

К.И. Гобрусенко, Б.П. Иваненко

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ МНОГОУГЛОВОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В работе предлагается метод интерпретации данных многоугольного лазерного зондирования применительно к задаче восстановления оптической толщи и коэффициента ослабления атмосферы. Метод основан на регуляризирующем алгоритме обработки экспериментальной информации. Эффективность алгоритма исследуется в численном эксперименте. Приводятся результаты обработки экспериментальных данных.

В последнее время в зарубежной печати появился ряд публикаций по практическому применению метода двухугольного лазерного зондирования и его модификаций для восстановления оптической толщи и коэффициентов аэрозольного светорассеяния при зондировании в ИК-области спектра [1, 2].

Однако в данной схеме зондирования для обеспечения уверенного определения оптической толщи атмосферы угол между направлениями зондирования должен составлять 60° . Это в свою очередь вступает в очевидное противоречие с предположением о слоисто-горизонтальной однородности, по заложенным в основу метода двухугольного зондирования [1, 2].

В данном сообщении для восстановления оптической толщи атмосферы либо нижней границы плотных облачных образований предлагается использовать многоугольную методику зондирования в сочетании с регуляризирующим алгоритмом метода логарифмической производной (МЛП) [3].

Запишем уравнение лазерной локации в предположении о слоисто-горизонтальной однородности атмосферы в виде

$$S(R_k, x) = \beta_\pi(R_k) \exp(-2x \cdot \tau(R_k)), \quad (1)$$

где $S(R_k, x) = U(R_k, x) \cdot R_k^2 \cdot x^2 / P_0$, — амплитуда локационных сигналов получаемых при отражении под разными углами γ от слоя $\Delta R_k = R_{k+1} - R_k$ — расположенного на высоте R_k ; $x = \sec \gamma$; P_0 — аппаратная константа лидара: $\beta_{\text{ext}}(R_k)$, $\beta_\pi(R_k)$ — коэффициенты ослабления и обратного рассеяния в слое ΔR_k , $\tau(R_k) = \int_0^{R_k} \beta_{\text{ext}}(R) dR$ — оптическая толщина атмосферы по направлению в зенит.

Из (1) можно получить следующее выражение для определения $\tau(R_k)$:

$$\tau(R_k) = -0,5d \ln S(R_k, x) / dx. \quad (2)$$

Таким образом, задача восстановления оптической толщи атмосферы сводится к определению логарифмической производной по $x = \sec \gamma$ сигнала $S(R_k, x)$, получаемого от слоя ΔR_k при зондировании под разными углами. Известно [4], что задача дифференцирования эмпирических функций (лидарных сигналов), содержащих случайные погрешности, является некорректной и требует применения регуляризирующих алгоритмов обработки экспериментальной информации. С этой целью одним из авторов ранее был разработан регуляризирующий алгоритм МЛП [3]. Согласно [3] искомая информация от $\tau(R_k)$ извлекается из следующего выражения:

$$\tau_\alpha(R_k) = -0,5d \ln S^{(\alpha)}(R_k, x) / dx, \quad (3)$$

где

$$S^{(\alpha)}(R_k, x) = S(R_k, x_0) + \int_{x_0}^x \varphi'_\alpha(R_k, x) dx, \quad \text{а } \varphi'_\alpha(R_k, x) = d \ln S^{(\alpha)}(R_k, x) / dx -$$

регуляризованное значение логарифмической производной сигнала по $x = \sec \gamma$ при выбранном значении параметра α . В свою очередь, процесс перехода от $S(R_k, x)$ к $S^{(\alpha)}(R_k, x)$ следует понимать как процедуру фильтрации и выделения регулярной (дифференцируемой) компоненты в принимаемых на фоне случайных помех локационных сигналах [4]. При этом согласно [5] задача численного дифференцирования может быть сведена к решению интегрального уравнения Фредгольма первого рода относительно искомой производной по методу сглаживающего функционала Тихонова.

