

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 551.501.7

УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ЛИДАРНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЯ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ СЛАБО ЗАМУТНЕННОЙ АТМОСФЕРЫ

© 2015 г. Н. А. Саноцкая, канд. физ.-мат. наук

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

E-mail: hydro.rgo@gmail.com

В связи с необходимостью определения характеристик атмосферного аэрозоля на значительных расстояниях от лидара рассматриваются методы интерпретации слабых сигналов обратного рассеяния. Установлено, что погрешность определения концентрации аэрозоля может быть существенно уменьшена за счет использования эффективного алгоритма статистической обработки и весовых коэффициентов.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, лидарные измерения, мощность сигнала, обратная задача, линейное решение, ослабление, погрешность, весовые коэффициенты.

Коды OCIS: 280.0280, 280.1100, 280.1120.

Поступила в редакцию 09.06.2014.

Введение

Лидарная информация о содержании аэрозоля в атмосфере получается оперативно и дистанционно с высоким пространственным разрешением. Этим обеспечивается ее научная и практическая значимость. Поскольку характеристики аэрозольного загрязнения требуется определять на значительных расстояниях от лидара, имеется необходимость интерпретации слабых сигналов обратного рассеяния. Сложность интерпретации таких сигналов обусловлена существенной ролью погрешностей измерений [1], включая погрешности из-за фоновой засветки [2].

Фоновая засветка определяется по данным, полученным до посылки зондирующего импульса. Результаты ее определения могут не обеспечить достаточной точности измерений, в том числе, при зондировании слабо замутненной атмосферы. В связи с этим в работе, наряду с задачей интерпретации данных лидарного зондирования аэрозоля, рассматривается задача определения фоновой засветки на основании решения лидарного уравнения.

Лидарное определение концентрации атмосферного аэрозоля

В работе [3] лидарное уравнение, которое связывает эхо-сигнал P_i с коэффициентами обратного рассеяния β и ослабления σ

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

рассмотрено в линейном приближении, что позволило уменьшить случайную погрешность коэффициента ослабления и фоновой засветки P_* .

В уравнении (1) $B = A\beta$, A – постоянная лидара, R_i – расстояние зондирования.

Случайную погрешность определяемых величин можно дополнительно существенно уменьшить, если ввести обоснованные весовые коэффициенты.

Учитывая связь коэффициента ослабления с интегральной концентрацией N аэрозольных частиц [4] для определения величины N можно записать уравнение

$$P_i = P_* + BR_i^{-2} \exp(-2\sigma_* NR_i), \quad (2)$$

где σ_* – коэффициент ослабления [5].

Уравнение (2) при зондировании слабо за-
мутненной атмосферы целесообразно линейри-
зовать. Погрешность, связанную с линейриза-
цией, можно уменьшить, используя аналог [6]

$$P_i = P_* + BR_i^{-2} \exp(-2\sigma_* \tilde{N} R_i) + \varepsilon R_i^{-1} \exp(-2\sigma_* \tilde{N} R_i). \quad (3)$$

В таком случае решение задачи (3) отно-
сительно фоновой засветки совпадает с реше-
нием, исследованным в работе [6]. При этом
 $\varepsilon = 2B\sigma_* \Delta N$ – малый параметр, $\Delta N = N - \tilde{N}$,
а приближенное значение концентрации час-
тиц \tilde{N} определяется соотношением

$$\tilde{N} = -\frac{1}{2m\sigma_* \Delta} \ln X_m, \quad (4)$$

где $\Delta = R_{i+1} - R_i$ – шаг зондирования,

$$X_m = \frac{b_m - \sqrt{b_m^2 - 4a_m c_m}}{2a_m}, \quad a_m = \sum_{i=1}^n \frac{P_i - P_{i+m}}{R_{i+2m}^2},$$

$$b_m = \sum_{i=1}^n \frac{P_i - P_{i+2m}}{R_{i+m}^2}, \quad c_m = \sum_{i=1}^n \frac{P_{i+m} - P_{i+2m}}{R_i^2}.$$

Знак в решении выбирается с учетом того,
что оно до осреднения является решением урав-
нения

$$\frac{P_i - P_{i+m}}{R_{i+2m}^2} X_m^2 - \frac{P_i - P_{i+2m}}{R_{i+m}^2} X_m + \frac{P_{i+m} - P_{i+2m}}{R_i^2} = 0,$$

где $R_{i+m} - R_i = 2m\Delta$.

