第21卷 第2期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.2
2001 年 4 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 2001

无线电掩星和激光雷达观测结果比较

曾 桢 胡 雄 张训械
(中国科学院武汉物理与数学研究所 430071)
Makoto Abo
(日本东京都市大学电子工程研究院)

摘 要

简要阐述了激光雷达和 GPS 掩星探测大气的基本原理，并利用 1996 年 10 月 14 日 1625 UT 时日本 TMU 钠和瑞利散射激光雷达 (139.23°E、35.37°N) 资料，反演得到 30—55 km 高度范围内大气密度和温度的观测结果，与此同时通过激光雷达上空的 GPS 掩星观测到的掩星切点处的观测结果进行了比较. 结果表明：两种方法获得测出的密度廓线符合得很好；温度廓线的变化趋势也基本一致，但在某些高度上有较大的偏离. 文中最后对比较结果作了简要分析，讨论了重力波对大气密度和温度廓线的影响.

关键词 GPS/MET —激光雷达—掩星观测

1 引 言

中层大气是在大气平流层到热层的过渡区，其间充满着各种复杂的光化学及动力学相互作用，是大气中很活跃的区域. 但中层大气处于各种手段均难以探测的高度范围，因而成为迄今人们了解较少的大气层. 不过，近年由于探测技术发展，人们研究中层大气的仪器日趋丰富，譬如： VHF 雷达、中频雷达、相干散射雷达、瑞利散射激光雷达、掩星技术等，它们将把中层大气的研究工作推向一个新的阶段.

瑞利散射激光雷达出现于 20 世纪 60 年代，现已成为探测中层大气的有效手段之一. 它具有高空间分辨率，能定位探测，数据直观，快速，实时等优点. 本文所用的雷达数据来自东京大学的 TMU 钠雷达 1996 年 10 月 14 日获得的观测数据 —— 光子数，雷达站位于东经 139.23°，北纬 35.37°，数据所覆盖的高度范围为 0—110 km，其垂直分辨率为 100 m.

另一方面，自从 1995 年以来，人们开始用无线电掩星技术探测中层大气和电离层. 尽管这只是一项新的技术，但已在空间探测方面显示出了巨大的应用潜力. 它提供全天候的全球观测，具有垂直分辨率高、准确、稳定性好和探测参量多等特点. 许多先前的文章已将 GPS 掩星技术与其他众多探测手段进行了对比 [1,2]，发现由掩星技术所获得的大气数据参量与其他手段得到的数据相当一致. 可是，由于气象探空仪一般只能探测到 30 km 以下的高度范围，对 30 km 以上的比较还是较少的. 本文试图利用 Rayleigh 和钠激光雷达观测结果与掩星的比较，研究 30 km 以上的掩星资料.

为了进一步讨论多种技术探测中层大气的问题，本文对用瑞利散射激光雷达和掩星技术探测中层大气密度和温度廓线作了比较，并对其结果进行简要的阐述.

2000-06-21 收到原稿， 2001-02-25 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

2 瑞利散射激光雷达测量

瑞利和钠雷达一般由发射机、接收机和数据采样部分构成. 根据散射源的不同, 雷达回波信号通常分为三类: 25 km 以下主要是大分子和气溶胶引起的散射, 即 Mie 散射; 钠层 (80 km) 以上, 近似视为受激钠原子引起的散射; 在 25 km 和钠层之间的高度范围内, 散射信号为分子散射, 信号强度与大气密度成正比. Rayleigh 激光雷达正是设计用于测量分子散射信号, 从而推断出大气的密度和温度信息. 本文也着眼于该区域的讨论.

Gardner[3] 已详细的讨论了激光雷达方程, 对如何由雷达数据反演出大气密度和温度给出了详尽的说明, 并做了误差分析. 此处, 只对此作简要的阐述, 特别是讨论为提高结果精确度而对数据作的有关处理.

