

С.И. Кавкянов, Г.М. Креков, С.Р. Чурагулов

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АЭРОЗОЛЬНОЙ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ АТМОСФЕРЫ

В работе рассматриваются методические вопросы и проводится сравнительный анализ информативности одно-, двух- и трехчастотного лазерного зондирования пространственного распределения аэрозольной и молекулярной составляющих атмосферы. Приводятся результаты замкнутого численного эксперимента по зондированию высотного хода аэрозольного и молекулярного коэффициентов обратного рассеяния. Исследуется влияние различных упрощающих предположений о пространственном и спектральном изменениях аэрозольных параметров на точность восстановления коэффициентов рассеяния, даются рекомендации по оптимальному планированию эксперимента.

Использование одночастотного лидара для исследования пространственно-временной структуры атмосферного аэрозоля имеет ограниченную область применения ввиду возможной неоднозначности интерпретации экспериментальных данных [1–3]. В данной работе рассматриваются информационные возможности спектральных измерений для восстановления данных об аэрозольных и молекулярных профилях.

Интенсивность лидарного сигнала связана с пространственным распределением двухкомпонентной смеси аэрозолей и молекул в атмосфере известным уравнением:

$$s(z, \lambda) = [\beta_a(z, \lambda) + \beta_m(z, \lambda)] \exp \left\{ -2 \int_0^z [\sigma_a(z', \lambda) + \sigma_m(z', \lambda)] dz' \right\}, \quad (1)$$

где $s(z, \lambda)$ — квадратично усиленный сигнал, нормированный в точке z_0 ; σ_a и β_a — аэрозольные, σ_m и β_m — молекулярные коэффициенты полного и обратного рассеяния.

При одночастотной локации единственно возможным способом доопределения (1) являлось [1] априорное введение профиля $g_\Sigma(z) = [\beta_a(z) + \beta_m(z)] / [\sigma_a(z) + \sigma_m(z)]$ либо $g_a(z) = \beta_a(z) / \sigma_a(z)$. Развивая методологию многочастотного зондирования [2], можно в качестве еще одного способа доопределения уравнения (1) для набора длин волн λ_i , $i = 1, 2, \dots$ предложить замену спектрального хода $\beta_a(\lambda_i)$, $\sigma_a(\lambda_i)$ разложением по некоторой системе известных функций с оценкой параметров разложения по данным лазерного зондирования, в частности, ряда по степеням приращений $(\lambda - \lambda_1) / \lambda_1$ (в логарифмическом масштабе):

$$\ln \beta_a(z, \lambda) = \ln \beta_a(z, \lambda_1) + \frac{\partial \ln \beta_a}{\partial \ln \lambda} \left(\frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_1} \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \ln \beta_a}{\partial \ln \lambda^2} \left(\frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_1} \right)^2 + \dots \quad (2)$$

$$\ln \sigma_a(z, \lambda) = \ln \sigma_a(z, \lambda_1) + \frac{\partial \ln \sigma_a}{\partial \ln \lambda} \left(\frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_1} \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \ln \sigma_a}{\partial \ln \lambda^2} \left(\frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_1} \right)^2 + \dots \quad (3)$$

Зачастую можно ограничиться в (2), (3) лишь первыми приращениями с точностью до двух параметрических функций $\eta_\beta = \partial \ln \beta_a / \partial \ln \lambda$, $\eta_\sigma = \partial \ln \sigma_a / \partial \ln \lambda$, характеризующими относительный спектральный ход β_a , σ_a и изменяющимися в пределах, поддающихся оценкам (обычно $-2 \leq \eta_\beta$, $\eta_\sigma \leq 0$ [4]). В аналогичном (2), (3) разложении для β_m , σ_m параметр $\eta_m = -4$, а члены порядка выше первого равны нулю. Очевидно, для одновременного восстановления, например, трех профилей $\beta_a(z)$, $\sigma_a(z)$ и β_m в случае использования только линейных частей разложений (2), (3) необходимо не менее пяти рабочих длин волн. На практике при меньшем количестве волн λ_i приходится прибегать к дальнейшим допущениям либо привлечению сопутствующих измерений (модельных оценок). Далее на основе численного моделирования исследуется точность восстановления аэрозольных и молекулярных профилей при различных допущениях о высотном ходе вводимых априори оптических параметров аэрозоля в случае одно-, двух- и трехчастотного зондирования.

