

В.А. Банах, А.В. Фалиц, И.Н. Смалихо, Ш. Рам*

Оценка параметров турбулентности из измерений скорости ветра импульсным когерентным доплеровским лидаром

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия
**Институт физики атмосферы, г. Оберпфaffenхофен, Германия*

Поступила в редакцию 12.10.2005 г.

Представлены результаты восстановления параметров турбулентного поля ветра в пограничном слое атмосферы по данным измерений скорости ветра когерентным импульсным 2-мкм доплеровским лидаром. Полученные данные демонстрируют возможность исследования атмосферной турбулентности с использованием коммерческих когерентных доплеровских лидарных систем.

Исследованию возможностей оценки параметров турбулентности по данным измерений скорости ветра когерентными доплеровскими лидарами посвящено значительное число работ. Рассмотрены методы и особенности восстановления турбулентных параметров из измерений скорости ветра доплеровскими системами с непрерывными и импульсными лазерными источниками. Результаты этих исследований можно найти в работах, приведенных в списке литературы [1].

Отметим, что в пограничном слое атмосферы для этих целей с успехом могут использоваться когерентные доплеровские лидары с непрерывным лазерным источником. Так, в [2] приведены примеры восстановления высотных профилей скорости диссипации кинетической энергии турбулентности из лидарных оценок скорости ветра, полученных с непрерывным CO₂-лазером.

В работах [3–6] проводится анализ возможностей восстановления параметров ветровой турбулентности по скорости ветра, оцениваемой из дан-

ных когерентного импульсного лидара. В частности, разработан метод параметрической подгонки определения скорости диссипации кинетической энергии турбулентности по пространственной структурной функции флуктуаций скорости ветра [6]. В данной статье приводятся результаты восстановления скорости диссипации кинетической энергии турбулентности этим методом и определения других параметров турбулентности из измерений ветра 2-мкм импульсным доплеровским лидаром.

Использованные для восстановления скорости диссипации турбулентной энергии экспериментальные данные получены с помощью 2-мкм импульсного лидара, разработанного фирмой Coherent Technologies, Inc. (CTI, Louisville, CO 80027 USA [7]). Измерения проводились в мае–июне 2002 г. вблизи г. Тулуза (Франция). Частота следования импульсов этого лидара составляет 500 Гц, общая длительность импульса 400 нс, по уровню e^{-1} примерно 120 нс. Примеры сигналов начального и рассеянного аэрозолем импульсов приведены на рис. 1.

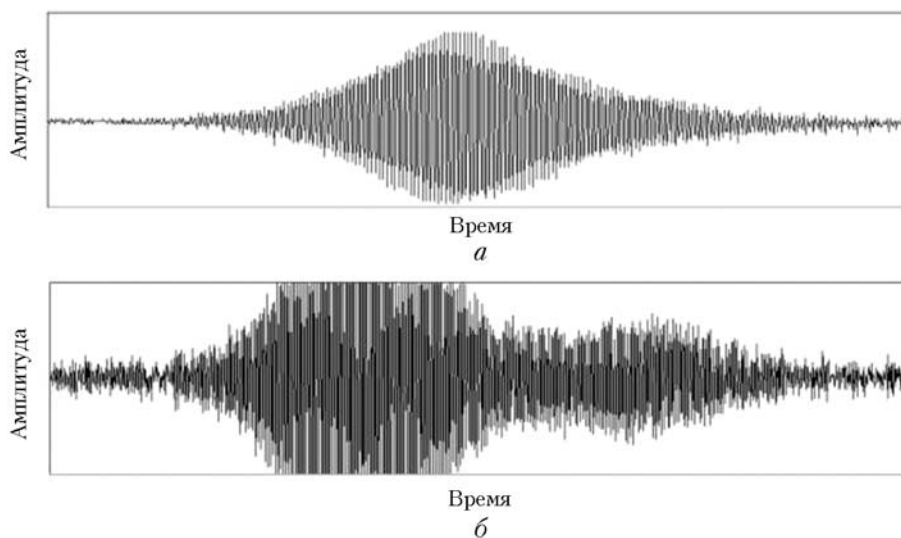
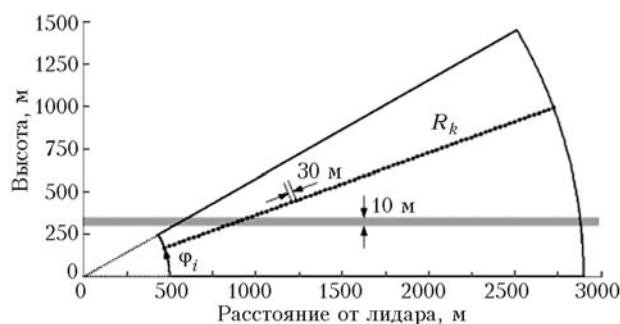


