

中层大气臭氧的全日盘掩日测量*

王英鑑 徐寄遥

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

提 要

本文研究了日盘张角对掩日测量的影响, 引进了日盘光辐射空间变化特性这一先验信息, 提出了从全日盘掩日测量反演中层大气臭氧含量的新方法, 数值模拟试验指出, 这一方法可以满意地给出 25—65km 高度范围内大气臭氧的垂直分布。当测量吸收比的均方根噪声为 0.01 时, 其反演误差小于 10%, 利用这一方法, 可以大大简化探测系统, 降低测量对遥感平台的要求。

关键词: 掩日测量; 反演方法; 大气遥感; 中层大气; 大气臭氧。

一、引 言

中层大气微量成分的分布特性对了解中层大气的光化、动力和辐射过程是非常重要的。为了获得它们的垂直分布和空间分布特性, 掩日测量是重要的探测方法之一。这一方法的优点是测量量为所通过大气路径的透过率值, 仪器不需进行绝对标定; 而且它以太阳为光源, 光源信号较强, 在测量中灵敏度和信噪比不是主要问题。但是当进行全日盘掩日测量时, 由于日盘具有较大的视场张角(约 $32'$), 它在正切高度点附近所对应的高度范围约为 20—30km, 这使大量的中层大气信息在测量中被光滑掉, 甚至达到无法应用的地步。为了解决这一问题, 目前有两种方法: 一是^[1, 2]将日盘划分成许多小区域, 分别计算它们对测量结果的贡献权重, 最后用简单的二参量或三参量模式近似表示中层大气臭氧的分布特性。这一方法实际上仅解决了全日盘掩日测量时大气透过率的计算方法问题, 而没有获得更多的信息量。随着卫星技术的发展, 目前广泛应用的方法是采用较小仪器视场角, 测量仪器仅跟踪、观测日盘上的一小部分区域, 这样大大减小了仪器视场角在正切高度点附近所对应的高度范围, 获得了较窄的权函数特性, 增大了测量的有效信息量。SAGE I, SAGE II, ATMOS 和即将发射的 UARS 卫星上的 HALOE 等测量仪器均采用这种方法探测中层大气臭氧含量。这一方法的主要不足是需要利用精密的太阳跟踪系统, 并采用较大的通光口径, 使测量系统大大复杂化, 也相应地提高了对遥感平台的要求。

近年来, 数字信号处理技术在图象处理、光谱分析等方面得到了较广泛的应用, 对地基大气遥感, 我们^[3]曾指出测量仪器的仪器函数是重要的先验信息来源, 利用这一先

1991年2月18日收到, 6月5日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

验信息和非线性迭代退卷积方法,可以较好地去除仪器函数影响,恢复原吸收谱特性,从而获得更多的大气信息.事实上,日盘上各点太阳光谱辐射率的变化特性已很好地给出了^[4],它是全日盘掩日测量的重要先验信息,现有的掩日测量反演方法都忽略了这一信息来源.本文考虑了这一先验信息,提出了全日盘掩日测量时,反演中层大气臭氧垂直分布的新方法.

二、日盘张角对掩日测量的影响

若地外太阳光谱辐射率为 $I_{0\lambda}$, 测量仪器的相对光谱响应为 R_λ , 光学系统增益为 G , 则通过大气路径测量系统所接收到的太阳辐射能为

$$P = G \int d\Omega \int I_{0\lambda} R_\lambda \tau_\lambda d\lambda, \quad (1)$$

其中, τ_λ 为所通过大气路径的光谱透射比, Ω 为测量仪器的视场立体角. 若测量仪器的光谱带通足够窄, 以致在其有效区间内 $I_{0\lambda}$ 和 τ_λ 随波长的变化可以忽略. 这样, 测量的大气吸收比可写成

$$A_{0b} = \int A I_0 d\Omega / \int I_0 d\Omega, \quad (2)$$

其中, $A = 1 - \tau$.