Сохраняя в уравнениях (2), (3) линейные части приращений $\ln \beta_a$ и $\ln \sigma_a$, получим после логарифмирования и дифференцирования (1) по $\ln \lambda$ для относительного спектрального хода сигнала $\eta_s(z, \lambda) = \partial \ln s / \partial \ln \lambda$:

$$\eta_s(z, \lambda) = \eta_\beta(z, \lambda) \frac{\beta_a(z, \lambda)}{\beta_\Sigma(z, \lambda)} + \eta_m \frac{\beta_m(z, \lambda)}{\beta_\Sigma(z, \lambda)} - 2 \int_{z_0}^z [\sigma_a(z', \lambda) \eta_s(z', \lambda) + \eta_m \sigma_m(z', \lambda)] dz'. \quad (4)$$

Проведя подобное преобразование (1) для заданного набора λ_i , $i = 1, 2, \dots$, получим эквивалентную систему, которую дополним уравнениями связи, следующими из (2), (3):

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_i - \lambda_1} \ln \frac{\sigma_a(z, \lambda_i)}{\sigma_a(z, \lambda_1)} = \eta_s(z); \quad \frac{\lambda_i}{\lambda_i - \lambda_1} \ln \frac{\beta_a(z, \lambda_i)}{\beta_a(z, \lambda_1)} = \eta_\beta(z); \quad \frac{\lambda_i}{\lambda_i - \lambda_1} \ln \frac{\beta_m(z, \lambda_i)}{\beta_m(z, \lambda_1)} = \eta_m. \quad (5)$$

Как показано в [2], возникшую систему уравнений, при условии (5), удобно решать итерационными методами. Одна из возможных схем обработки заключается в задании начального приближения $\beta_m(z, \lambda_1)$, $g_a(z, \lambda_1)$ в (1), после чего можно найти:

$$\beta_a(z, \lambda_1) = \frac{s(z, \lambda_1)}{\beta_\Sigma^{-1}(z_0, \lambda_1) - 2 \int_{z_0}^z \frac{s(z', \lambda_1)}{g_a(z', \lambda_1)} dz'} \times \exp \left\{ -2 \int_{z_0}^z [g_a^{-1}(z', \lambda_1) - g_m^{-1}] \beta_m(z', \lambda_1) dz' \right\} \times \frac{\beta_m(z, \lambda_1)}{\exp \left\{ -2 \int_{z_0}^z [g_a^{-1}(z'', \lambda_1) - g_m^{-1}] \beta_m(z'', \lambda_1) dz'' \right\}} = \beta_m(z, \lambda_1). \quad (6)$$

Пересчитывая последовательно с учетом (5) и начального приближения для η_σ , η_β профили β_m , g_a , σ_a с λ_i на λ_{i+1} , можно уточнять η_σ , η_a с помощью аналитических решений уравнений (4):

$$\eta_s(z) = \varphi(z) \left\{ \eta_s(z_0) \frac{\beta_a(z_0)}{\beta_\Sigma(z_0)} + \int_{z_0}^z \left[2\eta_m \sigma_m(z') - \frac{\partial \eta_s(z')}{\partial z'} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\beta_a(z') \eta_\beta(z') + \beta_m(z') \eta_m}{\beta_\Sigma(z')} \right) \right] \varphi(z') dz' \right\}, \quad (7)$$

где

$$\varphi(z) = \exp \left\{ -2 \int_{z_0}^z \beta_\Sigma(z') g_a^{-1}(z') dz' \right\};$$

$$g_a(z, \lambda_1) = g_m \frac{\sigma_m(z, \lambda_1)}{\sigma_a(z, \lambda_1)} \frac{\eta_m - \eta_s(z, \lambda_1) - 2 \int_{z_0}^z [\eta_m \sigma_m(z', \lambda_1) + \eta_\beta(z', \lambda_1) \sigma_a(z', \lambda_1)] dz'}{\eta_s(z, \lambda_1) - \eta_\beta(z, \lambda_1) - 2 \int_{z_0}^z [\eta_m \sigma_m(z', \lambda_1) + \eta_\beta(z', \lambda_1) \sigma_a(z', \lambda_1)] dz'}. \quad (8)$$

Подробные аналитические оценки несложно записать также для $\sigma_m(z)$, $\eta_\beta(z)$ и $\beta_a(z)$. В численном эксперименте для восстановления прозрачности $T_\Sigma(z_0, z)$ использовались модельные оценки относительного высотного хода лидарного отношения $g_\Sigma(z)/g_\Sigma(z_0)$, полученные нами в работе [4].

Далее показаны наиболее характерные результаты.

