

Метод коррекции искажений профилей обратного рассеяния в ближней зоне атмосферной трассы

П. Н. Назаренко

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь,
e-mail: npn05@mail.ru

В работе описан метод коррекции атмосферных профилей, регистрируемых биаксиальными метеолидарами. Применение описанного метода позволяет исключить влияние на регистрируемые атмосферные профили таких факторов как квадрат расстояния, зона неполного перекрытия лазерного пучка и поля зрения приемного канала лидара, неопределенность начала отсчета высоты трассы, другие аппаратные амплитудные и временные параметры прибора. Проводится обсуждение полученных результатов.

Ключевые слова: лидарное уравнение; профиль коэффициента обратного рассеяния; опорный амплитудный профиль.

Method for correcting distortions of backscattering profiles in the near zone of the atmospheric track

P. N. Nazarenko

SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Belarus,
e-mail: npn05@mail.ru

The paper describes a method for correcting atmospheric profiles recorded by biaxial meteorological lidars. The use of the described method makes it possible to eliminate the influence on the recorded atmospheric profiles of such factors as the square of the distance, the zone of incomplete overlap of the laser beam and the field of view of the lidar receiving channel, the uncertainty of the reference height of the path, and other hardware amplitude and time parameters of the device. The results obtained are discussed.

Keywords: lidar equation; backscatter coefficient profile; reference amplitude profile.

Введение

Одноволновые аэрозольные лидары (облакомеры) являются одними из наиболее простых универсальных и информативных устройств для изучения и контроля параметров атмосферы. Точность аэрозольных лидарных измерений зависит как от аппаратных характеристик лидаров, так и от применяемых лидарных методов измерений. Существующие методы основаны на преобразовании регистрируемых амплитудных профилей эхосигнала в профили коэффициента обратного рассеяния по методу обращения лидарного уравнения [1] с предварительной обработкой полученного массива данных: вычитания фона, нормировки на квадрат расстояния, нормировании на геометрический фактор [2–4].

Неопределенность начала отсчета высоты трассы, связанная с продолжительностью оптического импульса (порядка 100 нс), зависимость от высоты неодно-

родности мощности, формы излучения в сечении пучка, неопределенность геометрического фактора (функции перекрытия полей зрения приемной системы и пятна лазерного излучения) могут приводить к достаточно большим систематическим ошибкам в измерении профилей обратного рассеяния аэрозолей в ближней зоне зондируемой трассы.

Для определения зависимости геометрического фактора от расстояния используются аналитические, трассировочные и экспериментальные методы [4–9]. Во всех перечисленных методах в предложенных математических моделях присутствует расстояние, что вследствие неопределенности начала отсчета высоты и несоосности приемного и передающего каналов приводит к систематическим погрешностям измерения атмосферных профилей.

С целью устранения указанных выше факторов, влияющих на точность измерений, разработан относительный метод калибровки биаксиальных лидаров, разработан алгоритм калибровки и выполнены сравнительные исследования по применению данного метода для измерения атмосферных профилей.

1. Описание метода

Предлагаемый относительный метод калибровки лидаров-облакомеров основан на определении нормируемого профиля атмосферного обратного рассеяния как отношения амплитуд измеряемого и опорного профилей регистрируемых на одинаковых высотах эхосигналов с учетом ослабления атмосферой зондирующего излучения лидара для измеряемого и опорного сигналов. В качестве опорного профиля используется профиль эхосигнала, полученный в условиях ясной атмосферы при отсутствии облачности и других атмосферных образований и вертикальной видимости, превышающей 10 км.

В рамках модели однократного упругого рассеяния мощность оптического эхосигнала, приходящего с расстояния z на приемник лидара, описывается основным лидарным уравнением, имеющим вид [1, 2]:

$$P(z) = \frac{A(z) \cdot \beta(z) \cdot \exp[-2 \int_0^z \alpha(z) dz]}{z^2} + P_{\phi}, \quad (1)$$

где $P(z)$, P_{ϕ} – мощность оптического эхосигнала, приходящего с расстояния z на приемник лидара, и мощность фоновой засветки, соответственно; $A(z)$ – аппаратная функция лидара, не зависящая от параметров атмосферы; $\beta(z) = \alpha(z) \cdot S(z)$ – коэффициент обратного рассеяния на высоте z ; z – высота с которой принимается сигнал; $S(z)$ – лидарное отношение или обратный модуль вектора индикатрисы рассеяния для угла π ; $\alpha(z)$ – коэффициент экстинкции атмосферы на высоте z .

Аппаратная функция лидара описывается выражением:

$$A(z) = P_0 \frac{c \tau}{2} Q(z) T_{\text{л}} A_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где P_0 – пиковая мощность импульса лазера; c – скорость света; τ – длительность лазерного импульса; $Q(z)$ – геометрический фактор (зависит от геометрии опти-

ческой системы лидара, максимальное значение равно 1); $T_{\text{л}}$ – пропускание приемного и передающего каналов лидара; $A_{\text{пр}}$ – площадь приемного телескопического канала.