在理想情况下, 测量仪器的视场角很小, 且仅观测日盘上的某一小部分区域, 这时测量的大气吸收比等于 A 值. 若正切高度为 h_0 , 大气吸收比 A 应为大气各层贡献之和,

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\tau}{dx} dx, \quad (3)$$

这里, x 值的零点取为正切高度点, 在太阳方向取为正, 在卫星方向取为负, 其值由图 1 的几何关系给出:

$$x^2 = (2R_0 + h_0 + h)(h - h_0), \quad (4)$$

其中, R_0 为地球半径. 在紫外波段, 透射比由 Beer 定律直接给出, 有

$$\tau(h_0, x) = \exp \left[-\sigma \int_x^\infty \rho q dx \right], \quad (5)$$

这里, σ 为臭氧的分子吸收截面, ρ 为大气数密度, q 为臭氧的体积混合比. 考虑到(4)、(5)式后, (3)式可改写为

$$A = \int_{h_0}^{\infty} K(h_0, h) q dh, \quad (6)$$

其中, K 为理想情况下掩日测量的权函数, 有

$$K(h_0, h) = 2\sigma\rho(h)\exp[-l(h_0, \infty)] \operatorname{ch}[l(h_0, h)] f(h_0, h). \quad (7)$$

这里

$$I(h_0, h) = \sigma \int_{h_0}^h \rho q f(h_0, z) dz, \quad (8)$$

$$f(h_0, h) = (R_0 + h) / x.$$

当测量仪器观测整个日盘时, 由于临边昏暗效应的影响, 从日盘中心到边缘, 太阳光谱辐射率的变化必须考虑. 若太阳半径与视线的夹角为 θ , 则太阳光谱辐射率随 θ 角的变化由下式给出^[4]:

$$\frac{I_0(\theta)}{I_0(0)} = 1 - u_2 - v_2 + u_2 \cos \theta + v_2 \cos^2 \theta, \quad (9)$$

其中, $I_0(0)$ 为日盘中心的光谱辐射率, 对给定波段, u_2, v_2 为常数. 如前所述, 对一般近地轨道卫星而言, 日盘视场张角在正切高度点附近对应的尺度约为 20—30 km. 在这一尺度范围内, 大气在水平方向可看成是均匀的. 考虑这一简化后, (2) 式可改写为

$$A_{ob} = \int w \cdot A dh. \quad (10)$$

这里, A 值由 (6) 式给出, 而

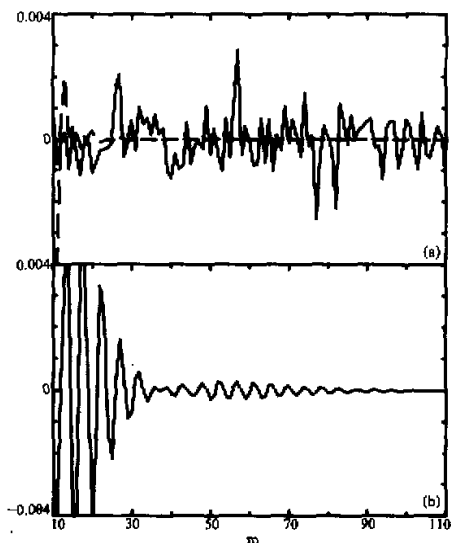


图 2 (a) 全日盘掩日测量时, 测量吸收比曲线的空间频谱特性

虚线为无测量噪声情况, 实线为纯噪声谱

(b) 理想情况掩日测量所得吸收比曲线的空间频谱特性

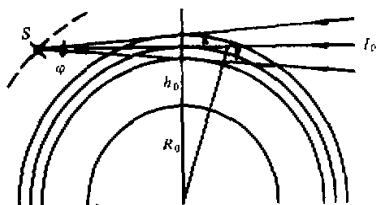


图 1 掩日测量几何学

图中虚线表示卫星轨道, s 表示卫星,
 φ 表示日盘张角

$$w = \frac{\xi}{\pi \cdot \Delta h_0} \left[2 \left(1 - u_2 - v_2 + \frac{2}{3} v_2 \xi^2 \right) + \frac{\pi}{2} u_2 \xi \right] / \left(1 - \frac{u_2}{3} - \frac{v_2}{2} \right), \quad (11)$$

