

# ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 551.501.7

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СЛАБО ЗАМУТНЕННОЙ АТМОСФЕРЫ

© 2013 г. А. Д. Егоров, доктор физ.-мат. наук; И. А. Потапова, доктор физ.-мат. наук; Ю. Б. Ржонсницкая, канд. физ.-мат. наук; Н. А. Саноцкая, канд. физ.-мат. наук

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

E-mail: egorovad@rambler.ru

Рассмотрены методы интерпретации сигналов обратного рассеяния, принятых от слабо замутненной атмосферы. Установлено, что точность интерпретации этих сигналов может быть повышена при использовании эффективной процедуры осреднения на отрезке трассы зондирования и линейной аппроксимации пропускания.

**Ключевые слова:** прозрачность атмосферы, лидарные измерения, мощность сигнала, нелинейная обратная задача, линейное решение, погрешность коэффициента ослабления.

Коды OCIS: 280.0280, 280.1100, 280.1120.

Поступила в редакцию 10.09.2012.

### Введение

Лидарная информация о характеристиках аэрозольного загрязнения атмосферы отличается возможностью его дистанционной регистрации, высоким пространственным разрешением и оперативностью получения, что обеспечивает ее научную и практическую значимость. Характеристики аэрозольного загрязнения в интегральных методах лидарного зондирования можно связать с параметрами слабо замутненной атмосферы [1, 2]. Это приводит к необходимости разработки методов интерпретации и оценки погрешности результатов лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы. В работе [3] рассмотрены систематические ошибки, для данных конкретного лидара [4] показано наличие существенных искажений сигнала обратного рассеяния, которые препятствуют интерпретации результатов измерений на расстояниях до 2,5 км. В настоящей работе участок зондирования с недопустимо большими систематическими погрешностями исключается. Рассматривается случайная погрешность измерения для условий работы [4] со слабо изменяющимися во времени параметрами

среды, когда удалось выполнить осреднение по большому количеству измерений. Расчет погрешности выполняется по значениям лидарных сигналов, полученных в процессе натуральных измерений.

### Основы методов интерпретации результатов лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы

Для коротких зондирующих импульсов в приближении однократного рассеяния обрабатываемое лидарное уравнение связывает эхо сигнал  $P_i$  с оптическими характеристиками аэрозоля атмосферы:

$$P_i = P_* + B/R_i^2 \exp(-2\sigma R_i), \quad (1)$$

где  $P_*$  – фоновая засветка,  $B = A\beta$ ,  $A$  – постоянная лидара,  $R_i$  – расстояние зондирования,  $\beta$  – коэффициент обратного рассеяния,  $\sigma$  – коэффициент ослабления, постоянный вдоль трассы зондирования слабо замутненной атмосферы.

Для того чтобы найти средние значения  $P_*$ ,  $B$ ,  $\sigma$  в случае слабо замутненной атмосферы, т. е. в случае малых величин  $\sigma$ , задачу можно линеаризовать и использовать метод наимень-

ших квадратов. Искомые величины определяются на основании решения системы уравнений

$$\sum_1^n (P_* + B/R_i^2 - 2\sigma B/R_i - P_i) = 0, \quad (2)$$

$$\sum_1^n (P_* + B/R_i^2 - 2\sigma B/R_i - P_i) 1/R_i^2 = 0, \quad (3)$$

$$\sum_1^n (P_* + B/R_i^2 - 2\sigma B/R_i - P_i) 1/R_i = 0. \quad (4)$$

При зондировании слабо замутненной атмосферы для определения осредненной по  $n$  измерениям фоновой засветки  $P_{*n}$  можно использовать непосредственно систему уравнений (2)–(4), поскольку значение  $P_*$  близко к измеряемому сигналу  $P_i$  и определяется с меньшей погрешностью по сравнению с погрешностью определения величины  $\sigma$ .

Соответствующая случайная погрешность  $\delta$  фоновой засветки  $P_*$  может быть определена в линейном приближении с использованием правила переноса ошибок (см., например, [5]).

Величины  $B$ ,  $\sigma$  целесообразно определять для уменьшения их погрешности с учетом результата расчета фоновой засветки  $P_*$  на основании решения системы уравнений (3), (4). Их случайные погрешности  $\delta_1$  при определенном одном параметре  $P_*$  рассчитываются также на основании правила переноса ошибок.

В частности, при известном параметре  $B$  коэффициент ослабления определяется выражением

$$\sigma = (D_1 + BD_2)/(2BD_3), \quad (5)$$

где

$$D_1 = \sum_{i=1}^n P_i \sum_{i=1}^n (1/R_i) - n \sum_{i=1}^n (P_i/R_i), \quad (6)$$

$$D_2 = n \sum_{i=1}^n (1/R_i^3) - \sum_{i=1}^n (1/R_i) \sum_{i=1}^n (1/R_i^2), \quad (7)$$

$$D_3 = n \sum_{i=1}^n (1/R_i^2) - \left( \sum_{i=1}^n (1/R_i) \right)^2. \quad (8)$$

Для случайной погрешности  $\delta_1$  имеет место формула

$$\delta_1 = \delta_p / 2B \sqrt{(n/D_3)}, \quad (9)$$

где  $\delta_p$  – случайная погрешность эхо-сигнала и учитывается, что эхо-сигнал близок к постоянной величине – фоновой засветке.

