки использовались в стендовых измерениях для визуализации поля скоростей воздушных течений, генерируемых винтом вертолета. Однако для атмосферных задач непосредственное применение готовых PIV- или спекл-технологий

вызывает большие трудности, так как получить изображения отдельных частиц аэрозоля на трассах протяженностью до нескольких километров с целью анализа их перемещения в пространстве практически невозможно, а наблюдаемая динамика разрешаемых на этих расстояниях спеклов не отражает реального движения воздушного потока в атмосфере.

В работах [7, 8] предложена и обоснована методика получения изображений атмосферного рассеивающего слоя при подсветке импульсным когерентным источником излучения и визуализации вихревого движения, возникающего в следе самолета, по корреляции изображений, полученных для разнесенных во времени импульсов. В работе [9] наряду с расчетами представлены результаты экспериментов по визуализации поля скоростей при подсвечивании лазером частиц снега, искусственного тумана CO₂ и при рассеянии лазерного излучения на неоднородностях показателя преломления.

В [7–9] численный анализ возможностей визуализации вихрей в атмосфере проводился на основе моделирования турбулентных искажений изображения подсвечиваемого участка рассеивающего слоя, возникающих при распространении зондирующего излучения. При этом предполагалось, что турбулентные неоднородности увлекаются вихревым потоком на протяжении всей трассы, а изображение слоя строилось на основе приближенного вычисления интегрального выражения в [8, (13)], связывающего распределения интенсивностей подсвечивающего и отраженного лазерных пучков с распределением интенсивности в изображении рассеивающего слоя.

* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Андрей Вячеславович Фалиц (falits@iao.ru).

В настоящей статье анализ возможностей визуализации поля скоростей по рассеянному излучению осуществляется путем последовательного моделирования подсвечивающего пучка в процессе распространения, отражения и формирования изображения, а не основывается на приближенных вычислениях интегральных соотношений работы [8]. Рассматривается ситуация, когда в вихревое движение вовлечены турбулентные неоднородности на выделенном участке трассы, а не на всей трассе.

Описание численного эксперимента визуализации и параметры моделирования

Схема численного эксперимента по визуализации движения в турбулизированном слое представлена на рис. 1.

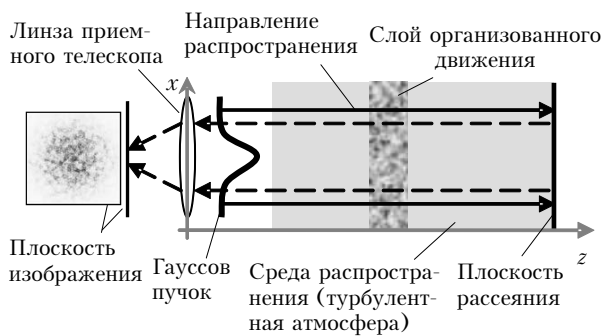


Рис. 1. Схема численного эксперимента

Когерентный гауссов пучок распространяется в турбулентной атмосфере и проходит сквозь атмосферный слой, подверженный вихревому или какому-то другому организованному движению. Прошедшее слой излучение рассеивается затем на диффузной (ламбертовской) поверхности. Случайный коэффициент отражения диффузной поверхности $U(\rho)$, где ρ – двумерный вектор в поперечной к пуску плоскости, задается соотношением [13]:

$$\langle U(\rho_1)U(\rho_2) \rangle = \frac{4\pi}{k^2} A(\rho_1)A(\rho_2)\delta(\rho_1 - \rho_2),$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны; $A(\rho)$ – средняя амплитуда коэффициента отражения; $\delta(\rho)$ – дельта-функция Дирака; угловые скобки означают усреднение по ансамблю. Как отмечается в [13, с. 36], эта модель при конкретизации амплитуды $A(\rho)$ широко используется для описания рассеяния лазерного излучения на атмосферном аэрозоле (см., в частности, [8]), так что отражателем в рассматриваемой задаче может служить и атмосферный рассеивающий слой.

После рассеяния излучение распространяется в обратном направлении и собирается линзой, за которой строится изображение в момент времени t_1 . Второе изображение, соответствующее моменту времени t_2 , строится аналогичным образом. При этом предпо-

лагается, что время корреляции коэффициента отражения диффузной поверхности τ_V и характерное время турбулентных процессов в атмосфере τ_T превышают время между экспозициями $\Delta t = t_2 - t_1$, поэтому отражающую поверхность и турбулентные неоднородности вне слоя организованного движения в течение Δt можно считать «замороженными», а турбулентные неоднородности в анализируемом слое смещаются в поперечной плоскости согласно заданным скоростям движения.

