

武汉上空对流层与平流层大气密度 和温度探测的初步结果^{*}

陈 皓 易 帆

(武汉大学电子信息学院电子工程系 武汉 430079)

摘 要

利用武汉大学 Rayleigh/钠荧光散射激光雷达和无线电探空仪进行联合探测的数据,反演出武汉地区上空 (30.5°N, 114.4°W) 0—65 km 处的密度和温度分布曲线,并简单阐述了激光雷达的工作原理.将测量结果和 MSISE-90 参考大气模式比较,二者结果基本符合,温度廓线在中层顶附近和模式的差别约为 3 K.同时利用激光雷达探测到了中层大气中的重力波活动.

关键词 激光雷达; 无线电探空仪; 平流层大气

1 引言

从地面到中间层顶的大气状态对于气象预报,航空航天与军事活动都是至关重要的,大气的温度和密度对大气中的光化学和动力学的相互作用起着关键作用.为研究中层大气的特性,人们采用了各种探测手段:火箭, VHF 雷达, MF 雷达,无线电探空仪, Rayleigh 散射激光雷达,以及近来发展迅速的掩星技术等^{[1],[2]},这些都为大气研究提供了有力的工具.然而,利用单一的探测技术无法完成这个相当宽的高度范围的大气状态参量测量,因此,人们必须采用多种探测手段综合得出这一区域的大气结构^{[1]-[3]}.

在国内,虽然已有利用激光雷达探测中层大气密度和温度的报道^{[3],[4]},但都仅限于 30 km 以上的范围.为测量武汉地区的中层大气状态,武汉大学激光雷达实验室采用激光雷达和无线电探空仪进行联合观测,获得了从地面到 65 km 高度的大气密度和温度的剖面图.

借助气球携带的无线电探空仪是获得 25 km 以下区域内大气状态的一种方便实用的探测手段,利用它可以探测大气的温度、密度、气压、湿度等参数.25 km 以上大气的温度和密度则利用 Rayleigh 散射激光雷达测量获得.激光雷达现已成为探测中层大气特性的有效工具之一^[4],它的特点是具有高的空间和时间分辨率,这对研究大气的动力学过程(例如中小尺度的波动过程)具有重要意义.武汉大学的 Rayleigh/钠荧光散射激光雷达的时间分辨率为 5 min,空间分辨率为 96 m,除了探测 90—110 km 处钠层的数密度外,还可以探测 25—65 km 大气的密度和温度.

^{*} 国家自然科学基金项目 (40174044) 资助

2003-01-26 收到原稿, 2003-05-06 收到修定稿

本文将介绍无线电探空仪和武汉大学 Rayleigh/钠荧光散射激光雷达的基本结构和利用激光雷达进行密度和温度反演的原理, 给出利用探空气球和激光雷达联合探测的武汉地区地面到 65 km 高度处的温度和密度分布, 并将结果与 MSISE-90 大气模式相比较, 对二者结果差异的原因进行探讨, 初步分析武汉地区的大气结构特征.

2 探测仪器的基本描述

2.1 无线电探空仪

无线电探空仪借助探空气球携带升空, 是测量对流层和平流层气象资料的主要仪器. 它由感应器, 转换器和发射装置三个部分组成. 感应器感应大气温度、气压、湿度等参数, 转换开关轮流将感应元件依次接入变换器, 将气象信息变换成电信号. 探空仪的变换器采用电码式, 发射装置是一个高频或超高频发射机, 以载波方式将气象信息发到地面. 利用无线电探空仪可以获取 25—30 km 以下的温度、密度、压强、湿度、风速等气象参数. 它的特点是仪器整体体积小、重量轻、牢固可靠, 能经受风云雨雪和高空强辐射. 本文中使用的无线电探空仪释放的位置是位于和武汉大学激光雷达相距 20 km 的武汉气象台, 每日早、晚 8 时各释放一个探测气球, 获取气象参数, 它的探测高度一般为 25—27 km.

2.2 Rayleigh/钠荧光散射激光雷达

Rayleigh/钠荧光散射激光雷达系统主要分为 4 个部分, 激光发射部分, 光学接收部分, 光电检测部分和数据采集部分, 具体结构文献 [5] 中已经有详细的描述. 这里仅列出主要的参数指标.

