

А.Д. Егоров, И.А. Потапова, Ю.Б. Ржонсницкая, Н.А. Саноцкая, В.А. Драбенко, А.А. Ошуркова

МИНИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОБРАЩЕНИЯ СЛАБЫХ СИГНАЛОВ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Y.B. Rzhonsnitskaya, N.A. Sanotskaya, V.A. Drabenko, A.A. Oshurkova

MINIMIZATION OF WEAK BACKSCATTERING SIGNALS INVERTING ERRORS

Рассматривается метод интерпретации лидарной информации, принятой с расстояний с минимальными систематическими погрешностями. Метод был успешно применен для обработки данных для типичных атмосферных условий.

Ключевые слова: лидарная информация, обратная задача, однородная атмосфера, фоновая засветка, минимальные систематические погрешности

It is considered the method of interpretation of lidar information received from the distances with minimal systematic errors. The method was used successfully for data processing for typical atmospheric scenarios.

Key words: lidar information, inverse problem, homogeneous atmosphere, background light, minimal systematic errors

Обычно интерпретация данных лидарного зондирования атмосферного аэрозоля основывается на обращении лидарного уравнения, записанного для незначительной фоновой засветки [1-3]. Это уравнение связывает сигнал обратного рассеяния с коэффициентом обратного рассеяния β и коэффициентом ослабления σ . В общем случае фоновую засветку следует учитывать [4, 5].

В работе рассматривается метод интерпретации данных лидарного зондирования атмосферы с учетом фоновой засветки и с минимизацией систематической погрешности.

1. Метод интерпретации данных лидарных измерений с учетом фоновой засветки и с минимизацией погрешности

В случае однородной атмосферы для интерпретации данных лидарного зондирования атмосферного аэрозоля можно записать:

$$\delta_i = P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i, \quad (1)$$

где P_* – фоновая засветка, $B = A\beta$, A – постоянная лидара, R_i – расстояние зондирования.

Поскольку мощность сигнала P_i измеряется с погрешностью, величина δ_i , характеризующая эту погрешность, не равна нулю. Задача состоит в том, чтобы найти неизвестные постоянные P_* , B , σ , минимизируя сумму:

$$\delta^2 = \sum_1^n \delta_i^2 = \sum_1^n \left(P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i \right)^2. \quad (2)$$

Это можно сделать, решая систему уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_1^n \left(P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i \right) &= 0, \\ \sum_1^n \left(P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i \right) \frac{1}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) &= 0, \\ \sum_1^n \left(P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i \right) \frac{1}{R_i} \exp(-2\sigma R_i) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Для решения полученной системы (3) в случае малых величин σ работы [4] ее можно линеаризовать, учитывая приближенное равенство:

$$\exp(-2\sigma R_i) = 1 - 2\sigma R_i. \quad (4)$$

Влияние систематического искажения сигнала проанализировано в работе [6], для его минимизации в настоящей работе рассматриваются расстояния зондирования, начиная с некоторого достаточно большого значения R_1 . Это значение отыскивается из условия постоянства определяемых величин P_* , B , σ , на трассе зондирования.

Решение сформулированной задачи относительно величины P_* , которая не должна зависеть от расстояния зондирования R_i , имеет вид:

$$P_* = D_1 / D_0, \quad (5)$$

где

$$D_0 = \begin{vmatrix} n & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} & \sum_1^n \frac{1}{R_i} \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^4} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \end{vmatrix}, \quad D_1 = \begin{vmatrix} \sum_1^n P_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} & \sum_1^n \frac{1}{R_i} \\ \sum_1^n \frac{P_i}{R_i^2} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^4} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \\ \sum_1^n \frac{P_i}{R_i} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \end{vmatrix}.$$

Аналогично можно определить величины B , σ , которые также не должны зависеть от расстояния зондирования R_i .

2. Результаты интерпретации данных лидарных измерений

Для минимизации влияния искажения сигнала работы [4] выбраны расстояния зондирования, начиная с $R_1 = 2500$ м.

