

文章编号: 0258-7025(2001)02-0137-04

# 用瑞利散射激光雷达探测平流层 中上部温度<sup>\*</sup>

吴永华 胡欢陵 胡顺星 周 军

(中国科学院安徽光机所国家 863 计划大气光学重点实验室 合肥 230031)

**提要** 介绍了一台用于平流层中上部温度探测的双波长激光雷达,分析了数据处理方法及其过程。该激光雷达获得的结果与 NOAA/NMC 及 MSISE-90 模式资料对比表明,在 30~40 km 高度范围内三者反映了较一致的温度分布特征。一般情况下 30~40 km 范围内它们的温度偏差小于 3 K;低层 30 km 以下很可能主要受气溶胶的影响,相对偏差小于 6 K。

**关键词** 激光雷达,平流层温度,NOAA/NMC,MSISE-90 模式

中图分类号: TN 958.98 文献标识码: A

## Temperature Measurement with Rayleigh Scattering Lidar in the Mid and Upper Stratosphere

WU Yong-hua HU Huan-ling HU Shun-xing ZHOU Jun

(Key Lab of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract** A Rayleigh scattering lidar is presented for temperature observation in the mid and upper stratosphere, both principle and process of data analysis are described. Temperature profiles obtained by lidar show the coincident distribution with the NOAA/NMC and MSISE-90 model over the altitudes of 30 to 40 km. Generally, temperature biases between lidar and NOAA/NMC or MSISE-90 model are less than 3 K from 30 km to 40 km altitude, not larger than 6 K at the lower altitudes probably due to the influences of aerosol.

**Key words** lidar, stratospheric temperature, NOAA/NMC, MSISE-90 model

平流层温度的分布直接关系到平流层臭氧的变化及其光化学反应过程,同时它亦影响到全球气候变化、地球重力波和大气环流结构。为进行全球范围内的有效监测,1988 年成立了国际平流层变化观测网(NDSC),但是由于平流层较高的高度范围,全球平流层温度观测网站仍较有限,目前主要的观测手段有火箭及高空气球探空、星载辐射计和激光雷达等。在我国,火箭和高空气球的探空资料仍很有限,卫星资料尚需地面定标,并且其空间分辨率较低,而激光雷达则具有较高的空间分辨率,且能够进

行长期连续观测,为卫星数据的定标提供了较好的资料<sup>[1]</sup>。本文介绍了一台能够用于平流层中上部温度探测的激光雷达。

### 1 L625 瑞利散射激光雷达及其探测温度原理

#### 1.1 L625 瑞利散射激光雷达

L625 瑞利散射激光雷达使用 532 nm 和 355 nm 两波长探测平流层温度。该激光雷达系统主要由激光发射、回波信号接收和数据采集及控制三部分组成。整个系统如图 1 所示。Nd:YAG 激光器调 Q 单横模倍频分别输出 532 nm 和 355 nm 波长。在其垂直发射光路上相距约 30 m 两点处,分别设置 CCD 监视光束方向及其调整,使得激光束和接收望远镜

<sup>\*</sup> 国家 863 计划激光技术领域和国家自然科学基金(49775258)资助项目。

收稿日期:1999-08-23;收到修改稿日期:2000-01-10

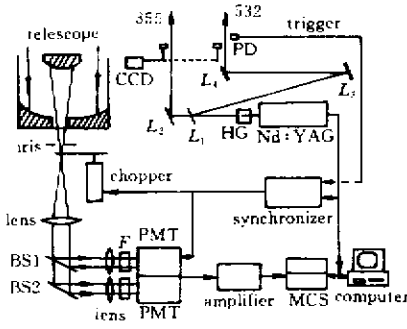


图 1 L625 瑞利散射激光雷达原理框图

HG: 倍频器;  $L_1 \sim L_4$ : 导光镜; PD: 光电二极管;  
BS1, BS2: 分色片; F: 滤光片; MCS: 多通道光子计数器

Fig. 1 Schematic diagram of L625 Rayleigh scattering lidar

HG: harmonic generator;  $L_1 \sim L_4$ : steering mirrors; PD: photodiode;

