

А.Д. Егоров, И.А. Потапова, Ю.Б. Ржонсницкая, А.А. Ошуркова

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ИМПУЛЬСАМИ КОНЕЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Y.B. Rzhonsnitskaya, A.A. Oshurkova

LIDAR PROBING OF ATMOSPHERIC AEROSOL POLLUTIONS BY INTEGRAL METHODS USING FINITE DURATION PULSES

рассматриваются методы лидарного зондирования атмосферы импульсами конечной длительности. разработан новый интегральный метод лидарных измерений оптических характеристик атмосферного аэрозоля и оценки точности их определения в условиях неоднородной атмосферы.

Ключевые слова: обратное рассеяние, ослабление, многопозиционные измерения, импульсы конечной длительности, лидарное уравнение, интегральное решение.

There are considered lidar probing methods for atmospheric measurements using finite duration pulses. New integral lidar multiposition technique was developed to measure the aerosol pollutions and to assess the accuracy of the measurements results in inhomogeneous atmosphere conditions.

Key words: backscattering, extinction, multiposition lidar measurements, finite duration pulses, lidar equation, integral solution

Для осуществления дистанционных измерений перспективными является методы лидарного зондирования. Однако при применении методов лидарного зондирования необходимо решить проблемы неопределенности и математической некорректности. Кроме того, в условиях неоднородной атмосферы, низкой прозрачности воздуха необходим учет конечной длительности лазерных импульсов.

В этой связи в работе рассматриваются интегральные методы многопозиционно-го лидарного зондирования атмосферы.

Интегральные методы лидарного зондирования атмосферного аэрозоля импульсами конечной длительности

Методы лидарного зондирования атмосферного аэрозоля основаны на измерении мощности эхо сигнала P , связанной лидарным уравнением с показателем ослабления и показателем обратного рассеяния:

$$P(r) = \frac{2A}{c\tau} \int_r^{r+\frac{c\tau}{2}} f(r')\beta(r') \exp\left(-2 \int_0^{r'} \sigma(r'') dr''\right) dr', \quad (1)$$

где r – расстояние между лидаром и рассеивающим объемом, $f = K(\vec{r}_j - \vec{R}_i)^{-2}$ – геометрический фактор лидара, K – коэффициент заполнения, A – постоянная лидара, β – коэффициент обратного рассеяния, σ – коэффициент ослабления, c – скорость света, τ – длительность зондирующего импульса.

Уравнение (1) отличается от обычно используемого уравнения, т.к. содержит длительность зондирующего импульса. С учетом малости длительности зондирующего импульса с точностью до членов первого порядка малости лидарное уравнение (1) можно заменить разложением в ряд, ввести соответствующий скорректированный на геометрический фактор эхо сигнал и предложить дифференциальное решение задачи [1]. Однако из-за математической некорректности этой задачи целесообразен другой путь ее решения.

Уравнение (1) можно решать методом последовательных приближений. Коэффициент обратного рассеяния β_0 и коэффициент ослабления σ_0 в нулевом приближении находятся на основании многопозиционного интегрального решения [2] лидарного уравнения, записанного в приближении короткого зондирующего импульса

$$S_0(r) = Af(r)\beta_0(r) \exp\left(-2 \int_0^r \sigma_0(r') dr'\right), \quad (2)$$

где

$$S_0(r) = \frac{P(r)}{f(r)}. \quad (3)$$

В первом приближении коэффициенты β_1, σ_1 находятся на основании многопозиционного интегрального решения лидарного уравнения

$$S_1(r) = Af(r)\beta_1(r) \exp\left(-2 \int_0^r \sigma_1(r') dr'\right), \quad (4)$$

где

$$S_1(r) = \frac{c\tau P(r)\beta_0(r) \exp\left(-2 \int_0^r \sigma_0(r') dr'\right)}{2 \int_r^{r+\frac{c\tau}{2}} f(r')\beta_0(r') \exp\left(-2 \int_0^{r'} \sigma_0(r'') dr''\right) dr'}. \quad (5)$$

Аналогичным образом можно рассмотреть следующие приближения. Для $l+1$ -го приближения получается:

$$S_{l+1}(r) = Af(r)\beta_{l+1}(r) \exp\left(-2 \int_0^r \sigma_{l+1}(r') dr'\right), \quad (6)$$

$$S_{l+1}(r) = \frac{c\tau P(r)\beta_l(r)\exp\left(-2\int_0^r \sigma_l(r')dr'\right)}{2 \int_r^{r+\frac{c\tau}{2}} f(r')\beta_l(r')\exp\left(-2\int_0^{r'} \sigma_l(r'')dr''\right)dr'}. \quad (7)$$

