

## АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.501

С. Н. Волков, А. И. Надеев

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗОНДИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОТНОШЕНИЯ РАССЕЯНИЯ КР-ЛИДАРОМ С ПОСЛЕДУЮЩИМ АДАПТИВНЫМ СГЛАЖИВАНИЕМ СИГНАЛОВ

Рассматриваются возможности метода наименьших квадратов для адаптивного пространственного сглаживания сигналов лидарного зондирования при регистрации в режиме счета фотонов. Приведен пример использования процедуры адаптивного сглаживания для определения вертикальных профилей температуры и отношения рассеяния.

На станции высотного зондирования ИОА проводятся регулярные измерения профилей температуры и отношения рассеяния до высот тропопаузы. Повышение точности измерения указанных профилей при ограничениях на энергетический потенциал лидара может быть достигнуто путем тщательного выбора алгоритма обработки. В работе [1] дан анализ алгоритмов оптимальной оценки параметров для случая зондирования аэрозолей с использованием оптимальной марковской фильтрации.

В данной статье обсуждаются возможности метода наименьших квадратов для адаптивного пространственного сглаживания сигналов лидарного зондирования при регистрации в режиме счета фотонов.

Лидарные эхосигналы в счете фотонов при зондировании КР-лидаром выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} N(\lambda_0, H) &= C \Phi(H) (\beta_{\pi}^a(H) + \beta_{\pi}^m(H)) T^2(\lambda_0, H) H^{-2} + N_{ш}; \\ N(\lambda, H) &= C \Phi(H) \beta_{\pi}^{кр}(H) T(\lambda_0, H) T(\lambda, H) H^{-2} + N_{ш}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $N(\lambda_0, H)$  и  $N(\lambda, H)$  – принятые эхосигналы в каналах упругого и неупругого рассеяния;  $C$  – аппаратная постоянная, включающая число излученных фотонов;  $\Phi(H)$  – геометрический фактор;  $\beta_{\pi}^a(H)$  и  $\beta_{\pi}^m(H)$  – аэрозольный и молекулярный объемные коэффициенты рассеяния назад;  $\beta_{\pi}^{кр}(H)$  – объемный коэффициент рассеяния назад для вращательного СКР с квантовым вращательным числом  $J$ ;  $T(\lambda, H)$  – объемный коэффициент пропускания;  $H$  – высота;  $N_{ш}$  – фон.

Определение профилей температуры и отношения рассеяния из измеренных эхосигналов достаточно подробно описано в [2,3]. Для этого используются отношения эхосигналов в каналах упругого и неупругого рассеяния КР-лидара. Для получения профиля температуры используется отношение двух выделенных участков чисто вращательного спектра КР, откуда из зависимости

$$R(H) = \exp(\alpha / T(H) + \beta), \quad (2)$$

где  $R = \{N_1(\lambda_1, H) - N_{ш1}\} / \{N_2(\lambda_2, H) - N_{ш2}\}$  – отношение двух измеренных сигналов для двух выбранных участков чисто вращательного спектра;  $\alpha, \beta$  – константы;  $T(H)$  – температура, можно получить выражение для температуры

$$T = \alpha / \{\ln R - \beta\}. \quad (3)$$

Здесь для упрощения записи приняты обозначения  $R$  и  $T$  вместо  $R(H)$  и  $T(H)$ . Центры выделенных спектральных участков в чисто вращательном спектре комбинационного рассеяния, как правило, выбираются для соответствующих им вращательных квантовых чисел  $J$ , равных 6 и 14.

Для получения профиля отношения рассеяния используется отношение аэрозольного сигнала к сумме сигналов КР от температурно-чувствительных участков, при этом температурная зависимость взаимно компенсируется [4].