由于散射光子数与绝对大气密度成正比, 可由测得的瑞利散射光子数来推断绝对大气密度. 但这需涉及到许多雷达参数及大气参数的定标与计算, 因此通常将散射光子数进行归一化处理, 以求出相对大气密度. 具体计算公式如下 [3]:

$$\frac{\rho_{\mathrm{a}}(z)}{\rho_{\mathrm{a}}(z_{\mathrm{R}})}=\frac{z^2[N_{\mathrm{R}}(z)-N_{\mathrm{B}}]}{z_{\mathrm{R}}^2[N_{\mathrm{R}}(z_{\mathrm{R}})-N_{\mathrm{B}}]}, \tag{1}$$

其中 z_{R} 为归一化高度, 即设 $\rho_{\mathrm{a}}(z_{\mathrm{R}})=1$. z_{R} 通常选在 30—35 km, 那里大气气溶胶很少. $N_{\mathrm{R}}(z_{\mathrm{R}})$ 为归一化高度 z_{R} 上的光子数, N_{B} 为背景噪声引起的光子数的估计值, 由于钠层以上钠的密度 (通常取 150—200 km 高度范围) 接近于零, 由钠原子散射信号非常弱, 回波信号实际上是噪声. 因此, 通常可用钠层以上的平均光子数来代替背景噪声光子数 N_{B}. $N_{\mathrm{R}}(z)$ 为 z 高度上的光子数.

由后向散射信号所推出的大气密度的精确度与接收的光子数有关. 假设背景噪声可忽略, 若用符号 std[ ] 表示标准偏差, 则相对大气密度的相对误差 [3] 可表示为

$$\frac{\mathrm{std}[\rho_{\mathrm{a}}(z)]}{\rho_{\mathrm{a}}(z)}\approx\frac{1}{\sqrt{N_{\mathrm{R}}(z)}}, \tag{2}$$

值得一提的是, 密度误差与光子数的平方根成反比. 已知光子数近似为高度的递减函数, 因此相对密度误差随高度的增加而增加.

利用静力平衡方程和理想大气状态方程, 给定上边界温度, 对密度廓线由上至下积分, 求得大气温度

$$T(z)=\frac{T(z_1)\rho_{\mathrm{a}}(z_1)}{\rho_{\mathrm{a}}(z)}+\frac{M}{R}\int_z^{z_1}\frac{g(r)\rho_{\mathrm{a}}(r)}{\rho_{\mathrm{a}}(z)}\mathrm{d}r. \tag{3}$$

其中 $T(z)$ 是大气温度廓线, $\rho_{\mathrm{a}}(r)$ 为大气密度, z_1 是上边界高度, $T(z_1)$ 为由其他方式获得的在 z_1 高度上的温度, $M=28.964\,\mathrm{kg/kmol}$, 为平均大气分子量, R 为宇宙气体常数, 为 8 314 J/K·kmol. 这种计算方法的精确度与光子数 $N_{\mathrm{R}}(z)$ 和温度上界的估值 $T(z_1)$ 的精确性有关.

激光雷达数据的质量与许多因素有关, 包括背景噪声的估计, 激光器发射功率的波动, 天气情况等. 这些都可能引起回波信号的变化. 因此, 必须对这些因素进行合适的处理, 以便可以根据测得的光子数正确的反演出密度和温度.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

为了减小光子数不合理波动所造成的影响，对原始数据作了 1 km 的平滑，再由公式 (1) 和 (3) 反演出相对密度和温度．而且对 40 km 以上反演出的温度数据进行了统计优化处理，其中采用的模式是 MSISE 模式．Hocke[4] 介绍了统计优化方法并将其应用于掩星观测反演的温度资料的优化处理上．

本文的激光雷达数据来自日本东京都市大学 (Tokyo Metropolitan University, TMU)，雷达站位于北纬 35.37° 、东经 139.23° 的瑞利激光雷达．观测数据为回波光子数，垂直分辨率为 100 m．该雷达的主要参数指标如下：

发射机 (Transmitter)

激光类型 (laser type)	Nd: YAG SHG pumped Dye
波长 (wavelength)	589 nm
脉冲能量 (pulse energy)	65 mJ/pulse
脉冲率 (pulse rate)	$10^{-12}s^{-1}$
脉冲宽度 (pulse width)	6 ns
波束宽度 (beam divergence)	0.2 mrad

接收机 (Receiver)

