

Определение структурной характеристики показателя преломления воздуха из данных, измеряемых когерентным доплеровским лидаром

В.А. Банах¹, И.Н. Смалихо¹, S. Rahm^{2*}

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

²Институт физики атмосферы Германского аэрокосмического центра
Мюнхнер-штрассе, 20, 82234, Оберфлаффенхофен-Веслинг, Германия

Поступила в редакцию 18.04.2014 г.

Предложен способ определения структурной характеристики показателя преломления воздуха из данных импульсного когерентного доплеровского ветрового лидара. Выполнена апробация предложенного способа в атмосферных экспериментах. Получены временные зависимости структурной характеристики показателя преломления в приземном слое атмосферы и проведено их сопоставление с временными ходами скорости диссипации кинетической энергии турбулентности, полученными из тех же лидарных данных. Таким образом показано, что когерентные лидары могут использоваться для исследования не только ветровой, но и температурной турбулентности.

Ключевые слова: когерентный доплеровский лидар, отношение сигнал-шум, структурная характеристика показателя преломления, скорость диссипации турбулентной энергии; coherent Doppler lidar, signal-noise ratio, structure characteristics of refractive index, rate of dissipation of turbulent energy.

Введение

В настоящее время когерентные доплеровские лидары (КДЛ) широко используются для получения информации о скорости ветра и параметрах ветровой турбулентности, в частности о скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ϵ , характеризующей процесс передачи турбулентной энергии от крупных вихрей к мелким в инерционном интервале масштабов неоднородностей ветрового потока [1]. Турбулентное перемешивание воздушных масс с различной температурой вызывает флуктуации плотности и, как следствие, флуктуации показателя преломления воздуха. Возникает так называемая оптическая турбулентность, для описания которой в инерционном интервале масштабов неоднородностей обычно используется такой параметр, как структурная характеристика показателя преломления C_n^2 . Уровень эхосигнала КДЛ зависит от интенсивности оптической турбулентности [2], так что регистрируемая приемником лидара средняя мощность эхосигнала должна содержать информацию о структурной характеристике C_n^2 .

В настоящей статье предложен способ определения C_n^2 по величине эхосигнала импульсного КДЛ.

Проведено апробирование предложенного способа в натурном эксперименте. Полученные данные о C_n^2 в приземном слое атмосферы сопоставляются с результатами оценивания скорости диссипации ϵ из тех же лидарных данных.

1. Теория

Известно, что при фокусировке зондирующего пучка импульсного КДЛ (ИКДЛ) на некоторое расстояние F средняя мощность эхосигнала $\langle P_S(R) \rangle$ (отношение сигнал-шум $\text{SNR}(R) = \langle P_S(R) \rangle / P_N$, где P_N – средняя мощность шума) изменяется вдоль трассы зондирования и принимает максимальное значение на некотором расстоянии $R = R_{\max}$ от лидара [1, 2]. Согласно [1, рис. 1.8] R_{\max} зависит от C_n^2 . Следовательно, зная зависимость R_{\max} от C_n^2 , можно получать информацию о структурной характеристике турбулентных пульсаций показателя преломления путем нахождения положения максимума в распределении лидарного отношения сигнал-шум $\text{SNR}(R)$ вдоль трассы зондирования.

Для нахождения зависимости R_{\max} от C_n^2 , в случае статистической однородности турбулентности на трассе зондирования, когда C_n^2 не зависит от R , мы воспользовались численным моделированием работы ИКДЛ в турбулентной атмосфере. Описание алгоритма моделирования работы ИКДЛ можно найти,

* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Игорь Николаевич Смалихо (smalikho@iao.ru); Stephan Rahm (Stephan.Rahm@dlr.de).

например, в [1, с. 27]. Численное моделирование осуществлялось для лидара со следующими параметрами: длина волны лазера $\lambda = 2$ мкм, длительность зондирующего импульса $\tau_p = 400$ нс, радиус пучка на выходе из телескопа $a_0 = 2,5$ см и фокусное расстояние $F = 1,5$ км. Эти параметры соответствуют 2-микронному импульсному КДЛ Германского аэрокосмического центра [3].

На рис. 1 представлены зависимости отношения сигнал-шум от дальности измерения $\text{SNR}(R)$, рассчитанные на основе численного моделирования для колмогоровского спектра флуктуаций показателя преломления [4] при различных C_n^2 . Видно, что с увеличением C_n^2 максимум распределения $\text{SNR}(R)$, т.е. R_{\max} , смещается в сторону лидара.