Не отвлекаясь на проблемы калибровки в отношении рассеяния и точность определения констант  $\alpha$  и  $\beta$  в выражении (3), запишем оценку абсолютной погрешности для отношения двух сигналов в виде

$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial N_1}\right)^2 \delta^2 N_1 + \left(\frac{\partial R}{\partial N_{ш1}}\right)^2 \delta^2 N_{ш1} + \left(\frac{\partial R}{\partial N_2}\right)^2 \delta^2 N_2 + \left(\frac{\partial R}{\partial N_{ш2}}\right)^2 \delta^2 N_{ш2}}. \quad (4)$$

В предположении пуассоновской статистики при приеме сигнала в режиме счета фотонов имеем

$$N = \delta^2 N, \quad N_{ш} = \delta^2 N_{ш},$$

затем, обозначая вклад шума в полезный сигнал как

$$\varepsilon = N_{ш}/N_c,$$

где  $N_c = N - N_{ш}$  – полезный сигнал, из (4) получим

$$\delta R / R = \sqrt{(1 + 2 \varepsilon_1) / N_{c1} + (1 + 2 \varepsilon_2) / N_{c2}}. \quad (5)$$

Разделение принятого эхосигнала на шум и полезный сигнал стало возможным после того, как шум в процессе накопления сигнала стал выделяться стробом. Временная задержка до начала шумового строба в сигнале выбрана таким образом, чтобы обеспечить превалирование шума над полезным сигналом в несколько порядков.

Для температуры оценка абсолютной погрешности с учетом (3) будет иметь вид

$$\delta T = T^2/\alpha \delta R/R.$$

Характерный профиль оценок относительной и абсолютной погрешностей для большинства измеренных профилей приведен для отношения рассеяния и температуры на рис. 1 от 21.12.1991 г. Из рисунка видно, что изменение профилей оценок по величине достигает одного порядка с выраженным минимумом на высоте 2 км, что связано с влиянием геометрического фактора на низких высотах и квадратичным уменьшением с ростом высоты принятого эхосигнала. Значительная величина оценки относительной погрешности для отношения рассеяния на высоте 22 км связана с тем, что в величину отношения сигналов входит аэрозольный сигнал, взятый после подавления на четыре порядка первым монохроматором. Для поиска функциональной зависимости между экспериментальными величинами воспользуемся классическим методом наименьших квадратов, т.е. будем искать такую функциональную зависимость, при которой

$$\sum_i (Y_i - Y_i')^2$$

обращается в минимум. Единственным аргументом, определившим наш выбор метода наименьших квадратов среди других методов, является его простота. Это обстоятельство, на наш взгляд, является достаточно веским обоснованием, в особенности при проведении измерений на начальном этапе экспериментальных работ. Традиционное использование метода наименьших квадратов заключается в сглаживании экспериментальных данных окном, величина которого выбирается в зависимости от степени выбранного полинома и величины разброса экспериментальных данных. Так, например, если величина окна равна степени полинома плюс один, то получим точное решение, т. е. полином пройдет через экспериментальные точки. Проходя последовательно окном через все экспериментальные точки, получим сглаженную функциональную зависимость, учитывающую экспериментальный разброс измеренных данных. Но в условиях, когда оценка погрешности меняется вдоль измеренного профиля эхосигнала, как видно на рис. 1, выбор критерия сглаживания или ширины окна затруднен. Идея предлагаемого метода заключается в том, чтобы количество точек сглаживания или ширину окна поставить в зависимость от величины оценки погрешности на каждом шаге сглаживания.

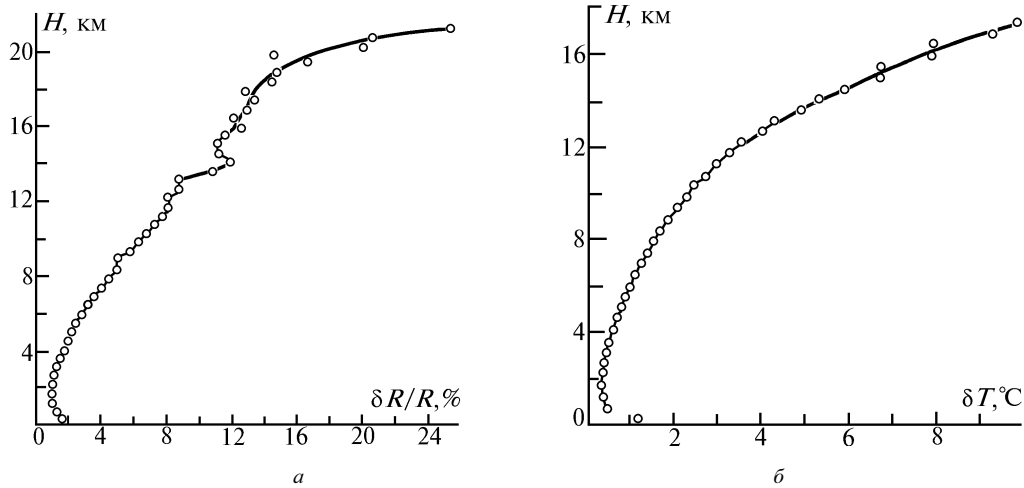


Рис. 1. Профили оценки статистической погрешности определения температуры (а) и отношения рассеяния (б) в зависимости от высоты