武汉大学 Rayleigh/钠荧光散射激光雷达的主要参数指标:

激光类型 (laser type)	ND:YAG 抽运染料激光器
激光波长 (wavelength)	589 nm
脉冲能量 (pulse energy)	80 mJ
脉冲频率 (pulse rate)	20 Hz
望远镜直径 (telescope diameter)	100 cm
望远镜视场 (field of view)	1.5 mrad
干涉滤光片带宽 (bandwidth of filter)	1.0 nm

图 1 为利用激光雷达收集到的原始光子回波曲线, 其中 25 km 以下是大气中大分子和气溶胶引起的 Mie 散射部分, 85—110 km 隆起的部分是钠荧光共振散射部分, 25—70 km 处是 Rayleigh 散射回波的部分, 120 km 以上可视为背景噪声.

我们在原始光子回波采集的时候特别注意了防止由低空强回波信号引起光电倍增管的饱和. 因为光电倍增管的饱和会引起信号诱导噪声 (Signal Induced Noise) 和非线性饱和效应 (Nonlinear Saturation Effect)^[6], 严重影响回波光子数的准确性. 调整激光光束进入望远镜视场的高度或是在后置光路中加一机械斩光盘 (Chopper), 可以去除低空的强回波以消除信号诱导噪声, 图 1 中显示的是去除了低空强回波信号的光子计数. 对非线性饱和效应, 我们则通过测量光电倍增管的最大计数率进行了校正^[6].

3 激光雷达探测密度温度的原理

利用激光雷达的数据来反演大气的密度和温度, Gardner 和 Hauchecorne 等已经做了详细的分析^{[7],[8]}, 这里只做简要的阐述.

首先利用光子回波数反演出大气密度, 由雷达方程, 在高度 z 和 $z + \Delta z$ 内大气密度为

$$\rho_a(z) = \frac{z^2 \rho_a(z_R)}{z_R^2} \frac{(N(z) - N_B)}{(N_R(z_R) - N_B)}, \quad (1)$$

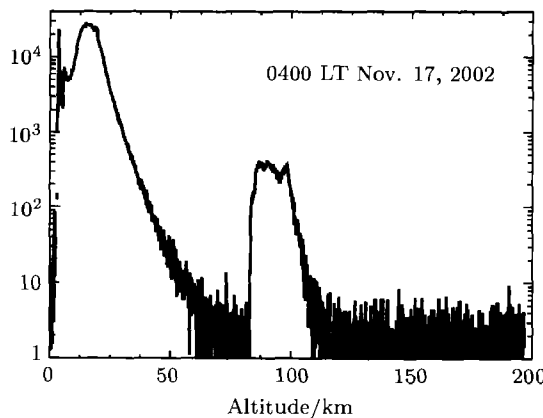


图 1 原始光子数回波曲线

Fig.1 A photon count profile of 0040, Nov. 17, 2002

其中, z_R 是归一化高度, 一般取为 30 km, $\rho_a(z_R)$ 是归一化高度上的大气密度, 它的值一般取自参考大气模式, 本文取无线电探空仪在武汉地区的测量值, 更能代表武汉地区的大气特性. $N(z)$ 是在高度 z 上的回波光子数, $N_R(z_R)$ 是在归一化高度上的回波光子数, N_B 为背景噪声引起的光子数. (1) 式表明, 中层大气的密度廓线的绝对值可以从探测高度处和参考高度处的激光雷达回波信号之比求得.

由此公式推出的大气密度的精确度与接收的光子数的统计起伏有关, 在背景噪声可以忽略的条件下, 反演所得大气密度的标准偏差可表示为^[7]

$$\frac{\text{std}[\rho_a(z)]}{\rho_a(z)} = \frac{1}{\sqrt{N_R(z)}}, \quad (2)$$

即相对大气密度 $\rho(z)$ 的标准偏差与光子数的平方根成反比, 而由激光雷达方程可知, 在 z 高度上收集的光子数与激光器的发射功率, 接收望远镜的面积, 接收门宽, 光子数积累时间成正比. 所以, 高激光雷达的因子, 大门宽范围和长积累时间都能使相对密度误差减小, 提高数据反演的准确性.

再根据反演所得大气相对密度得到反演大气的温度廓线.

温度的反演是基于两个假设: 假定中层大气处于静力学平衡状态, 并符合理想气体定律; 假定大气中各组分的比例是恒定的. 根据其密度即可计算大气的温度.