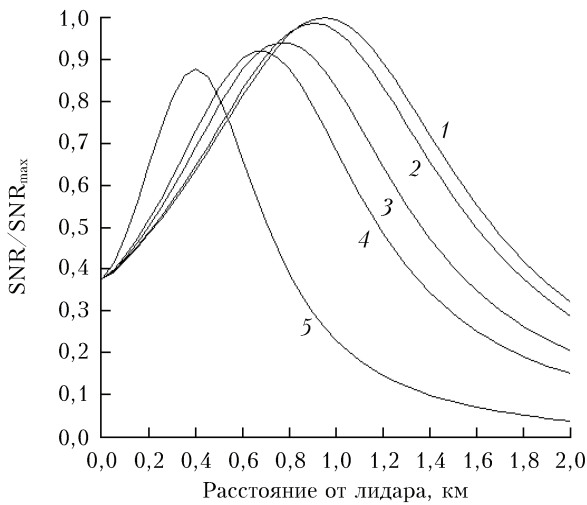


Рис. 1. Зависимость нормированного отношения сигнал-шум от дальности зондирования при $C_n^2 = 0$ (1), 10^{-14} (2), $5 \cdot 10^{-14}$ (3), 10^{-13} (4) и $5 \cdot 10^{-13}$ (5) $\text{м}^{-2/3}$

Зависимость R_{\max} от C_n^2 , рассчитанная на основе численного моделирования, показана на рис. 2 в виде сплошной кривой. Согласно результатам расчета величина R_{\max} изменяется от 950 м при $C_n^2 \leq 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$ до 250 м при $C_n^2 = 10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$.

Зависимость отношения сигнал-шум от дальности измерения $\text{SNR}(R)$ в виде аналитического выражения может быть получена лишь с использованием того или иного приближения. В частности, для $\text{SNR}(R)$ в пренебрежении корреляцией встречных волн [5, 6] (бистатистическое приближение) и с использованием квадратической аппроксимации [4–6] можно получить простую формулу вида [1, 2]:

$$\text{SNR}(R) = \frac{\eta E_p c}{4 h \nu B} \beta_\pi(R) T_A^2(R) \frac{\lambda^2}{\pi a_0^2 g(R)}, \quad (1)$$

где η – квантовая эффективность фотодетектора; E_p – энергия зондирующего импульса; c – скорость света; $h\nu$ – энергия фотона; B – полоса пропускания приемника; $\beta_\pi(R)$ – коэффициент обратного аэрозольного рассеяния; $T_A(R)$ – атмосферное пропускание;

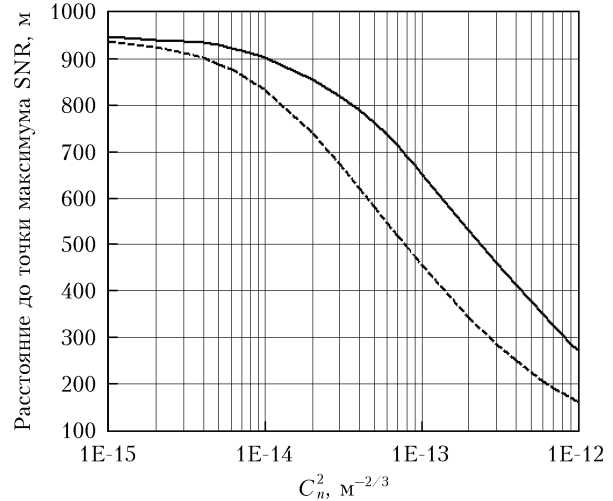


Рис. 2. Зависимость расстояния между лидаром и точкой максимума R_{\max} отношения сигнал-шум от структурной характеристики показателя преломления C_n^2 ; сплошная линия – результат расчета с использованием численного моделирования, штриховая – результат расчета с использованием формул (2) и (3)

$$g(R) = \left(1 - \frac{R}{F}\right)^2 + \left(1 + \frac{4a_0^2}{r_s^2(R)}\right) \left(\frac{\lambda R}{2\pi a_0^2}\right)^2 \quad (2)$$

– нормированный квадрат эффективного радиуса зондирующего пучка на расстоянии R ;

$$r_s(R) = \left[\mu \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \int_0^R dz C_n^2(z) \left(1 - \frac{z}{R}\right)^{5/2} \right]^{-3/5} \quad (3)$$

– радиус пространственной когерентности сферической волны, распространяющейся из точки $z = R$ в точку $z = 0$ (при условии, что $r_s \gg l_n$, l_n – внутренний масштаб турбулентности); $\mu = 1,45$ [4].

