

Восстановление профиля скорости ветра по флуктуациям интенсивности лазерного пучка в приемном телескопе

Д.А. Маракасов*

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

Поступила в редакцию 4.12.2008 г.

Предложена модификация алгоритма восстановления профилей поперечных к оптической оси компонент скорости ветра из пространственно-временной статистики интенсивности лазерного пучка в приемном телескопе на прямой трассе. Показано, что введение в приемный тракт собирающей линзы позволяет улучшить точность восстановления на участке трассы, прилегающем к приемнику. Возможность восстановления профилей с помощью предложенного алгоритма продемонстрирована в численных экспериментах по замкнутой схеме.

Ключевые слова: оптическая турбулентность, лазерный пучок, профиль ветра, восстановление; optical turbulence, laser beam, wind profile, reconstruction.

Введение

В последнее время развиваются методы профилирования ветра по турбулентным флуктуациям интенсивности оптической волны. Измерители ветра и структурной характеристики на основе методики SCIDAR позволяют восстанавливать профили с разрешением в несколько сотен метров по взаимной корреляции интенсивностей волн, возбуждаемых парой источников [1, 2]. Они находят применение при исследовании высотных профилей с помощью телескопов астрономических обсерваторий, когда в качестве источников используются яркие звезды [3–5]. При измерениях в приземном слое предпочтительнее использовать способы профилирования по флуктуациям оптической волны, порождаемой одним источником. В работе [6] показана возможность восстановления профиля структурной характеристики по автокорреляционной функции принимаемой интенсивности. Основным недостатком этого метода – плохое разрешение по трассе – был устранен в [7] посредством регистрации двумерных распределений интенсивности в нескольких плоскостях за формирующей изображением телескопической системой.

При измерениях скорости ветра в приземном слое необходимо учитывать то, что в отличие от измерителей высотных профилей на основе SCIDAR просвечивание осуществляется не плоской (сферической) волной, а лазерным пучком конечного радиуса. В работах [8, 9] продемонстрирована возможность профилирования ветра с помощью вейвлет-анализа флуктуаций интенсивности лазерного пучка на основе сопоставления различным участкам

трассы флуктуаций интенсивности с соответствующими пространственными масштабами. Основой подхода, предложенного в [10], являются интегральные соотношения, связывающие профили ветра и структурной характеристики и пространственно-временные спектры интенсивности лазерного пучка с гауссовым амплитудным профилем, и продемонстрированная в [10–12] возможность извлечения из них информации о профиле ветра.

В настоящей статье предлагается обобщение метода профилирования ветра, изложенного в [10]. В приемный тракт измерителя введена собирающая линза, что позволяет усилить флуктуации интенсивности, порожденные неоднородностями плотности воздуха, расположенными вблизи приемного конца трассы, и улучшить таким образом точность определения профиля. Получено выражение для пространственно-временной корреляционной функции интенсивности лазерного пучка в приемном телескопе с учетом его диафрагмирования в плоскости объектива. Приведены основные соотношения, позволяющие восстановить профили поперечных к оптической оси компонент скорости ветра из флуктуаций интенсивности пучка. Представлены результаты численных экспериментов по восстановлению профиля скорости ветра.

1. Постановка задачи и основные соотношения

Пусть лазерный источник, расположенный в плоскости $x = 0$, формирует поле с комплексной амплитудой $U_0(\mathbf{p})$, $\mathbf{p} = \{y, z\}$ – вектор, перпендикулярный оптической оси x . Пучок, возмущенный турбулентной атмосферой, проходит через объектив приемного телескопа, находящегося в плоскости

* Дмитрий Анатольевич Маракасов (mda@iao.ru).

$x = L$, и регистрируется матрицей приемников (видеокамерой) в плоскости $x = l + L$ (рис. 1).

