

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

МЕТОДЫ МНОГОПОЗИЦИОННОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

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

METHODS OF MULTIPPOSITION LIDAR ATMOSPHERIC PROBING

Рассматривается новый интегральный метод интерпретации данных лидарного зондирования атмосферы. С помощью незначительной аппроксимации результатов многопозиционных измерений достигается значительное снижение случайных погрешностей определения оптических характеристик атмосферного аэрозоля в условиях неоднородной атмосферы.

Ключевые слова: обратное рассеяние, ослабление, многопозиционные измерения, лидарное уравнение, интегральное решение

There is considered the new integral method for the atmospheric lidar probing data interpretation. It is achieved essential diminishing of multiposition lidar measurements statistical error by an approximation of the determination results of the aerosol optical characteristics in inhomogeneous atmosphere conditions.

Keywords: backscattering, extinction, multiposition lidar measurements, lidar equation, integral solution.

Методы лидарного зондирования атмосферы разрабатываются для решения ряда задач, в том числе, для дистанционного определения аэрозольного состава атмосферы и наклонной дальности видимости. Интерпретация получаемых данных основывается на обращении лидарного уравнения. Это уравнение связывает сигнал обратного рассеяния с двумя параметрами атмосферы (коэффициентом обратного рассеяния β и коэффициентом ослабления σ). Они не могут быть определены из одного лидарного уравнения при однопозиционном зондировании. Многолетняя работа в рамках подхода однопозиционного зондирования привела к созданию методов интерпретации лидарных данных, которые базируются на априорных допущениях о состоянии среды и не находят широкого применения для решения практических задач. В настоящей работе развивается направление многопозиционного зондирования, основанное на строгом решении данного уравнения, которое является дифференциальным, т.е. проблема является математически некорректной [1]. Точность интерпретации данных зондирования реальной неоднородной атмосферы оказывается недостаточной. Для устранения этого недостатка в работе рассмотрены новые возможности лидарного многопозиционного зондирования атмосферы, осуществляемого вдоль трасс, пересечение которых формирует замкнутые многоугольники.

1. Методы лидарного зондирования атмосферного аэрозоля импульсами конечной длительности

Методы лидарного зондирования атмосферного аэрозоля основаны на измерении мощности эхо сигнала P , связанной лидарным уравнением с коэффициентами β и σ :

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

где r – расстояние между лидаром и рассеивающим объемом; f – геометрический фактор лидара; A – постоянная лидара; l – протяженность зондирующего импульса.

Если учесть малую длительность лазерных импульсов, то в нулевом приближении на основании уравнения (1) получается уравнение

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

где S – скорректированный сигнал обратного рассеяния:

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

В первом приближении коэффициенты β_1 , σ_1 находятся на основании решения [2] лидарного уравнения

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

где

$$S_1(r) = \frac{P(r)}{f(r)} \left[1 - \left(\frac{d \ln f}{dr} + \frac{d \ln \beta_0}{dr} - 2\sigma_0 \right) \frac{l}{4} \right]. \quad (5)$$

Систематическую погрешность определения коэффициентов β и σ при использовании соотношений (2), (3) можно оценить по разности решений уравнений (2), (4):

$$\begin{aligned} \delta_\beta &= \beta_0 - \beta_1, \\ \delta_\sigma &= \sigma_0 - \sigma_1. \end{aligned} \quad (6)$$

Анализ результатов таких оценок показывает, что погрешности искомых величин, связанные с конечностью длительности импульса, для данных работы [1] незначительны.

2. Интегральные методы интерпретации лидарных сигналов

С учетом малой длительности лазерных импульсов интерпретация сигналов обратного рассеяния основана на обращении лидарного уравнения:

$$P(\vec{R}_j, \vec{r}_j) = Af\beta(\vec{r}_j) \exp\left(-2 \int_{c_{i,j}} \sigma(\vec{r}) dr\right), \quad (7)$$

где \vec{r}_j – радиус-вектор зондируемого рассеивающего объема; \vec{R}_j – радиус-вектор точки посылки зондирующих импульсов и приема сигналов обратного рассеяния; $c_{i,j}$ – отрезок $[\vec{R}_j, \vec{r}_j]$, вдоль которого вычисляется интеграл в уравнении (7).

