

Б. С. КОСТИН

(Томск)

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ

Введение. Методы многочастотного лазерного зондирования наиболее перспективны для исследования микроструктуры и показателей преломления, являющихся основными параметрами атмосферного аэрозоля. Это обусловлено тем, что оптические свойства аэрозолей определяются их химическим составом, от которого зависит величина показателей преломления, и отношением размера частиц к длине волны зондирующего излучения.

Постановка задачи. Параметры атмосферного аэрозоля по данным многочастотного лазерного зондирования атмосферы находятся из решения системы, состоящей из уравнения лазерного зондирования и уравнений для полидисперсных оптических характеристик:

$$\frac{P(z, \lambda_i)}{P_0(\lambda_i)} = B(\lambda_i) z^{-2} \beta_{\pi}(z, m_i, \lambda_i) \exp \left\{ -2 \int_0^z \beta_{ex}(z', m_i, \lambda_i) dz' \right\}, \quad (1)$$

$$\beta_{\pi}(z, m_i, \lambda_i) = \int_{R_1(z)}^{R_2(z)} K_{\pi}(r, m_i, \lambda_i) s(z, r) dr, \quad s(z, r) = \pi r^2 n(z, r), \quad (2)$$

$$\beta_{ex}(z, m_i, \lambda_i) = \int_{R_1(z)}^{R_2(z)} K_{ex}(r, m_i, \lambda_i) s(z, r) dr, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где $P(z, \lambda_i)/P_0(\lambda_i)$ — относительная мощность принимаемого оптического излучения с длиной волны λ_i ; z — расстояние от лазерного локаатора до рассеивающего слоя атмосферы; $B(\lambda_i)$ — постоянная, зависящая от параметров аппаратуры; $\beta_{\pi}(z, m_i, \lambda_i)$ и $\beta_{ex}(z, m_i, \lambda_i)$ — полидисперсные оптические характеристики обратного рассеяния и ослабления; $K_{\pi}(r, m_i, \lambda_i)$ и $K_{ex}(r, m_i, \lambda_i)$ — факторы эффективности обратного рассеяния и ослабления оптического излучения аэрозольной частицей радиусом r ; $m_i = n_i - ik_i$ — комплексный показатель преломления; $s(z, r)$ — распределение геометрического сечения частиц аэрозоля по размерам; $n(z, r)$ — распределение концентрации частиц по размерам; $R_1(z)$ и $R_2(z)$ — наименьший и наибольший размеры частиц в распределении; n — число длин волн зондирующего излучения.

В [1] предложен итерационный алгоритм решения системы уравнений (1)–(3), позволяющий определить один параметр атмосферного аэрозоля (микроструктуру). Другой параметр (показатель преломления) должен быть задан априори. Очевидно, что точность определения микроструктуры в этом случае, помимо точности измерений, будет зависеть от точности априорного задания показателя преломления. В условиях значительных вариаций аэрозольных параметров, что особенно характерно для приземного слоя атмосферы, априорное задание конкретного значения показателя преломлений весьма затруднительно. В данном сообщении рассмотрен алгоритм, с помощью которого можно определить оба параметра аэрозоля из оптических измерений.

Решение задачи и основной результат. В [2] рассмотрен метод оптического зондирования параметров слабопоглощающего ($\kappa \ll 0,002$) атмосферного аэрозоля, основанный на одновременном использовании многочастотного лазерного локаатора и спектрального фотометра. Измерения могут осуществляться, например, по схеме, представленной на рис. 1. Отражающий экран 5, источник света 4 и спектральный фото-

метр 3 предназначены для определения базовым методом прозрачности (коэффициента ослабления) слоя атмосферы от лазерного локатора 1 до рассеивающего объема 2. Данный метод оптического зондирования позволяет построить ряд алгоритмов определения параметров атмосферного аэрозоля. Как показал анализ, выполненный автором, наиболее оптимальным является алгоритм, основанный на построении вспомогательной функции

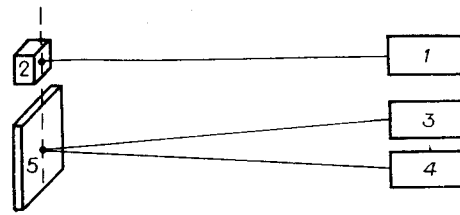


Рис. 1.

$$\varphi_j(m) = \int_{R_1(z)}^{R_2(z)} K_{ex}(r, m, \lambda_j) s(z, r) dr, \quad j = 1, \dots, N, \quad (4)$$

где $s(z, r)$ получено при решении уравнений (1)–(3) с показателем преломления, равным m ; N — число рабочих длин волн спектрального фотометра.

Из выражения (4) следует, что значение функции $\varphi_j(m^*)$ совпадает с величиной полидисперсного коэффициента ослабления на длине волны λ_j (см. (3)), если только m^* и $s(z, r)$, входящие в $\varphi_j(m)$, соответствуют параметрам атмосферного аэрозоля.