Моделирование распространения пучка света в турбулентной атмосфере выполнялось в соответствии с алгоритмом [9], построенным на основе численного решения параболического уравнения для комплексной амплитуды поля оптической волны методом расщепления по физическим факторам. Моделирование атмосферных неоднородностей осуществлялось посредством возмущений распространяющейся волны последовательностью случайных фазовых экранов со спектром флуктуаций фазы $\Phi_\psi(\kappa) = k^2 C_n^2 \Delta L \bar{\Phi}_n(\kappa)$, где ΔL – расстояние между экранами; $\bar{\Phi}_n(\kappa) = 0,033\kappa^{-11/3}$ – колмогоровский спектр турбулентных флуктуаций показателя преломления.

Один из слоев протяженностью ΔL , на которые разбивалась трасса при моделировании распространения, рассматривался как слой с организованным движением. Для этого слоя задавались отличное от других слоев значение структурной характеристики показателя преломления и круговое смещение турбулентных неоднородностей фазового экрана относительно его центра с возрастанием скорости движения вдоль радиуса из центра к периферии (рис. 2). Смещением неоднородностей фазового экрана за время между экспозициями $\Delta t = t_1 - t_2$ имитировалось поле скоростей в исследуемом слое.

В плоскости рассеяния формировалось комплексное поле, которое для моментов времени t_1 и t_2 задавалось выражениями

$$U^R(L, \rho, t_1) = U(L, \rho, t_1) \tilde{A}(\rho) \exp(i\phi(\rho)), \quad (1)$$

$$U^R(L, \rho, t_2) = U(L, \rho, t_2) \tilde{A}(\rho) \exp(i\phi(\rho)), \quad (2)$$

где $U(L, \rho, t)$ – комплексное поле оптического пучка, падающего на плоскость рассеяния; $\tilde{A}(\rho)$ – случайная функция, имитирующая случайную амплитуду коэффициента отражения, значения которой равномерно распределены от 0 до 1; $\phi(\rho)$ – случайная функция, имитирующая случайную фазу рассеянного поля, значения которой распределены равномерно от 0 до 2π [10, 11]. В соответствии с δ -коррелированностью коэффициента отражения V пространственные масштабы функций \tilde{A} и ϕ при моделировании определялись расстоянием между узлами расчетной сетки.

Моделирование распространения рассеянного поля $U^R(L, \rho, t)$ в обратном направлении от плоскости рассеяния к собирающей линзе телескопа осуществлялось численным решением параболического уравнения для поля волны как и при прямом распространении.

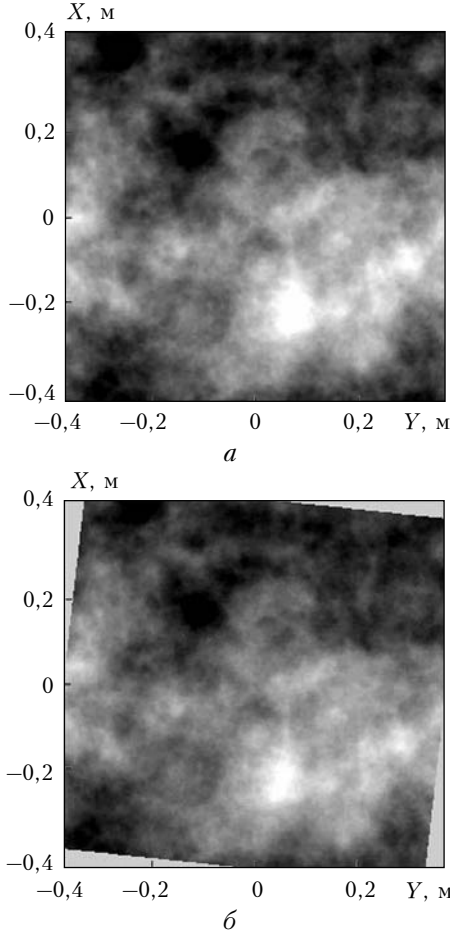


Рис. 2. Расположение неоднородностей в случайном фазовом экране для слоя с круговым движением в моменты времени t_1 (а) и t_2 (б)