镜头直径 (telescope diameter)	60 cm
视场 (field of view)	0.7 mrad
带宽 (optical bandwidth)	3.5 nm

3　GPS/MET 掩星观测

GPS/MET 数据是由掩星技术获得的．在低轨小卫星 (LEO) 上安放一个 GPS 接收机，进行地球临边观测．当电波经过地球电离层或大气层时，由于大气的作用 (传播介质折射率的变化)，电波路径会发生弯曲和相位延迟 (见图 1)．

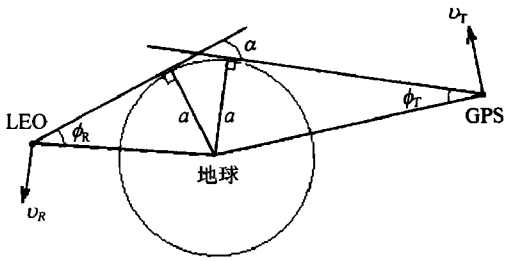


图 1　掩星示意图

Fig.1　Occultation schematic diagram

在掩星技术中，随着电波路径的升降变化，大气的作用可用函数 $\alpha(a)$ 表示，其中 α 为弯曲角，a 是碰撞高度．在频率和卫星轨迹已知的情况下，可由电磁波的多普勒频移计算弯曲角，进而反演出折射指数的垂直分布廓线，再而推出其他的大气参数，如：密度，

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

温度，大气压等.

本文所用的掩星数据是由 UCAR 提供的. 选取的是 1996 年 10 月 14 日 1625 UT 时在东经 136.89°, 北纬 36.42° 的一组大气掩星数据，包括经纬度，高度，密度，干温度，大气压，弯曲角. 高度范围为 4.6—60 km, 垂直分辨率为 200 m. 为了与激光雷达数据进行比较， GPS 的绝对密度数据被转化为相对密度数据，其归一化高度与雷达数据的归一化高度一致.

4 比较结果

激光雷达观测和掩星观测是在同一时刻获得的. 图 2 给出 GPS 掩星观测切点和雷达观测站的相对地理位置. 其中，菱形所示为 TMU 激光雷达的站址，实线表示掩星切点轨迹经过日本上空的位置. 由于 GPS 和 LEO 的运动，掩星切点的高度变化的同时，切点的经纬度也会发生变化，因此，掩星切点的轨迹在地图坐标平面上表现为一条轨迹线. 与切点高度 30—55 km 相对应的切点经纬度是从 36.54°N, 139.31°E 到 36.64°N, 139.63°E. 激光雷达则位于 35.37°N, 139.23°E. 两组观测数据在地理位置上非常接近，因此可以利用它对两种观测手段进行对比. 为了减小误差，本文只对 30—55 km 高度范围的数据进行分析.

在图 3 中，绘出相对密度的比较结果. 横坐标表示相对密度值，纵坐标为高度，以 km 为单位. 图中实线为雷达数据，虚线为掩星数据，点划线为 MSIS 模式数据. 三条曲线基本重合，随高度均近似成指数变化，归一化高度在 35 km. 图中的短横线标出雷达数据的相对误差限，可见，雷达密度数据是比较可靠的，其相对误差仅为 1%—2%. 掩星数据基本处于雷达数据的误差限内，两者平均误差为 2.96%, 标准偏差为 8.73%. 在 40 km 以上，雷达的密度数据呈现出较小的扰动变化，可能是大气波动的作用.

图 4 显示了温度廓线的比较结果. 其中点划线为 MSIS 模式值. 温度廓线近似为抛物线，最大值在平流层附近，与先验知识相符. 模式值与观测值之间存在较明显的偏差，这可能是模式反映的是大气长期统计的平均状态. 雷达数据较掩星数据显示温度变化的一

