

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2013.01.003

合肥钠测温测风激光雷达与武汉流星雷达 水平风场的对比研究

方欣¹, 谷升阳¹, 班超¹, 李陶¹,
熊建刚², 宁百齐², 窦贤康¹, 王宁宁¹

(1 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026 ;
2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100026)

摘要: 中间层顶区域大气温度和风场是研究中高层大气动力学的重要参量。简要介绍中国科学技术大学钠测温测风激光雷达系统。其可用于高分辨率探测中间层顶区域 (80~105 km) 大气温度和风场。给出了该激光雷达测量大气温度和风场的基本原理, 对系统的发射部分、接收部分和光电探测采集及时序控制部分进行简要介绍, 给出了该系统探测的大气温度和风场的结果。温度和风场结果分别与 TIMED/SABER 卫星仪器和武汉地基流星雷达观测结果进行了对比。

关键词: 大气光学; 中高层大气; 大气温度; 风场; 钠测温测风激光雷达

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5461(2013)00-0012-05

Horizontal wind comparison between sodium temperature/wind lidar over Hefei and meteor radar over Wuhan

FANG Xin¹, GU Sheng-yang¹, BAN Chao¹, LI Tao¹,
XIONG Jian-gang², NING Bai-qi², DOU Xian-kang¹, WANG Ning-ning¹

(1 School of Earth and Space, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China ;
2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100026, China)

Abstract: The middle and upper atmosphere temperature and wind fields are important parameters to study atmospheric dynamics. A sodium temperature/wind lidar system of University of Science and Technology of China (USTC), which can be used for the temperature and wind measurement with high resolution in the mesopause region (80~105 km) is presented briefly. Theory for measuring atmospheric temperature and wind of the lidar is discussed. The transmitter, receiver, photoelectric detecting subsystem, acquisition subsystem and timing control subsystem are described respectively. Finally, the temperature and wind results are given, while the temperature profile observed by sodium lidar is compared with SABER observed, the wind observed by sodium lidar is compared with ground-based meteor radar observed in Wuhan.

Key words: atmospheric optics; middle and upper atmosphere; atmospheric temperature; wind fields; sodium temperature/wind lidar

1 引言

中间层顶区域是大气波动 (重力波、潮汐波、行星波等) 的活跃区域。对该区域大气温度和风场的探测对于研究重力波、潮汐波及行星波及其相互作用具有非常重要的意义^[1,2]。高光谱分辨率钠测温测风激光雷达是目前为止能够同时探测中间层顶区域大气温度和风场的最为有效的手段^[3,4]。

基金项目: 国家自然科学基金 (41074108, 40974084)、中科院“百人计划”和国家“985”工程项目

作者简介: 方欣 博士, 研究方向为激光雷达系统及激光大气探测。 **E-mail:** fangxin1981@163.com

收稿日期: 2012-10-09

针对国内对中间层顶区域探测资料匮乏的现状，中国科学技术大学 (USTC) 研制了一台高光谱分辨率钠测温测风激光雷达系统，Li *et al.*^[5] 对该激光雷达系统进行了详细的报道。下文将先阐述钠测温测风激光雷达的基本原理，然后对钠测温测风激光雷达系统进行介绍，接着给出其温度和风场的探测结果，温度结果和卫星 SABER 仪器进行了对比分析，风场结果和武汉地基流星雷达进行了对比分析。

2 钠测温测风激光雷达系统

2.1 探测原理

钠测温测风激光雷达的基本探测原理基于钠原子的高精细 D_{2a} 光谱结构。通过向大气中序列发射三个频率激光：D_{2a} 峰值频率 ν_0 ，两个侧翼频率 $(\nu_0 + 630)$ MHz 和 $(\nu_0 - 630)$ MHz。接收机分别接收这三个频率的钠原子 (存在于 70~120 km 高度) 的共振荧光后向散射回波信号。得到实测信号的温度比 $R_T(T, V)$ 和风速比 $R_V(T, V)$ 分别为