Еще более точно можно определить любой из искомых параметров с учетом результата расчета двух других неизвестных величин. Например, фоновую засветку  $P_*$  с погрешностью  $\delta_2$  можно вычислить, используя выражение

$$P_* = 1/n \sum_{i=1}^n [P_i - B/R_i^2 \exp(-2\sigma R_i)] \quad (10)$$

при предварительно рассчитанных значениях  $B_n$ ,  $\delta_n$ .

### Погрешности результатов лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы

На рис. 1 представлены результаты расчета погрешности фоновой засветки в линейном приближении для лидарных сигналов, рассмотренных в работе [4] с осреднением по 1500 посылкам зондирующих импульсов с частотой 50 посылок в секунду. Приводится зависимость от расстояния зондирования погрешности, отнесенной к мощности фоновой засветки. Погрешность фоновой засветки удастся уменьшить до 0,1% за счет увеличения количества измерений на отрезке трассы достаточной пространственной протяженности. Несмотря на малое значение погрешности актуален вопрос о повышении точности интерпретации данных лидарного зондирования, так как рассматриваемый отрезок трассы, на котором атмосфера является слабо замутненной, может быть существенно короче.

На рис. 2 представлены результаты расчета погрешности коэффициента ослабления с использованием выражения (9). Приводятся зависимости погрешностей, отнесенных к ко-

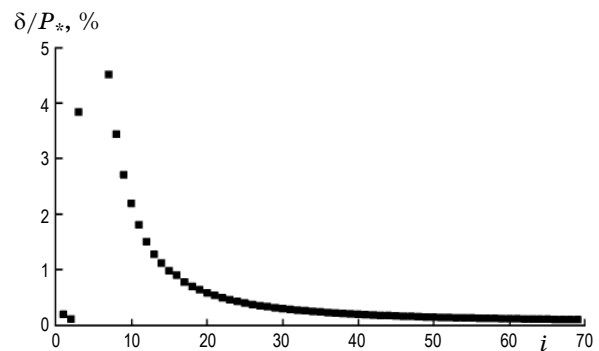


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности фоновой засветки  $\delta/P_*$ .  $i$  – номер шага, шаг 150 м.

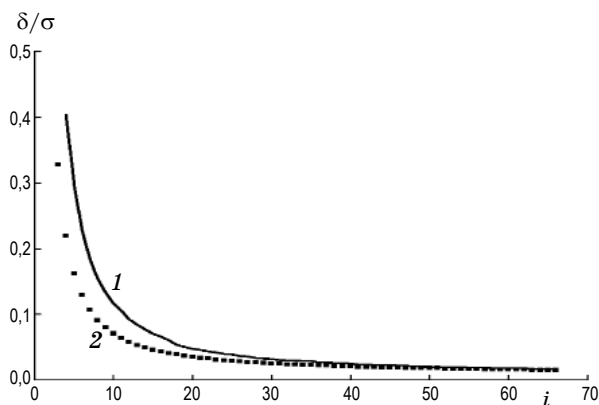


Рис. 2. Результаты расчетов относительной погрешности коэффициента ослабления для разных шагов зондирования (1 – 75 м, 2 – 150 м).

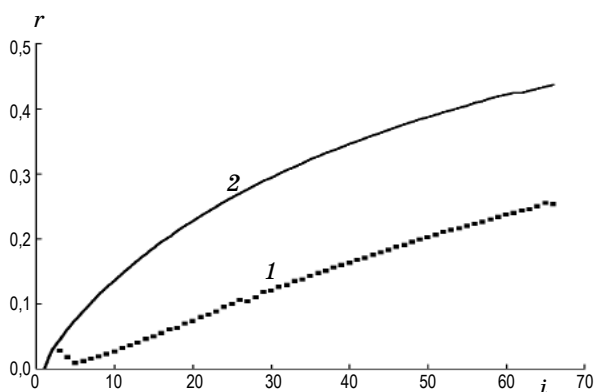


Рис. 3. Результаты определения отношений погрешностей  $r = \delta_2/\delta$  для фоновой засветки (1) и  $r = \delta_2/\delta_1$  для коэффициента ослабления (2).

эффиценту ослабления, от расстояния зондирования для разных шагов зондирования. Погрешность коэффициента ослабления может быть меньше 2%, но величина  $\sigma$  определяется с большей погрешностью по сравнению с погрешностью определения  $P_*$ .

На рис. 3 представлены результаты определения отношений погрешностей для фоновой засветки ( $\delta_2/\delta$ ) и для коэффициента ослабления ( $\delta_2/\delta_1$ ). Полученные зависимости показывают, что погрешности определения фоновой засветки и коэффициента ослабления могут быть уменьшены путем выбора алгоритма статистической обработки более чем в 2–3 раза.

### Выводы

С использованием данных эксперимента проведен анализ погрешностей лидарного определения оптических характеристик атмосферного аэрозоля. Установлено, что погрешности определения коэффициента ослабления и фоновой засветки могут быть уменьшены до 2% и 0,1% соответственно путем увеличения количества измерений на отрезке трассы зондирования и за счет выбора алгоритма статистической обработки более, чем в 2 раза.

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., Щукин Г.Г. Методы лидарного зондирования атмосферного аэрозоля // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 11. С. 10–14.
2. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б. Обращение лидарных сигналов малой мощности // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 10. С. 25–28.
3. Потапова И.А. Оценка инструментальных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик // Ученые записки РГГМУ. 2009. № 9. С. 86–91.
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. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. 276 с.