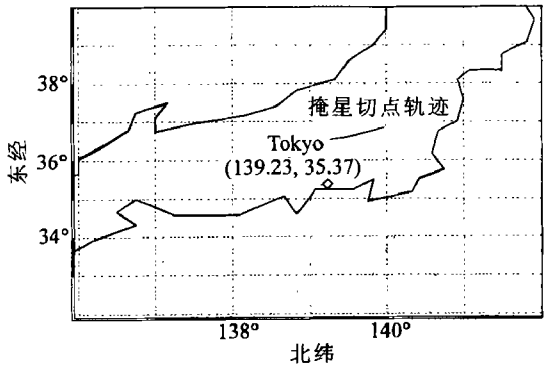


图 2 掩星和激光雷达观测位置比较示意图，横坐标和纵坐标分别表示东经和北纬

Fig.2 Comparison of the observed location between the occultation and the lidar. The abscissa and ordinate are separately denoted east longitude and north latitude

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

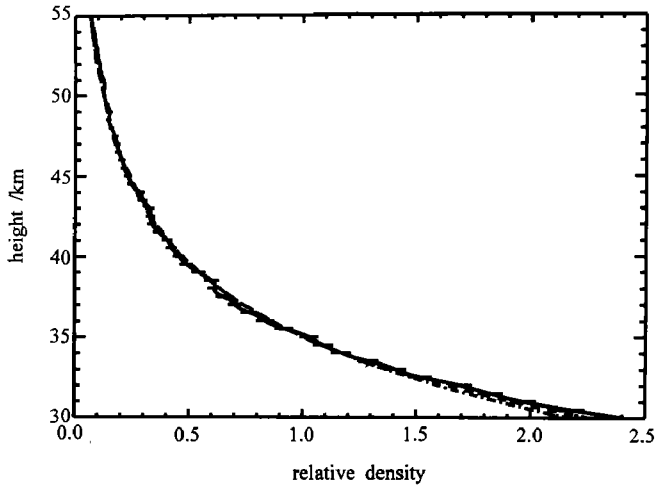


图 3　雷达 (实线) 和掩星 (虚线) 观测获得的相对密度比较 (MSIS 模式数据用点划线表示)

Fig.3　Comparison of relative density profile measurements between the Rayleigh lidar (solid) and the occultation data (dashed). MSIS data marked by dot-dashed line

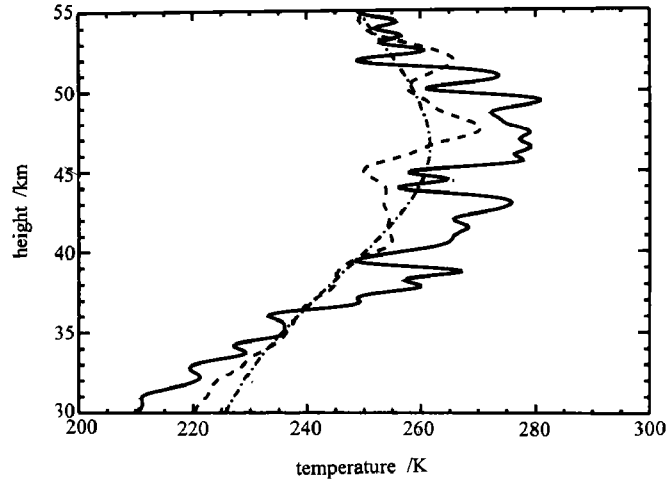


图 4　温度廓线比较. 雷达数据 (实线); 掩星数据 (虚线);MSIS 模式数据 (点划线)

Fig.4　Comparison of temperature profiles measurements: lidar(solid line); occultation (dashed line); MSIS (dot-dashed line)

些细节, 因为激光雷达的水平分辨率很高, 文中采用的雷达温度数据的垂直分辨率为 1 km, 掩星观测数据在 20 km 以上, 其垂直分辨率通常为 1.5 km, 水平分辨率为 280 km. 两温度廓线的平均误差为 0.53 K, 标准误差为 8.44 K. 图中所示的雷达温度数据在 35 km 以下表现出垂直波长为 2 km 的波动. 图中掩星观测数据在平流层 (30—40 km), 呈现出垂直波长为 4 km 左右的波动. 这些重力波可能是造成激光雷达观测和掩星观测存在误差的原因之一. 在利用掩星技术反演大气参数时, 作了大气均匀分层和球对称的模式假设, 当出现大气波动时, 这些假设是不能完全满足的, 掩星观测得到的数据势必存在一定的误差, 至于

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

误差的程度有待进一步理论和模拟上的探讨.