Это решение может быть записано в виде

$$X_m = \frac{1}{2} \frac{P_i - P_{i+2m}}{P_i - P_{i+m}} \frac{R_{i+2m}^2}{R_{i+m}^2} \pm \left[\frac{1}{4} \left(\frac{P_i - P_{i+2m}}{P_i - P_{i+m}} \right)^2 \frac{R_{i+2m}^4}{R_{i+m}^4} - \frac{P_{i+m} - P_{i+2m}}{P_i - P_{i+m}} \frac{R_{i+2m}^2}{R_i^2} \right]^{1/2}.$$

Из прямой задачи, когда задается $X_m = X_{m0}$,
следует

$$\frac{P_i - P_{i+2m}}{P_i - P_{i+m}} = \frac{R_{i+2m}^2 - R_i^2 X_{m0}^2}{R_{i+m}^2 - R_i^2 X_{m0}^2} \frac{R_{i+m}^2}{R_{i+2m}^2},$$

где

$$X_{m0} = \exp(-2\sigma_* \tilde{N}_0 m \Delta).$$

Для определения знака можно использовать
равенство

$$X_m = \frac{1}{2} \frac{R_{i+2m}^2 - R_i^2 X_{m0}^2}{R_{i+m}^2 - R_i^2 X_{m0}^2} \pm$$

$$\pm \left[\frac{1}{4} \left(\frac{R_{i+2m}^2 - R_i^2 X_{m0}^2}{R_{i+m}^2 - R_i^2 X_{m0}^2} - 2X_{m0} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где учитывается, что одно из решений обрат-
ной задачи X_{m0} . Поскольку

$$\exp(2\sigma_* \tilde{N}_0 m \Delta) > 1,$$

$$\exp(2\sigma_* \tilde{N}_0 m \Delta) + \exp(-2\sigma_* \tilde{N}_0 m \Delta) > 1,$$

$$R_i = i\Delta,$$

то

$$\frac{R_{i+2m}^2 - R_i^2 X_{m0}^2}{R_{i+m}^2 - R_i^2 X_{m0}^2} > 2X_{m0},$$

а знак в решении – минус.

Аналогичный результат получается для фо-
новой засветки.

Имеется другая возможность определения
параметра \tilde{N} . Для вычисления искомого пара-
метра методом наименьших квадратов в соот-
ношении

$$\delta_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - P_{i+m}}{R_{i+2m}^2} X_m^2 - \frac{P_i - P_{i+2m}}{R_{i+m}^2} X_m + \frac{P_{i+m} - P_{i+2m}}{R_i^2} \right)^2 \quad (5)$$

задаются различные его значения, и находят-
ся минимальная величина суммы. На рис. 1
приведена характеристика $\delta(\tilde{N})$ – значение (5),
умноженная на 1000, в зависимости от отноше-
ния $l = \tilde{N}(5) / \tilde{N}(4)$.

Минимум $\delta(\tilde{N})$, вычисленной по данным
эксперимента [7], имеет место на рис. 1 при зна-
чении, близком к 1, что показывает в этом слу-
чае слабую чувствительность решения рассмат-
риваемой задачи к используемому алгоритму.

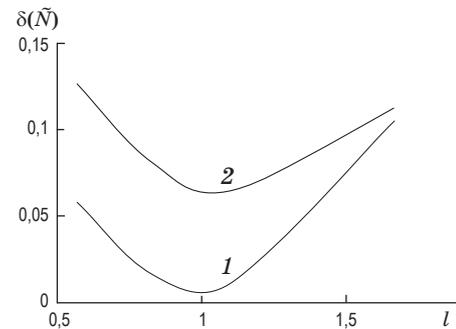


Рис. 1. Относительная погрешность фоновой за-
светки. Зависимость характеристики $\delta(N)$ от от-
ношения l . $n = 10$ (кривая 1). $n = 40$ (кривая 2).

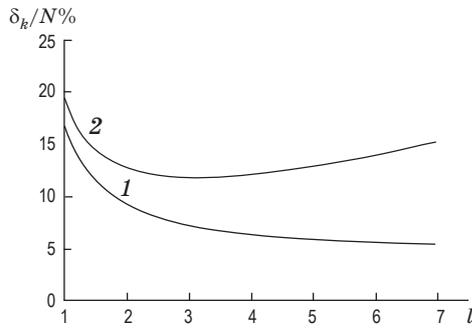


Рис. 2. Зависимость относительной случайной погрешности δ/N от числа шагов для различных алгоритмов. Алгоритм 6 (кривая 1), алгоритм 7 (кривая 2).

