

*В.А. Драбенко*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ**

*V.A. Drabenko*

### **USING OPTICAL RELATIONSHIPS FOR DEVELOPMENT OF INTEGRAL METHODS OF ATMOSPHERE LIDAR PROBING**

*Рассмотрены лидарные методы, использующие соотношение коэффициента ослабления и коэффициента обратного рассеяния. Выполнено сравнение погрешностей коэффициента ослабления и оптической толщины, определенных системой, включающей лидар и отражатель. Показано, в каких случаях оптическая толщина определяется более точно, чем коэффициент ослабления.*

*Ключевые слова: лидар, зондирование, отражатель, атмосфера, погрешность, коэффициенты ослабления и обратного рассеяния, оптическая толщина.*

*There were considered the lidar methods using the relationship between the extinction coefficient and backscattering coefficient. There were compared the errors of the extinction coefficient and the optical thickness determined by the system including lidar and reflector. It is shown in what cases the optical thickness is determined more accurately than the extinction coefficient.*

*Key words: lidar, probing, reflector, atmosphere, error, extinction and backscattering coefficients, optical thickness.*

Методы многопозиционного лидарного зондирования атмосферы [5] разрабатываются для определения различных атмосферных характеристик, включая МДВ. Интерпретация данных многопозиционного зондирования основывается на интегральном решении лидарного уравнения [6]. Это решение связывает сигнал обратного рассеяния с коэффициентом ослабления атмосферы в двух вершинах замкнутого многоугольника, образованного отрезками пересекающихся трасс зондирования [1]. В основанных на данном решении методах [2] используется степенная зависимость коэффициента ослабления от коэффициента обратного рассеяния, которая является приближенной. Она выпадает при стягивании многоугольника в точку [3], но в таком случае решаемая обратная задача становится математически некорректной. Рассмотрение различных многоугольников с общей вершиной [6] дает возможность определить параметры степенной зависимости, если она достаточно реалистична. Таким образом, актуальна задача исследования [7] и использования зависимости коэффициента ослабления от коэффициента обратного рассеяния в природных условиях.

В настоящей работе рассматриваются соответствующие методы. Проводится детальный анализ точности этих методов.

*Однопозиционные схемы зондирования с отражением излучения*

В рассматриваемых схемах лидар посылает импульс, который отражается зеркалом в обратном направлении. Принимается эхосигнал от рассеивающего объема в точке  $R_1$  от лидара, в которой коэффициент ослабления равен  $\sigma_1$ . Эхосигнал до отражения от зеркала в этой точке равен  $S_1$ , а после отражения равен  $S_{11}$ . Оптическая толщина участка, ограниченного точкой  $R_1$  и зеркалом в точке  $R_2$ , равна  $\tau_1$ .

Представляется интересным сравнить случайную погрешность  $\delta_{\sigma_1}$  величины  $\sigma_1$  и исследованную [5]  $\delta_{\tau_1}$  величины  $\tau_1$  для однопозиционных схем зондирования с отражением излучения в линейном приближении, пренебрегая погрешностью величины  $R$ , но учитывая, в отличие от предыдущих работ, погрешность определения связи коэффициентов ослабления и обратного рассеяния.

Случайная погрешность  $\delta_{\sigma_1}$  определяется формулой:

$$\delta_{\sigma_1}^2 = \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial P_1} \right)^2 \delta_1^2 + \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial P_{11}} \right)^2 \delta_{11}^2. \quad (1)$$

Ее можно рассчитать на основании решения системы уравнений для определения величин  $m$ ,  $\sigma_1$ , которую можно записать в виде:

$$\frac{S_1^m}{S_{11}^m} - 1 = m B_1 \sigma_1, \quad (2)$$

$$\frac{S_1^{m/2}}{S_{11}^{m/2}} - \frac{S_{11}^{m/2}}{S_1^{m/2}} = m C_1, \quad (3)$$