5 结 论

目前, 人们对中性大气的掩星观测资料曾进行过许多比较, 他们将掩星资料与气象探空仪以及各种气象预报模式进行比较, 得到了很好的结果 [5]. 但是, 由于气象探空仪通常只能得到 30 km 以下的气象场资料, 而进行 30 km 以上的比较还比较困难. 其次, 我们也注意到目前掩星观测资料与激光的比较也是非常少的, 主要是难以找到两者同时观测结果. 加之, 激光只能在夜间观测, 所以两者的比较就更加困难了. 我们很幸运得到一组同时近地的激光观测和掩星观测结果, 非常适合于作 30 km 以上的比较. 从这些资料对比中, 我们可以得到以下几点初步结论:

1. 两种探测技术得到的密度分布是非常一致的, 结果证实了掩星反演得到的 30—50 km 高度范围的大气密度剖面是可靠的.

2. 从掩星观测得到的温度剖面与激光观测的基本上是一致的. 激光观测的温度剖面给出较多的波动特性, 这可能是由于激光是一个局地的垂直探测设备, 有较高的垂直分辨率, 它给出比较丰富的大气波动过程. 掩星是一种天基观测, 电波射线穿过比较大的水平范围, 它的测量量是一个路径积分的结果, 一些大气波动过程可能被平滑掉了, 它给出的是某一个水平范围内的温度平均值. 因此比较的结果是合理的.

3. 我们也注意到, 模式给出的温度剖面与上述两种探测得到的结果有较大的偏差, 特别是在 40 km 附近, 偏离达 18°C. 这是因为模式给出的是气候变换的剖面, 偏离是可能存在的.

4. 重力波的存在降低了掩星观测的精度, 对在球对称假设和大气均匀分层假设下提出的反演公式提出质疑. 希望能够从反演方法的角度和层析技术方面对这一问题进行研究.

致谢 我们非常感谢 UCAR 提供的 GPS/MET 观测资料.

参 考 文 献

[1] Kursinski E R. Initial results of radio occultation observations of earth's atmosphere using the Global Positioning System. *Science*, 1996, **271**:1 107—1 110

[2] Rocken C *et al.* Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:29 849—29 866

[3] Gardner C S *et al.* Rayleigh and sodium lidar techniques for measuring middle atmosphere density, temperature and wind perturbations and their spectra. World Ionosphere/Thermosphere Study Handbook, 1989, **2**:148

[4] Hocke K. Inversion of GPS meteorology data. *Ann. Geophys.*, 1997, **15**:443—450

[5] Kursinski E R *et al.* Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:23 429—23 465

[6] 张训械, 胡雄, 曾文. 利用 GPS 信号探测中性大气和电离层参量. 电波科学学报, 1997, **14**:59—63

[7] Steiner K A *et al.* Inversion, error analysis, and validation of GPS/MET occultation data. *Ann. Geophys.*, 1997, **17**:122—138

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

[8] Kuo Y-H *et al.* Assimilation of GPS radio occultation data for numerical weather prediction. *Terr. Atmos. Ocean Sci.*, 2000, 11(1):157—186

COMPARISON OF DENSITY AND TEMPERATURE PROFILE OBSERVED BY LIDAR AND OCCULTATION TECHNIQUE

ZENG Zhen HU Xiong ZHANG Xunjie

(*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences*, 430071)

Makoto Abo

(*Graduate School of Electrical Engineering, Tokyo Metropolitan University, Japan*)

Abstract

Comparisons of profiles of the atmospheric density and the temperature at heights from 30—55 km measured by a Rayleigh with Na lidar and occultation technique have been made preliminarily. The lidar situated in Hochioji Tokyo (35.37°N, 139.23°E) operated routinely, and the data of occultation are available at almost the same place and at the same time (Oct.14, 1996), which allow to do comparisons of these results obtained by different techniques. The limits of these two techniques are discussed respectively. Results illustrate a good agreement in density profiles and temperature profiles.

Key words GPS/MET, Lidar, Occultation

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com