Распределение поля в плоскости изображения рассчитывалось в соответствии с выражением [3]:

$$U^I(l, \mathbf{R}) = \frac{k}{2\pi i l} \exp\left\{ikl + \frac{ik\mathbf{R}^2}{2l}\right\} \int d\rho T(\rho) U(z, \rho) \times \exp\left\{-\frac{ik}{l} R\rho + ik\left(\frac{1}{l} - \frac{1}{f}\right)\rho^2\right\}, \quad (3)$$

где l – расстояние от линзы телескопа до плоскости резкого изображения; f – фокусное расстояние приемного телескопа; $\mathbf{R} = (x, y)$ – радиус-вектор в плоскости изображения; $R = |\mathbf{R}|$; $\rho = |\rho|$; $T(\rho)$ – функция зрачка линзы приемного телескопа; $U(0, \rho)$ – падающее на приемную линзу рассеянное поле. Расстояние между линзой и плоскостью резкого изображения определяется соотношением $1/L + 1/l = 1/f$.

Моделирование эксперимента, схема которого изображена на рис. 1, осуществлялось на массиве значений комплексного поля с размерностью $N_x \times N_y = 1024 \times 1024$ точек. Шаг дискретизации расчетной сетки h для поля составлял $0,62 \cdot 10^{-3}$ м. Гауссов пучок с начальным радиусом, равным $R_b = 0,15$ м, и длиной волны $\lambda = 0,57$ мкм распространяется вдоль трассы длиной $L = 0,5$ км. Рассеянное излучение со-

бирается линзой диаметром $D_t = 0,2$ м и фокусным расстоянием $f = 1$ м. Шаг дискретизации расчетной сетки h' поля в плоскости изображения равнялся $0,84 \cdot 10^{-6}$ м.

Трасса распространения разбивалась на слои толщиной $\Delta L = 62,5$ м. Слой, находящийся на расстоянии 312,5 м от начала трассы распространения, рассматривался как подвергающийся круговому движению, структурная характеристика показателя преломления в котором задавалась равной $C_n^2 = 3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$, а время между экспозициями – равным 2 мкс.

Для сравнительного анализа распределений интенсивности в изображениях пятна подсветки рассеивающей поверхности, полученных в разнесенные моменты времени, разница между которыми определяется смещением турбулентных неоднородностей вследствие их увлекаемости полем скоростей в слое организованного движения, была разработана итерационная процедура [12]. Суть ее заключается в том, что из анализируемых распределений интенсивности выделяются участки заданной размерности и затем рассчитываются суммы квадратов разностей интенсивностей выделенных участков изображений

$$\text{Sum}(j, q) = \sum_{s, g} \left(I_{n+s, m+g}^{(1)} - I_{n+s+j, m+g+q}^{(2)} \right)^2, \quad (4)$$

где $I^{(1)}$ и $I^{(2)}$ – значения интенсивностей в изображениях, полученных в различающиеся моменты времени; s и g – индексы массива значений интенсивности выделенного из общего распределения участка; j и q – индексы смещения выделенного двумерного массива. Размерность участков в рассматриваемых в статье примерах задавалась равной 64×64 пикселя.

На первом шаге рассчитываются суммы квадратов разностей интенсивностей в выделенных массивах с совпадающими индексами, т.е. при $j = q = 0$. После этого рассчитываются суммы квадратов разностей значений интенсивности при смещении выделенного участка на один пиксель по различным направлениям в одном из распределений. Минимальное значение из рассчитанных сумм

$$\text{Min}[\text{Sum}(0,0), \text{Sum}(-1,0), \text{Sum}(1,0), \text{Sum}(0,-1), \text{Sum}(0,1)] \quad (5)$$

указывает направление смещения выделенного участка изображения. Если индексы смещения для минимального значения из рассчитанных сумм оказываются отличными от нуля, то процедура повторяется с присвоением минимальной сумме квадратов разностей интенсивностей нулевых индексов смещения. Итерирование проводится до тех пор, пока минимальной из рассчитанных сумм (4) не окажется сумма с нулевыми значениями индексов смещения, т.е. $\text{Sum}(0,0)$.