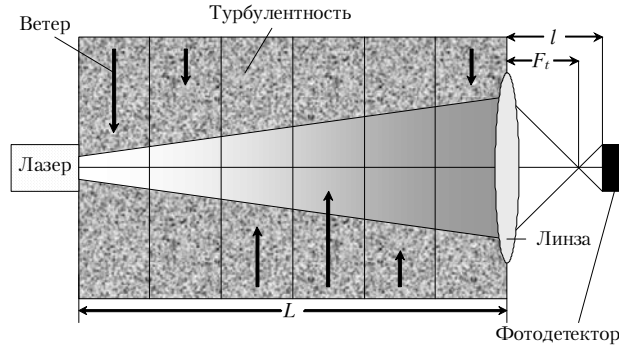


Рис. 1. Геометрия задачи

Найдем пространственно-временную корреляционную функцию интенсивности в плоскости регистрации $x = l + L$:

$$K_I(\rho_1, \rho_2; \tau) = \langle I(\rho_1, t_1) I(\rho_2, t_2) \rangle - \langle I(\rho_1, t_1) \rangle \langle I(\rho_2, t_2) \rangle, \quad (1)$$

где $I(\rho_i, t_i)$ – интенсивность волны в момент времени t_i в точке ρ_i плоскости $x = l + L$; $\tau = t_1 - t_2$; угловые скобки $\langle \dots \rangle$ – усреднение по ансамблю реализаций.

Рассмотрим режим слабой оптической турбулентности и применим для описания пространственно-временных изменений поля показателя преломления гипотезу «замороженной» турбулентности Тейлора [13]. Корреляционную функцию (1) будем искать аналогично [11], ограничиваясь слагаемыми, линейными по отношению к структурной характеристике показателя преломления $C_n^2(x)$. Для гауссовых комплексной амплитуды поля источника и функции пропускания объектива

$$U_0(\rho) = U_0 \exp\left\{-\frac{\rho^2}{2a^2} - ik\frac{\rho^2}{2F}\right\}; \quad T(\rho) = T_0 \exp\left\{-\frac{\rho^2}{2a_t^2}\right\},$$

где k – волновое число; U_0 – амплитуда на оптической оси; a – эффективный радиус пучка; F – его фокусное расстояние; T_0 – коэффициент пропускания на оптической оси; a_t – эффективный радиус объектива, выражение для пространственно-временной корреляционной функции интенсивности лазерного пучка в приемном телескопе имеет тот же вид, что и каждое из слагаемых в выражении для корреляционной функции пучка на трассе с отражением от диффузной поверхности, полученном в работе [11]:

$$K_I(\rho_1, \rho_2; \tau) = K_0 \exp\left(-(\rho_1^2 + \rho_2^2)/a_r^2\right) \times \int_0^1 d\xi \int d\mathbf{k} C_n^2(L\xi) \Phi_0(\mathbf{k}) \times \times \text{Re}\left\{e^{ik\mathbf{V}(L\xi)\tau} [\exp(-\text{Re}\beta(\xi)\mathbf{k}^2 + \gamma(\xi)\rho_1\mathbf{k} + \gamma^*(\xi)\rho_2\mathbf{k}) - \exp(-\beta(\xi)\mathbf{k}^2 + \gamma(\xi)(\rho_1 - \rho_2)\mathbf{k})]\right\}, \quad (2)$$

где $\Phi_n(\mathbf{k}, x) = \Phi_0(\mathbf{k})C_n^2(x)$ – трехмерный спектр показателя преломления [14]; $\xi = x/L$; \mathbf{k} – вектор пространственных частот, перпендикулярный оптической оси; $\mathbf{V}(x)$ – скорость ветра в текущей точке трассы. Отличаются лишь значения параметров:

$$\gamma(\xi) = \frac{k}{l} \left(\xi - \frac{ik}{Lz_0} (1 - \xi) \right) \frac{z_0}{z_0 z_t + k^2/L^2};$$

$$\beta(\xi) = \frac{l}{k} \gamma(\xi) \left(\xi + \frac{iL}{k} z_t (1 - \xi) \right);$$

$$a_r = \frac{l}{k} \left\{ \text{Re} \left(\frac{z_0}{z_0 z_t + k^2/L^2} \right) \right\}^{-1/2};$$

$$K_0 = 4\pi k^2 L \left(\frac{k^2 U_0 T_0}{iL|z_0 z_t + k^2/L^2|} \right)^4;$$

$$z_0 = \frac{1}{a^2} - \frac{ik}{L} \left(1 - \frac{L}{F} \right), \quad z_t = \frac{1}{a_t^2} - \frac{ik}{L} \left(1 + \frac{L}{l} - \frac{L}{F_t} \right),$$

где F_t – фокусное расстояние объектива.