где

$$B_1 = 2 \left( \int_{R_1}^{R_2} \frac{S^m}{S_{11}^m} dR + \int_{R_1}^{R_2} \frac{S_1^m}{S_{11}^m} dR \right), \quad (4)$$

$$C_1 = 2 \left( \int_{R_1}^{R_2} S^m dR + \int_{R_1}^{R_2} S_1^m dR \right) D^{-m/2} \exp \left( 2 \int_0^{R_2} \sigma dR \right). \quad (5)$$

На основании уравнений (2), (3), пренебрегая вкладом в случайную погрешность параметров  $B_1$ ,  $C_1$ , содержащих интегральные величины, можно получить выражения

для производных  $\frac{\partial m}{\partial S_1}$ ,  $\frac{\partial m}{\partial S_{11}}$ ,  $\frac{1}{\sigma_1} \frac{\partial \sigma_1}{\partial S_1}$ ,  $\frac{1}{\sigma_1} \frac{\partial \sigma_1}{\partial S_{11}}$ .

С учетом равенства

$$\frac{S_1}{S_{11}} = \exp(4\tau_1) \quad (6)$$

получаются выражения для производных  $\frac{1}{\sigma_1} \frac{\partial \sigma_1}{\partial P_1}$ ,  $\frac{1}{\sigma_1} \frac{\partial \sigma_1}{\partial P_{11}}$ .

Для выполнения сравнения случайных погрешностей  $\delta_{\sigma_1}$  и  $\delta_{\tau_1}$  с учетом равенства

$$\tau_1 = \frac{1}{4} \ln \frac{S_1}{S_{11}}, \quad (7)$$

получается выражение

$$\frac{\delta_{\tau_1}}{\tau_1} / \frac{\delta_{\sigma_1}}{\sigma_1} = \frac{2m\tau_1(\exp(4m\tau_1) + 1) - \exp(4m\tau_1) + 1}{2m\tau_1(\exp(4m\tau_1) - 1)}. \quad (8)$$

Анализ результатов сравнения случайных погрешностей  $\delta_{\sigma_1}$  и  $\delta_{\tau_1}$ , выполненного с использованием формулы (8), показывает, что оптическая толщина определяется точнее коэффициента ослабления. При увеличении оптической толщины  $\tau_1$  различие погрешностей уменьшается.

Применимость выполненного исследования ограничена условиями, когда известна постоянная в связи коэффициента ослабления и коэффициента обратного рассеяния. В противном случае следует рассмотреть систему уравнений, сформулированную в следующем разделе.

***Случайная погрешность решения обратной задачи лидарного зондирования для двухточечных однопозиционных схем***

Случайная погрешность  $\delta_m$  двухточечных однопозиционных схем зондирования с отражением излучения определяется формулой, связывающей ее со случайными погрешностями эхосигналов:

$$\delta_m^2 = \left(\frac{\partial m}{\partial P_1}\right)^2 \delta_1^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial P_{11}}\right)^2 \delta_{11}^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial P_2}\right)^2 \delta_2^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial P_{21}}\right)^2 \delta_{21}^2, \quad (9)$$

где  $P_1, P_2$  — мощности эхо-сигналов, измеренные в двух рассматриваемых точках  $R_1, R_2$  до отражения;  $P_{11}, P_{21}$  — мощности эхо-сигналов, измеренные в тех же точках после отражения, отражатель располагается в точке  $R_3$ .