Размерность элементарных участков, выделяемых из общего распределения интенсивности в изображении для анализа смещений, была выбрана равной $N_x^p \times N_y^p = 256 \times 256$. В итоге полное изображение разбивалось на 64 частично перекрывающихся участка. Угловая скорость регулярного смещения

неоднородностей в исследуемом слое задавалась равной $V = 54,25$ рад/с, что давало для максимальной линейной скорости на краю использовавшейся расчетной сетки величину, равную 20 м/с.

Результаты численного моделирования

На рис. 3, *a* представлено изображение подсвечиваемого участка рассеивающей диффузной поверхности, полученное с помощью численного моделирования распространения гауссова пучка по схеме, представленной на рис. 1, в случае, когда на трассе распространения и в исследуемом слое отсутствуют флуктуации показателя преломления среды.

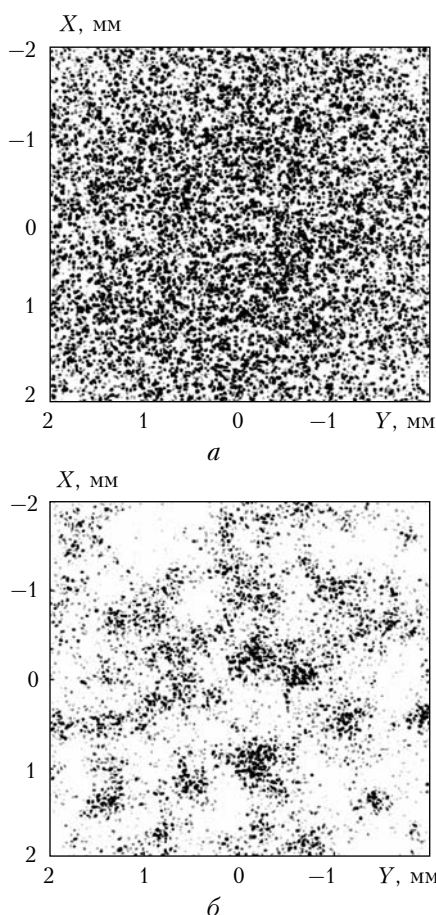


Рис. 3. Распределение интенсивности в изображении рассеивающей поверхности: *a* – в отсутствие флуктуаций показателя преломления; *b* – при наличии турбулентных флуктуаций показателя преломления в исследуемом слое

Распределение интенсивности в изображении представляет собой равномерно распределенную спекл-структуру. Средний размер спеклов в изображении определяется параметрами приемной линзы телескопа [10].

Если в слое, подверженном организованному движению, присутствуют флуктуации показателя преломления, то в падающем на рассеивающую поверхность поле появляются флуктуации, обусловленные искаже-

ниями, приобретаемыми волной при прохождении через неоднородности показателя преломления в слое. Изображение рассеивающего слоя в этом случае представляет собой спекл-структуру с неравномерной интенсивностью спеклов (рис. 3, *б*). Неравномерность интенсивности спеклов в различных областях изображения обусловлена флуктуациями интенсивности поля, падающего на рассеивающую поверхность.

На рис. 4, *a* представлено распределение интенсивности просвечиваемого слоя оптического излучения в плоскости рассеяния, когда структурная характеристика показателя преломления в слое с организованным движением задавалась равной $3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$.

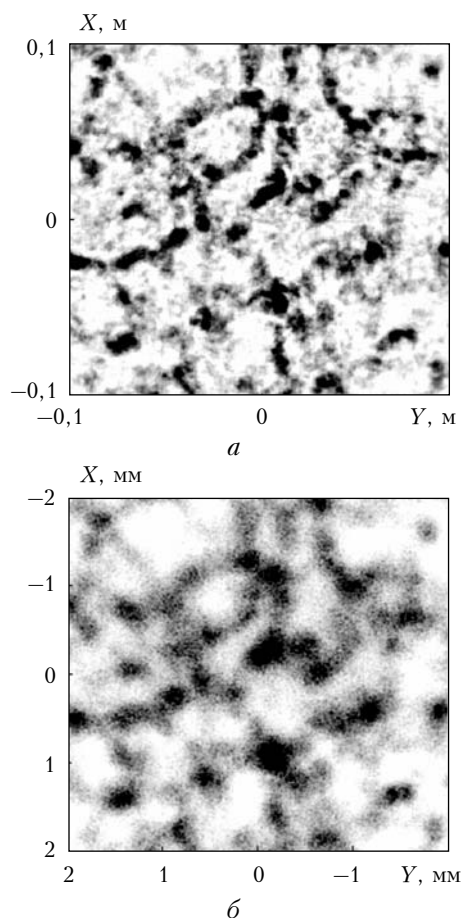


Рис. 4. Распределение интенсивности: *a* – оптического пучка в плоскости рассеяния; *b* – усредненное распределение интенсивности в изображении пятна подсветки рассеивающей поверхности по 30 независимым случайным реализациям