1. Одночастотное зондирование. При одночастотном зондировании разделение аэрозольной и молекулярной компонент рассеяния возможно лишь в том случае, когда одна из них известна (измеряется независимо). Как следует из (6), точность восстановления $\beta_a(z)$ (при заданном $\beta_m(z)$) определяется точностью априорного задания $g_a(z)$ (либо $g_\Sigma(z)$). Прогноз этих функций является весьма сложной задачей ввиду высокой пространственно-временной изменчивости (см. рис. 1, а). Влияние различных упрощающих предположений о высотном ходе $g_\Sigma(z)$ иллюстрируется численным экспериментом по восстановлению $\beta_a(z)$ (рис. 1, б).

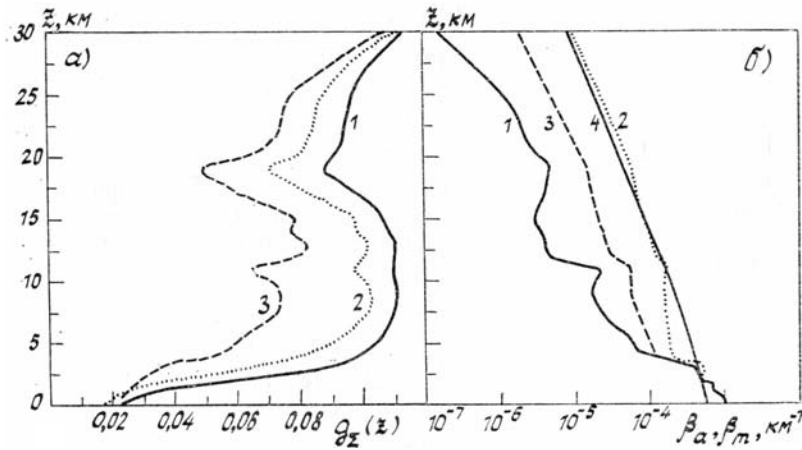


Рис. 1, а. Высотный ход лидарного отношения атмосферы а) для $\lambda_1 = 0,53$ мкм (1); $\lambda_2 = 0,69$ мкм (2) и $\lambda_3 = 1,06$ мкм (3), по данным [4]; б) численный эксперимент по одночастотному зондированию аэрозольного профиля $\beta_a(z)$ на $\lambda = 0,69$ мкм: 1 — модельный профиль $\beta_a(z)$ [4]; 2 — восстановленный при $g_z(z) = g_z(0)$; 3 — восстановленный при линейной аппроксимации $g_z(z) = g_z(0) + [g_z(30) - g_z(0)]z / 30$; 4 — модельный профиль $\beta_m(z)$

2. Двухчастотное зондирование. При двухчастотном зондировании систему (1), (4), (5) можно разрешить относительно профилей $\beta_a(z)$, $\beta_m(z)$ при заданных $\eta_a(z)$, $\eta_b(z)$.

$$\beta_m(z, \lambda_1) = \left[\frac{s(z, \lambda_2)}{T^2(z, \lambda_2)} - \frac{s(z, \lambda_1)}{T^2(z, \lambda_1)} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{\eta_{\beta}(z, \lambda_1)} \right] \left[\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^4 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{\eta_{\beta}(z, \lambda_1)} \right]^{-1}; \quad (9)$$

$$\beta_a(z, \lambda_1) = \beta_m(z, \lambda_1) \left[\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^4 - \frac{s(z, \lambda_2) T^2(z, \lambda_1)}{s(z, \lambda_1) T^2(z, \lambda_2)} \right] \times \left[\frac{s(z, \lambda_2) T^2(z, \lambda_1)}{s(z, \lambda_1) T^2(z, \lambda_2)} - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{\eta_{\beta}(z, \lambda_1)} \right]^{-1}. \quad (10)$$

Простейшие оценки на основании (9), (10) позволяют убедиться, что двухчастотное зондирование даже при использовании грубых упрощающих допущений относительно $\eta_a(z)$ и $\eta_b(z)$ позволяет заметно повысить точность лидарных измерений.

