

Drabenko V.A., Drabenko D.V. To the issue of reducing the systematic error in measuring the meteorological visibility range with multiposition lidar sounding

К вопросу о снижении систематической ошибки измерения метеорологической дальности видимости при многопозиционном лидарном зондировании

Drabenko Vad.A.

Head of the Department of ITBiP AOU VO LO
GIEFPT Professor, Doctor of Technical
Sciences, Ph.D.

Research Fellow: **Drabenko D.V.**

FGBU AANII, Ph.D., Master of Nature
Management

Драбенко Вад.А.

Зав кафедрой ИТБиП АОУ ВО ЛО ГИЭФПТ
профессор, д.т.н., к.э.н.

Научный сотрудник: Драбенко Д.В.

ФГБУ ААНИИ, к.т.н., магистр
природопользования

Abstract. *New integral methods of lidar determination of meteorological visibility range (hereinafter - MVR) are considered. With the help of an insignificant approximation of the results of multi-position measurements, a significant decrease in the random errors in determining the MPE in an inhomogeneous atmosphere is achieved.*

Keywords: *backscatter, attenuation, multiposition measurements, lidar equation, integral solution*

Аннотация. *Рассматриваются новые интегральные методы лидарного определения метеорологической дальности видимости (далее – МДВ). С помощью незначительной аппроксимации результатов многопозиционных измерений достигается значительное снижение случайных погрешностей определения МДВ в условиях неоднородной атмосферы*

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

DOI 10.54092/25421085_2021_10_60

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе в ООО «Научно-исследовательский и проектный институт экологических проблем», г. Оренбург

Методы лидарного зондирования атмосферы разрабатываются для решения ряда задач, в том числе, для определения МДВ. 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 , с которым дальность видимости S_m связана уравнением Кошмидера. Поскольку два параметра не могут быть определены из одного лидарного уравнения, в настоящее время развивается направление

многопозиционного зондирования¹. Однако точность определения МДВ методами многопозиционного зондирования в ряде случаев оказывается недостаточной. Для устранения этого недостатка в статье предлагаются новые методы лидарного многопозиционного определения МДВ.

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

$$P(\vec{R}_i, \vec{r}_j) = Af\beta(\vec{r}_j)\exp\left(-2\int_{c_{i,j}}\sigma(\vec{r})dr\right) \quad (1)$$

где \vec{r}_j - радиус-вектор зондируемого рассеивающего объема, \vec{R}_i - радиус-вектор точки посылки зондирующих импульсов и приема сигналов обратного рассеяния, f — геометрический фактор лидара, $c_{i,j}$ - отрезок, вдоль которого вычисляется интеграл в уравнении (1).

Интегральное многопозиционное решение лидарного уравнения (1) было разработано для k положений лидара. Принимая во внимание приближение

$$\beta(r) = v\sigma^{1/m}(r), v = const \quad (2)$$

можно записать систему уравнений, используя решение уравнения (1):

$$a_{ii}S_{mi} - a_{i,i+1}S_{m,i+1} = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, k-1 \quad (3)$$

$$a_{kk}S_{mk} - a_{k1}S_{m1} = b_k \quad (4)$$

где

$$a_{ij} = (P/f)_{ij}^m \quad (5)$$

$$b_i = \pm 6m \int_{c_i} P/f_i^m dr \quad (6)$$

(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 трёх направлений зондирования в вертикальной плоскости (рис. 1). Звездочками обозначены позиции лидаров.

Для определения неизвестных величин можно использовать решение системы (3), (4), найденное для различных треугольников с общими вершинами, как показано на (рис. 1).

¹ Yegorov A.D. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem [Text] / A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Yu.B. Rzhonsnitskaya // International Journal of Remote Sensing, 2008, v.29, 2449 – 2468

Система (3), (4) решается 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 искомых величин.

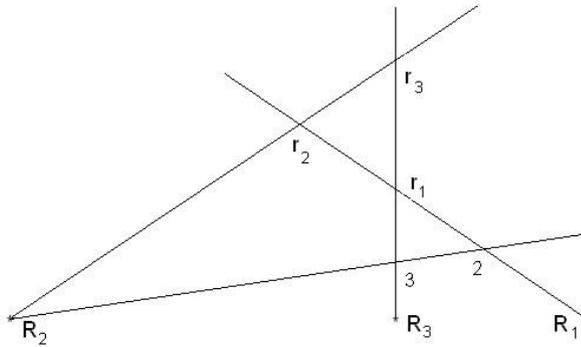


Рисунок 1 — Лидарная система, посылающая импульсы вдоль трех направлений

Предлагаемое решение переходит в решение системы (3), (4) 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 $m=1$ система уравнений для определения искомых величин может быть записана в виде

$$a_{11}S_{m1} - a_{12}S_{m2} = b_1 \quad (7)$$

$$a_{22}S_{m2} - a_{23}S_{m3} = b_2 \quad (8)$$

$$a_{33}S_{m3} - a_{31}S_{m1} = b_3 \quad (9)$$

где

$$a_{ij} = (P/f)_{ij} \quad (10)$$

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

$$\begin{aligned} (a_{11}a_{22}a_{33} - A^2a_{12}a_{23}a_{31})S_{m1} - (1 - A)a_{12}a_{33}(a_{22}S_{m2} + Aa_{23}S_{m3}) = \\ = a_{22}a_{33}b_1 + Aa_{12}a_{33}b_2 + A^2a_{12}a_{23}b_3 \end{aligned} \quad (11)$$