BS1, BS2: beam-splitter; F: filter; MCS: multichannel scaler

主光轴平行, 以保证回波信号的准确有效接收。直径 62.5 cm 的卡塞格伦(Cassegrain)型望远镜用以收集大气后向散射光信号, 其接收视场角为 2 mrad, 后向散射光信号由光电倍增管(PMT)进行光电信号转化, 其输出经放大后由光子计数器检测并把结果传给计算机保存。由于高低层回波信号动态范围大, 为防止低层强回波给 PMT 带来的非线性效应及信号诱导噪声, 接收望远镜焦平面附近放置了机械斩光盘用以斩掉低层强回波, 光电倍增管选用了线性好、高增益的 EMI9817B 和 EMI9214QB 型, 并采用光子计数技术检测高层弱回波信号; PMT 配置相应的制冷器, 用以降低它的热噪声和暗电流噪声; 为抑制天空背景噪声, PMT 前放置了窄带干涉滤光片。基于 Windows 界面的计算机软件可分别设置采样的大气分层厚度、高度、激光脉冲数和甄别电平, 并实时显示回波信号随高度的分布曲线。整个系统可用计算机外触发激光器实现自动工作, 亦可通过添加 XeCl 激光输出而具有探测平流层臭氧的能力<sup>[2]</sup>。表 1 给出了该激光雷达的系统参数。

表 1 L625 瑞利散射激光雷达性能指标

Table 1 Characteristics of L625 Rayleigh scattering lidar

<b>Transmitter</b>		Filter FWHM	1 nm
Laser	Nd: YAG	Transmission	50%, 40%
Wavelength	532 nm, 355 nm	PMT	EMI9817B, EMI 9214QB
Pulse energy	70 mJ, 60 mJ	Cooler	EMI FACT50(-20°)
Repetition rate	10 Hz	<b>Data acquisition</b>	
Pulse width	18 ns	Photon-counter	EG&G T914p
<b>Receiver</b>		Max. count rate	150 MHz
Telescope	φ 62.5 cm, Cassegrain	Range resolution	150 m
Field of view	2 mrad	Channel	1000
Chopper	400 Hz	Computer	Pentium 586

## 1.2 探测大气温度的原理

瑞利散射激光雷达可用于探测 30 km 以上高度的大气温度, 其主要思想是<sup>[3,4]</sup>: 1) 认为 30 km 以上的大气回波主要是分子瑞利散射信号, 忽略气溶胶粒子的散射; 2) 假设已知某一高度上大气密度, 可求得大气密度廓线; 3) 结合理想气体状态方程和大气静力学方程求得大气温度。30 km 以上的大气密度可由激光雷达的回波信号表示为

$$N(z) = \frac{P(\lambda, z) \times z^2}{P(\lambda, z_0) \times z_0^2} \times N(z_0) \times Q(z, z_0) \quad (1)$$

其中,  $N(z)$  和  $N(z_0)$  分别为  $z$  和  $z_0$  高度上的大气密度,  $z_0$  为参考高度;  $P(\lambda, z)$  和  $P(\lambda, z_0)$  分别对应  $z$  与  $z_0$  高度上的大气回波光子数;  $Q(z, z_0)$  为  $z$  至  $z_0$  高度的大气双程透过率。由理想气体状态方程和大气静力学方程可推知大气温度的表达式为

$$T(z) = \frac{T(z_c)N(z_c) + \frac{M}{R} \int_z^{z_c} g(z')N(z')dz'}{N(z)} \quad (2)$$

式(2)中  $T(z)$  与  $T(z_c)$  分别为  $z$  和  $z_c$  高度上的大气温度;  $z_c$  为参考温度高度;  $M$  为空气分子的摩尔质量;  $R$  为气体的普适常数;  $g(z)$  为重力加速度。参考高度处的大气密度和温度可由探空资料或模式给出, 利用激光雷达的回波信号可分别由式(1)和(2)得到大气的密度和温度。

对于 L625 瑞利散射激光雷达, 参考高度  $z_0$  一般选在 40 km 附近, 该处回波信噪比大于等于 10, 参考密度和温度取自于美国海洋大气管理局/国家气象中心(NOAA/NMC)或 MSISE-90 模式数据。NMC 温度是全球范围内网格化数据, 并已被广泛使用<sup>[1]</sup>; MSISE-90 模式描述了从地面至热层大气密度和温度的分布, 已为中层大气研究者所接受<sup>[5]</sup>。中分辨率大气辐射传输软件(Modtran)计算表明, 在 30 ~ 40 km 之间 532 nm 和 355 nm 处的大气双程透过率分别为 0.991 和 0.988。由于实际大气的双程透过率无法确切知道, 故在本文的计算中近似取大气双程透过率为 1, 这种近似会给大气密度的计算结果带来 1% ~ 2% 的误差。由方程(1)和(2)知, 温度的精度与回波信号、大气双程透过率、大气的相对密度和参考温度值的不确定性等有关, 而与大气的绝对密度无关。