С учетом решения (4) на основании равенства (3) можно определить фоновую засветку P_* . После этого можно уточнить результат определения N , минимизируя сумму

$$\delta_1^2 = \sum_1^n \left\{ \ln[(P_i - P_*)R_i^2] - \ln B + 2\sigma_*NR_i \right\}^2 \times R_i^4 \exp(4\sigma_*NR_i). \quad (6)$$

Следует обратить внимание на то, что в работе предпочитается связь концентрации частиц аэрозоля с коэффициентом ослабления, поскольку направленное рассеяние существенно зависит от свойств частиц [8].

В задачу (6) введен весовой коэффициент $\gamma = R_i^4 \exp(4\sigma_*NR_i)$, обоснованный в работе [6]. Для сравнения на рис. 2 показана зависимость относительной погрешности концентрации частиц аэрозоля δ_k/N от числа шагов зондирования, количество которых i измеряется в десятках, для алгоритма (6) и для аналогичного алгоритма без введения весового коэффициента

$$\delta_2^2 = \sum_1^n \left\{ \ln[(P_i - P_*)R_i^2] - \ln B + 2\sigma_*NR_i \right\}^2. \quad (7)$$

Результаты анализа погрешностей приведены для шага, равного 0,15 км, для экспериментальных данных [7]. Сравнение этих двух зависимостей показывает, что δ/N , вычисленные при анализируемых условиях, могут отличаться почти в 3 раза. Таким образом, в данном случае имеет место существенная чувствительность решения рассматриваемой задачи к ис-

* * * * *

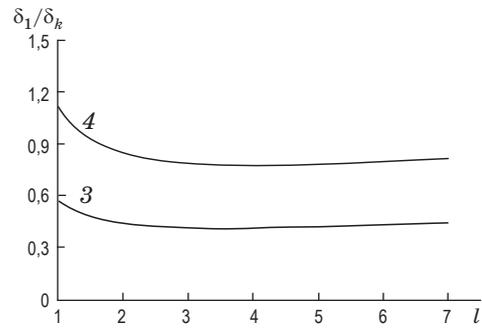


Рис. 3. Отношение погрешностей δ_1/δ_k как зависимость от числа шагов для различных схем обработки данных. Симметричная схема (кривая 3), несимметричная схема (кривая 4).

пользуемому алгоритму, а проблема весовых коэффициентов достаточно важна.

Отношения погрешностей δ_1/δ_k представлены на рис. 3 для экспериментальных данных [7] как зависимости от числа шагов для симметричной схемы обработки данных 3 и для несимметричной схемы 4. Сравнение этих зависимостей показывает, что погрешности могут значительно различаться. Таким образом, и в этих случаях результаты обработки лидарных данных существенно зависят от используемых алгоритмов.

Выводы

Выполнены исследования методов интерпретации лидарных сигналов, включающих фоновую засветку. Показано, что точность лидарных измерений может быть повышена за счет использования эффективной процедуры осреднения на трассе зондирования, отличающейся введением обоснованных весовых коэффициентов. Для уменьшения случайной погрешности определения искомых величин рассмотрена линеаризованная задача. Осуществлена линеаризация с введением малого параметра – разности между искомой характеристикой и ее предварительно вычисленным значением. Сравнение погрешностей алгоритмов с учетом и без учета введенных весовых коэффициентов показало, что погрешности концентрации частиц аэрозоля, найденные при анализируемых условиях, за счет введения весовых коэффициентов могут быть уменьшены почти в 3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б. Обращение лидарных сигналов малой мощности // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 10. С. 25–28.
2. Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem // Intern. J. Remote Sensing. 2008. № 29. P. 2449–2468.
3. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Саноцкая Н.А. Оценка погрешностей результатов лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 3. С. 58–60.
4. Yegorov A.D., Kopp I.Z., Perelman A.Y. Air aerosol pollution and lidar measurements // Proc. SPIE “Lidar and Atmospheric Sensing”. 1995. № 2505. P. 38–43.
5. Егоров А.Д., Ионин В.А. Вопросы параметризации оптико-микроструктурных связей аэрозольных частиц // Труды ГГО. 1981. Вып. 448. С. 70–75.
6. Егоров А., Потапова И., Ржонсницкая Ю. Интерпретация лидарной информации об атмосферном аэрозоле. Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2014. 104 с.
7. Егоров А.Д., Потапова И.А., Щукин Г.Г. Методы лидарного зондирования атмосферного аэрозоля // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 11. С. 10–14.
8. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Саноцкая Н.А. Определение оптических и микроструктурных характеристик атмосферного аэрозоля // Ученые записки РГГМУ. № 11. 2009. С. 71–78.