其中

$$\xi = \sqrt{1 - \left(\frac{h - h_0}{\Delta h_0} \right)^2}.$$

Δh_0 为仪器光轴通过日盘边缘和日盘中心时所对应的正切高度值之差。

为了清楚地看出日盘张角对掩日测量的影响,在图 2a 中给出了全日盘掩日测量时,测量吸收比曲线的空间频谱特性。图中纵坐标为频谱振幅的峰值归一化值,横坐标为空间频率 m ,以相对单位表之。在计算中,采用 1976 年美国标准大气模式,层厚取为 0.5km,并假定吸收比的测量噪声为白噪声,其均方根值 $\Delta A_{0b} = 0.01$ 。这里,虚线代表无测量噪声时的测量吸收比情况,实线给出了纯测量噪声的空间频谱特性。为了比较,在图 2b 中给出了由(6)式计算的理想情况掩日测量所得吸收比曲线的空间频谱特性。从图中看出,由于日盘张角的影响,全日盘掩日测量使测量吸收比曲线的高频信息大大削弱,以致在较低空间频率,测量信号谱已被噪声谱所淹没,导致大气臭氧垂直分布精细结构信息的严重丢失。事实上,对较低空间频率,测量吸收比曲线的频谱也被日盘张角特性大大畸变。如果在反演过程中,不仔细考虑这一影响,将导致反演结果的严重失真。

三、反演方法

从前节(11)式可以看出, w 实际上仅为 $h - h_0$ 的函数,这表明在全日盘掩日测量时,测量吸收比可表示为理想情况掩日测量所得大气吸收比与日盘光辐射空间分布特性的卷积,即

$$A_{0b}(h_0) = A(h_0) * w(h_0) + n(h_0), \quad (12)$$

这里, n 代表测量噪声,它表明,从全日盘掩日测量反演中层大气臭氧混合比的垂直分布必须求解二重积分方程。为此,我们分两步进行,首先从 A_{0b} 获得理想情况掩日测量的大气吸收比 A ,然后再由 A 给出中层大气臭氧的混合比轮廓。

当测量信噪比较高时,测量噪声对较低空间频率的影响可以忽略。根据 Fourier 变换理论,此时利用直接退卷积公式

$$F\{A\} = F\{A_{0b}\} / F\{w\} \quad (13)$$

即可较好地恢复其低频特性,这里 $F\{x\}$ 代表 x 的 Fourier 变换。如图 2a 所示,随空间频率的增高, $A * w$ 空间频谱的振幅迅速减小;而噪声谱往往具有白噪声特性,以致在较高空间频率下,测量噪声的影响已不能忽略,甚至完全淹没信号谱,这时直接退卷积方法将无法使用。

在地基大气遥感中,我们^[3]曾提出利用非线性迭代退卷积方法从测量大气吸收谱中去除仪器函数的影响,较好地恢复了原吸收谱的特性。这表明,非线性迭代退卷积方法具有较好地恢复高频信息的能力。对全日盘掩日测量,我们采用了类似的方法。在地基

大气遥感情况下, 它是对光谱扫描, 仪器函数对测量大气吸收比的最大影响位于子谱线中心, 即吸收最大处。与其不同, 掩日测量是对高度扫描, 日盘张角对测量吸收比的影响, 不仅当大气吸收比很小时较小, 而且在近于全吸收处影响也很小。也就是说, 当大气吸收比近于零和 1.0 时, 日盘张角的影响都趋于零。正如 Jansson^[5] 所指出, 弛豫函数的选取是非线性迭代退卷积方法成功的关键, 为了在全日盘掩日测量情况下获得满意的退卷积效果, 采用了以下的弛豫函数形式:

$$\alpha^{(k+1)} = \alpha_0 [A_d^{(k)}]^a [1 - A_d^{(k)}]^b. \quad (14)$$

这里, α_0 为加速因子; a, b 对给定测量波段为常数, 其值在 0.5 — 3.0 之间, 由数值模拟试验确定; $A_d^{(k)}$ 为第 k 次迭代后的大气吸收比值, 非线性迭代退卷积方法指出, 第 $k+1$ 次迭代后的大气吸收比为

$$A_d^{(k+1)} = A_d^{(k)} + \alpha^{(k+1)} [A_{ob} - A_d^{(k)} * w]. \quad (15)$$

