

И.М. Радюк, А. П. Шавель

### ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОГЕННЫХ АЭРОЗОЛЕЙ СРЕДСТВАМИ МОНОСТАТИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрена задача определения оптических характеристик гетерогенного аэрозоля по результатам многочастотного моностатического лазерного зондирования. Разработана методика решения данной задачи на основе метода максимального правдоподобия. Проведен численный эксперимент по восстановлению суммарных профилей коэффициента ослабления на различных длинах волн.

При лазерном зондировании атмосферы вполне реальна ситуация, когда зондируемую среду следует рассматривать как существенно гетерогенное аэрозольное образование, состоящее из двух или более фракций аэрозольного вещества с различным физико-химическим составом и различными пространственными распределениями концентрации. Известно, что определение оптических характеристик подобных образований средствами моностатического лазерного зондирования вызывает серьезные трудности. Наиболее распространенные методы обработки лидарных измерений типа [1, 2] основаны на предположении наличия линейной взаимосвязи между коэффициентом ослабления от и коэффициентом обратного рассеяния (З излучения дисперсной среды. На практике это выполняется главным образом тогда, когда аэрозоль состоит из частиц одной природы с пространственно однородным распределением дисперсности, т.е. когда аэрозоль можно считать гомогенным. Более сложные методы типа [3], допускающие вариации дисперсности аэрозоля по трассе зондирования, требуют постоянства показателя преломления дисперсного вещества, что, по существу, аналогично требованию неизменности химического состава частиц и тем самым предполагает своего рода гомогенность аэрозольной среды.

В настоящей работе предпринята попытка решения задачи об обработке результатов лазерного зондирования гетерогенных аэрозольных сред, пространственные распределения оптических характеристик которых описываются соотношениями

$$\begin{aligned}\sigma(z) &= \sum_{k=1}^K a_k c_k(z), \\ \beta(z) &= \sum_{k=1}^K b_k c_k(z),\end{aligned}\tag{1}$$

где  $z$  — координата вдоль трассы зондирования;  $K$  — число фракций аэрозоля, составляющих гетерогенную среду;  $c_k(z)$  — профиль распределения концентрации  $k$ -й фракции;  $a_k$  и  $b_k$  — параметры, характеризующие оптические свойства фракции.

Задача решалась применительно к ситуации, когда моностатическим лидаром на нескольких длинах волн ( $i = 1, \dots, N$ ) и при различных положениях поляризаторов на источнике и приемнике излучения зарегистрированы временные зависимости сигналов временного рассеяния  $F_i(z)$ . Известно, что при выполнении достаточно общих условий эти сигналы связаны с пространственными распределениями  $\sigma$  и  $\beta$  лидарным уравнением

$$F_i(z) = \frac{A_i}{z^2} \beta_i(z) \exp\left(-2 \int_0^z \sigma(x) dx\right),\tag{2}$$

где  $A_i$  — аппаратная постоянная. С учетом (1) выражение (2) запишем в виде

$$F_i(z) = \left( \sum_{k=1}^K \tilde{b}_{ik} c_k(z) \right) \exp\left(-2 \sum_{k=1}^K \int_0^z a_{ik} c_k(x) dx\right),\tag{3}$$

где

$$\tilde{b}_{ik} = A_i b_{ik}.\tag{4}$$

После алгебраизации (6) принимает вид

$$F_i(z_j) = \left( \sum_{\kappa=1}^K \tilde{b}_{i\kappa} c_{\kappa}(z_j) \right) \exp \left( -2 \sum_{\kappa=1}^K \sum_{l=1}^{j-1} a_{i\kappa} c_{\kappa}(z_l) (z_l - z_{l-1}) \right), \quad (5)$$

где  $\{z_i, j = 1, \dots, M\}$  – совокупность точек трассы зондирования, которым соотносят измеренные выборки сигналов обратного рассеяния.

Исходя из (5) нетрудно заметить, что при наличии серии измерений из  $N$  выборок сигналов обратного рассеяния, измеренных в  $M$  точках трассы зондирования, число измеренных величин, равное  $NM$ , превышает число неизвестных величин, равное  $KM + 2NK$  при всех  $K$ , меньших  $NM/(M + 2N)$ . При этом возникают необходимые предпосылки для решения задачи об определении неизвестных либо, по крайней мере, некоторых комбинаций этих неизвестных по указанной совокупности измеренных величин.