利用理想气体定律

$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

和静力学方程

$$dp = -\rho g dz,$$

给定上边界的温度, 对密度廓线由上至下积分, 即可求得大气温度

$$T(z) = \frac{T(z_1)\rho_a(z_1)}{\rho_a(z)} + \frac{M}{R} \int_z^{z_1} \frac{g(r)\rho_a(r)}{\rho_a(z)} dr. \quad (3)$$

其中, z_1 是上边界高度, $T(z_1)$ 是其他方式获得的在 z_1 高度上的温度, 作为积分的起始高度, 取自参考大气模式; M 为大气平均分子量, 取 $M = 28.964 \text{ kg/kmol}$, R 为普适气体常数, 取 $R = 8314 \text{ J/K}\cdot\text{kmol}$.

4 结果和初步讨论

由于受背景噪声的限制, 激光雷达只能在夜间工作, 而且对天气条件也有较高要求, 只有晴朗无云的夜晚才能进行观测实验. 激光雷达的探测高度, 和激光雷达的配置有关. 激光雷达的配置主要指发射激光器的功率 (P) 和接收望远镜的直径 (A) 两者的乘积 (激光雷达质量因子 PA). 激光雷达的探测高度和激光雷达质量因子成正比, 普通 Rayleigh 散射激光雷达的望远镜直径多在 $0.6\text{—}1.0 \text{ m}$ 激光功率多在 $3\text{—}10 \text{ W}$ 范围, 质量因子约为 $2\text{—}10$, 最大探测高度约为 $70\text{—}80 \text{ km}$. 本文中所用的是钠荧光共振激光雷达的 Rayleigh 散射部分, 雷达因子约为 1.6 , 所对应的探测高度约为 65 km . 改变激光雷达的配置, 如增大激光器的发射功率, 使用大口径的望远镜, 以及短的工作波长等, 都可以提高激光雷达的探测高度.

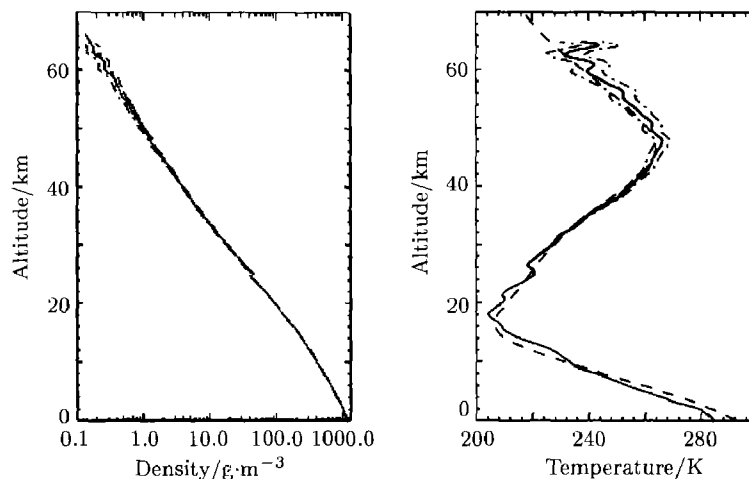


图2 利用激光雷达和探空气球联合测量得到的武汉地区 $0\text{—}65 \text{ km}$ 密度和温度廓线
(2002 年 11 月 17 日, 虚线表示参考大气模式, 点划线表示标准偏差)

Fig.2 Density and temperature profiles over wuhan from ground to 65 km by lidar and radiosonde
(Nov. 17, 2002, dash line means standard error and dot line means MSISE-90 atmosphere model)

对积累一定时间的光子数剖面进行反演, 可以得到一个温度和密度的廓线图, 不同时间反演得到的密度温度值作平均, 就是整个夜晚平均值的剖面图, 如图 2 所示. 图中 $0\text{—}25 \text{ km}$ 高度的温度和密度数据是通过探空气球观测得到, $25\text{—}65 \text{ km}$ 是武汉大学激光雷达观测的数据反演而得. 从图中可以看出, 二者测得温度和密度在 25 km 左右连接得很好. 除了温度密度廓线外, 为便于比较, 还给出了参考大气模式 MSISE-90 的密度温度廓线 (图中的点划线所示), 结果表明, 利用激光雷达反演的密度廓线和模式值符合得很好,

与温度廓线和模式值相比, 整个廓线的变化和模式保持一致, 但在某些高度上存在一定的差异, 如在对流层顶和平流层顶的温度和模式值相差较大; 在 40 km 以上波动现象比较明显.