Согласно формуле (1) для статистически однородной атмосферы (β_π и C_n^2 не зависят от расстояния R) и $T_A(R) \approx 1$ максимум функции $\text{SNR}(R)$ совпадает с минимумом $g(R)$. Результат расчета зависимости $R_{\max}(C_n^2)$, полученной путем нахождения точек минимума функции $g(R)$, представлен на рис. 2 в виде штриховой кривой. Видно, что сплошная кривая, полученная на основе численного моделирования, где учитывается корреляция встречных волн [5, 6], и штриховая кривая, рассчитанная с использованием формул (2), (3), существенно отличаются друг от друга. Так что использование приближенных формул для оценивания C_n^2 по смещению максимума распределения SNR вдоль трассы зондирования будет приводить к значительной погрешности. Для оценивания C_n^2 этим способом необходимо использовать расчетные данные для $R_{\max}(C_n^2)$, полученные на основе численного моделирования по строгим формулам. Оценивание структурной характеристики C_n^2 из данных атмосферного эксперимента нами осуществлялось с использованием зависимости $R_{\max}(C_n^2)$.

2. Эксперимент

Для определения C_n^2 описанным выше способом мы воспользовались исходными данными лидарных экспериментов, проводившихся на летном поле аэропорта Мюнхена весной 2011 г. В экспериментах был задействован 2-микронный импульсный КДЛ Германского аэрокосмического центра [3]. Целью экспериментов было лидарное исследование вихрей, генерируемых идущими на посадку самолетами. Поэтому во время лидарных измерений использовалось сканирование зондирующим пучком в вертикальной плоскости перпендикулярно взлетно-посадочной по-

лосе. Максимальный угол места φ составлял 6° , а скорость сканирования была равна $2^\circ/\text{с}$.

С целью получения среднего профиля $\text{SNR}(R_i)$, где $R_i = R_0 + i\Delta R$, $R_0 = 400$ м, $i = 0, 1, 2, \dots, 500$ и $\Delta R = 3$ м, при обработке лидарных данных применялась аккумуляция отдельных оценок отношения сигнал-шум для каждой посылки зондирующего импульса, накапливаемых в течение 5 мин и попадающих в интервал углов места от 1 до 3° . В этом случае оценка R_{\max} получалась как результаты усреднения SNR по вертикальному слою в пределах высот примерно от 1,5 до 10 м. С использованием полученной оценки R_{\max} и данных, представленных на рис. 2