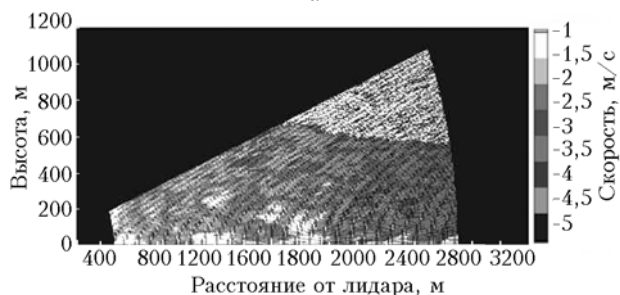
Рис. 1. Пример записи сигналов зондирующего импульса: а – начальный импульс, б – рассеянный

Как показывают расчеты [5], такие характеристики зондирующего импульса позволяют получать оценки радиальной (вдоль оси зондирующего пучка) компоненты скорости ветра $\hat{V}_D(R)$ с осреднением по объему зондирования, имеющему протяженность 51 м в продольном направлении по уровню e^{-1} , на расстояниях R_i , $i = n, n + 1, \dots, n - \text{целое}$, отстоящих друг от друга на 0,3 м. Имеется «мертвая» зона вблизи лидара протяженностью 500 м.

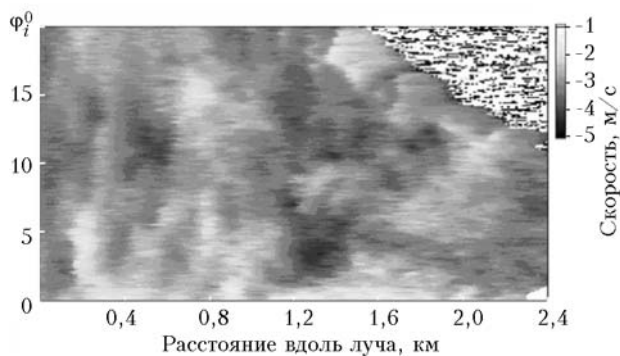
Геометрия измерений и пример развертки доплеровских лидарных оценок скорости ветра в плоскости сканирования показаны на рис. 2.



а



б



в

Рис. 2. Схема эксперимента и примеры 2-D-распределений лидарных оценок скорости ветра

Сканирование осуществлялось в вертикальной плоскости в диапазоне углов места Φ_i от нуля до 30° , скорость сканирования 2 град/с, время одного сканирования примерно 15 с. Число аккумулярованных импульсов для оценки одного значения скорости равнялось 25, так что в эксперименте ско-

рость ветра оценивалась с частотой 20 Гц и пространственное разрешение измерений R_k составляло 30 м. На рис. 2,б показан пример 2-D-распределения оценок скорости ветра вдоль направления зондирования в вертикальной плоскости за время сканирования 10 с, полученных при усреднении по 25 «выстрелам». В верхнем правом углу на этом рисунке прописывается нижняя граница облачности.

Известны три метода определения скорости диссипации турбулентной энергии ϵ из измерений скорости ветра когерентными доплеровскими лидарами: а) по ширине доплеровского спектра [2, 8]:

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{\Delta z} \left[\frac{\langle \sigma_{ft}^2 \rangle_E}{(2/\lambda)^2 0,247 C_K} \right]^{3/2}, \quad (1)$$

где $\langle \sigma_{ft}^2 \rangle_E$ – среднее по ансамблю и по времени турбулентное уширение доплеровского спектра; Δz – продольный размер объема зондирования; λ – длина волны лазерного источника лидара; $C_K \approx 2$ – постоянная Колмогорова;

б) по разности пространственных структурных функций скорости ветра, измеряемых лидаром [5]:

$$\hat{\epsilon} = \left[\frac{\hat{D}_{\hat{V}_D}(r_2) - \hat{D}_{\hat{V}_D}(r_1)}{C_K \left(r_2^{2/3} - r_1^{2/3} \right)} \right]^{3/2}, \quad (2)$$