Многопозиционное решение лидарного уравнения может быть использовано для определения постоянной в степенной зависимости коэффициента обратного рассеяния от коэффициента ослабления при разработке методов зондирования неоднородной атмосферы. Интегральное многопозиционное решение лидарного уравнения было разработано [1] в общем случае для k положений лидара. Вводя обозначение

$$V(r) = \beta(r)\sigma^{-1/m}(r), \quad m = \text{const}, \quad (8)$$

можно записать систему уравнений, используя решение уравнения (7).

$$a_{ij}z_j - a_{j,j-1}z_{j+1} = b_j, \quad I = 1, 2, \dots, k-1, \quad (9)$$

$$a_{kk}z_k - a_{k_1}z_1 = b_k,$$

где

$$a_{ij} = S_{ij}^m,$$

$$z_j = (\beta_j)^{-m},$$

$$b_j = \pm 2m \int_{c_j} \{S(R_j, r)/v(r)\}^m dr,$$

(знак зависит от направления зондирования), c_i – отрезки $[r_i, r_{i+1}]$ и $[r_k, r_1]$.

В настоящей работе рассматривается интегральное многопозиционное решение для трех направлений зондирования в вертикальной плоскости (рис. 1). Звездочками обозначены позиции лидаров.

Для определения двух неизвестных $v(r)$, c можно использовать решение (9), найденное для различных треугольников с общими вершинами, как показано на (рис. 1).

Система (9) решается также и приближенно умножением i -го уравнения на коэффициент A_i и сложением уравнений, в случае неприемлемо больших величин случайных погрешностей. При этом коэффициенты A_i выбираются из условия минимума погрешности определения искомым величин.

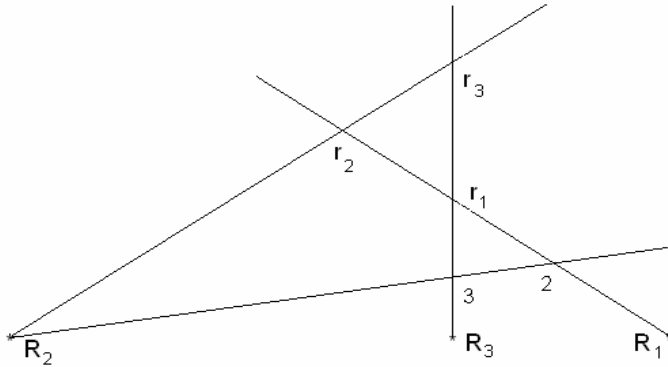


Рис. 1. Лидарная система, посылающая импульсы вдоль трех направлений

Предлагаемое решение переходит в решение системы (9) при равенстве всех коэффициентов единице. При равенстве $k-1$ коэффициента нулю в системе остаётся одно уравнение, рассматриваемое решение совпадает с однопозиционным.

Для случая треугольной схемы зондирования однородной атмосферы при $m = 1$, если можно ограничиться первым членом степенного ряда в разложении функции $v(r)$, система уравнений для определения искомых коэффициентов может быть записана в виде

$$\begin{aligned} \frac{S_{11}}{\sigma_1} - \frac{S_{12}}{\sigma_2} &= b_1, \\ \frac{S_{22}}{\sigma_2} - \frac{S_{23}}{\sigma_3} &= b_2, \\ \frac{S_{33}}{\sigma_3} - \frac{S_{31}}{\sigma_1} &= b_3. \end{aligned} \tag{10}$$