Величину  $\delta_m$  можно рассчитать на основании решения системы уравнений в приближении степенной связи между коэффициентом ослабления и коэффициентом обратного рассеяния. Эту систему для определения степени связи  $m$  можно записать в виде:

$$\delta_m^2 = \left(\frac{\partial m}{\partial P_1}\right)^2 \delta_1^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial P_{11}}\right)^2 \delta_{11}^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial P_2}\right)^2 \delta_2^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial P_{21}}\right)^2 \delta_{21}^2, \quad (10)$$

$$\frac{S_2^m}{S_{21}^m} - 1 = mB_2\sigma_2, \quad (11)$$

$$\sigma_2 S_1^{m/2} S_{11}^{m/2} = \sigma_1 S_2^{m/2} S_{21}^{m/2}, \quad (12)$$

где  $\sigma_1$  — коэффициент ослабления в ближней к лидару точке  $R_1$ ;  $\sigma_2$  — коэффициент ослабления в точке  $R_2$ .

На основании уравнений (10)–(12) можно получить выражения для производных  $\frac{\partial m}{\partial S_1}, \frac{\partial m}{\partial S_{11}}, \frac{\partial m}{\partial S_2}, \frac{\partial m}{\partial S_{21}}, \frac{1}{\sigma_1} \frac{\partial \sigma_1}{\partial S_1}, \frac{1}{\sigma_1} \frac{\partial \sigma_1}{\partial S_{11}}, \frac{1}{\sigma_1} \frac{\partial \sigma_1}{\partial S_2}, \frac{1}{\sigma_1} \frac{\partial \sigma_1}{\partial S_{21}}$ .

Случайную погрешность  $\delta_m$  можно сравнить с исследованной [1] случайной погрешностью  $\delta_{\tau_1}$  оптической толщины  $\tau_1$  отрезка, ограниченного точками  $R_1, R_2$ . Последнюю можно рассчитать на основании решения системы уравнений, которое можно записать в виде:

$$\frac{S_1 S_{21}}{S_{11} S_2} = \exp(4\tau_1). \quad (13)$$

Для относительной случайной погрешности  $\delta_{\tau_1}/\tau_1$  получается выражение:

$$\frac{\delta_{\tau_1}}{\tau_1} = \frac{1}{4\tau_1} \left\{ \left( \frac{\delta_1}{P_1} \right)^2 + \left( \frac{\delta_{21}}{P_{21}} \right)^2 + \left( \frac{\delta_{11}}{P_{11}} \right)^2 + \left( \frac{\delta_2}{P_2} \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (14)$$

Сравнить случайные погрешности  $\delta_m/m, \delta_{\sigma_1}/\sigma_1$  можно, рассчитав отношение:

$$\begin{aligned} \frac{\delta_m}{m} / \frac{\delta_{\tau_1}}{\tau_1} = & 2\tau_1 \left\{ q_1 + (q_2 + q_3) \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^{1/m} \right\}^{-1/2} |4q_5\tau_{13} - \\ & - q_4 q_6|^{-1} \left\{ q_1 [(2 - q_4)q_5]^2 + q_4^2 \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^{1/m} [q_2(2 - q_5)^2 + q_3(2 + q_5)^2] \right\}^{1/2}, \quad (15) \end{aligned}$$

где

$$q_1 = 1 + (2x_3 - 1)^2 \exp(4\tau_{13}), \quad (16)$$

$$q_2 = (x_2 \exp \tau_1)^2, \quad (17)$$

$$q_3 = ((2x_3 - x_2) \exp(\tau_{13} + \tau_{23}))^2, \quad (18)$$

$$x_2 = R_2/R_1, \quad x_3 = R_3/R_1, \quad (19)$$

$$q_4 = 1 - \exp(-4m\tau_{13}), \quad (20)$$

$$q_5 = 1 - \exp(-4m\tau_{23}), \quad (21)$$

$$q_6 = \frac{q_5}{m} \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2} + 4\tau_{23}, \quad (22)$$

$$\tau_1 = \tau_{13} - \tau_{23}, \quad (23)$$

$\tau_{13}$  — оптическая толщина отрезка, ограниченного точками  $R_1, R_3$ ;  $\tau_{23}$  — оптическая толщина отрезка, ограниченного точками  $R_2, R_3$ ,

