

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

УДК 550.501.7:510.42

А.Д. Егоров, А.Я. Перельман, Т.Б. Казиахмедов

ОЦЕНКА МИКРОСТРУКТУРЫ АЭРОЗОЛЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО МЕТОДА МНОГОПОЗИЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Рассматриваются интегральные методы k -позиционного лидарного определения оптических параметров атмосферы, оценивается достоверность результатов применения этих методов, и полученная оптическая информация используется для восстановления микрофизических характеристик аэрозоля с учетом радиально изменяющегося показателя преломления аэрозольных частиц.

Показано, что схемы многопозиционного лидарного зондирования атмосферы вдоль трасс, образующих в пересечении замкнутые многоугольники, применимы для определения параметров реальных неоднородных аэрозольных образований.

Предложенная оптическая модель аэрозоля позволила объяснить результаты экспериментов и выявить причину трудностей интерпретации результатов измерений спектрального состава частиц.

Аэрозоль существенно влияет на процесс переноса радиации в атмосфере, является одним из основных климатообразующих факторов. Информация о распределении аэрозоля по размерам необходима для решения экологических проблем. Для оценки параметров атмосферного аэрозоля широко используются оптические устройства и методы. Например, для дистанционного определения коэффициентов ослабления и обратного рассеяния применяются лидары, а характеристики аэрозольной микроструктуры измеряются оптическими счетчиками частиц или (дистанционно) с помощью лидаров. Интерпретация результатов таких измерений должна быть основана на анализе оптико-микроструктурных связей частиц. Этот анализ особенно сложен в условиях загрязненной атмосферы. Здесь надо учитывать, что в атмосферу попадают аэрозоли различного происхождения, связанные с промышленными и транспортными выбросами, и такие частицы различаются по размерам, химическому составу и оптическим характеристикам. Отметим, что оптические свойства аэрозоля определяются главным образом его фракцией мелких частиц, а фракция крупных частиц аэрозоля, в свою очередь, характеризует его массовую концентрацию.

Важной проблемой лидарного зондирования атмосферы является оценка степени достоверности определения оптических и микрофизических параметров аэрозолей.

В настоящей статье оптические параметры оцениваются интегральными методами k -позиционного лидарного зондирования атмосферы [1, 2]. Метод иллюстрируется для случая $k = 3$. Полученная оптическая информация используется для восстановления микрофизических характеристик аэрозоля с учетом радиально изменяющегося показателя преломления [3].

Интерпретация результатов измерений параметров атмосферного аэрозоля с помощью метода лидарного зондирования основана на решении оптико-локационного уравнения (ОЛУ). Трудность такой интерпретации связана с неопределенностью ОЛУ, содержащего две неизвестные – коэффициент обратного рассеяния $\beta = \beta(\mathbf{r})$ и пропускание атмосферы $T = T(\mathbf{R}_i, \mathbf{r})$. Здесь \mathbf{r} – радиус-вектор точки наблюдения внутри рассеивающего объема, $\mathbf{R}_i (i = 1, \dots, k)$ – радиусы-векторы точек посылки световых импульсов, с которыми совмещены точки приема сигналов обратного рассеяния (точки ПСИ):

$$T(\mathbf{R}_i, \mathbf{r}) = \exp \left(- \int_{r(i)} \sigma(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \right), \quad (1)$$

где $\sigma(\mathbf{r}')$ – коэффициент ослабления, а интегрирование производится по отрезку $\mathbf{r}(i)$, соединяющему точку наблюдения \mathbf{r} и точку ПСИ \mathbf{R}_i . Отметим, что в точках ПСИ могут располагаться как разные лидары, так и один и тот же перемещающийся лидар. ОЛУ связывает мощность $P = P(\mathbf{R}_i, \mathbf{r})$ сигнала обратного рассеяния с оптическими параметрами атмосферы по формуле

$$\begin{aligned} P(\mathbf{R}_i, \mathbf{r}) &= f(\Delta r) S(\mathbf{R}_i, \mathbf{r}) ; \\ S(\mathbf{R}_i, \mathbf{r}) &= A \beta(\mathbf{r}) r^2(\mathbf{R}_i, \mathbf{r}) , \end{aligned} \quad (2)$$

где A – постоянная лидара; $\Delta r = |\mathbf{r} - \mathbf{R}_i|$; $f(\Delta r)$ – геометрический фактор лидара и $S(\mathbf{R}_i; \mathbf{r})$ – мощность, скорректированная на геометрический фактор лидара.