Сравнение найденных решений с решением в нулевом приближении дает возможность оценить систематическую погрешность использования лидарного уравнения, записанного в приближении короткого зондирующего импульса. При этом следует учитывать малую длительность импульсов, посылаемых в атмосферу применяемыми устройствами [3-5]. В соответствии с этим, предлагается упрощенный подход к оценке систематической погрешности. Систематическую погрешность определения коэффициента обратного рассеяния β и коэффициента ослабления σ при использовании соотношений (2), (3) можно оценить по разности решений уравнений (2), (4):

$$\begin{aligned} \delta_\beta &= \beta_0 - \beta_1, \\ \delta_\sigma &= \sigma_0 - \sigma_1. \end{aligned} \quad (8)$$

При этом интеграл в знаменателе выражения (5) можно вычислить методом трапеций:

$$\begin{aligned} &\int_r^{r+\frac{c\tau}{2}} f(r')\beta_0(r')\exp\left(-2\int_0^{r'} \sigma_0(r'')dr''\right)dr' = \\ &= \left\{ f(r)\beta_0(r)\exp\left(-2\int_0^r \sigma_0(r')dr'\right) + f\left(r+\frac{c\tau}{2}\right)\beta_0\left(r+\frac{c\tau}{2}\right)\exp\left(-2\int_0^{r+\frac{c\tau}{2}} \sigma_0(r')dr'\right) \right\} \frac{c\tau}{4}. \end{aligned} \quad (9)$$

Поскольку в первом приближении

$$\begin{aligned} f\left(r+\frac{c\tau}{2}\right) &= f(r) + f'(r)\frac{c\tau}{2}, \\ \beta_0\left(r+\frac{c\tau}{2}\right) &= \beta_0(r) + \beta_0'(r)\frac{c\tau}{2}, \\ \exp\left(-2\int_0^{r+\frac{c\tau}{2}} \sigma_0(r')dr'\right) &= \exp\left(-2\int_0^r \sigma_0(r')dr'\right)[1 - c\tau\sigma_0(r)], \end{aligned} \quad (10)$$

выражение (9) преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} &\int_r^{r+\frac{c\tau}{2}} f(r')\beta_0(r')\exp\left(-2\int_0^{r'} \sigma_0(r'')dr''\right)dr' = \\ &= \left\{ f(r)\beta_0(r)\exp\left(-2\int_0^r \sigma_0(r')dr'\right) \right\} \left[1 + \left(\frac{d \ln f}{dr} + \frac{d \ln \beta_0}{dr} - 2\sigma_0 \right) \frac{c\tau}{4} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом равенства (11) выражение (5) можно переписать в виде:

$$S_1(r) = \frac{P(r)}{f(r)} \left[1 - \left(\frac{d \ln f}{dr} + \frac{d \ln \beta_0}{dr} - 2\sigma_0 \right) \frac{c\tau}{4} \right]. \quad (12)$$

В данном приближении результаты применения рассматриваемого метода и метода работы [1] совпадают.

Результаты лидарного зондирования импульсами конечной длительности аэрозоля неоднородной атмосферы

Для описания оптических параметров на основе данных [2] была использована степенная связь между коэффициентом ослабления и коэффициентом обратного рассеяния:

$$\beta = D\sigma^{1/m}. \quad (13)$$

Учитывалось существование физических причин, способствующих образованию в атмосфере горизонтально однородных слоев. Решение системы интегральных уравнений на трассах зондирования позволяет найти коэффициент ослабления, коэффициент обратного рассеяния, степенную связь и их погрешности. Для определения параметров погрешности минимизируются. Таким образом, связь между коэффициентами обратного рассеяния и ослабления была найдена посредством решения лидарного уравнения в терминах Клетта для различных направлений зондирования и зондируемых слоев. Средние квадратичные отклонения были рассчитаны для слоев с границами в пределах 200-600 м [2].

Используя найденные величины и интегральное решение лидарного уравнения, можно восстановить профили коэффициентов обратного рассеяния и ослабления.

На рис. 1 представлены вертикальные профили коэффициента ослабления и коэффициента обратного рассеяния, определённые по этим лидарным данным.