Если провести усреднение регистрируемых когерентных изображений рассеивающей поверхности (см. рис. 3, *б*) по статистически независимым случайным реализациям коэффициента отражения диффузной поверхности, разнесенным на время $T \gg \tau_V, \tau_T$, то структура флуктуаций интенсивности в изображении для рассматриваемой здесь модели отражения будет повторять структуру флуктуаций интенсивности просвечиваемого излучения в плоскости отражения. На рис. 4, *б* представлено распределение интенсивности в изображении после усреднения

по 30 независимым реализациям. Видно, что структура флуктуаций интенсивности в падающем на отражающую поверхность излучении (рис. 4, *a*) воспроизводится в изображении подсвечиваемого участка этой поверхности (рис. 4, *b*).

Таким образом, динамика изменения интенсивности подсвечиваемого оптического излучения в плоскости рассеяния напрямую связана с динамикой флуктуаций интенсивности усредненных когерентных изображений рассеивающей поверхности. Приведенные здесь результаты численного моделирования когерентных изображений диффузной поверхности согласуются с результатами теоретического анализа в [8].

Чтобы проследить динамику крупномасштабных флуктуаций интенсивности в когерентных изображениях рассеивающей поверхности, которая связана с динамикой неоднородностей показателя преломления в слое организованного движения через флуктуации интенсивности поля, падающего на поверхность, использовалась процедура фильтрации мелкомасштабных спекл-флуктуаций интенсивности в изображениях [12].

Визуализация поля скоростей в слое осуществлялась следующим образом. Путем численного моделирования строилась пара когерентных изображений рассеивающей поверхности для разных моментов времени. Первое изображение получалось путем численного моделирования процессов распространения, рассеяния, распространения в обратном направлении и формирования собственно изображения согласно схеме численного эксперимента. Второе изображение строилось аналогичным образом, но неоднородности показателя преломления в слое организованного движения смещались в поперечной плоскости по окружности (см. рис. 2). В получаемых таким образом изображениях общая картина распределения интенсивности складывается из мелкомасштабной спекл-структуры и крупномасштабных флуктуаций интенсивности. Посредством усреднения значений интенсивности в пикселях изображения по соседним пикселям устранялось влияние случайной спекл-структуры и выделялись крупномасштабные флуктуации интенсивности. Затем определялись направления смещений крупномасштабных флуктуаций интенсивности во втором изображении пары по сравнению с первым с использованием итерационной процедуры (4), (5).

На рис. 5 представлен результат визуализации движения неоднородностей в исследуемом слое.

Направление и длина векторов определяют направление и величину скорости. Результат визуализации хорошо отражает круговое поле скоростей, задававшееся при моделировании.

Турбулентные неоднородности показателя преломления на трассе распространения оптического излучения снижают эффективность визуализации поля скоростей в выделенном слое. На рис. 6, *a* представлен результат визуализации поля скоростей для той же геометрии и условий распространения, что и на рис. 5, но при наличии турбулентных флуктуаций показателя преломления (C_n^2 задавалось

равным $10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$) вне слоя организованного движения $C_n^2 = 3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$.

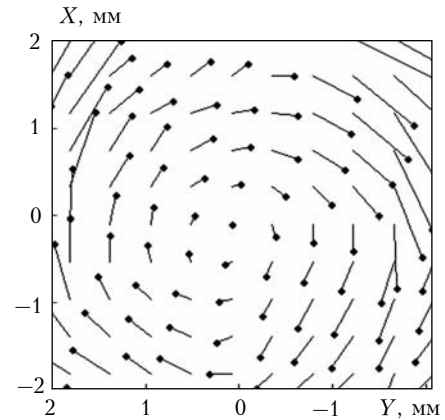


Рис. 5. Визуализация поля скоростей в слое

Из рис. 6, *a* видно, что качество картины визуализации поля скоростей ухудшилось. Улучшить качество визуализации при наличии турбулентных искажений на трассе распространения можно путем