Полученное выражение является обобщением результатов [10], где рассмотрены флуктуации интенсивности гауссова пучка в атмосфере, регистрируемого матрицей фотодетекторов без приемного объектива. Переход к соотношениям, приведенным в [10], можно осуществить, полагая $F_t \rightarrow \infty$, $T_0 \rightarrow 1$, $a_t \rightarrow \infty$ и устремляя к нулю расстояние l между объективом и плоскостью регистрации. При этом на приемном конце трассы $\xi = 1$ имеем $\gamma(1) = i$ и $\beta(1) = 0$, вследствие чего выражение в квадратных скобках в (2) обращается в нуль, а участок, прилегающий к приемнику, практически не дает вклада в корреляционную функцию интенсивности. При наличии линзы в приемном тракте, в особенности если ее эффективный радиус достаточно велик, так что $\text{Re}(z_t) \ll |\text{Im}(z_t)|$, подынтегральное выражение в (2) заметно отличается от нуля при любых ξ , что дает возможность восстанавливать профиль ветра на всей трассе. Необходимо отметить также, что в отличие от трассы с отражением [11] фокусировка изображения в приемном канале при $1/l + 1/L = 1/F_t$ не улучшает разрешение на участке трассы, прилегающем к объективу, по сравнению с регистрацией изображения без приемной линзы.

2. Численные эксперименты по восстановлению профиля скорости ветра

Для определения профиля ветра будем использовать процедуру, аналогичную предложенной в [11]. На первом этапе рассчитываются пространственно-временные спектры

$$g_{y,z}(\omega, \mathbf{q}) = \frac{|q| a^{10/3}}{2^{14/3} \pi^4 K_0 \Phi_0(\mathbf{q})} \times$$

$$\times \int d\rho_1 d\rho_2 d\tau K_I(\rho_1, \rho_2; \tau) \exp[i\omega\tau + iq\mathbf{e}_{y,z}(\rho_1 - \rho_2)], \quad (3)$$

где ω – частота; $\mathbf{e}_{y,z}$ – орты в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, вектор

пространственных частот ориентирован вдоль выделенной оси $\mathbf{q} = q\mathbf{e}_{y,z}$. Отметим, что каждой точке трассы ξ в спектре (3) соответствует прямая

$$\frac{\omega}{q} = \alpha = \frac{a_r^2 \operatorname{Im} \gamma(\xi)}{2 \operatorname{Re} \eta(\xi)} V_{y,z}(\xi L) \quad (4)$$

в плоскости частот $\{\omega, q\}$, проходящая через начало координат, наклон которой пропорционален проекции скорости ветра в этой точке на выделенную ось. Здесь $V_{y,z}(\xi L) = \mathbf{V}(\xi L)\mathbf{e}_{y,z}$ – проекция вектора скорости на выделенную ось; $\eta(\xi) = \beta(\xi) - \frac{a_r^2 \gamma^2(\xi)}{2}$.

Изменения спектральной плотности вдоль прямой $\omega/q = \alpha$ никак не зависят от скорости ветра и определяются только координатой этой точки трассы ξ и соответствующим значением структурной характеристики $C_n^2(L\xi)$. Таким образом, на первом этапе изображение фильтруется по значениям проекций скорости поперечного смещения неоднородностей интенсивности.

На втором этапе значениям α сопоставляются значения координаты ξ . Для этого вычислим интеграл

$$f_{y,z}(\alpha, p) = \int_0^\infty g_{y,z}(\alpha q, q) \exp(ipq^2) q dq.$$

В соответствии с результатами [11] абсолютная величина $|f_{y,z}(\alpha, p)|$ при фиксированном α будет иметь максимум в точке

$$p = \frac{a_r^4}{4} \operatorname{Im} \left(\frac{\gamma^2(\xi)}{\eta(\xi)} \right). \quad (5)$$

Координата точки максимума не зависит от скорости ветра, что позволяет решить уравнение (5) относительно переменной ξ , после чего проекции скорости ветра в этой точке трассы легко найдутся из соотношения (4).

Для вычисления компонент пространственно-временного спектра $g_{y,z}(\omega, q)$ было проведено компьютерное моделирование распространения лазерного пучка в турбулентной атмосфере в соответствии с алгоритмом, разработанным в [15].

Моделирование атмосферных неоднородностей осуществлялось посредством возмущения распространяющейся волны равноотстоящими друг от друга случайными фазовыми экранами с колмогоровским спектром флуктуаций фазы. Поперечная составляющая скорости ветра на трассе моделировалась поперечными смещениями положений фазовых экранов со временем на расстоянии $\mathbf{V}(x)\tau$ в соответствии с заданным профилем скорости ветра. Полученные реализации интенсивности в плоскости фотодетектора обрабатывались согласно изложенному выше алгоритму профилирования.