Функции $\varphi_j(m)$ рассчитываются одновременно с решением системы уравнений (1)–(3). При этом для каждой длины волны λ_j с некоторым шагом Δm_l строится последовательность возрастающих значений показателя преломления

$$\{m_l\} \quad (l = 1, 2, \dots; m_{l-1} < m_l). \quad (5)$$

Предельные значения в этой последовательности задаются априори на основе имеющихся данных о составе атмосферного аэрозоля. Выбор шага $\Delta m_l = m_l - m_{l-1}$ проводится с учетом разрешающей способности используемой аппаратуры. В большинстве случаев, если последовательность (5) построена с равномерным шагом $\Delta m = 0,01$, обеспечивается приемлемая точность определения параметров атмосферного аэрозоля.

Алгоритм осуществляется в два этапа.

1. Сначала выбирается некоторое значение показателя преломления m_l из последовательности (5), с учетом которого итерационным методом [1] решается система уравнений (1)–(3) для измеренных с помощью многочастотного лазерного локатора значений $P(z, \lambda_i)/P_0(\lambda_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) и находится $s_i(z, r)$ — распределение геометрического сечения частиц.

2. В соответствии с (4) рассчитывается значение функции $\varphi_j(m_l)$ и сопоставляется с измеренным с помощью фотометра значением коэффициента ослабления. Если разность между ними велика, то переходят к следующему значению показателя преломления из последовательности (5), причем выбор делается с учетом знака разности. Если разность между рассчитанными значениями функции $\varphi_j(m_l)$ и измеренным значением коэффициента ослабления отрицательна, выбирается $m_{l+1} > m_l$. Если же разность мала, то процесс обрывается. Найденные на первом этапе распределение $s(z, r)$ и на втором этапе значение показателя преломления принимаются в качестве параметров атмосферного аэрозоля.

Заметим, что длины волн λ_j , входящие в выражение (4), для фотометра могут быть иными, нежели длины волн λ_i , на которых работает лазерный локатор. Это является преимуществом алгоритма. Во-первых, отпадает необходимость оригинальных разработок спектральных фотометров, так как можно использовать серийные приборы. Во-вторых, открывается возможность детального исследования спектральной зависимости показателя преломления аэрозолей. В этом случае необходимо,

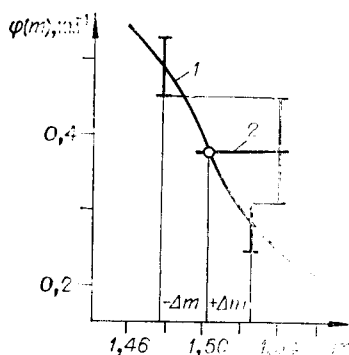


Рис. 2.

чтобы спектральный интервал рабочих длин волн фотометра был больше, чем спектральный интервал лазерного локатора, и выполнялось условие $N > n$.

Алгоритм устойчив к ошибкам оптических измерений при определении показателей преломления, что обусловлено быстрым убыванием функции $\varphi_2(m)$. Погрешность нахождения показателя преломления иллюстрируется примером на рис. 2. Функция $\varphi(m)$ ($\lambda = 0,63$ мкм, $z = 360$ м) рассчитана для измерений, выполненных лазерным локатором с тремя длинами волн (кривая 1). Измеренное фотометром значение коэффициента ослабления (прямая 2) позволяет установить,

что показатель преломления для $\lambda = 0,63$ мкм примерно составляет 1,50. Наибольшая ошибка при определении показателя преломления возникает в тех случаях, когда данные лазерного зондирования систематически занижены, а фотометрические измерения систематически завышены, и наоборот. В ситуации, показанной на рис. 2, погрешность результатов лазерного зондирования равна $\pm 10\%$, а фотометрические измерения выполнены с ошибкой $\pm 20\%$. В этом случае, как следует из рис. 2, величина показателя преломления находится с погрешностью Δm , не превышающей $\pm 0,025$. Уменьшение ошибки фотометрических измерений до $\pm 10\%$ (что вполне реально для существующего технического уровня) приводит к уменьшению Δm практически вдвое. Такие погрешности определения показателя преломления атмосферного аэрозоля вполне приемлемы на практике.

Описанный алгоритм был опробован для нахождения параметров атмосферного аэрозоля по данным оптического зондирования, выполненного в Томске на полигоне Института оптики атмосферы СО АН СССР по указанной выше схеме (см. рис. 1). Лазерное зондирование на трех длинах волн ($\lambda = 0,53$; $0,69$ и $1,06$ мкм) сопровождалось фотометрическими измерениями на длине волны $\lambda = 0,63$ мкм. Значение показателя преломления для серии измерений при различных оптических состояниях атмосферы менялось от 1,50 до 1,55. Эти значения показателей преломления, а также полученные данные о микроструктуре удовлетворительно согласуются с результатами выполненных в Томске измерений аэрозольных параметров контактным методом [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Наац И. Э. Вопросы теории дистанционного определения микроструктуры атмосферного аэрозоля методами лазерной локации.— В кн.: Лазерное зондирование атмосферы. М.: Наука, 1976.
2. Костин Б. С., Наац И. Э. К теории дистанционного определения микрофизических характеристик аэрозолей многочастотными лидарами.— В кн.: 7-й Всесоюз. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (Тез. докл.). Томск: ТФ СО АН СССР, 1982, ч. 1.
3. Зуев В. Е., Ивлев Л. С., Кондратьев К. Я. Новые результаты исследований атмосферного аэрозоля.— Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана, 1973, т. IX, № 4.

Поступила в редакцию 7 июля 1982 г.;
окончательный вариант — 7 января 1983 г.