若选取 A_d 的初值为测量吸收比, 则由 (14)、(15) 式可以给出第 $k+1$ 次迭代后的大气吸收比值, 它可以看成是理想情况掩日测量所得大气吸收比的近似值, 上式中右边第二项称为修正函数, 在迭代过程中, 考虑到退卷积问题的关键在于恢复测量大气吸收谱中的高频成分, 这里采用修正函数的均方根值 $E^{(k)}$ 作为收敛判据, 当 $E^{(k)}$ 值小于测量误差或给定偏差时迭代结束。

图 3 给出了理想掩日测量所得大气吸收比曲线以及日盘张角的影响, 这里假定测量噪声为白噪声, 其均方根值 $\Delta A_{ob} = 0.01$ 。从图中看出, 与全日盘掩日测量所得大气吸收比曲线相比, 经退卷积处理后的大气吸收比曲线有明显的改善, 它很接近光滑实线所给出的理想情况掩日测量所得的无噪声大气吸收比曲线, 在绝大部分区间内两者的偏差小于测量噪声, 仅在个别区间内略大于测量噪声, 但最大偏差也不超过测量噪声的 3 倍,

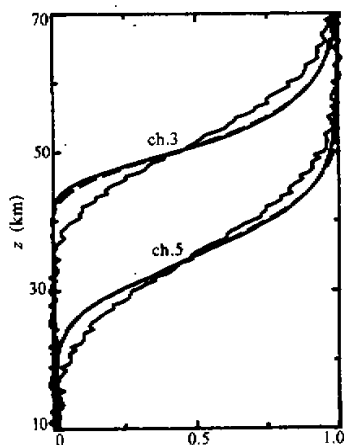


图 3 掩日测量所得大气透射比随高度的变化

图中光滑实线为无噪声理想掩日测量情况, 实线为全日盘掩日测量结果, 虚线为从实线经退卷积后所得曲线。

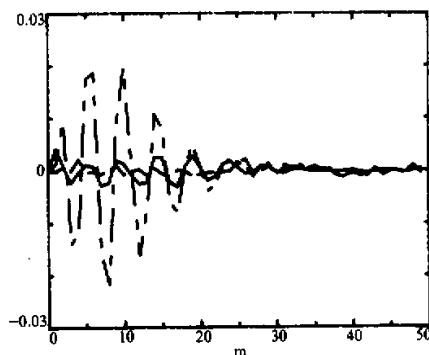


图 4 掩日测量频谱特性比较

点划线和实线分别为全日盘掩日测量的信号谱和经退卷积处理后所得结果与理想掩日测量信号谱特性之差, 虚线为噪声谱

在有效利用的高度区间内最大偏差不大于测量噪声的 1.5 倍, 图 4 给出了频谱空间特性的比较, 所用坐标单位与图 2 相同, 可以看出, 经非线性迭代退卷积处理后, 全日盘掩日测量的大气吸收比曲线的频谱特性有明显改善. 特别对空间频率 $m < 20$ 的区域, 改善更为显著; 在 $m = 20 - 25$ 的区间内, 其频谱特性也有一定程度的改善. 与测量噪声谱相比, 经退卷积处理后的信号谱与理想掩日测量所得吸收比曲线的频谱特性之差仅比它约大 2 倍. 在更高的空间频率上, 退卷积效果较差. 这一方面表明这一方法对高频信息的恢复是有限度的; 另一方面也由于测量噪声较大, 以致在理想掩日测量情况下, 对这些空间频率测量噪声已将信号谱湮没, 也就是说, 即使在理想掩日测量情况下, 也无法获得这些空间频率下大气臭氧垂直分布的精细结构.

在掩日测量中, 为从测量吸收比获取大气臭氧的分布特性, 目前较广泛应用的方法有: 约束矩阵反演方法, Chahine 迭代反演方法和剥皮法. 剥皮法具有计算迅速、不需要任何先验信息的优点, 特别适用于高垂直分辨率的情况. 由于利用非线性迭代退卷积方法, 获得了较好的退卷积大气吸收比曲线, 这里选用剥皮法反演大气臭氧混合比的垂直分布. 具体做法是利用经退卷积处理后的大气吸收比曲线, 从大气高层逐层向下计算, 计算层厚取为 0.5km. 考虑到测量噪声和退卷积误差的影响, 利用单一波段所覆盖的高度范围有限, 为此采用了多波段测量.