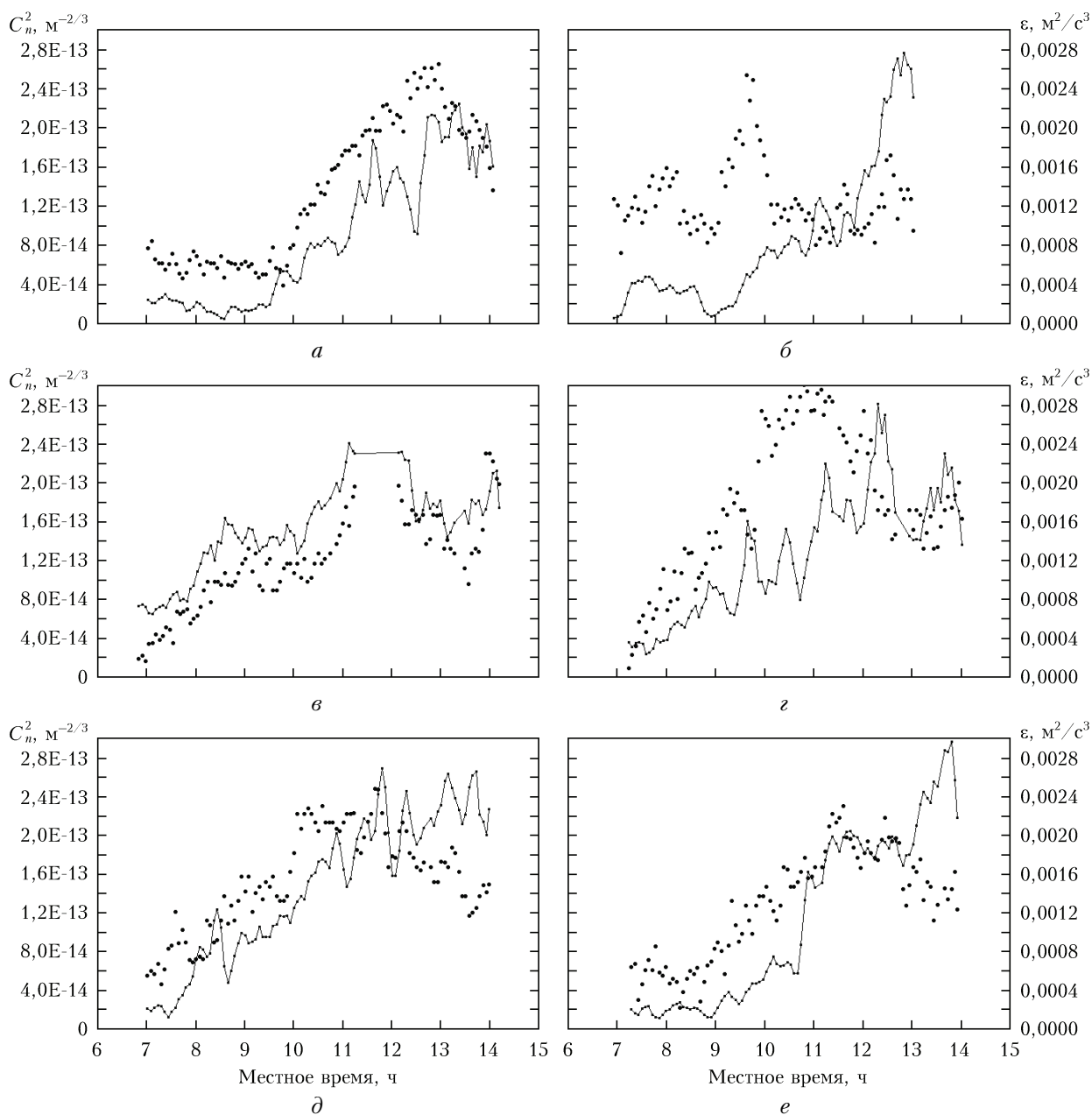


Рис. 3. Временной ход структурной характеристики показателя преломления воздуха C_n^2 (кружочки, шкала слева) и скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ϵ (сплошные кривые, шкала справа), полученный из лидарных данных 30.03.2011 (а), 31.03.2011 (б), 01.04.2011 (в), 05.04.2011 (г), 06.04.2011 (д) и 07.04.2011 (е)

в виде сплошной кривой, определялась структурная характеристика C_n^2 . Для использовавшегося в экспериментах 2-микронного ИКДЛ минимальная дальность зондирования составляет 400 м. Так что, согласно результатам численного моделирования на рис. 2, максимальное значение C_n^2 , которое можно определить по положению точки максимума распределения $\text{SNR}(R_i)$, для этого лидара не превышает $3,5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$. Этого ограничения может не быть для других лидаров. Например, для лидара HRDL [7] длительность зондирующего импульса $\tau_p = 200$ нс и минимальная дальность зондирования, которая должна удовлетворять условию $R_0 \gg c\tau_p/2$, составляет примерно 200 м. Это позволяет из данных лидара HRDL и других ИКДЛ с короткоимпульсным зондирующим излучением определять C_n^2 в более широком диапазоне, вплоть до максимальных значений C_n^2 , наблюдающихся в атмосфере.

Наряду с оцениванием C_n^2 , из этих же лидарных данных мы определяли скорость диссипации кинетической энергии турбулентности ϵ методом продольной структурной функции радиальной скорости [1, 8–12], используя для расчета структурной функции лидарные данные, измеренные в прилегающем к Земле слое толщиной 30 м.

На рис. 3 представлен полученный из лидарных измерений временной ход структурной характеристики показателя преломления воздуха и скорости диссипации кинетической энергии турбулентности.

Видно, что за исключением представленных на рис. 3, б данных структурная характеристика показателя преломления C_n^2 растет с утра со временем, достигая максимума к полудню. Такой временной ход C_n^2 в приземном слое атмосферы экспериментально наблюдался другими авторами на основе прямых измерений флуктуаций температуры [4] и с использованием сканнилометра SLS-20 [13]. Представленные на рис. 3 значения C_n^2 хорошо согласуются со значениями структурной характеристики показателя преломления воздуха на высоте 1,8 м, полученными в [13].

На рис. 3 также представлены временные зависимости скорости диссипации ϵ . Видно, что как структурная характеристика C_n^2 , так и скорость диссипации турбулентной энергии ϵ возрастают по мере прогрева поверхности Земли начиная с 7 утра местного времени и достигают максимума в полуденные часы, когда в атмосфере, как правило, реализуется неустойчивая термическая стратификация. В ряде случаев временной ход C_n^2 и ϵ почти одинаков, например 1 апреля (рис. 3, в). Однако есть ситуации (рис. 3, б), когда зависимости C_n^2 и ϵ от времени существенно различаются.