Различные методы решения многопозиционного ОЛУ были разработаны в [1, 2, 4, 5]. В частности, в [2] ОЛУ решается методом его замены на систему интегральных уравнений (СИУ), соответствующую различным трассам непозиционного зондирования неоднородной атмосферы. Проблема недоопределенности этого ОЛУ в методе СИУ решается на основе апостериорных оценок связи между неизвестными коэффициентами $\beta(\mathbf{r})$ и $\sigma(\mathbf{r})$ в конкретных условиях измерения. Это делается с помощью предложенной схемы обработки сигналов обратного рассеяния для трасс, выбор которых определяется условиями их пересечения внутри исследуемого рассеивающего объема. СИУ удобно записать в терминах функции [6]:

$$\eta(\mathbf{r}) = \beta(\mathbf{r}) \sigma^{-\xi}(\mathbf{r}) , \quad (3)$$

подлежащей определению. Здесь ξ – некоторая постоянная величина, которую следует находить из условия минимальности относительной погрешности решения СИУ.

Выпишем СИУ для ОЛУ. С этой целью введем величины ($i = 1, \dots, k$)

$$a_{ij} = [S(\mathbf{R}_i, \mathbf{r}_j)]^{1/\xi} ; \quad (4)$$

$$z_j = [\beta(\mathbf{r}_j)]^{-1/\xi} ; \quad (5)$$

$$b_i = \pm \frac{2}{\xi} \int_{d(i)} [S(\mathbf{R}_i, \mathbf{r}) \eta^{-1}(\mathbf{r})]^{1/\xi} dr , \quad (6)$$

где $d(i)$ – ($i = 1, \dots, k-1$) – означает сторону многоугольника трасс (МТ), соединяющего вершины \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_{i+1} , а $d(k)$ – отрезок, соединяющий вершины \mathbf{r}_k и \mathbf{r}_1 МТ. В [2] показано, что в случае совпадения количества точек ПСИ и сторон МТ СИУ имеет вид

$$\begin{cases} a_{ii} z_i - a_{i,i+1} z_{i+1} - b_i = 0 & (i = 1, \dots, k-1) , \\ a_{kk} z_k - a_{k1} z_1 - b_k = 0 . \end{cases} \quad (7)$$

Каждое из уравнений в (7) получается из решения дифференциальных уравнений Бернулли, величины z_1, \dots, z_k – параметры, определяющиеся в результате последовательного решения уравнений, составляющих систему (7). В [6] была рассмотрена только единичная трасса и неизвестный параметр выбирался с помощью искусственно сконструированного условия. Наличие МТ, введенного в [2], позволяет аналитически определить величины z_1, \dots, z_k .

В системе (7) величины (4) известны из измерений, а величины z_1, \dots, z_k могут быть выражены в терминах b_1, \dots, b_k . Присвоим рассматриваемой вершине номер 1. Тогда в силу (7) любая из величин (5) представима в виде

$$\begin{cases} z_1 = B A^{-1} , \\ A = a_{kk} - \frac{a_{12} a_{23} \dots a_{k-1 k}}{a_{11} a_{22} \dots a_{k-1 k-1}} a_{k1} , \\ B = \frac{a_{kk}}{a_{11}} \left(b_1 + \sum_{i=2}^k \frac{a_{12} a_{23} \dots a_{i-1 i}}{a_{22} a_{33} \dots a_{ii}} b_i \right) . \end{cases} \quad (8)$$

Рассмотрим два МТ с общей вершиной 1. Тогда можно исключить z_1 и тем самым получить уравнение относительно величин b_1, \dots, b_k , зависящих от одной неизвестной величины $\eta(\mathbf{r})$. В [2] дан общий метод вычисления величины $\eta(\mathbf{r})$ посредством ее разложения в степенной ряд в окрестности заданной точки зондирования. Для простоты ограничимся первым членом ряда $\eta(\mathbf{r}) = \text{const}$, тогда в соответствии с (3) и (7) находим

$$\sigma_1 = A B^{-1} , \quad (9)$$

где без нарушений общности можно полагать $\eta(\mathbf{r}) = 1$.