四、数值计算结果和讨论

为了判断本文所提方法的可行性以及适用范围, 我们对不同噪声特性和大气臭氧分布特性进行了数值模拟. 所选取的测量波段为 254, 293, 303, 314 和 328nm, 相应的臭氧分子吸收截面分别为 1.15×10^{-17} , 1×10^{-18} , 3×10^{-19} , 6×10^{-20} 和 $1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ [6]. 假定测量噪声为白噪声, 其均方根值 $\Delta A_{06} = 0.01$, 这略大于 SAGE I 的测量噪声 [7].

1. 测量噪声的影响

图 5 给出了不同噪声特性下, 利用本方法反演所得大气臭氧含量的平均值以及均方根偏差. 为了比较起见, 原始大气臭氧分布在图中用虚线给出了. 从图中看出, 反演结果的平均值与原模式分布十分接近. 在 20—66km 高度范围内, 两者的均方根偏差小于 5%, 而绝对误差小于 0.26ppmv. 但在 50km 高度附近的小区域内两者有一小的系统偏差, 这里噪声影响远小于反演平均轮廓与原模式分布的偏差. 这是由于此高度区大气臭氧混合比的垂直分布为一个转折区, 退卷积没能把丢失的高频信息完全恢复的原因所致. 即使如此, 在 20—66km 高度范围内

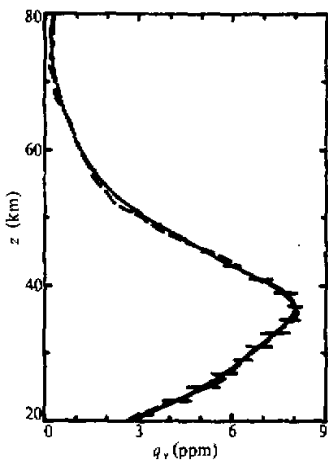


图 5 测量噪声对大气臭氧反演结果的影响
虚线为原模式分布, 实线为反演结果的平均值, 水平横线长度给出了反演结果的均方根误差

的总偏差(随机误差与系统误差之和)的均方根值小于7%, 绝对误差小于0.3ppmv, 最大偏差约为15%, 且仅在51—56km的一个小高度区域内总偏差超过10%。与Cunnold等人^[8]所给图2比较表明, 本方法由测量噪声引起的反演误差和SAGE II所给测量噪声引起的反演误差大体相当。

2. 不同臭氧分布特性的影响

在计算中, 选用了热带大气、中纬夏季和冬季大气、副极带夏季和冬季大气等5种臭氧模式分布^[9], 以及1976年美国标准大气模式的臭氧分布特性。图6给出了计算结果, 可以看出, 在20—66km的高度区间内, 不同臭氧混合比分布特性引起的反演误差的均方根值小于7%, 而其绝对误差小于0.24ppmv。除20km附近的一个小高度区域内相对误差大于10%外, 其余高度的误差均在10%以内, 而且绝大部分高度的误差小于5%, 即使对20km附近高度, 最大误差也不超过15%。它也表明, 不同臭氧分布特性对(14)式中参量 a 、 b 的影响很小, 可以不予考虑。