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

$$\tilde{S}_{m1} = \frac{a_{22}a_{33}b_1 + Aa_{12}a_{33}b_2 + A^2a_{12}a_{23}b_3}{(a_{11}a_{22}a_{33} - A^2a_{12}a_{23}a_{31})}$$

(12)

Для систематической погрешности

$$\frac{\delta(syst)}{S_{m1}} = \frac{\tilde{S}_{m1} - S_{m1}}{S_{m1}} \quad (13)$$

получается оценка

$$\frac{\delta(syst)}{S_{m1}} = \frac{(1 - A)a_{12}a_{33}(a_{22}S_{m2} + Aa_{23}S_{m3})}{S_{m1}(a_{11}a_{22}a_{33} - A^2a_{12}a_{23}a_{31})} \quad (14)$$

Если принять во внимание равенства

$$\frac{S_{11}}{S_{12}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \exp(2\tau_{12}), \frac{S_{23}}{S_{22}} = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} \exp(-2\tau_{23}), \frac{S_{31}}{S_{33}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \exp(2\tau_{13}) \quad (15)$$

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

$$\tau_{i,j} = \int_{C_{i,j}} \sigma(\vec{r}) d\vec{r} \quad (16)$$

то равенство (14) можно записать в виде

$$\frac{\delta(syst)}{S_{m1}} = (1 - A) \frac{1 + A \exp(-2\tau_{23})}{\exp(2\tau_{12}) - A^2 \exp(-2\tau_{23}) \exp(2\tau_{13})} \quad (17)$$

Если ввести в рассмотрение осредненный по исследуемому объему коэффициент ослабления σ , то формула (17) переписется следующим образом

$$\frac{\delta(syst)}{S_{m1}} = (1 - A) \frac{1 + A \exp(-2\Delta_{23}\sigma)}{\exp(2\Delta_{12}\sigma) - A^2 \exp(-2\Delta_{23}\sigma) \exp(2\Delta_{13}\sigma)} \quad (18)$$

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

Следует отметить, что формулы для оценки систематической погрешности МДВ и для оценки систематической погрешности коэффициента ослабления работы² совпадают, поэтому для анализа погрешности МДВ можно учесть результаты работы (Егоров, 2010).

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

² Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Драбенко В.А., Ошуркова А.А. Методы многопозиционного лидарного зондирования атмосферы // Ученые записки РГГМУ, № 16, 2010, с.87-93

$$\begin{aligned} \Delta_{12} &= (l_{13} + l_{23}) \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} - l_{13} \frac{\sin \alpha_3}{\sin(\alpha_1 - \alpha_3)}, \\ \Delta_{23} &= l_{23} \frac{\sin \alpha_3}{\sin(\alpha_3 - \alpha_2)} - (l_{13} + l_{23}) \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}, \\ \Delta_{31} &= l_{23} \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_3 - \alpha_2)} - l_{13} \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}, \end{aligned} \quad (19)$$

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

На рис. 2 представлена систематическая погрешность $\delta(syst)/S_{m1}$ в зависимости от угла места α_2 для разных величин l_{13} при $\alpha_2=120^\circ$, $\alpha_3=90^\circ$, $l_{23}=0,5$ км, $\sigma = 2 \text{ км}^{-1}$, $A= 0,8$. 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.

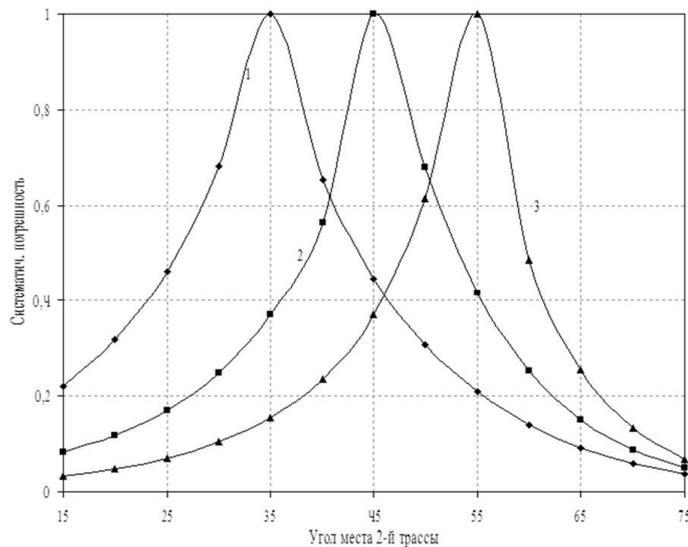


Рисунок 2 — Систематическая погрешность $\delta(syst)/\sigma_1$ в зависимости от угла места α_2 при $\alpha_2=120^\circ$, $\alpha_3=90^\circ$, $l_{23}=0,5$ км, $\sigma = 2 \text{ км}^{-1}$, $A= 0,8$ (где 1 — $l_{13} = 0,2$ км, 2 — $l_{13} = 0,3$ км, 3 — $l_{13} = 0,4$ км)

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).

В статье рассмотрен новый интегральный метод интерпретации данных лидарного зондирования атмосферы. С помощью незначительной аппроксимации результатов многопозиционных измерений удалось достичь значительного

снижения случайных погрешностей определения МДВ в условиях неоднородной атмосферы.

References

1. Yegorov A.D. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem [Text] / A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Yu.B. Rzhonsnitskaya // International Journal of Remote Sensing, 2008, v.29, 2449 – 2468.
2. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Драбенко В.А., Ошуркова А.А. Методы многопозиционного лидарного зондирования атмосферы // Ученые записки РГГМУ, № 16, 2010, с.87-93.