Отметим далее, что при лазерном зондировании значительный интерес представляет определение оптической толщи нижней границы плотных облачных образований или оптической толщи всего облака. Данная задача может быть решена либо путем последовательного (последойного) восстановления с применением вычислительной схемы (3) МЛП, либо с помощью модификации МЛП, предложенной в работе [6] и позволяющей при построении сглаживающего функционала использовать априорную информацию об искомом решении в виде задания некоторой модели. При этом производится восстановление не самого профиля, а его отклонения от исследуемой априорной модели. Применительно к интересующей нас задаче восстановления $\Delta\tau(R_{k+1}, R_k)$ данный подход приводит к следующему расчетному соотношению:

$$\Delta\tau_\alpha(R_k, R_{k+1}) = -0,5 d \ln (S^{(\alpha)}(R_{k+1}, x)/S_{\text{мод}}(R_k, x))/dx, \quad (4)$$

где роль априорного $S_{\text{мод}}(R_k)$ профиля выполняет значение $S^{(\alpha)}(R_k)$ восстановленное по схеме (3) или из независимых измерений. Кроме того, использование вычислительной схемы (4) позволяет восстанавливать и оптическую толщину всего облака в случае, когда лидар способен регистрировать сигнал, приходящий от верхней границы. При этом можно предполагать, что вклад многократного рассеяния в этот сигнал не будет в значительной степени зависеть от угла зондирования и, следовательно, не повлияет на значение производной сигнала по углу.

Для исследования эффективности описанного выше алгоритма восстановления $\tau(R_k)$ авторами был проведен замкнутый численный эксперимент по последойному восстановлению оптической толщи модели слоисто-однородного облака, изображенной на рис. 1. Подробная схема проведения эксперимента приведена в [5]. Отметим, что при этом с помощью датчика случайных чисел моделировалась степень горизонтальной неоднородности облака путем варьирования коэффициента обратного рассеяния $\beta_\pi(R_k, x)$ в пределах 20–30%.

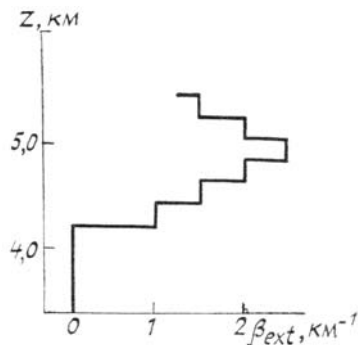


Рис. 1. Оптическая модель слоисто-однородного облака

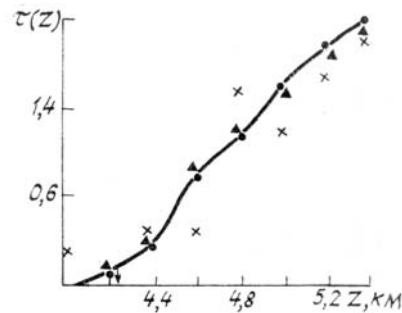


Рис. 2. Результаты численного эксперимента по восстановлению оптической толщи облака по данным многоуглового лазерного зондирования: — — точные значения $\tau(R_k)$, \blacktriangle — восстановленные по схеме (3) МЛП значения $\bar{\tau}_\alpha(R_k)$ при $\Delta\gamma = 15^\circ$ и $n = 6$; \bullet — при $\Delta\gamma = 30^\circ$ и $n = 6$; \times — значения $\tau(R_k)$, восстановленные по стандартной двухугловой методике при $\Delta\gamma = 30^\circ$ и уровне погрешности эксперимента порядка 10%

Восстановление $\bar{\tau}(R_k) = \sum_{l=1}^n \tau_\alpha(R_k, x_l)$ осуществлялось по схеме (3) МЛП при $n = 6$ и равномерной сетке углов. Максимальное отклонение луча от вертикали составляло величину $15^\circ, 30^\circ$. Соответствующие результаты восстановления $\bar{\tau}_\alpha(R_k)$ для $\Delta\gamma = 15^\circ$ и 30° представлены на рис. 2. Здесь же для сравнения нанесены значения $\tau(R_k)$, полученные с использованием двухугловой методики определения $\tau(R_k)$. Из полученных результатов численного моделирования следует, что предложенный подход обеспечивает устойчивое восстановление оптической толщи атмосферы при $\Delta\gamma = 15^\circ$, когда применение стандартной двухугловой методики приводит к физически неприемлемым результатам.