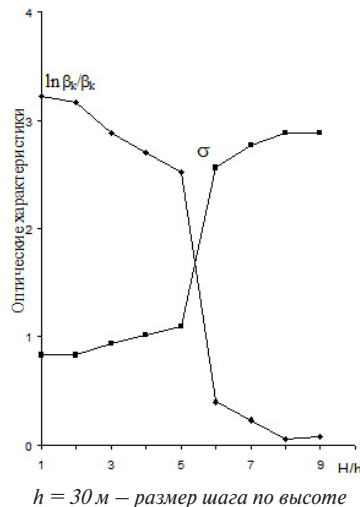
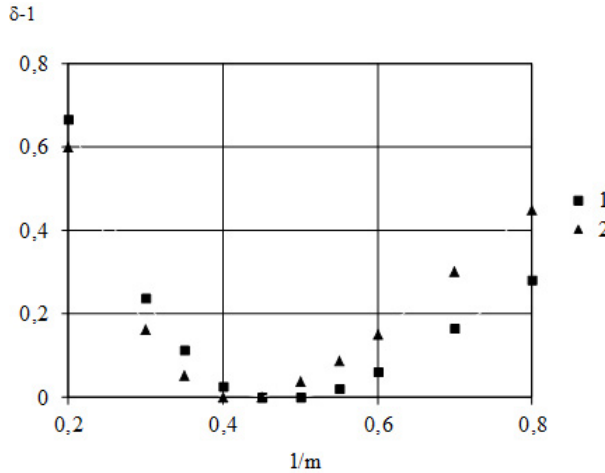


Рис. 1 — Вертикальные профили коэффициента ослабления коэффициента обратного рассеяния

На рис. 2 и в таблице 1 представлены средние квадратичные отклонения δ (за вычетом минимального) для различных пар углов места и зондируемых слоёв с учетом и без учета длительности импульса. Представленные результаты учитывают всю совокупность поправок равенства (12). Минимумы кривых, построенные с учетом и без учета длительности импульса, находятся в точках: 0,5 и 0,45, соответственно. Таким образом, погрешность величины m , связанная с конечностью длительности импульса для данных работы [2] составляет 10%.



1 - с учетом длительности импульса, 2- без учета длительности импульса
 Рис. 2 – Среднее квадратичное отклонение решений интегрального уравнения по совокупности направлений зондирования и зондируемых слоев

Таблица 1

Среднее квадратичное отклонение решений интегрального уравнения

1/m	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
($\delta-1$)1	0,239	0,114	0,025	0,001	0,000	0,021	0,061
($\delta-1$)2	0,162	0,053	0,001	0,000	0,036	0,087	0,151

Заключение

В работе проанализированы интегральные методы интерпретации данных многопозиционного лидарного зондирования неоднородной атмосферы и найдено новое итерационное решение задачи, учитывающее конечную длительность зондирующего импульса. Найденное решение позволяет повысить точность определения характеристик аэрозольных загрязнений неоднородной атмосферы лидарными системами.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.2 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № П1037 от 31 мая 2010 г.) по направлению «Физика атмосферы»

Литература

1. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Суворов А.П.* Зондирование атмосферы импульсами конечной длительности // Седьмая международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли». Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 2010, с.30.
2. *Yegorov A.D.* Atmospheric aerosols measurements and reliability problem [Text] / A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Yu.B. Rzhonsnitskaya // International Journal of Remote Sensing, 2008, v.29, 2449 – 2468.
3. *Muller, D., Ansmann, A., Mattis, I., Tesche, M., Wandinger, U., Althausen, D., and Pisani, G.* Aerosol type dependent lidar-ratio observed with Raman lidar. J. Geophys. Res., 112(D16202):doi:10.1029/2006JD008292, 2007.
4. *Nishizawa T., Sugimoto N., Matsui I., Shimizu A., Liu X., Zhang Y., Li R., Liu J.*, 2010: Vertical distribution of water-soluble, sea salt, and dust aerosols in the planetary boundary layer estimated from two-wavelength backscatter and one-wavelength polarization lidar measurements in Guangzhou and Beijing, China, Atmospheric Research 96, pp. 602-611.
5. *Omar A., Winker D., Kittaka C., Vaughan M., Liu Z., Hu Y., Trepte C., Rogers R., Ferrare R., Lee K. P., Kuehn R., and Hostetler C.*, “The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm,” J. Atmos. Oceanic Technol., vol.26, pp. 1994-2014, 2009.