图 3 是利用激光雷达和无线电探空仪联合探测的结果 (从 2002 年 8 月—2002 年 12 月), 从图中可以看出, 大部分的观测结果都显示, 对流层顶的温度要比模式的值低, 而在平流层顶附近, 观测值要高于模式值 2—3 K, 这个探测结果与探测仪器的测量误差有关, 因为在实际的观测过程中, 采集到的激光雷达的原始数据会受到下面因素的影响: 背景噪声的起伏, 激光的功率变化, 激光频率的漂移, 以及大气传输透射率的变化. 虽然经过信

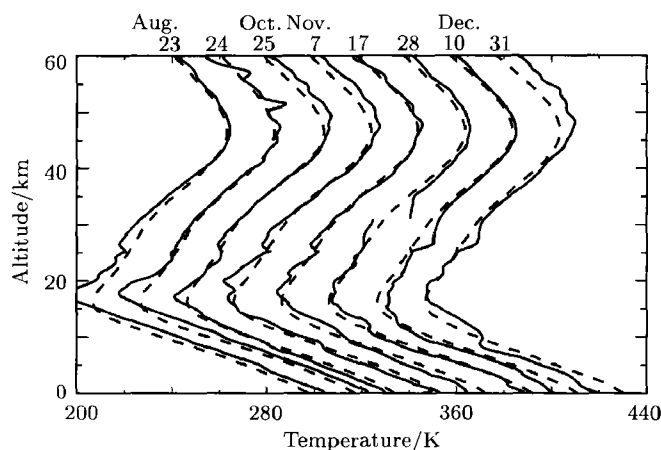


图 3 从 2002 年 8 月到 2002 年 12 月激光雷达和无线电探空仪联合探测温度的结果 (除第一个温度剖面外, 其他剖面在横坐标方向依次有 20 K 的平移, 虚线表示参考大气模式)

Fig.3 Temperature profiles by lidar and radiosonde from August to December 2002
(Profiles excepted for the first one are shifted by 20 K each on the temperature scale and dash lines are MSISE-90 model)

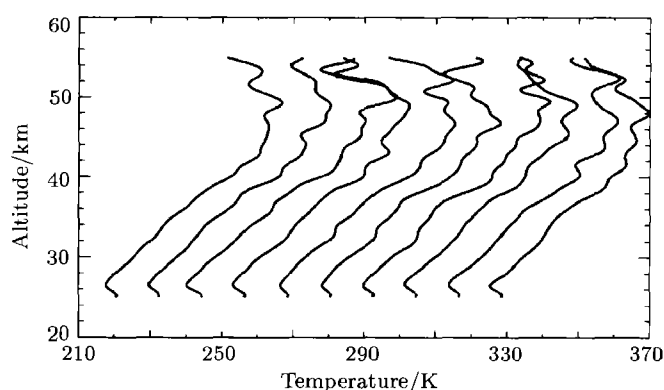


图 4 2002 年 10 月 25 日温度剖面随时间的变化 (每 30 min 一个剖面)

(除第一个温度剖面外, 其他剖面在横坐标方向依次有 12 K 的平移)

Fig.4 Temperature changes of whole night (Oct. 25, 2002 with interval of 30 min)
(Profiles excepted for the first one are shifted by 12 K each on the temperature scale)

号归一化处理,但这些因素仍会导致温度反演曲线和模式值的少量差异.同时,这也反映了高时间分辨率条件下测量的大气参数与参考大气模式的某些差异,因为大气模式所描述的是某个地区的背景大气参数,不能体现中小尺度的波动的影响,而激光雷达的高时间分辨率特性则能探测到包括重力波在内的中小尺度波动对温度引起的扰动.当然也不排除武汉上空确实存在这样的温度分布^[9],这一结果还需要在今后通过大量的观测结果来验证.平流层顶的位置在 43—47 km,并且随季节变化,冬季位置要比夏季高,这个结果与大气的模式相符.

激光雷达的一个重要特性就是具有很高的时间和空间分辨率,武汉大学激光雷达的时间分辨率是 5 min,空间分辨率是 96 m,这对于研究大气动力学特征,如重力波的活动等都非常重要^{[8],[11]}.图 4 是从 2002 年 10 月 25 日 0000—0500,每半小时的温度廓线.从图中可以看到,在 35—45 km,温度的扰动随时间有向下运动的趋势,在 0100—0300 比较明显,这种扰动向下运动的趋势对应这能量向上的传播,是重力波的特性之一^{[7],[10]}.进一步可以测得重力波的具体参数,如垂直波长,垂直波速,垂直波数谱等^[6].

5 结论

(1) 武汉大学的 Rayleigh/钠荧光激光雷达和无线电探空仪的联合探测可以得到从地面到 65 km 的大气的密度温度数值.与参考大气模式比较,二者基本符合,但也存在一定的差异,这种差异与探测仪器的误差有关,也与武汉地区本身的大气特征有关,反映了中层大气中的波动特征对温度的扰动.