Заключение

В настоящей статье предложен способ определения структурной характеристики показателя преломления C_n^2 из измерений расстояния R_{max} от лидара до точки максимума в распределении отношения сигнал-шум ветрового ИКДЛ вдоль трассы зонди-

рования. Способ апробирован в атмосферных экспериментах. Проведено сопоставление временных ходов C_n^2 и ϵ , полученных соответственно предложенным способом и методом продольной структурной функции радиальной скорости [1, 8–12], из одних и тех же данных, измеренных 2-микронным ИКДЛ на летном поле аэропорта Мюнхена весной 2011 г. Представленные на рис. 3 экспериментальные данные для C_n^2 не противоречат результатам измерения структурной характеристики в приземном слое атмосферы прямыми [4] и оптическими [13] методами. В дальнейшем мы планируем проведение исследований точности определения структурной характеристики показателя преломления (температуры) воздуха предложенным в этой работе способом путем сравнительного анализа оценок C_n^2 из данных измерений ИКДЛ «Stream Line» [14] и акустического анемометра.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 13-05-00458 и 12-05-00332).

1. *Банах В.А., Смалихо И.Н.* Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. 304 с.
2. *Frehlich R.G., Kavaya M.J.* Coherent laser radar performance for general atmospheric turbulence // *Appl. Opt.* 1991. V. 30. P. 5325–5337.
3. *Smalikho I.N., Köpp F., Rahm S.* Measurement of atmospheric turbulence by 2- μm Doppler lidar // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2005. V. 22, N 11. P. 1733–1747.
4. *Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 280 с.
5. *Banakh V.A., Mironov V.L.* Lidar in a turbulent atmosphere. Artech House: Boston & London, 1987. 185 p.
6. *Банах В.А.* Усиление средней мощности обратно рассеянного в атмосфере излучения в режиме сильной оптической турбулентности // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 10. С. 857–862.
7. *Grund C.J., Banta R.M., George J.L., Howell J.N., Post M.J., Richter R.A., Weickman A.M.* High-resolution Doppler lidar for boundary layer and cloud research // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2001. V. 18, N 3. P. 376–393.
8. *Frehlich R.G., Cornman L.B.* Estimating spatial velocity statistics with coherent Doppler lidar // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2002. V. 19, N 3. P. 355–366.
9. *Смалихо И.Н., Пичугина Е.Л., Банах В.А., Брюер А.* Измерения импульсным когерентным лидаром параметров шлейфа, генерируемого ветряком при различных атмосферных условиях // *Изв. вузов. Физ.* 2012. Т. 55, № 8. С. 91–95.
10. *Смалихо И.Н., Банах В.А.* Точность оценивания скорости диссипации энергии турбулентности из измерений ветра импульсным когерентным доплеровским лидаром при коническом сканировании зондирующим пучком. Часть I. Алгоритм обработки лидарных данных // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 3. С. 213–219.
11. *Смалихо И.Н., Банах В.А., Пичугина Е.Л., Брюер А.* Точность оценивания скорости диссипации энергии турбулентности из измерений ветра импульсным когерентным доплеровским лидаром при коническом сканировании зондирующим пучком. Часть II. Численный

- и натурный эксперименты // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 3. С. 220–225.
12. *Smalikho I.N., Banakh V.A., Pichugina Y.L., Brewer W.A., Banta R.M., Lundquist J.K., Kelley N.D.* Lidar investigation of atmosphere effect on a wind turbine wake // J. Atmos. Ocean. Technol. 2013. V. 30, N 11. P. 2554–2570. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00108.1>
13. *Hutt D.L.* Modeling and measurements of atmospheric optical turbulence over land // Opt. Eng. 1999. V. 38, N 8. P. 1288–1295.
14. *Pierson G., Davies F., Collier C.* An analysis of performance of the UFAM Pulsed Doppler lidar for the observing the boundary layer // J. Atmos. Ocean. Technol. 2009. V. 26, N 2. P. 240–250.

V.A. Banakh, I.N. Smalikho, S. Rahm. Estimation of the structure characteristics of refractive index of air from a coherent Doppler wind lidar data.

A technique is proposed for estimation of the structure characteristics of refractive index of air from data of a coherent Doppler wind lidar. The proposed technique is tested in atmospheric experiments. Time profiles of the structure characteristics of refractive index in the atmospheric surface layer are obtained and compared with the time profiles of the dissipation rate of the kinetic energy of turbulence obtained from the same lidar data. It is shown in this way that coherent lidars can be used for investigation of not only wind turbulence, but also temperature turbulence.