## 2 观测结果及讨论

该激光雷达在合肥市西郊进行了观测。图 2 给出了它在 1997 年 11 月 2 日晚所接收到的距离平方校正后的回波信号,累积的激光脉冲数均为 10000;纯分子大气层内,该信号与大气密度近似成正比。由图 2 看出,对于该雷达系统而言,532 nm 的回波信号较 355 nm 的强,而 50 km 以上,距离平方校正后的回波信号因噪声的影响而起伏较大。以 355 nm 通道为例,图 3 给出了参考温度值的变化对激光雷达结果的影响,参考温度  $T_c$  和密度取自 MSISE-90

模式值。图 3 表明,当参考温度取值偏大 5 K (即:  $T_c + 5 \text{ K}$ ) 时,反演的温度结果亦偏大;当参考温度取值偏小 ( $T_c - 5 \text{ K}$ ) 时,反演的温度结果亦偏小。但是,不同高度处的温度结果受影响程度不同;在 36 km 以下,温度的变化幅度小于 2 K;随高度增加,温度的变化幅度逐渐趋近于参考温度的变化幅度。这主要是由于低层大气密度较大,使低层的温度结果受参考温度变化的影响较小。

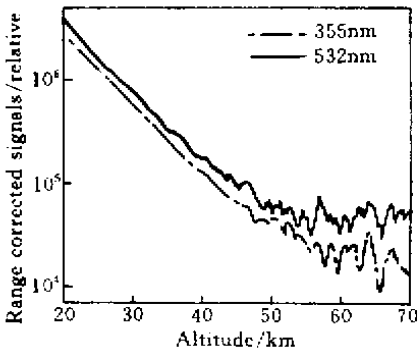


图 2 距离平方校正后的激光雷达信号

Fig.2 Range-square corrected signals of lidar at 355 nm and 532 nm

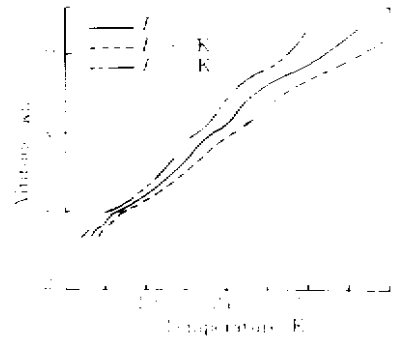


图 3 参考温度值的变化对温度结果的影响

Fig.3 Variation of temperature profiles with the changes of reference temperature

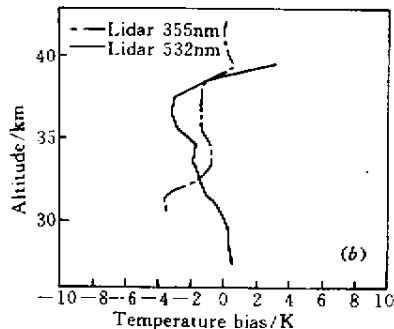
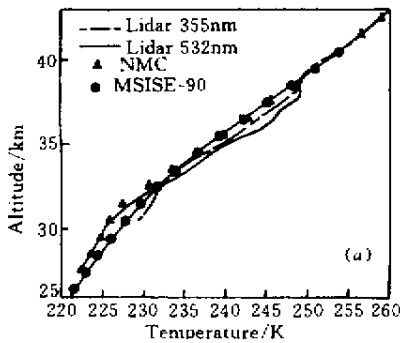


图 4 激光雷达获得的温度分布 (a) 及它与 NMC 温度的差别 (b)

Fig.4 Profiles of temperature (a) and temperature bias (b) ( $T(\text{NMC}) - T(\text{lidar})$ ) made by lidar and MSISE-90 model

图 4 (a) 给出了 1996 年 10 月 4 日晚激光雷达双波长获得的温度廓线;它们与 NMC 及 MSISE-90 模式温度值较为一致。随着高度的升高,平流层温度明显递增。激光雷达的结果相对于 NMC 温度的偏差如图 4 (b) 所示,可以看出,在 33 ~ 42 km 范围内 355 nm 通道的结果较 NMC 温度的偏差小于 1.5 K;33 km 以下偏差稍大。而对于 532 nm 通道而言,在 27 ~ 39 km 范围内与 NMC 温度的偏差小于 3 K。造成上述偏差的主要原因是低层气溶胶的影响和高层

回波信号噪声及参考温度值的不确定性。另外,大气透过率也因激光波长的不同而带来了不同偏差。

图 5 (a) 为 1997 年 11 月 2 日晚激光雷达与 NMC 及 MSISE-90 模式给出的温度廓线,它们所反映的温度分布趋势是一致的,但在低层和 39 km 以上, NMC 与 MSISE-90 模式温度值的差别较明显。激光雷达与 MSISE-90 模式温度的相对偏差如图 5 (b) 所示。可以看出,对于 355 nm 通道而言,它们的偏差小于 2 K;对 532 nm 通道而言,在 30 ~ 40 km 范围内