В настоящей работе эта задача рассматривалась в ограниченном объеме лишь как задача определения  $\sigma_i(z_j)$ . Алгоритм определения  $\sigma_i(z_j)$  был построен на базе метода максимального правдоподобия [4, с. 617]. Сущность алгоритма сводится к нахождению  $a_{i\kappa}$ ,  $b_{i\kappa}$  и  $c_{\kappa}(z_j)$ , при которых вероятность наблюдения измерений совокупности  $F_i(z_j)$  принимает наибольшее значение. Для конкретности при разработке алгоритма предполагалось, что измерения будут производиться в режиме счета фотонов, т.е. на трассе зондирования будут открыты  $M$  временных каналов. Будем считать, что вероятность регистрации  $n_{ij}$  фотонов в  $ij$ -м канале описывается распределением Пуассона

$$P(n_{ij}) = \bar{n}_{ij}^{n_{ij}} \exp(-\bar{n}_{ij}) / n_{ij}!, \quad (6)$$

где

$$\bar{n}_{ij} = F_i(z_j) (z_j - z_{j-1}) \quad (7)$$

– математическое ожидание.

В этом случае вероятность регистрации совокупности  $N$  сигналов приобретает вид

$$L = \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^M (\bar{n}_{ij}^{n_{ij}} \exp(-\bar{n}_{ij}) / n_{ij}!) \quad (8)$$

Система уравнений правдоподобия принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln L}{\partial a_{i\kappa}} &= -2 \Delta z \sum_{j=1}^M \left( (n_{ij} - \bar{n}_{ij}) \sum_{l=1}^{j-1} c_{\kappa l} \right) = 0; \\ \frac{\partial \ln L}{\partial b_{i\kappa}} &= \sum_{j=1}^M \frac{(n_{ij} - \bar{n}_{ij}) c_{\kappa j}}{\beta_{ij}} = 0; \\ \frac{\partial \ln L}{\partial c_{\kappa j}} &= \sum_{i=1}^N \frac{(n_{ij} - \bar{n}_{ij})}{\beta_{ij}} - 2 \Delta z a_{i\kappa} \sum_{l=j+1}^M (n_{il} - \bar{n}_{il}) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Система (9) решалась итерационно на основе градиентного метода [4, с. 660]. Работоспособность данной процедуры и в целом всего алгоритма определения  $\sigma_i(z_j)$  была проверена средствами численного моделирования на модели двухфракционной дисперсной среды с линейными профилями  $c_{\kappa}(z)$ :

$$c_{\kappa}(z) = a_{\kappa} + \gamma_{\kappa} z. \quad (10)$$

Считалось, что первая из этих фракций представляет собой систему сферических частиц, причем концентрация этих частиц в начале рассматриваемого интервала трассы зондирования  $1 \text{ km} \leq z \leq 4 \text{ km}$  полагалась равной нулю. Частицы, составляющие вторую фракцию, считались асферическими, т.е. заметно деполяризующими рассеянное излучение. Концентрация асферических частиц полагалась линейно убывающей функцией  $z$ , обращаящейся в нуль в конце рассматриваемого интервала трассы зондирования. Исходя из указанной модели, по формуле (5) были рассчитаны 4 тридцатимерных выборки сигналов обратного рассеяния, соответствующие двум длинам волн и двум ортогональным состояниям поляризации.