Перейдем к оценке относительной случайной погрешности коэффициента ослабления σ_1 при $k = 3$. В соответствии с теорией переноса ошибок [7] имеем

$$\delta_1 = \left[\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial P_{ii}} \delta P_{ii} \right)^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial P_{i,i+1}} \delta P_{i,i+1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial P_{k1}} \delta P_{k1} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (10)$$

где $P_{ij} = P(R_i, r_j)$.

На основании (8)–(10) при $k = 3$ получаем

$$\delta_1 \sigma_1^{-1} = \frac{1}{g(1-D)\sqrt{\sigma_1}} \left\{ [\Delta_4^2 + L_1^{-1} (\Delta_1 + \Delta_4)^2] M_1 + [(\Delta_1 + \Delta_4)^2 + L_1^{-1} (\Delta_1 + \Delta_3)^2] L_1^{-2} M_2 + L_2^{-1} (\Delta_2 + \Delta_3)^2 M_3 D^2 \right\}^{1/2}. \quad (11)$$

Здесь

$$\begin{cases} L_1 = e^{\sigma_1 \Delta_1}, & L_2 = e^{\sigma_1 \Delta_3}, \\ M_1 = e^{\sigma_0 \Delta_4}, & M_2 = e^{\sigma_0 (\Delta_1 + \Delta_4)}, & M_3 = e^{\sigma_0 \Delta_2}, \\ D = L_2 L_1^{-2}, \end{cases} \quad (12)$$

где σ_0 – коэффициент ослабления среды вне МТ; величина g – экспериментально определяемый параметр, характеризующий погрешность δ_p мощности эхосигнала P . Для лидаров, в которых используются лазерные измерители высоты облаков (ЛИВО) [8], имеем $\delta_p \sim \sqrt{P}$. Учитывая это, определим величину g по известному радиусу действия ЛИВО, соответствующему отношению сигнала к шуму, равному 2, и зависящему от пропускания атмосферы. Величина g для расстояний в км, найденная по результатам измерений в С.-Петербурге вблизи пересечения пр. Непокоренных и пр. Пискаревского [1] при $\eta = \text{const}$, представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика погрешности эхосигнала ЛИВО

Дата	Время	g
23.01.91	11.00	5
24.01.91	10.30	5
30.01.91	12.40	5
20.02.91	16.00	10
22.02.91	15.00	10

Таким образом, среднее значение g примерно равно 7. Результаты расчетов относительной погрешности (11) (при условии, что отношение сигнала к шуму превосходит 2) приведены в табл. 2 и 3.

Данные таблиц показывают, что рассмотренный метод позволяет определять коэффициент ослабления как однородной, так и неоднородной атмосферы с приемлемой погрешностью.

По измеренным оптическим характеристикам атмосферы можно определить концентрацию атмосферного аэрозоля (более детальное рассмотрение вопроса можно найти в [1]) и другие аэрозольные характеристики, в связи с чем актуальным является моделирование микроскопической структуры аэрозольных частиц. Моделирование процесса рассеяния электромагнитных волн основано на решении системы уравнений Максвелла и оказалось весьма эффективным для решения проблемы дифракции в случае частиц, составленных из однородного ядра и неоднородной оболочки, помещенных в однородной непоглощающей среде [9]. В [3] предложен метод, позволяющий получать надежные аппроксимации решения системы Максвелла при произвольном радиальном распределении (как непрерывного, так и разрывного) комплексного показателя преломления. Использование нового метода показало, что вектор Пойтинга рассеянной волны наиболее значительно изменяется (на порядок величины и более) при увеличении толщины оболочки в случае поглощающих ядер, что следует учитывать при интерпретации данных лидарных измерений спектрального состава частиц. В качестве примера в табл. 4 приведены результаты расчетов относительной характеристики направленного (под углом 90°) рассеянного излучения $R_k = I_k(\Delta) \Gamma^{-1}(0)$ для частицы сажи

($m = 1,80 - 0,64i$, волновой радиус $\rho_0 = 30$). Здесь $\Delta = |\rho_1 - \rho_0|$ – волновая толщина оболочки, случай $k = 1$ соответствует оболочке, заполненной загрязненной водой, а случай $k = 2$ – обезвоженной оболочке.