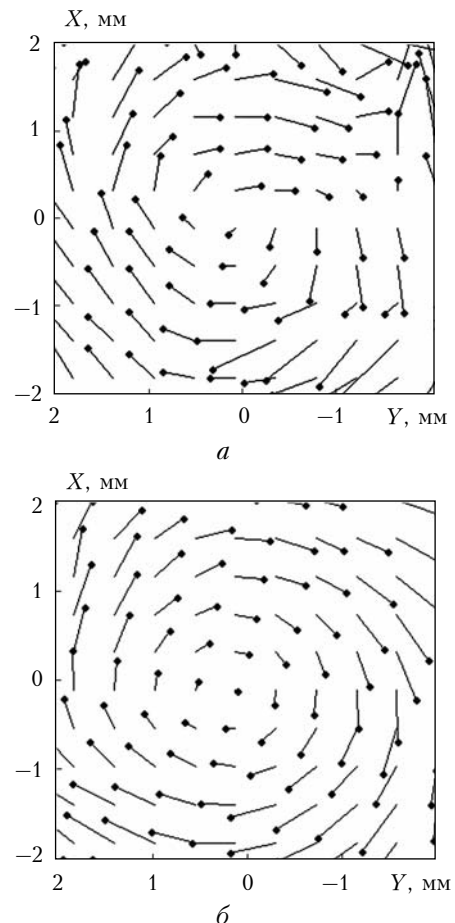


Рис. 6. Визуализация поля скоростей при наличии турбулентных искажений просвечиваемого излучения на трассе распространения, $C_n^2 = 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$; *a* – без усреднения; *b* – усреднение по 10 независимым реализациям парных изображений

Заключение

усреднения результатов оценки смещений элементарных участков, на которые разбивались полные изображения.

На рис. 6, б представлен результат усреднения по 10 независимым реализациям пар изображений рассеивающей поверхности. Видно, что усредненная картина визуализации поля скоростей (рис. 6) по качеству близка той, что получается в отсутствие турбулентных флуктуаций показателя преломления в среде распространения (см. рис. 5).

Если интенсивность турбулентных флуктуаций показателя преломления на пути распространения просвечивающего оптического пучка сравнима с интенсивностью турбулентных искажений в исследуемом слое, то визуализация движения становится невозможной. На рис. 7, а представлен результат визуализации поля скоростей, когда структурная характеристика показателя преломления на трассе задавалась такой же, как и в слое, $C_n^2 = 3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$.

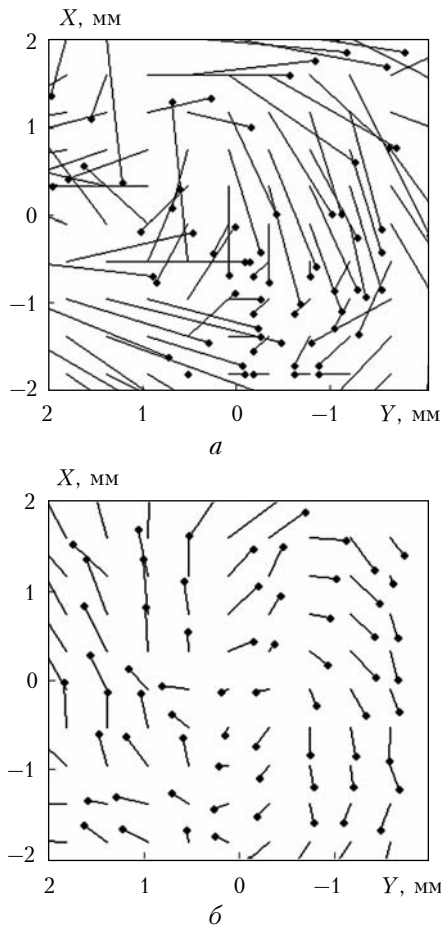


Рис. 7. Результат визуализации поля скоростей, когда флуктуации показателя преломления на трассе распространения сравнимы с флуктуациями в исследуемом слое, $C_n^2 = 3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$: а – без усреднения, б – усреднение по 30 независимым реализациям парных изображений

В этом случае ситуацию не спасает и применение процедуры усреднения. На рис. 7, б представлен результат визуализации при усреднении по 30 независимым реализациям парных изображений.