На рис. 1а представлены соответствующие результаты расчетов величины фоновой засветки P_* . Для сравнения на рисунке 1б представлены результаты расчетов величины фоновой засветки для $R_1 = 750$ м. Очевидно, что выбор расстояния $R_1 = 2500$ м решает задачу минимизации влияния искажения, в отличие от выбора расстояния $R_1 = 750$ м.

С учетом результатов расчетов величины фоновой засветки, на рис. 2 представлены результаты расчетов коэффициента ослабления:

$$\sigma = \frac{1}{2} \left\{ n - \frac{\sum_1^n (P_i - P_*) R_i^2}{(P_0 - P_*) R_0^2} \right\} / \sum_1^n (R_i - R_0), \quad (6)$$

который равен $0,033 \text{ км}^{-1}$.

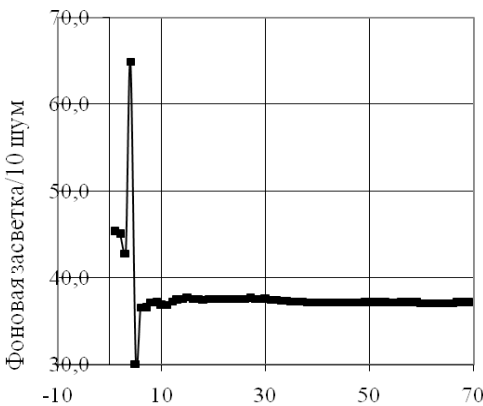
С учетом найденных значений σ , P_* можно определить величину B :

$$B = \frac{\sum_1^n (P_i - P_*) \exp(-2\sigma R_i) / R_i^2}{\sum_1^n \exp(-4\sigma R_i) / R_i^4}. \quad (7)$$

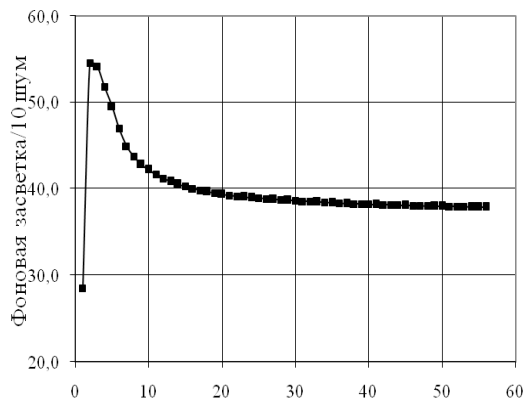
На рис. 3 представлены результаты расчетов величины $\frac{B_i - B}{B}$, причем в относительных единицах $B = 60,9$. По измеренному эхо-сигналу и найденным константам можно оценить шум сигнала. Рис. 4 показывает возможность использовать для оценки шума известную формулу:

$$\delta_i = C \sqrt{P_i}. \quad (8)$$

а)



б)



