

В.П. Аксенов, В.А. Банах, Е.А. Ефимова, О.В. Тихомирова

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДВУМЕРНЫХ ПОЛЕЙ АТМОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО ЛИДАРНОМУ СИГНАЛУ, ОТРАЖЕННОМУ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Использование отраженного от земной поверхности сигнала бортового лидара дифференциального поглощения в сочетании с томографическим методом обработки данных измерений позволяет существенно снизить уровень мощности, требуемой для эффективного зондирования атмосферы.

Предложена схема просвечивания, и описан алгоритм обращения лидарных данных с целью восстановления двумерных полей атмосферных параметров. Представлены результаты решения модельной задачи.

Информация о пространственно-временной структуре полей атмосферных параметров существенна практически для всех задач физики атмосферы. Эффективное получение такой информации в глобальных и мезомасштабах может быть достигнуто при активном зондировании атмосферы с помощью аппаратуры, размещенной на аэрокосмических носителях. Появление новейших систем лазерной локации свидетельствует о скором включении лидаров в состав космических метеорологических систем. Однако для надежной интерпретации сигнала обратного рассеяния требуется существенное повышение энергетического потенциала лазерного локалятора, находящегося в верхних слоях атмосферы по сравнению с потенциалом наземной лидарной станции, решающей локальные задачи [1].

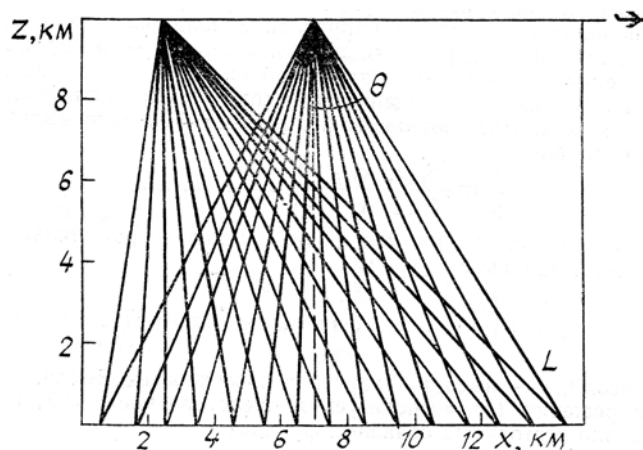


Рис. 1. Схема зондирования

Традиционные пути повышения энергетического потенциала лидара — увеличение антенных апертур и потребляемой мощности — ограничены техническими причинами. В этой связи перспективным представляется способ получения пространственно разрешенных данных о поле влажности, температуре, концентрации атмосферных компонент на основе лидарного сигнала, отраженного земной поверхностью. Схема зондирования приведена на рис. 1. В таких измерениях может быть достигнуто значительное снижение уровня требуемой мощности лазерного излучения [2] за счет различия в коэффициентах яркости подстилающей поверхности ρ и обратного рассеяния атмосферы [3].

Энергия излучения, отраженного подстилающей поверхностью в приближении ламбертовского рассеяния [4], описывается уравнением

$$E(z, x) = \frac{P_0}{\pi} \rho \tau_u S_0 k \frac{\cos \Theta}{L^2} \exp \left\{ -2 \int_0^L \sigma_t(x + \xi \sin \Theta, z + \xi \cos \Theta) d\xi \right\}, \quad (1)$$

где P_0 — мощность излучения лазерного передатчика; τ_u — длительность импульса; S_0 — площадь приемной антенны; k — аппаратный коэффициент, связанный с пропусканием приемной и передающей оптики, квантовой эффективностью и т.п., смысл обозначений Θ и L ясен из рис. 1; σ_t — объемный коэффициент ослабления, обусловленный рассеянием и поглощением аэрозолями и молекулами воздуха. При зондировании на двух длинах волн λ_1 и λ_2 и выполнении требований метода дифференциального поглощения [2, 5] получим из (1)

$$\frac{1}{2} \ln \frac{E(z, x, \lambda_1)}{E(z, x, \lambda_2)} = \int_0^L \sigma_t(\lambda_1, x + \xi \sin \Theta, z + \xi \cos \Theta) d\xi, \quad (2)$$

$\sigma_t(\lambda_1, \mathbf{r}(\xi, \Theta))$ — объемный коэффициент ослабления за счет резонансного поглощения исследуемой компонентой атмосферы.

Совокупность лидарных данных (2), представляющая собой набор интегральных характеристик (проекции) $\sigma_t(\lambda, \mathbf{r})$, полученная для различных положений лидара и направлений зондирования, служит исходными данными для решения обратной задачи — томографического восстановления поля коэффициента ослабления $\sigma_t(\lambda, \mathbf{r})$, а в итоге (если известен коэффициент поглощения) и распределения концентрации.