Разработанный алгоритм был апробирован при обработке реальных данных лазерного зондирования облачных образований. Зондирование осуществлялось в районе пос. Кацивели Крымской области во время экспедиционных работ в октябре 1988 г. при непосредственном участии авторов.

На рис. 3 приведены результаты восстановления оптической толщи и коэффициента ослабления облака по данным многоуглового зондирования. Восстановление $\bar{\tau}_\alpha(R_k)$ осуществлялось по четырем углам с использованием вычислительной схемы (4) МЛП, коэффициент ослабления $\beta_{\text{ext}}(R_k)$ оценивался путем последующего дифференцирования $\tau_\alpha(R_k)$ по методу интегральных уравнений [5].

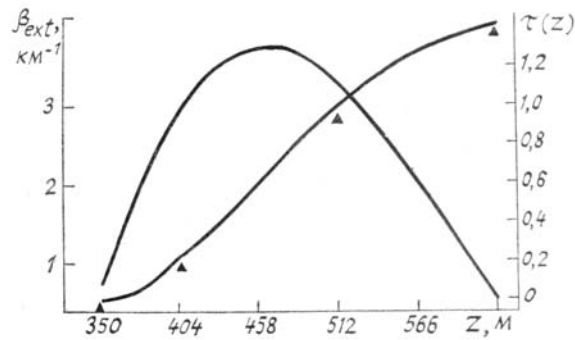


Рис. 3. Результаты обработки экспериментальных данных, полученных при многоугловом лазерном зондировании облака: \blacktriangle — восстановленные по схеме (4) МЛП значения $\tau_\alpha(R_k)$ при $\Delta\gamma = 15^\circ$ и $n = 4$; — — значения $\beta_{\text{ext}}(R_k)$, полученные путем численного дифференцирования $\tau_\alpha(R_k)$

Расчеты проводились на микроЭВМ ДВК-3 с использованием разработанного авторами программного комплекса ИКАР, предназначенного для интерпретации данных лазерного зондирования, получаемых при одно-, многочастотном и многоугловом зондировании атмосферы.

В заключение можно отметить, что предложенный алгоритм достаточно эффективен, помехоустойчив и может быть применен в системах оперативной обработки локационных сигналов.

1. Rothermal J., Jones D. // Appl. Opt. 1985. V. 24. № 21. P. 3487–3496.
2. Spinhirne J.D., Reagan J.A., Herman B.M. // J. Appl. Meteorol. 1980. V. 19. № 4. P. 426–438.
3. Иваненко Б. П., Наац И. Э. Известия АН СССР, ФАО. 1983. Т. 19. № 1. С. 94–98.
4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 283 с.
5. Ivanenko B.P., Naats I. E. // Opt. Lett. 1981. V. 6. № 7. P. 305–307.
6. Иваненко Б. П. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 8. С. 111–116.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступило в редакцию
19 апреля 1989 г.

В. П. Ivanenko, К. И. Gobruseenko. A Technique for Restoring the Optical Depth of the Atmosphere from the Data of Multiangle Liriar Sensing.

The paper suggests a technique for interpreting the data of multiangle lidar sensing in application to restore the optical depth and extinction coefficient of the atmosphere. The technique is based on the use of a regularization algorithm. The efficiency of the algorithm is studied numerically. Some results of experimental data handling using this algorithm are presented.