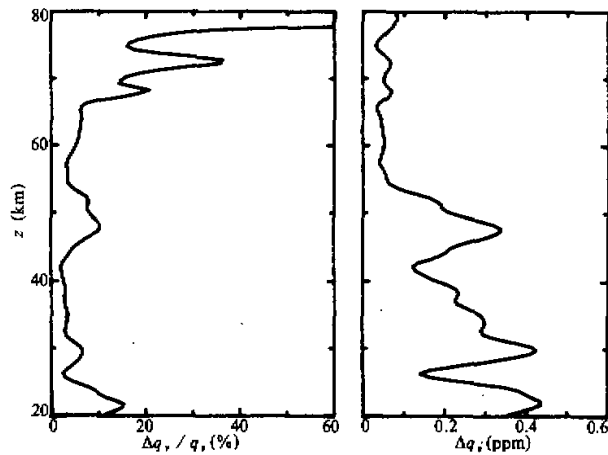


图6 不同臭氧分布模式, 反演误差随高度的变化

左图给出了相对误差, 右图给出了绝对体积混合比误差

应该指出, 云层影响是掩日测量的致命弱点。因此, 对观测日盘上一小区域的理想掩日测量情况, 最低的测量高度约为10km。当全日盘掩日测量时, 若日盘中心相应的正切高度为20km, 其下边缘所对应的正切高度已低到约5km的高度, 此时云层的影响必须考虑。这使得由全日盘掩日测量试图获得20km附近及其以下高度的大气臭氧含量是十分困难的。为此, 对全日盘掩日测量最有意义的测量高度范围是25—65km的中层大气。

五、结 论

综上所述, 在全日盘掩日测量中, 日盘光辐射空间分布特性是重要的先验信息来源。

非线性迭代退卷积方法对从全日盘掩日测量反演中层大气臭氧含量是非常有用的, 利用本文建议的反演方法可以从全日盘掩日测量满意地给出 25—65km 高度范围内大气臭氧的垂直分布特性。当测量吸收比的均方根噪声为 0.01 时, 反演的均方根误差小于 10%, 这与理想掩日测量的精度相近。

本方法的主要优点是较充分地利用了测量信息, 从而可大大简化探测系统, 并降低对遥感平台的要求。

参 考 文 献

- [1] May, R. B., 1971, A method of determining the density of thermospheric gases from measurements of solar UV light absorption at grazing-ray and near-vertical incidence, *Planet. Space Sci.*, **19**, 27—37.
- [2] Roble, R.C. and Hay, P. B., 1972, A technique for recovering the vertical number density profile of atmospheric gases from planetary occultation data, *Planet. Space Sci.*, **20**, 1727—1744.
- [3] 王英德, 徐寄遥, 1990, 提高地对空大气红外遥感能力的新方法, *科学通报*, **35**, 1880—1883.
- [4] Allen, C. W., 1973, *Astrophysical Quantities*, 3rd Edition, Athlone Press, 169—173.
- [5] Jansson, P. A., ed., 1984, *Deconvolution; with Application in Spectroscopy*, Academic Press, New York, 93—225.
- [6] Nicolet, M., 1981, The solar spectral irradiance and its action in the atmospheric photodissociation processes, *Planet. Space Sci.*, **29**, 951—974.
- [7] Chu, W. P. and McCormick, M. P., 1979, Inversion of stratospheric aerosol and gaseous constituents from solar extinction data in the 0.38—1.0 μ m wavelength region, *Appl. Optics*, **18**, 1404—1413.
- [8] Cunnold, D. M., Chu, W. P., Barnes, R. A., McCormick, M. P. and Veiga, R. E., 1989, Validation of SAGE II ozone measurements, *J. Geophys. Res.*, **94**, 8447—8460.
- [9] Anderson, G. P., Clough, S. A., Kneizys, F. X., Chetwynd, J. H. and Shettle, E. P., 1986, AFGL atmospheric constituent profiles (0—120km), AD /A-175173, 4—14.

Full-Disk Solar Occultation Measurements of Ozone Profiles in the Middle Atmosphere

Wang Yingjian Xu Jiyao

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

In this paper, the effect of solar angular diameter on solar occultation measurements is discussed. A prior information on the spatial variation characteristics of UV radiation in solar disk is introduced. A new method of retrieving ozone concentration in the middle atmosphere from full-disk solar occultation measurements is developed. The results of numerical experiments show that this method can obtain a satisfactory profile of the atmospheric ozone in the layer of 25—65 km. The inversion error of ozone concentration is less than 10% if the RMS noise of the measured absorptance is equal to 0.01. Using this method, the detecting instrument can be simplified greatly and the requirements for remote sensing platform can also be loosen obviously.

Key words: Solar occultation measurements, Inversion method, Atmospheric remote sensing, Middle atmosphere, Atmospheric ozone.