Номер шага/2, шаг 75 м

Номер шага/3

Рис. 1 – результаты расчетов величины P_*

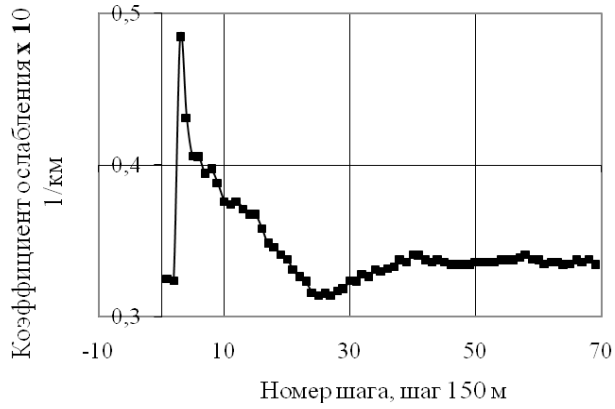


Рис. 2 – Результаты расчетов коэффициента ослабления

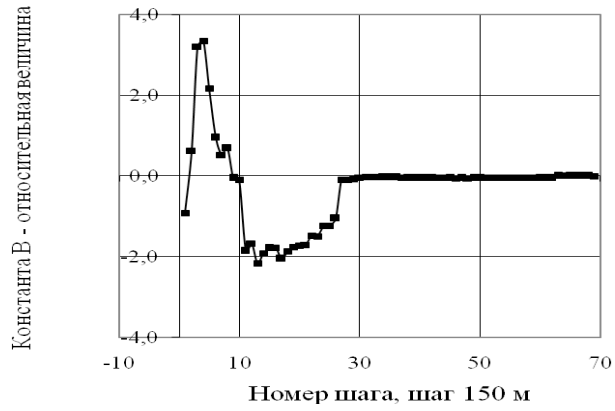


Рис. 3 – Результаты определения величины B

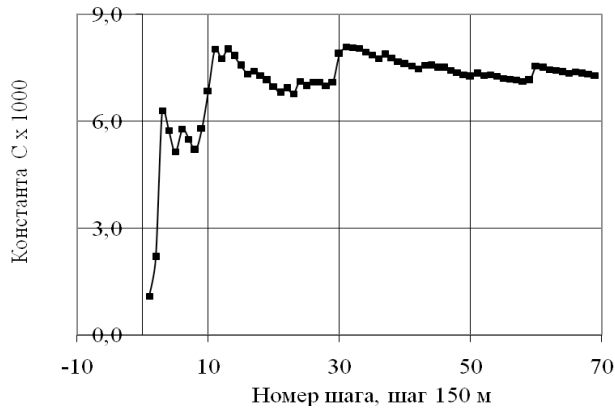


Рис. 4 – Результаты определения связи шума с мощностью эхо-сигнала

В работе [7] осуществлен анализ результатов зондирования без привлечения степенной зависимости погрешности измерений сигнала от его мощности. Сравнение результатов настоящей работы с результатами работы [7] показывает удовлетворительную сопоставимость двух приближений.

Заключение

В работе развито направление решения обратных задач лидарного зондирования с учетом фоновой засветки. Разработан метод интерпретации данных лидарных измерений, минимизирующий систематические погрешности определения коэффициента ослабления, фоновой засветки. Разработанный метод успешно применен для типичных атмосферных условий и для реалистических характеристик аппаратуры.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № 16.740.11.0619 от 31 мая 2011 г.) по направлению «Геология, горное дело, геохимия, геофизика, география и гидрология суши, океанология, физика атмосферы».

Литература

1. *Egorov A.D., Perelman A.Y., Kaziakhmedov T.B.* Estimate of aerosol microstructure based on integral method of multiposition sounding of the atmosphere // *Atmospheric and Oceanic Optics.* – 1997. № 10. – P. 729 – 732.
2. *Egorov A.D., Potapova I.A., Shchukin G.G.* Lidar methods for probing an atmospheric aerosol // *Journal of Optical Technology.* – 2001. № 68. – P. 801 – 804.
3. *Егоров А.Д.* Методы многопозиционнолидарного зондирования атмосферы // *Ученые записки РГГМУ.* – 2010. № 16. – С. 87 – 93.
4. *Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B.* Atmospheric aerosols measurements and reliability problem // *International Journal of Remote Sensing.* – 2008. № 29. – P. 2449–2468.
5. *Ржонсницкая Ю.Б.* Погрешность определения фоновой засветки методом двухпозиционного лидарного зондирования атмосферы: труды ГГО. – 2010. Вып. 562. – С. 258–266.
6. *Потапова И.А.* Оценка инструментальных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик // *Ученые записки РГГМУ.* – 2009. № 9. – С. 86 – 90.
7. *Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B.* The treatment of low-power lidar signals // *J. Opt. Technol.* – 2007. № 74. – P. 665 – 668.