где

$$\hat{D}_{\hat{V}_D}(r_i) = \langle [\hat{V}_D(R_k + r_i) - \hat{V}_D(R_k)]^2 \rangle_E$$

– экспериментальная оценка структурной функции скорости; $i = 1, 2$; r_1, r_2 – пространственный разность точек измерения скорости, $r_2 > r_1$;

в) по измеряемым лидаром пространственным структурным функциям скорости ветра, которые подгоняются к моделируемым для условий эксперимента при различных значениях внешнего масштаба турбулентности путем минимизации функционала

$$\sum_i \left[\overline{\hat{D}_a(r)} - \overline{D_a(L_{V_i}, r)} \right]^2, \quad (3)$$

где

$$\overline{\hat{D}_a(r)} = \hat{D}_{\hat{V}_D}(r) / \hat{D}_{\hat{V}_D}(r_{\max})$$

– нормированная оценка пространственной структурной функции, найденная из экспериментальных данных,

$$\overline{D_a(L_{V_i}, r)} = D_{V_D}(L_{V_i}, r) / D_{V_D}(L_{V_i} = \infty, r)$$

– пространственная структурная функция скорости ветра в турбулентной атмосфере, моделируемая при

различных значениях внешнего масштаба турбулентности L_V .

Применимость метода «б» ограничена расстояниями между точками измерения скорости ветра r_i , не превышающими внешний масштаб турбулентности; метод «а», как показано в [9], также требует поправок, учитывающих внешний масштаб турбулентности. Поэтому мы использовали метод «в» определения ε из лидарных данных при восстановлении высотного профиля скорости диссипации кинетической энергии, свободный от этих ограничений. Параметрическая подгонка измеряемых структурных функций скорости ветра к моделируемым при различных значениях внешнего масштаба турбулентности по формуле (3) позволяет определить значения внешнего масштаба на высотах, для которых осуществляется оценка структурной функции. Пример семейства моделируемых нормированных пространственных структурных функций представлен на рис. 3.

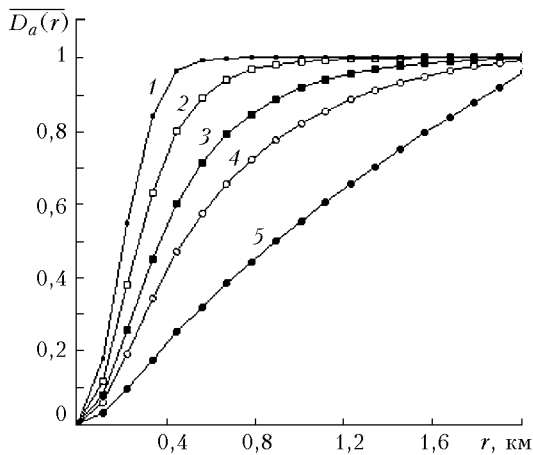


Рис. 3. Расчетные нормированные пространственные структурные функции: 1 – $L_V = 50$; 2 – 150; 3 – 300; 4 – 500; 5 – 1000

Из теории турбулентности известна формула

$$\varepsilon = \frac{1,887 \sigma_V^3}{C_K^{3/2} L_V}, \quad (4)$$

связывающая скорость диссипации кинетической энергии турбулентности ε , внешний масштаб L_V и дисперсию флуктуаций скорости ветра σ_V^2 . После того как произведена оценка внешнего масштаба флуктуаций скорости ветра, можно найти нормировочный коэффициент и тем самым получить оценку дисперсии флуктуации скорости ветра σ_V^2 [6]. Затем по формуле (4) оценить скорость диссипации кинетической энергии.

Для определения высотных профилей параметров турбулентности сектор сканирования лидара (см. рис. 2) разбивался по вертикали на слои толщиной 10 м. Всем оценкам структурной функции для разносов, не выходящих по высоте за пределы

выбранного слоя, приписывалась высота этого слоя. Таким образом, для каждого слоя находилась структурная функция и по ней определялись внешний масштаб, дисперсия и скорость диссипации кинетической энергии. Разбивка сектора сканирования на слои позволяет строить высотные профили параметров турбулентности.