На рис. 2 показаны вертикальные профили температуры (а) и отношения рассеяния (б), полученные по предлагаемой методике. Для сглаживания полученных профилей по методу наименьших квадратов использовался полином четвертого порядка. При этом критерий сглаживания выбирался так, чтобы окно сглаживания менялось в три раза (от 5 до 15) при изменении оценки погрешности на порядок. Величина окна на каждом шаге сглаживания определялась как среднее по пяти предыдущим точкам и для температуры вычислялась из соотношения

$$n = \sum_{i=1}^5 \delta T_i,$$

и для отношения рассеяния

$$n = 50 \sum_{i=1}^5 \frac{\delta R_i}{R_i}$$

В качестве примера использования предлагаемого метода отметим, выделенное образование на рис. 2, б на высоте от 12 до 14 км. При выделении этого слоистого образования традиционным методом значения величин выше 13,5 км были бы недостаточно сглажены, т.е. проявилась бы несуществующая структура слоя.

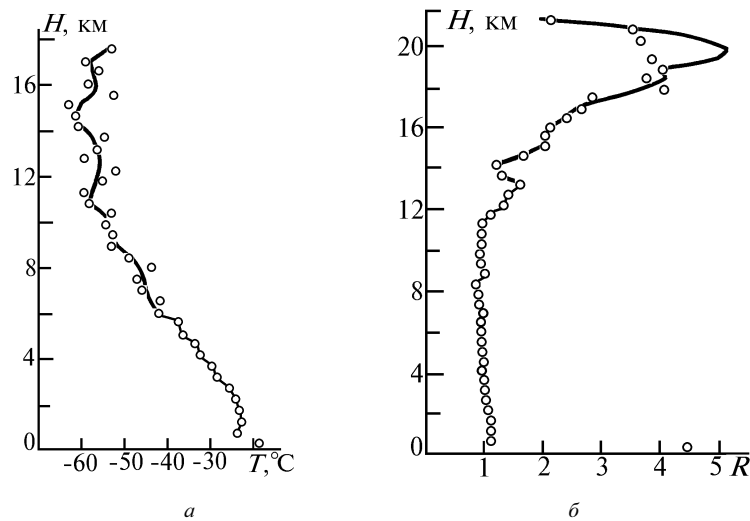


Рис. 2. Профили зависимости температуры (а) и отношения рассеяния (б) от высоты

Таким образом, можно сделать вывод, что наряду с существующими методами выделения полезного сигнала на фоне шума адаптивное сглаживание профилей является достаточно надежным способом, повышающим эффективность зондирования параметров атмосферы.

1. Исакова А.И., Игонин Г.М. // 1 Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана». (Тезисы докл.) Томск: ИОА СО РАН, 1994. Ч. 2. С. 126–127.
2. Волков С.Н., Кауль Б.В., Шапранов В.А., Шелефонтьук Д.И. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 6. С. 608–610.
3. Волков С.Н., Кауль Б.В., Кузнецов А.Л. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 5. С. 547–552.
4. Бобровников С.М. Разработка и исследование метода дистанционного определения оптических характеристик атмосферных аэрозолей с использованием эффекта СКР. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1983.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
15 декабря 1994 г.

**S.N. Volkov, A.I. Nadeev. Efficiency of Raman Lidar Sounding of Temperature Profiles and Scattering Ratio Followed by the Signals Adaptive Smoothing.**

Capability of the least squares method is in question in the paper for adaptive spatial smoothing of the sounding signals at recording under conditions of photons counting. An example of the adaptive smoothing procedure use for determination of temperature vertical profiles and scattering ratio is presented.