Пусть в результате зондирования имеется N измеренных значений оптической толщи

$$\tau_i = \frac{1}{2} \ln \frac{E_i(z, x, \lambda_1)}{E_i(z, x, \lambda_2)}, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

полученных для различных положений «лидар—отражатель». В соответствии с (2) запишем

$$\tau_i = \int_0^{L_i} \sigma_t(\lambda_1, x + \xi \sin \Theta_i, z + \xi \cos \Theta_i) d\xi, \quad (3)$$

где $L_i = h \cos \Theta_i$; h — высота лидара над поверхностью Земли.

Для решения (3) воспользуемся представлением $\sigma_t(\lambda, \mathbf{r})$ в виде ряда кусочно-постоянных базисных функций

$$\sigma_t(\lambda, \mathbf{r}) = \sum_{j=1}^M b_j \sigma_j(\mathbf{r}). \quad (4)$$

Область исследования σ_t разобьем на прямоугольные элементы, в каждом из которых σ_t постоянна. С учетом (4) перепишем (3)

$$\tau_i = \sum_{j=1}^M b_j \int_0^{L_i} \sigma_j(x + \xi \sin \Theta_i, z + \xi \cos \Theta_i) d\xi = \sum_{j=1}^M b_j G_{ij}, \quad (5)$$

где

$$G_{ij} = \int_0^{L_i} \sigma_j(\mathbf{r}) d\xi.$$

Систему линейных уравнений (5) для неизвестных коэффициентов b_j будем решать итерационным методом. Зададим исходное распределение $\sigma_t(\lambda, \mathbf{r})$. Для этого распределения найдем оценку исходных данных

$$\tilde{\tau}_i = \sum_{j=1}^M G_{ij} b_j^q. \quad (6)$$

Здесь индекс q означает номер итерации. Определим систему поправок так, чтобы точно выполнялось i -е уравнение

$$\tau_i = \sum_{j=1}^M (b_j^q + \Delta b_j^q) G_{ij}. \quad (7)$$

Из (6), (7) следует уравнение

$$\Delta \tau_i = \tau_i - \tilde{\tau}_i = \sum_{j=1}^M \Delta b_j^q G_{ij}. \quad (8)$$

Минимизируем расхождение $\Delta\tau_i$ по методу наименьших квадратов, тогда выражение для поправок будет иметь вид

$$\Delta b_{ij}^q = \frac{G_{ij} \Delta\tau_i}{\sum_{j=1}^M G_{ij}}. \quad (9)$$

Найдя Δb_{ij} , получим

$$\Delta b_{ij}^{q+1} = b_{ij}^q + \Delta b_{ij}^q. \quad (10)$$

Окончательная система поправок по q -й итерации формируется из всех K -лучей, прошедших через элемент j

$$\Delta b_j^q = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \Delta b_{ij}^q. \quad (11)$$

Итерационные алгоритмы типа, описанного выше, широко распространены. Они применяются для решения задач обработки изображений, физической, медицинской томографии [6]. Схема зондирования, изображенная на рис. 1, имеет значительное сходство со схемой метода межскважинного просвечивания [7], применяемого в геофизике для изучения массивов горных пород. Поэтому нами с небольшими модификациями был использован алгоритм обработки данных сейсмической томографии, описанный в работе [8].