(2) 由光子计数导致的统计误差在激光雷达的所有误差源中是最主要的部分.当激光雷达的时间分辨率和空间分辨率都减小的时候,这种误差就会相应地减小.为此,通常用延长探测光子数累积时间和光子计数门宽度的方法,即以牺牲空间和时间分辨率的方法来提高温度和密度的反演精度.

(3) 本文反演温度和密度的数据是取自钠荧光共振散射激光雷达的散射部分,其雷达因子比较小,因此能够反演的温度和密度的高度也比较低,目前我们正在进行激光雷达的升级工作,可以通过提高激光雷达的单脉冲能量,利用短的工作波长(波长 532 nm,单脉冲能量 400 mJ),增大雷达因子的配置,从而提高探测的高度范围.并通过长期的观测积累,建立武汉地区中高层大气的温度和密度分布特征,为研究大气的物理化学变化机制等提供参考数据.

参 考 文 献

- [1] Zeng Zhen, Hu Xiong, Zhang Xunjie *et al.* Comparison of density and temperature profile observed by lidar and occultation technique. *Chin. J. Space Sci.*, 2001, **21**(2):165—171. in Chinese (曾桢, 胡雄, 张训斌等. 无线电掩星和激光雷达观测结果比较. 空间科学学报, 2001, **21**(2):165—171)
- [2] Parameswaran K *et al.* Altitude profiles of temperature from 4 to 80 km over the tropics from MST radar and lidar. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2000, **62**:1327—1337
- [3] Wu Yonghua, Hu Huanling *et al.* Temperature measurement with Rayleigh scattering lidar in the mid and upper stratosphere. *Chin. J. Lasers*, 2001, **28**(2):137—140. in Chinese (吴永华, 胡欢陵等. 用瑞利散射激光雷达探测平流层中上部温度. 中国激光, 2001, **28**(2):137—140)

- [4] Zheng Wengang, Li Hongjun *et al.* Lidar detection of the atmospheric density and temperature over Wuhan. *Chin. J. Atmos. Sci.*, 1999, **23**(4):397—402. in Chinese (郑文钢, 李洪钧等. 武汉上空大气密度温度的激光雷达探测. 大气科学, 1999, **23**(4):397—402)
- [5] Yi Fan, Zhang Shaodong *et al.* Lidar observations of sporadic Na layers over Wuhan (30.5°N, 114.4°E). *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(9):1—4
- [6] Singh U N *et al.* Stratospheric temperature measurements by two collocated NDSE lidars during UARS validation campaign. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(D6):10 287—10 297
- [7] 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, **12**:148—186
- [8] Hauchecore A *et al.* Climatology and trends of the middle atmospheric temperature (33—87 km) as seen by Rayleigh lidar over the south of France. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(D8):15 297—15 301
- [9] Ma Ruiping, Xu Jiyao, Liao Huaizhe. The characteristic of temperature at height of 20—80 km in Chinese area. *Chin. J. Space Sci.*, 2001, **21**(3):248—252. in Chinese (马瑞平, 徐奇遥, 廖怀哲. 我国地区 20—80 km 高空大气温度特征. 空间科学学报, 2001, **21**(3):248—252)
- [10] Alikin A C, Chanin M L *et al.* Temperature trends in the lower mososphere. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**(3):416—419
- [11] Takashi Shibata *et al.* Measurements of density and temperature profile in the middle atmosphere with a XeF lidar. *App. Opt.*, 1986, **25**(5):685—688

RAYLEIGH LIDAR AND RADIOSOND OBSERVATIONS OF DENSITY AND TEMPERATURE IN MIDDLE ATMOSPHERE OVER WUHAN

CHEN Hao YI Fan

(School of Electronic Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract

Vertical distributions of atmospheric density and temperature over Wuhan (30.5°N, 114.4°E) from ground to 65 km have been obtained by Rayleigh Scattering Lidar with high temporal and special resolution and radiosondes. A method to derive the density and temperature from the photon counts collected by lidar is described briefly. The density and temperature profiles agree very well with MSISE-90 atmosphere model and the temperature difference between the derived profiles and model were less than 3 K near the stratopause. The errors involved in the derived values are presented and analyzed. Preliminary analysis of temperature variations in a night revealed fluctuations with characteristics resembling those large-scale gravity waves.

Key words Lidar, Radiosonde, Stratosphere