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма, когда фокус объектива находится между фотодетектором и линзой ($l > F_t$), были заданы следующие значения параметров моделиро-

вания: длина трассы $L = 1000$ м, длина волны $\lambda = 0,5$ мкм, $C_n^2 = 4 \cdot 10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$, параметры приемного телескопа $F_t = 5$ см, $a_t = 5$ см, расстояние между объективом и фотодетектором $l = 6$ см. Лазерный пучок был задан коллимированным с начальным радиусом $a = 10$ см. Моделирование распространения пучка в атмосфере ($0 \leq x \leq L$) проводилось на сетке размером 512×512 элементов в пространстве с шагом 1 мм. В плоскости фотодетектора выполнялось масштабирование расчетной сетки с коэффициентом гомотетии $l/F_t - 1$, так что ее шаг уменьшался до 0,2 мм. Спектр оценивался по 20 реализациям распределений интенсивности длительностью, равной 256 отсчетам во времени с задержкой 1 мс.

Результаты расчетов логарифма нормированного пространственно-временного спектра (3) показаны на рис. 2.

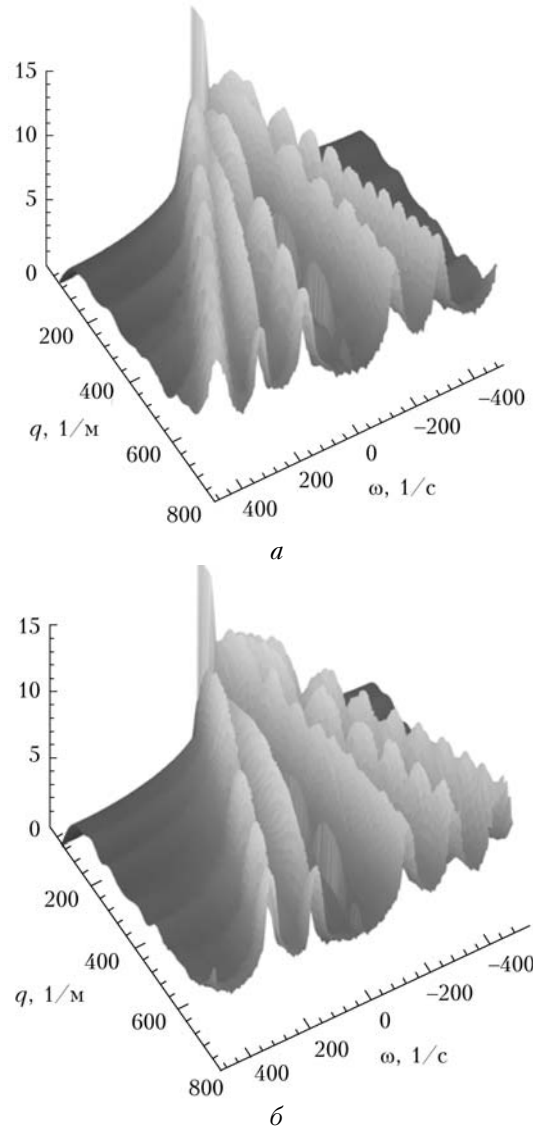


Рис. 2. Проекция пространственно-временного спектра интенсивности в плоскости приема: *a* – *z*-компонента, *b* – *y*-компонента

Каждый фазовый экран отображается в виде луча, вдоль которого спектральная плотность принимает значительно большие значения, чем в его окрестности.

На рис. 3 представлены результаты восстановления профилей y -компоненты скорости ветра. Исходные профили представлены сплошной линией, восстановленные — штриховой линией. Вдоль всей трассы профили скорости ветра восстановлены с ошибкой, не превосходящей 20 м по координате и 0,02 м/с по скорости.

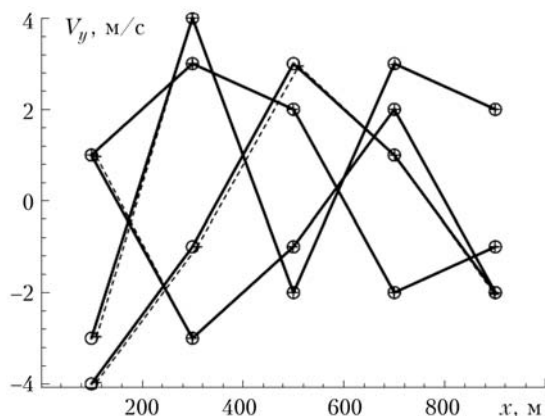


Рис. 3. Исходные (сплошные линии, кружки — положение экранов) и восстановленные (штриховые линии, крестики — положение экранов) профили y -компоненты скорости ветра

Результаты численного эксперимента показывают, что предложенный алгоритм позволяет восстанавливать профиль скорости ветра из флуктуаций интенсивности лазерного излучения, прошедшего через приемный объектив, с хорошей точностью на всей трассе.