$$\tau_{13} = \tau_1 \frac{x_3 - 1}{x_2 - 1}, \quad (24)$$

$$\tau_{23} = \tau_1 \frac{x_3 - x_2}{x_2 - 1}. \quad (25)$$

При выводе соотношения (15) учитываются равенства:

$$\frac{S_1}{S_{11}} = \exp(4\tau_{13}), \quad (26)$$

$$\frac{S_2}{S_{21}} = \exp(4\tau_{23}). \quad (27)$$

На рис. 1 представлены результаты сравнения случайных погрешностей  $\delta_{\sigma_1}$  и  $\delta_{\tau_1}$ . Расчеты проведены в широком диапазоне оптических толщин  $\tau_1$ . Кривая 1 соответствует значению  $m = 1$ , кривая 2 соответствует значению  $m = 0,3$ . При выполнении анализа влияния величин  $\tau_1, \tau_{13}, x_2, x_3, \sigma_1/\sigma_2, m$  задавались согласованные параметры, характерные для натуральных атмосферных измерений. На рис. 1а представлены результаты расчетов для следующих значений параметров:  $x_2 = 2, x_3 = 2,2, \tau_{13} = 6\tau_{23}, \sigma_1 = \sigma_2$ . Представленные результаты показывают, что интегральные алгоритмы лидарного определения коэффициента ослабления атмосферы при заданных параметрах являются менее точными, чем алгоритмы определения ее оптической толщины. При этом различие погрешностей может достигать нескольких раз. На рис. 1б представлены результаты расчетов для следующих значений:  $x_2 = 2, x_3 = 3, \tau_{13} = 2\tau_{23}, \sigma_1 = \sigma_2$ . Эти результаты показывают, что рассматриваемые алгоритмы лидарного определения коэффициента ослабления атмосферы при значении  $m = 1$  являются менее точными, чем алгоритмы определения ее оптической толщины. При значении  $m = 0,3$  алгоритмы лидарного определения коэффициента ослабления являются менее точными при оптических толщинах  $\tau_1 < 1,5$  и более точными при оптических толщинах  $\tau_1 > 1,5$ , чем алгоритмы определения оптической толщины.

На рис. 1в представлены результаты расчетов для значений:  $x_2 = 2, x_3 = 2,2, \tau_{13} = 2\tau_{23}$ , причем кривая 1 соответствует равенству  $(\sigma_1/\sigma_2)^{1/m} = 0,3$ , а кривая 2 — равенству  $(\sigma_1/\sigma_2)^{1/m} = 0,03$ . Представленные результаты показывают, что алгоритмы лидарного определения коэффициента ослабления при значении  $m = 1$  являются менее точными при оптических толщинах  $\tau_1 > 0,4$  и более точными при оптических толщинах  $\tau_1 < 0,4$ , чем алгоритмы определения оптической толщины. При значении  $m = 0,3$  граничное значение оптической толщины увеличивается с 0,4 до 2.