Полагая $A_1 = S_{22}S_{33}$, $A_2 = AS_{12}S_{33}$, $A_3 = A^2S_{12}S_{23}$, получаем:

$$\begin{aligned} \frac{S_{11}S_{22}S_{33} - A^2S_{12}S_{23}S_{31}}{\sigma_1} - (1-A)S_{12}S_{33} \left(\frac{S_{22}}{\sigma_2} + A \frac{S_{23}}{\sigma_3} \right) &= \\ = S_{22}S_{33}b_1 + AS_{12}S_{33}b_2 + A^2S_{12}S_{23}b_3. \end{aligned} \tag{11}$$

В результате для малых величин $(1-A)$ имеет место приближенная формула:

$$\tilde{\sigma}_1 = \frac{S_{11}S_{22}S_{33} - A^2S_{12}S_{23}S_{31}}{S_{22}S_{33}b_1 + AS_{12}S_{33}b_2 + A^2S_{12}S_{23}b_3}. \tag{12}$$

Для систематической погрешности

$$\frac{\delta(syst)}{\sigma_1} = \frac{\tilde{\sigma}_1}{\sigma_1} - 1 \quad (13)$$

с учетом равенств (3.4) получается оценка

$$\frac{\delta(syst)}{\sigma_1} = \frac{(1-A)S_{12}S_{33}\left(\frac{S_{22}}{\sigma_2} + A\frac{S_{23}}{\sigma_3}\right)}{S_{11}S_{22}S_{33} - A^2S_{12}S_{23}S_{31} - (1-A)S_{12}S_{33}\left(\frac{S_{22}}{\sigma_2} + A\frac{S_{23}}{\sigma_3}\right)} \quad (14)$$

или

$$\frac{\delta(syst)}{\sigma_1} \approx \frac{(1-A)S_{12}S_{33}\left(\frac{S_{22}}{\sigma_2} + A\frac{S_{23}}{\sigma_3}\right)}{S_{11}S_{22}S_{33} - A^2S_{12}S_{23}S_{31}}. \quad (15)$$

Если принять во внимание равенства

$$\frac{S_{11}}{S_{12}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \exp(2\tau_{12}), \quad \frac{S_{23}}{S_{22}} = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} \exp(-2\tau_{23}), \quad \frac{S_{31}}{S_{33}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \exp(2\tau_{13}), \quad (16)$$

где $\tau_{i,j}$ – оптическая толщина отрезка $[\vec{r}_i, \vec{r}_j]$, по которому вычисляется интеграл

$$\tau_{i,j} = \int_{C_{i,j}} \sigma(\vec{r}) d\vec{r}, \quad (17)$$

то равенство (15) приближенно можно записать в виде

$$\frac{\delta(syst)}{\sigma_1} = (1-A) \frac{1 + A \exp(-2\tau_{23})}{\exp(2\tau_{12}) - A^2 \exp(-2\tau_{23}) \exp(2\tau_{13})}. \quad (18)$$

Если ввести в рассмотрение осредненный по исследуемому объему коэффициент ослабления σ , то формула (18) переписется следующим образом

$$\frac{\delta(syst)}{\sigma_1} = (1-A) \frac{1 + A \exp(-2\Delta_{23}\sigma)}{\exp(2\Delta_{12}\sigma) - A^2 \exp(-2\Delta_{23}\sigma) \exp(2\Delta_{13}\sigma)}, \quad (19)$$

где Δ_{ij} – длина отрезка $[\vec{r}_i, \vec{r}_j]$.

При зондировании атмосферы в вертикальной плоскости под углом места α_i из точки \vec{R}_i (вдоль i -й трассы зондирования) величины Δ_{ij} можно определить по формулам

$$\begin{aligned} \Delta_{12} &= (l_{13} + l_{23}) \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} - l_{13} \frac{\sin \alpha_3}{\sin(\alpha_1 - \alpha_3)}, \\ \Delta_{23} &= l_{23} \frac{\sin \alpha_3}{\sin(\alpha_3 - \alpha_2)} - (l_{13} + l_{23}) \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}, \\ \Delta_{31} &= l_{23} \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_3 - \alpha_2)} - l_{13} \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_3)}, \end{aligned} \quad (20)$$

где l_{ij} – длина отрезка $[\vec{R}_i, \vec{R}_j]$.