Для решения задачи измерения профиля обратного объемного рассеяния $\beta(z)$ в рамках предлагаемого метода вводится понятие относительной функции профиля мощности обратно рассеянного излучения $F(z)$:

$$F(z) = \frac{P_{\text{из}}(z) - P_{\text{физ}}}{P_{\text{o}}(z) - P_{\text{фо}}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{из}}(z)$ и $P_{\text{o}}(z)$ – мощности обратно рассеянного измеряемого и опорного излучения на высоте z , соответственно; $P_{\text{физ}}$ и $P_{\text{фо}}$ – мощности фоновой засветки на измеряемой и опорной трассах, соответственно;

Лидарное уравнение (1) приобретает вид:

$$F(z) = \frac{\beta_{\text{из}}(z)}{\beta_{\text{o}}(z)} \exp \left[-2 \int_0^z \alpha_{\text{o}} \left(\frac{\alpha_{\text{из}}(z)}{\alpha_{\text{o}}} 1 \right) dz \right], \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{из}}(z)$ и α_{o} – коэффициенты экстинкции на высоте z измеряемой и опорной трассы; $S_{\text{из}}(z)$ и $S_{\text{o}}(z)$ – лидарные отношения на высоте z измеряемой и опорной трассы; $\beta_{\text{из}}(z)$, $\beta_{\text{o}}(z)$ – коэффициенты обратного рассеяния на высоте z измеряемой и опорной трассы.

Коэффициенты экстинкции на измеряемой и опорных трассах $\alpha_{\text{из}}^{**}$ и α_{o}^{**} при вертикальной видимости, превышающей максимальную рабочую высоту, определяются из величин метеорологической оптической дальности (МОД) [10], фиксируемых метеорологическими станциями:

$$\alpha = \left(\frac{3}{\text{МОД}} \right) \left(\frac{550}{\lambda} \right)^q, \quad (5)$$

где λ – длина волны зондирующего излучения в нм; q – параметр распределения аэрозольных частиц по размерам, связанный с МОД [10].

Отношение $S_{\text{из}} / S_{\text{o}}$ рассчитывается в соответствии с выражением (6) для минимальной высоты z^* , для которой коэффициенты пропускания на высоте от 0 до z^* на измеряемой и опорной трассе близки к единице:

$$\frac{S_{\text{из}}(z^*)}{S_{\text{o}}(z^*)} = \frac{\alpha_{\text{из}}(z^*)}{\alpha_{\text{o}} \cdot F(z^*)}, \quad (6)$$

где $F(z^*)$ – среднее значение $F(z)$ на высотах от 0 до z^* .

В полученном аналитическом уравнении (4), полученном из лидарного уравнения (1) в предположении неизменности коэффициента экстинкции атмосферы на всей длине трассы для опорного сигнала, отсутствуют такие факторы как квадрат расстояния, геометрический фактор, другие аппаратные амплитудные и временные параметры прибора. Для преобразования измеренного массива

амплитудных данных в профили коэффициента обратного рассеяния требуются только предварительное измерение амплитудного опорного профиля и данные измерения метеорологической оптической дальности на момент измерения опорного и регистрируемых профилей.

Таким образом, предлагаемый относительный метод измерения атмосферного профиля коэффициента обратного рассеяния существенно снижает систематические погрешности измерений атмосферных профилей обратного рассеяния за счет исключения факторов, дающих основной вклад в данные погрешности и перечисленных во введении. В данном методе измерения в отличие от прямых методов требуется измерение только относительного амплитудного профиля зондирующего излучения и данные измерения МОД на опорной и измеряемой атмосферной трассах.

Уменьшение переменных в уравнении профиля коэффициента обратного рассеяния (4) по сравнению с основным лидарным уравнением (1) позволяет упростить алгоритмическое обеспечение измерительных систем за счет исключения корреляционной обработки сигналов, требующей больших вычислительных ресурсов.

Профили, измеренные по описанному методу, позволяют достаточно просто идентифицировать атмосферные образования (осадки, туман, облачные образования), а также определить нижнюю границу облачности, вертикальную видимость, плотность и количество облачных слоев.

Библиографические ссылки

1. Klett J. D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // *Applied Optics*. 1981. Vol. 20, No. 2. P. 211–220.
2. Веретенников В. В. Геометрический фактор лидара в малоугловом приближении // *Оптика атмосферы и океана*. 1998. Т. 11, № 9. С. 1002–1006.
3. Determination of overlap in lidar systems / J. Vande Hey [et al.] // *Applied Optics*. 2011. Vol. 50, No. 7. P. 5791–5797.
4. Analytical function for lidar geometrical compression form-factor calculations / Kamil Stelmaszczyk [et al.] // *Applied Optics*. 2005. Vol. 44, No. 7. P. 1323–331.
5. Harms J. Lidar return signals for coaxial and noncoaxial systems with central obstruction / *Applied Optics*. 1979. Vol. 18, No. 10. P. 1559–1566.
6. Field-of view dependence of lidar signals by use of Newtonian and Cassegrainian telescopes / H. Kuze [et al.] // *Applied Optics*. 1998. Vol. 37, No. 15. P. 3128–3132.
7. Takeuchi N., Sato T. Geometrical form factor of lidar with a narrow-band interference filter / *Rev. Laser Eng.* 1987. Vol. 15. P. 269–274.
8. Analysis of the receiver response in lidar measurements / R. Velotta [et al.] // *Applied Optics*. 1998. Vol. 37, No. 30. P. 6999–7007.
9. Dho S.W. Experimental determination of geometrical form factor in lidar equation for an inhomogeneous atmosphere / S. W. Dho Y. J. Park, H. J. Kong // *Applied Optics*. 1997. Vol. 36, No. 24. P. 6009–6010.
10. Kim I. I. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications / I. I. Kim, B. McArthur, E. Korevaar // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2001. Vol. 4214, No. 2. P. 26–37.