Заключение

Полученные формулы описывают пространственно-временную корреляционную функцию флуктуаций интенсивности лазерного пучка, прошедшего трассу в турбулентной атмосфере в одном направлении в условиях слабых флуктуаций с учетом дифрактирования пучка приемным объективом. Показано, что хотя наличие объектива с гауссовой функцией пропускания качественно не изменяет вид корреляционной функции, соответствующий выбор параметров приемного устройства позволяет существенно улучшить восстановление профиля ветра на приемном конце трассы. Возможность восстановления профиля на всей трассе продемонстрирована в численных экспериментах по замкнутой схеме.

D.A. Marakasov. Wind profiling reconstruction from laser beam intensity fluctuations in a receiving telescope.

In this paper the modification of the algorithm of profile reconstruction of wind components transverse to the optical axis from spatiotemporal statistics of laser beam intensity in a receiving telescope, is proposed. It is shown, that the presence of the collecting lens in the receiving tract improves the accuracy of profile reconstruction at the sensing path end. The possibility of wind profiling with the algorithm proposed is demonstrated in the end-to-end computer experiments.

Статья подготовлена при поддержке РФФИ (грант № 09-05-00054).

1. Kluckers V.A., Wooder N.J., Nicholls T.W., Adcock M.J., Munro I., Dainty J.C. Profiling of atmospheric turbulence strength and velocity using generalized SCIDAR technique // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1998. V. 130. N 1. P. 141–155.
2. Johnston R., Dainty C., Wooder N., Lane R. Generalized scintillation detection and ranging results obtained by use of a modified inversion technique // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. N 32. P. 6768–6772.
3. Prieur J.-L., Avila R., Daigne G., Vernin J. Automatic determination of wind profiles with generalized SCIDAR // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 2004. V. 116. N 822. P. 778–789.
4. Prieur J.-L., Daigne G., Avila R. SCIDAR measurements at Pic du Midi // *Astron. and Astrophys.* 2001. V. 371. N 1. P. 366–377.
5. Tokovinin A., Vernin J., Ziad A., Chun M. Optical turbulence profiles at Mauna Kea measured by MASS and SCIDAR // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 2005. V. 117. N 830. P. 395–400.
6. Ochs G.R., Wang T.-I., Lawrence R.W., Clifford S.F. Refractive-turbulence profiles measured by one-dimensional spatial filtering of scintillations // *Appl. Opt.* 1976. V. 15. N 10. P. 2504–2510.
7. Garnier D. Profiling atmospheric turbulence with single star SCIDAR: PhD thesis. National University of Ireland. Galway, Ireland, 2007.
8. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П. Вейвлет-профилирование скорости ветра по флуктуирующей интенсивности лазерного пучка, распространяющегося в атмосфере // *Оптика и спектроскопия.* 2008. Т. 105. № 4. С. 698–705.
9. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П. Локализация турбулентных потоков по флуктуациям интенсивности просвечивающего лазерного излучения // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21. № 7. С. 640–647.
10. Banakh V.A., Marakasov D.A. Wind profiling based on the optical beam intensity statistics in a turbulent atmosphere // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 2007. V. 24. N 20. P. 3245–3254.
11. Банах В.А., Маракасов Д.А. Восстановление профиля ветра из флуктуаций интенсивности лазерного пучка, отраженного в турбулентной атмосфере // *Квант. электрон.* 2008. Т. 38. № 4. С. 404–408.
12. Banakh V.A., Marakasov 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.
13. Panofsky H.A., Dutton J.A. *Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications.* Wiley Interscience Publications. New York; Singapore, 1983. 397 p.
14. Татарский В.И. *Распространение волн в турбулентной атмосфере.* М.: Наука, 1967. 548 с.
15. Banakh V.A., Falits A.V. Turbulent statistics of laser beam intensity on ground-to-satellite optical link // *Proc. SPIE.* 2001. V. 4678. P. 132–143.