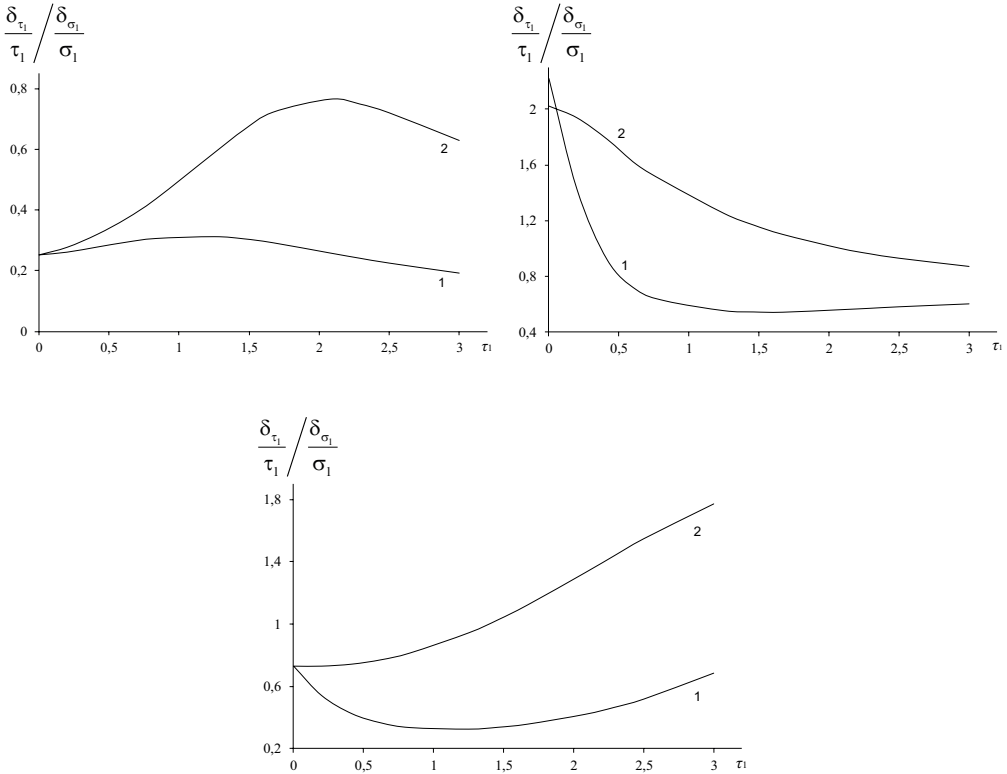


Рис. 1. Результаты сравнения случайных погрешностей коэффициента ослабления и оптической толщины.  
1 —  $m = 1$ ; 2 —  $m = 0,3$ .

**Заключение**

В работе выполнено сравнение случайных погрешностей коэффициента ослабления и оптической толщины для однопозиционных схем зондирования с отражением излучения. Сравнение выполнено с учетом погрешности, с которой определяется связь коэффициентов ослабления и обратного рассеяния. Показано, что интегральные алгоритмы лидарного определения коэффициента ослабления атмосферы могут быть

как менее, так и более точными, чем алгоритмы определения ее оптической толщины. Таким образом, для повышения точности решения рассмотренной обратной задачи целесообразно осуществить выбор используемого интегрального алгоритма в зависимости от условий выполнения измерений.

### Литература

1. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Драбенко В.А., Ошуркова А.А. Методы многопозиционного лидарного зондирования атмосферы. // Ученые записки РГГМУ, 2010, № 16, с. 87–93.
2. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Ошуркова А.А. Методы лидарного зондирования аэрозольных загрязнений атмосферы импульсами конечной длительности. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 18, с. 48–56.
3. Пат. 2439626 Российская Федерация, МПК G01W1/04 Способ определения прозрачности атмосферы. / Егоров А.Д., Потапова И.А., заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Российский государственный гидрометеорологический университет” № 2009144060; заявл. 27.11.2009; опубл. 10.01.2012; Бюл. № 1. — 7 с.
4. Пат. 2441261 Российская Федерация, МПК G01W1/00 Способ оптического зондирования атмосферы. / Егоров А.Д., Блакитная П.А., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Саноцкая Н.А., заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Российский государственный гидрометеорологический университет” № 2010143286; заявл. 22.10.2010; опубл. 27.01.2012; Бюл. № 3. — 7 с.
5. Egorov A.D., Potapova I.A., Shchukin G.G. Lidar methods for probing an atmospheric aerosol. // Journal of Optical Technology, 2001, 68, № 11, pp. 801–804.
6. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem. // International Journal of Remote Sensing, 2008, 29, pp. 2449–2468.
7. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Drabenko V.A., Sanotskaya N.A., Shchadin A.V. Atmospheric aerosols measurements and the reliability problem: new results. // Proc. of ISARD-2013. — St.Petersburg, 2013. — 47 p.