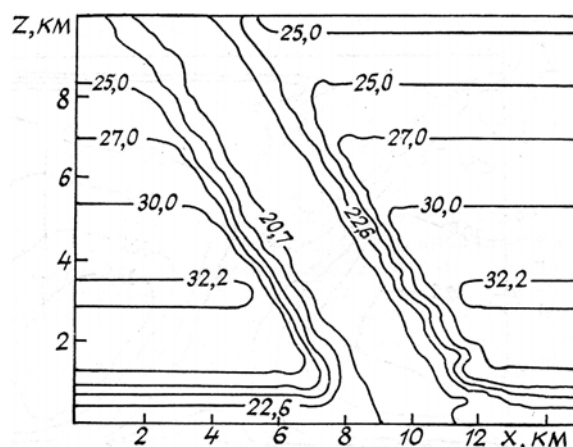


Рис. 2. Модельное поле парциального давления O_3

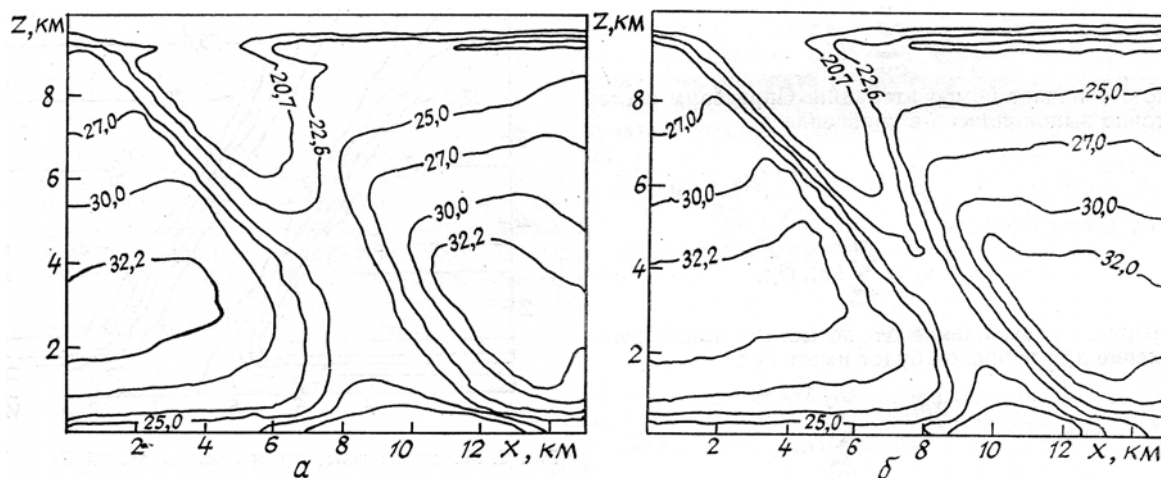


Рис. 3. Восстановленное поле парциального давления O_3 : а) 4 итерации, б) 9 итераций

Численный эксперимент по томографическому зондированию атмосферного озона проводился на ЭВМ «Эльбрус». Выбранное в качестве модельной функции $\sigma_i(\lambda, r)$ высотное распределение отноше-

ния парциального давления озона к температуре заимствовано из [9]. На этом исходном слое фоне задавалась область уменьшенной концентрации O_3 в виде шлейфа (рис. 2). Моделировался участок приземного слоя атмосферы протяженностью 15 км и высотой $h = 10$ км. Эта область была разделена прямоугольной сеткой на 40 элементов. Восстановление проводилось по 600 лучам, сформированным веером из 30 точек на траектории полета. Восстановленное поле парциального давления озона после 4 и 9 итераций изображено на рис. 3, а и 3, б. Начальное поле концентрации O_3 в процессе итераций задавалось слойным, совпадающим с исходным фоном [9]. Расчет ошибки восстановления дает величину от 0,1 до 7% для разных элементов восстанавливаемой области.

Таким образом, численный эксперимент показал, возможность использования томографического подхода для восстановления полей параметров атмосферы по лидарному сигналу, отраженному подстилающей поверхностью. Эти результаты являются предварительными.

Очевидно, что создание подобных лидарных систем требует разработки более эффективных алгоритмов восстановления, устойчивых к шумам в исходных данных (этот аспект в данной статье не затронут). Кроме того, при создании подобных систем следует учесть неизбежные ошибки в координатной привязке аэрокосмической лидарной станции, а также ошибки, обусловленные сканированием луча. Необходимо исследовать диапазон длин волн, наиболее эффективных с точки зрения информативности зондирования и коэффициента отражения подстилающей поверхности, особенностей рассеяния.

1. Лазерное зондирование атмосферы из космоса /В.М. Захаров, О.К. Костко, Л.Н. Бирич и др. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 213 с.
2. Лазерный контроль атмосферы /Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
3. Герман А.Н., Захаров В.М., Тихонов А.П., Теботов А.Е. //Тр. ЦАО. 1979 Вып. 138. С. 106–119.
4. Элементы теории светорассеяния и оптическая локация /В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.Г. Матвиенко и др. Новосибирск: Наука, 1982. 225 с.
5. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности /И.В. Самохвалов, Ю.Д. Копытин, И.И. Ипполитов и др. Новосибирск: Наука, 1987. 205 с.
6. Пикалов В.В., Преображенский Н.Г. Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы. Новосибирск: Наука, 1987. 231 с.
7. Иванссон С. //ТИИЭР. 1986. Т. 74. № 2. С. 99–111.
8. Ефимова Е.А. //Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1989. № 5. С. 53–68.
9. Ипполитов И.И., Комаров В.С., Мицель А.А. //Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–44.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
10 июля 1991 г.

V. P. Aksenov, V. A. Banakh, E. A. Efimova, O. V. Tikhomirova. Reconstruction of Two-Dimensional Fields of Atmospheric Parameters from Lidar Signals Reflected by the Earth's Surface.

The use of DIAL return signals from the Earth's surface when sounding from an airborne platform in combination with tomographic technique of measurement data processing makes it possible to essentially reduce the sounding pulse power required for the effective sensing of the atmosphere to be performed.

An optical arrangement of sounding and algorithm for inverting the lidar data aimed at restoration of two-dimensional fields of atmospheric parameters are suggested, and some results of numerical simulations of the problem are presented.