它们的偏差小于 1 K。

我们比较了激光雷达 532 nm 通道获得的温度与 MSISE-90 模式温度在不同时间及不同高度上的差别,结果如表 2。其中,一般情况下在 30.5 km 处它们的绝对差别小于 1.5 K,有时达 2.97 K;在 35.5

km 处激光雷达的结果稍偏大;而在 40.5 km 处激光雷达的结果却小于模式值。总的来说,大多数情况下它们的差别较小,这表明激光雷达的观测结果是可靠的。

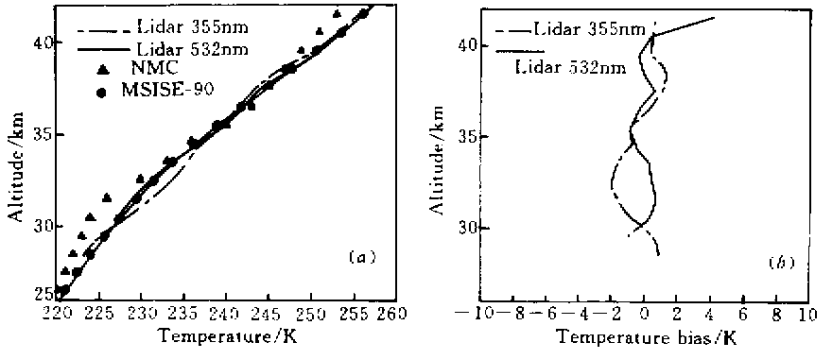


图 5 激光雷达获得的温度分布 (a) 及它与 MSISE-90 温度的差别 (b)

Fig.5 Profiles of temperature (a) and temperature bias (b) ( $T(\text{MSISE-90}) - T(\text{lidar})$ ) made by lidar and MSISE-90 model

表 2 激光雷达获得的温度与 MSISE-90 模式值的差别

Table 2 Temperature bias (K) among results of lidar and MSISE-90 model ( $T(\text{MSISE-90}) - T(\text{lidar})$ )

Altitude /km	Date ( year-month-day )						
	96-08-15	96-10-4	96-12-13	97-09-05	97-10-20	97-10-22	97-11-02
30.5	-0.47	0.01	-2.97	-0.97	0.93	1.36	0.3
35.5	-2.74	-2.7	-3.92	-1.47	0.81	-1.24	-0.85
40.5	5.4	-	0.98	1.69	0.15	2.28	0.44

### 3 结 论

本文介绍了一台双波长瑞利散射激光雷达系统,分析了参考温度值的变化对观测结果的影响。通过与 NOAA/NMC 及 MSISE-90 模式温度资料的对比验证,该激光雷达能够可靠地获得平流层中上部的大气温度;其结果与 NOAA/NMC 或 MSISE-90 模式温度的偏差在 30~40 km 范围内小于 3 K,而在低层较大。多天的观测对比分析表明,在 40.5 km 处,激光雷达获得的温度与 NMC 或 MSISE-90 模式值的差别一般小于 2.5 K。今后,该激光雷达将通过提高激光能量来扩大测量的高度范围;另外,高空探空或 NOAA/TOVS 测数据将有助于提高定标精度;我们将用该激光雷达长期监测合肥地区平流层温度的分布特征,为研究中层大气的物理化学变化机制及卫星数据的定标提供参考数据。

学数据中心(NSSDC)分别提供了 NOAA/NMC 和模式温度数据,在此表示由衷地感谢。

### 参 考 文 献

- 1 F. G. Finger, M. E. Gelman, J. D. Wild *et al.*. Evaluation of NMC upper-stratospheric temperature analysis using rocketsonde and lidar data. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1993, **74**(5):789~799
- 2 Hu Huanling, Wang Zhien, Wu Yonghua *et al.*. UV-DIAL system for measurements of stratospheric ozone. *Scientia Atmospherica Sinica* (大气科学), 1998, **22**(5):701~708 (in Chinese)
- 3 T. Shibata, M. Kobuchi, M. Maeda. Measurements of density and temperature profiles in the middle atmosphere with XeF lidar. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(6):685~688
- 4 L. Thierry, I. S. Mcdermid, A. Hauchecorne *et al.*. Evaluation of optimization of lidar temperature analysis algorithms using simulated data. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(6):6177~6185
- 5 A. E. Hedin. Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(2):1159~1172

致谢 岳古明、金传佳、戚福弟、张民等参加了该激光雷达的建立及观测;美国 NASA/Langley 和空间科