Таблица 2

Относительная погрешность определения коэффициента ослабления неоднородной атмосферы

$\Delta_1, \text{км}$	$\Delta_2, \text{км}$	$\Delta_3, \text{км}$	$\sigma_1, \text{км}^{-1}$	$\delta_1/\sigma_1, \%$
0,20	0,15	0,30	3,0	10
0,20	0,20	0,30	3,0	20
0,20	0,25	0,30	3,0	30
0,35	0,15	0,50	2,0	10
0,30	0,20	0,45	2,0	20
0,30	0,25	0,45	2,0	30
0,50	0,15	0,70	1,0	30
0,50	0,20	0,60	1,0	30

Таблица 3

Относительная погрешность определения коэффициента ослабления однородной атмосферы

$\Delta_1, \text{км}$	$\Delta_2, \text{км}$	$\Delta_3, \text{км}$	$\sigma_0, \text{км}^{-1}$	$\sigma, \text{км}^{-1}$	$\delta/\sigma, \%$
0,20	0,25	0,30	1,0	3,0	10
0,20	0,40	0,30	1,0	3,0	20
0,20	0,50	0,30	1,0	3,0	30
0,35	0,20	0,50	1,0	2,0	10
0,35	0,35	0,50	1,0	2,0	20
0,35	0,45	0,50	1,0	2,0	30
0,50	0,20	0,60	0,5	1,0	30
0,50	0,30	0,60	0,5	1,0	30

Результаты табл. 4 согласуются с оценками микроструктуры аэрозольных частиц, найденных аспирационным фильтровым и фотоэлектрическими методами [2].

Таблица 4

Относительная погрешность определения коэффициента рассеяния атмосферного аэрозоля

Δ	0	0,6	1	1,6
R_1	1	0,8	0,7	0,2
R_2	1	0,5	0,3	0,1

Таким образом, показано, что схемы лидарного непоозиционного зондирования атмосферы вдоль трасс, образующих в пересечении замкнутые многоугольники, применимы [3] для определения параметров реальных неоднородных аэрозольных образований. Использование этих схем дает возможность адекватно оценивать погрешность измеряемых величин, что особенно важно для дистанционного мониторинга загрязнения воздушного бассейна крупных промышленных и транспортных центров.

Построенная модель атмосферного аэрозоля, учитывающая микроскопические неоднородности рассеивателей [3] и их значительную изменчивость, позволила удовлетворительно объяснить результаты экспериментов, которые не укладывались в рамки классической модели, и причину трудностей интерпретации результатов измерений спектрального состава частиц.

1. Егоров А. Д. Альтернативные направления интерпретации лидарной информации. СПб: ГГО, 1993. 81 с.
2. Егоров А. Д., Егорова И. А. Альтернативные схемы обработки сигналов обратного рассеяния. СПб: ГГО, 1994. 44 с.
3. Перельман А. Я. Дифракция на сферически симметричных неоднородных структурах // Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 78. N 5. С. 822–831.
4. Веретенников В. В. К теории томографического зондирования атмосферы с использованием двух лидаров // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 7. С. 675–680.
5. Сергеев Н. М., Кугейко М. М., Ашкинадзе Д. А. Способ определения оптических характеристик рассеивающих сред. А.с. N 966639, 1982.
6. Klett J. D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 2. P. 211–220.
7. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. 276 с.
8. Иоффе М. М., Приходько М. Г. Справочник авиационного метеоролога. М.: Воениздат, 1977. 304 с.

9. Шифрин К.С., Перельман А.Я., Кокорин А.М. Рассеяние света двухслойными частицами с непрерывными оптическими свойствами // Оптика и спектроскопия. 1985. Вып. 3. С. 597–602.

Главная геофизическая обсерватория, Санкт-Петербург
Санкт-Петербургская лесотехническая академия

Поступила в редакцию
4 февраля 1997 г.

A. D. Egorov, A. Ya. Perelman, T. B. Kaziaxmedov. Estimate of Aerosol Microstructure Based on Integral Method of Multiposition Sounding of the Atmosphere.

Integral methods of k -position lidar determination of atmospheric optical parameters are treated in the paper. The reliability of results obtained by these methods is estimated. The found optical information is used in reconstruction of microphysical parameters of aerosol accounting for radially varying refraction index of aerosol particles.

The schemes of the multiposition lidar sounding of the atmosphere along the paths, making up a closed polygon in the intersection, are shown to be applicable to determination of parameters of realistic inhomogeneous aerosol formations.

The proposed optical model of aerosol allowed us to explain the experimental results and find the cause of difficulties in interpretation of the findings on the particles spectral composition.