В статье проведен анализ возможности визуализации 2-D-поля скоростей в слое турбулентной атмосферы по флуктуациям интенсивности просвечивающего слой оптического излучения. Показано, что крупномасштабная структура флуктуаций интенсивности в когерентных изображениях диффузной поверхности, на которой рассеивается просвечивающее турбулентный атмосферный слой оптическое излучение, воспроизводит распределение флуктуаций интенсивности зондирующего пучка, приобретаемых им при прохождении слоя. Это позволяет по корреляции крупномасштабной структуры флуктуаций интенсивности когерентных изображений рассеивающей диффузной поверхности, полученных в различающиеся моменты времени, воспроизвести двумерное поле скоростей в просвечиваемом турбулентном слое.

Разработана процедура выделения крупномасштабной турбулентной структуры флуктуаций интенсивности из мелкоспеклованных когерентных изображений, и выполнены численные эксперименты по визуализации заданного поля скоростей в просвечиваемом слое. Установлено, что с увеличением турбулентных искажений просвечивающего слой оптического пучка на участке трассы вне слоя эффективность рассмотренного способа визуализации снижается. Если турбулентные флуктуации показателя преломления на трассе вне слоя сравнимы с флуктуациями показателя преломления в исследуемом слое, то качество визуализации поля скоростей в слое становится низким даже при использовании усреднения регистрируемых пар изображений по большому количеству реализаций. Рассмотренная методика может найти применение в устройствах визуализации следовых самолетных вихрей, где создаются более интенсивные флуктуации показателя преломления воздуха, чем в естественных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 09-05-00054.

1. *Abbrecht H.-E., Borys M., Damaschke N., Tropea C.* Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Series: Experimental fluid Mechanics. Springer-Verlag, 2003. 738 p.
2. *Франсон М.* Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.
3. *Бакут П.А., Мандросов В.И., Матвеев И.Н., Устинов Н.Д.* Теория когерентных изображений / Под ред. Н.Д. Устинова. М.: Радио и связь, 1987. 264 с.
4. *Fomin N.A.* Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements. Springer-Verlag, 1998. 290 p.
5. *Raffel M., Willert C., Kompenhans J.* Particle image velocimetry: A practical guide. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 253 p.
6. *Raffel M., Richard H., Ehrenfried K., Van der Wall B., Burley C., Beaumier P., McAlisret K., Pengel K.* Recording and evaluation methods of PIV investigations on a helicopter rotor model // Experiments in Fluids. 2004. V. 36. N 1. P. 146–156.
7. *Banakh V., Falits A., Halldorsson T.* Simulation of retrieval of wind velocity and vortex observation in a turbulent atmosphere by speckle photography // Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmos-

- pheric Remote Sensing II // Proc. SPIE. 2006. V. 6367. P. 121–128.
8. *Банах В.А.* Моделирование изображения подсвечиваемого лазером рассеивающего слоя в турбулентной атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 4. С. 303–307.
 9. *Halldorsson T., Langmeier A., Prucklmeier A., Banakh V.A., Falits A.V.* Particle and speckle imaging velocimetry applied to a monostatic LIDAR // Proc. SPIE. 2006. V. 6522. P. 65220A-1–65220A-9.
 10. *Goodman J.W.* Statistical Optics. N.Y.: Wiley, 1985. 550 p.
 11. *Nelson D.H., Walters L.D., MacKerrow E.P., Schmit M.J., Quick C.R., Porch W.M., Petrin R.R.* Wave optics simulation of atmospheric turbulence and reflective speckle effects in CO₂ lidar // Appl. Opt. 2000. V. 39. N 12. P. 1857–1871.
 12. *Банах В.А., Фалиц А.В.* Визуализация поля скоростей в атмосфере по рассеянному излучению // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 890–896.
 13. *Банах В.А., Миронов В.Л.* Локационное распространение лазерного излучения в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1986. 173 с.

V.A. Banakh, A.V. Falits. Visualization of velocity fields in an atmospheric turbulent layer by means of passing of optical radiation through the layer.

Performance of visualization of 2-D velocity fields in a turbulent layer of atmosphere based on intensity fluctuations of optical radiation, passing through that layer, is analyzed in the paper. The scheme is considered, where the laser radiation after passing through the turbulent layer is scattered by the diffuse surface and the backscattered radiation is received by the telescope. Then the coherent images of a laser illuminated area on a target, registered in different moments of time, are correlatively compared. It is shown that based on correlation of large-scale structure of intensity fluctuations in the images, the visualization of 2-D velocity fields in an atmospheric turbulent layer is possible.