На рис. 4 представлены высотные профили внешнего масштаба, дисперсии флуктуации скорости ветра и скорости диссипации кинетической энергии, найденные путем усреднения по всем отдельным реализациям таких профилей, восстановленным по описанной выше методике из всех лидарных данных, полученных с 14 ч 52 мин до 16 ч 40 мин местного времени 30 мая 2002 г. Несмотря на то что лидарные данные о скорости ветра в эксперименте получены до высоты 2,5 км вследствие геометрии сканирования, статистически обеспеченные профили турбулентных параметров удается восстановить лишь до высоты 500 м.

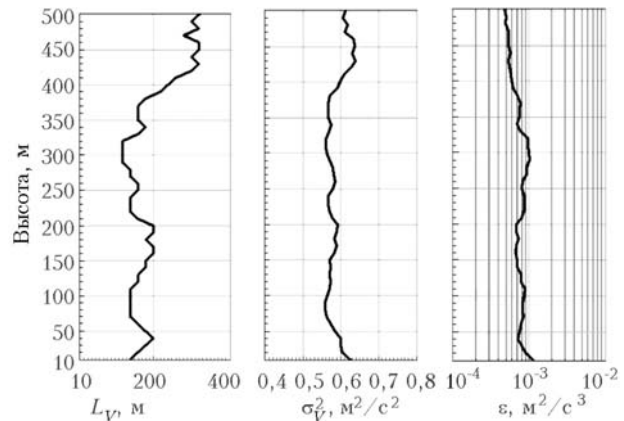


Рис. 4. Высотные профили внешнего масштаба турбулентности L_V , дисперсии флуктуаций скорости ветра σ_V^2 и скорости диссипации турбулентной энергии ε

Полученные профили не противоречат данным о поведении параметров атмосферной турбулентности в пограничном слое атмосферы и иллюстрируют возможности современных импульсных когерентных лидаров в исследованиях атмосферной турбулентности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 03-05-64194.

1. Banakh V.A., Werner Ch. Computer simulation of coherent Doppler lidar measurement of wind velocity and retrieval of turbulent wind statistics // Opt. Eng. 2005. V. 44. N 7. P. 071205-1–071205-19.
2. Banakh V.A., Köpp F., Werner Ch., and Smalikhov I.N. Measurement of turbulent energy dissipation rate with a CW Doppler lidar in the atmospheric boundary layer // J. Atmos. Ocean. Technol. 1999. V. 16. N 8. P. 1044–1061.
3. Frehlich R., Hannon S., and Henderson S. Coherent Doppler lidar measurements of wind field statistics // Boundary-Layer Meteorol. 1998. V. 86. P. 233–256.

4. *Frehlich R.G., Cornman L.* Estimating spatial velocity statistics with coherent Doppler lidar // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2002. V. 19. P. 355–366.
5. *Банах В.А., Смалихо И.Н.* Оценивание скорости диссипации турбулентной энергии из данных импульсного доплеровского лидара // *Оптика атмосф. и океана.* 1997. Т. 10. № 12. С. 1524–1538.
6. *Банах В.А., Фалиц А.В.* Оценивание параметров атмосферной турбулентности из измерений скорости ветра импульсным когерентным CO₂ доплеровским лидаром // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17. № 4. С. 297–305.
7. *Hannon S.M., Gatt P., Henderson S.W., and Huffaker R.M.* Recent progress and measurement results with commercial 2 μ m Doppler lidar // *Proc. 12-th Coherent Laser Radar Conf.* 15–20 June 2003, Bar Harbor Maine, US. P. 86–89.
8. *Doviak R.L., and Zrnic D.C.* Doppler Radar and Weather Observations. San Diego; New York; Berkeley; Boston; London; Sydney; Tokyo; Toronto: Academic Press, Inc. 1993. 562 p.
9. *Smalikho I., Köpp F., Rahm S.* Measurement of atmospheric turbulence by 2 μ m Doppler lidar // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2005. V. 22. N 11. P. 1733–1748.

V.A. Banakh, A.V. Falits, I.N. Smalikho, S. Rahm. **Estimate of turbulence parameters from wind speed measurements with a coherent pulse Doppler lidar.**

Results of retrieving the wind turbulent field parameters for the boundary atmospheric layer from wind speed measurements with a coherent pulse Doppler lidar are presented. The obtained data demonstrate a possibility of studying the atmospheric turbulence with the use of commercial coherent Doppler lidar systems.