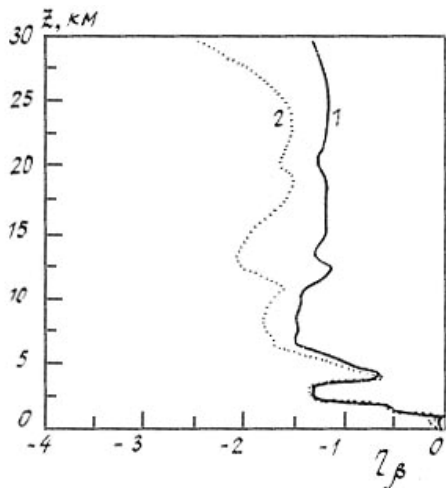


Рис. 2. Численный эксперимент по восстановлению характеристики $\eta_{\beta}(z)$ при трех длинах волн ($\lambda_i = 0,53$; $0,69$ и $1,06$ мкм); кривые 1, 2 — соответственно модельный и восстановленный профили

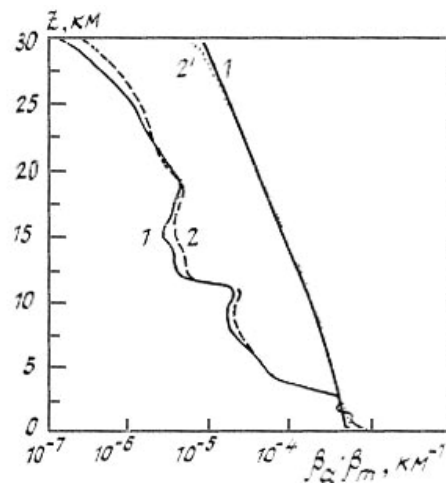


Рис. 3. Численный эксперимент по трехчастотному зондированию аэрозольного $\beta_a(z, \lambda_2)$ и молекулярного $\beta_m(z, \lambda_2)$ профилей обратного рассеяния при использовании $\eta_{\beta}(z, \lambda)$ указанной на рис. 2. Здесь 1 и 1' — модельные, 2 и 2' — восстановленные аэрозольные и молекулярные профили соответственно

Дальнейшее увеличение числа длин волны зондирования дает возможность уменьшить произвол в выборе спектральных зависимостей η_β и оценивать их непосредственно из лидарных данных.

3. Трехчастотное зондирование. Простейший вариант обработки лидарных сигналов в этом случае заключается в восстановлении профилей $\beta_a(z, \lambda_1)$ с использованием $s(z, \lambda_1)$, $s(z, \lambda_2)$ и $\beta_a(z, \lambda_2)$ с использованием, $s(z, \lambda_2)$, $s(z, \lambda_3)$, в оценке $\eta_\beta(z)$ на интервале $[\lambda_1, \lambda_2]$ на основе уравнений связи (5) и использовании полученной оценки $\eta_\beta(z)$ для уточнения первоначальных оценок $\beta_a(z)$, $\beta_m(z)$ на $[\lambda_1, \lambda_2]$. На рис. 2 приведены результаты восстановления профиля $\eta_\beta(z)$ по этому алгоритму, а на рис. 3 — результаты использования этой оценки для восстановления профилей $\beta_a(z)$ и $\beta_m(z)$.

Результаты численного моделирования, представленные на рис. 1–3, наглядно демонстрируют преимущества использования априорной информации о профилях $\eta_a(z)$, нежели о $g_a(z)$ при зондировании профилей $\beta_a(z)$ и $\beta_m(z)$. Кроме того, сравнение в одних и тех же условиях двух- и трехчастотного метода дает основание заключить, что даже при линейной аппроксимации зависимости $\ln \beta_a$, $\ln \sigma_a$ от λ трехчастотное зондирование информативнее двухчастотного. В заключение заметим, что задача оптимального выбора рабочих длин волн лидара здесь не ставилась, однако из общих соображений и накопленных результатов моделирования ясно, что при планировании эксперимента необходимо стремиться к максимальному их попарному разнесению в пределах интервалов слабой изменчивости $\eta_a(\lambda)$.

1. Зуев В.Е., Кавкьянов С.И., Креков Г.М. — Изв. АН СССР. ФАО, 1983, т. 19, № 3, с. 255.
2. Креков Г.М. Дистанционные методы исследования атмосферы. — Новосибирск: Наука, 1980.
3. Zuev V.E., Kavkuyanov S.I., Krekov G.M. — Adv. Space Res., 1985, v. 5, № 6, p. 81.
4. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 256 с.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, г. Томск

Поступило в редакцию
23 сентября 1987 г.

S.I. Kavkuyanov, G.M. Krekov, S.R. Churagulov. **Numerical study of information content of laser sensing of aerosol and molecular atmosphere.**

The paper considers the methodical questions and a comparative analysis is made of the information content of single, — double— and three—frequency laser sensing of spatial distribution of aerosol and molecular components of the atmosphere. The results of closed numerical experiment on sounding of altitude behavior of aerosol and molecular coefficients of backscattering are presented. The influence of different simplifying assumptions on space and spectral variation of aerosol parameters on the restitution accuracy is studied. The recommendations on optimal planning of the experiment are given.