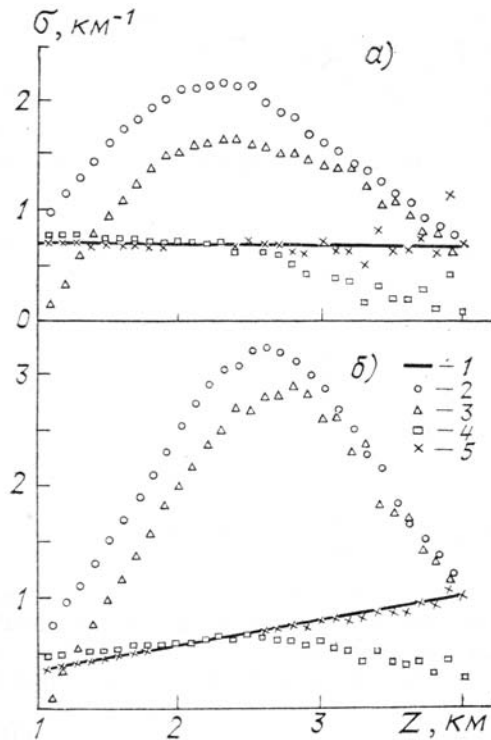
Параметры, использовавшиеся при расчетах, приведены в таблице.

№ фракции	$\alpha$ κ	$\gamma$ κ	$a=a$		$\bar{b}=\bar{b}$		$\bar{b}=\bar{b}$	
			1κ	3κ	2κ	4κ	1κ	2κ
1	-0,33	0,33	0,67	0,67	$6,7 \cdot 10^5$			0
2	1,33	-0,33	1,00	0,33	$3,3 \cdot 10^6$			$6,7 \cdot 10^5$

Далее найденные сигналы были «зашумлены» с помощью генератора пуассоновского шума и использованы в качестве исходных данных в алгоритме решения системы уравнений (9). Результаты решения подставлялись в (1), и получались искомые профили  $\sigma_i(z_j)$ . Для сопоставления каждый из сигналов был обработан также по методу [2], в соответствии с которым  $\sigma_i(z_j)$  находились из соотношения

$$\sigma_i(z_j) = \frac{F_i(z_j) z_j^2}{F_i(z_M) z_M^2 / \sigma_i(z_M) + 2 \int_{z_j}^{z_M} F_i(x) x^2 dx}, \quad (11)$$

где в качестве  $\sigma_i(z_M)$  использовались точные значения коэффициента ослабления в конце трассы зондирования. Результаты сопоставления представлены на рисунке.



Результаты восстановления профилей коэффициентов ослабления  $\sigma$  для первой и второй длин волн: истинный профиль (1); профили, восстановленные по [2], при параллельных (2) и ортогональных (3) поляризациях источника и приемника; профили, восстановленные по предлагаемой методике, при неизвестных (4) и известных (5) значениях  $\sigma$  на конце трассы

Как видно из рисунка, проверяемый алгоритм обеспечил более высокую точность восстановления  $\sigma$  почти на всем протяжении рассматриваемого участка трассы зондирования, за исключением ее конца. Отклонение восстановленных профилей  $\sigma$  от исходных на конце трассы связано с «погрешностями» измерений и, по-видимому, отражает известную неустойчивость решений лидарных уравнений. Установлено, что при введении в число исходных данных значений коэффициентов ослабления в конце трассы зондирования, использовавшихся в формуле Клетта (11), эти отклонения становятся соизмеримыми с погрешностями измерения эхо-сигнала.

Таким образом, первая попытка обработки сигналов от оптически гетерогенных сред, предпринятая в рамках настоящей работы, оказалась вполне успешной и может ставиться вопрос о продолжении исследований в этом направлении.

1. Ковалев В. А. — Тр. ГО, 1973, вып. 312, с. 128—133.
2. Klett D. — Appl. Optics, 1981, v. 20, № 2, p. 211—220.

3. Наац И. Э. Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы. — Новосибирск: Наука, 1980.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1978.

Научно-исследовательский институт  
прикладных физических проблем  
яч. А.Н. Севченко при Белгосуниверситете, Минск

Поступила в редакцию  
19 февраля 1988 г.

**I. M. R a d y u k, A. P. S h a v e l. On Determination of Heterogeneous Aerosol Optical Characteristics from Monostatic Laser Sounding Data.**

A workable approach to the solution of the problem of determining the heterogeneous aerosol optical characteristics from multifrequency monostatic laser sounding data is reported. The procedure relies on the maximum likelihood method.

A numerical simulation aimed at retrieval of the total extinction coefficient profiles for different laser wavelengths corroborated the fitness of the proposed algorithm.