На рис. 2 представлена систематическая погрешность $\frac{\delta(\text{sys})}{\sigma_1}$ в зависимости от угла места α_2 для разных величин l_{13} при $\alpha_1 = 120^\circ$, $\alpha_3 = 90^\circ$, $l_{23} = 0,5$ км, $\sigma = 2$ км⁻¹, $A = 0,8$. Расчеты выполнялись по формулам (18), (19), причем в формулах (19) менялся знак при переходе через направление на точку пересечения 1-й и 3-й трасс зондирования (направления со знаком минус отмечены на рис. 1 цифрами 2, 3).

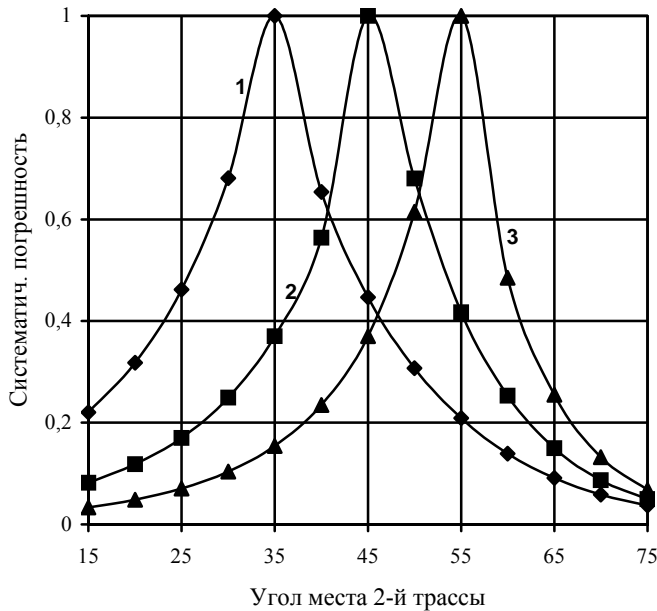


Рис.2. Систематическая погрешность $\frac{\delta(\text{sys})}{\sigma_1}$ в зависимости от угла места α_2 при

$\alpha_1 = 120^\circ$, $\alpha_3 = 90^\circ$, $l_{23} = 0,5$ км, $\sigma = 2$ км⁻¹, $A = 0,8$.

1. $l_{13} = 0,2$ км, 2. $l_{13} = 0,3$ км, 3. $l_{13} = 0,4$ км

Анализ результатов, представленных на рис. 2, показывает, что можно выбрать углы места с незначительными величинами систематической погрешности при заметном отличии от единицы значения A . При таких значениях A величины случайных погрешностей могут быть существенно меньше величин, характерных для случая $A = 1$, как это следует из сравнения с результатами работы [1].

Заключение

В работе рассмотрен новый интегральный метод интерпретации данных лидарного зондирования атмосферы. С помощью незначительной аппроксимации результатов многопозиционных измерений удалось достичь значительного снижения случайных погрешностей определения оптических характеристик атмосферного аэрозоля в условиях неоднородной атмосферы.

Литература

1. *Yegorov A.D.* Atmospheric aerosols measurements and reliability problem [Text] / A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Yu.B. Rzhonsnitskaya // Intern. J. of Remote Sensing, 2008, vol. 29, 2449 – 2468.
2. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Суворов А.П.* Зондирование атмосферы импульсами конечной длительности // Седьмая международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли». Тез. док-дов. Санкт-Петербург, 2010, с. 30.

Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. 218 "О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства" по открытому публичному конкурсу по отбору организаций на право получения субсидий на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства (шифр 2010-218-01).