$$R_T(T, V) = \frac{N_+ + N_-}{2N_0}, \tag{1}$$

$$R_V(T, V) = \frac{N_+ - N_-}{N_0}, \tag{2}$$

式中 N_0, N_+, N_- 分别为频率 $\nu_0, (\nu_0 + 630)$ MHz, $(\nu_0 - 630)$ MHz 处的理论光子数。由钠原子精确光谱线型，同时考虑激光线型，可理论计算出温度比和风速比表达式

$$R_T(T, V) = \frac{\sigma_{SB}^{total}(\nu_+, T, V) + \sigma_{SB}^{total}(\nu_-, T, V)}{2\sigma_{SB}^{total}(\nu_0, T, V)}, \tag{3}$$

$$R_V(T, V) = \frac{\sigma_{SB}^{total}(\nu_+, T, V) - \sigma_{SB}^{total}(\nu_-, T, V)}{\sigma_{SB}^{total}(\nu_0, T, V)}, \tag{4}$$

$\sigma_{SB}^{total}(\nu_0, T, V), \sigma_{SB}^{total}(\nu_+, T, V), \sigma_{SB}^{total}(\nu_-, T, V)$ 分别对应 $\nu_0, (\nu_0 + 630)$ MHz, $(\nu_0 - 630)$ MHz 的总的后向散射截面。其和温度、风速有关，从而可构建出理论的二维校准曲线。

由实测信号的温度和风速比查询二维校准曲线，可确定出各个高度的温度和风速。从而得到随高度分布大气温度和风速的垂直分布廓线。

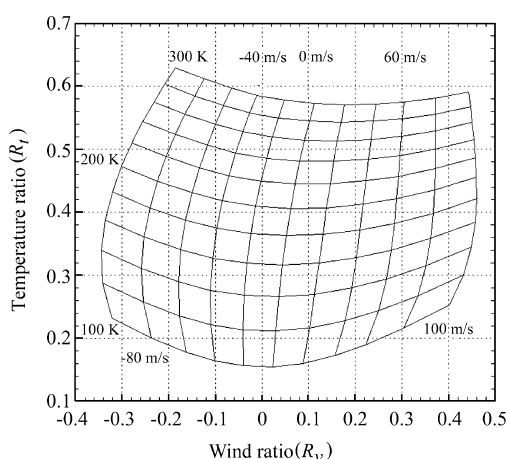


Fig.1 Theoretic 2-D calibration curve

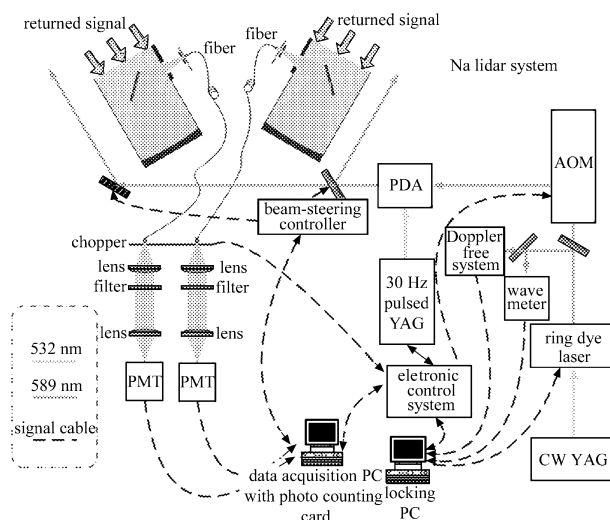


Fig.2 The diagram of sodium temperature/wind lidar system

2.2 钠测温测风激光雷达系统

钠测温测风激光雷达系统由发射机、接收机、光电探测采集和时序控制部分组成。图 2 给出了系统框图。表 1 是该激光雷达系统主要参数。

钠测温测风激光雷达发射机主要由四台激光器 (半导体连续激光器 CW YAG、环形染料激光器 Ring

Table 1 钠测温测风激光雷达系统主要参数

发射机			
发射激光功率	ν_0	$\nu_0 + 630$	$\nu_0 - 630$
	1.3 W	1.1 W	1.2 W
激光线宽	~120 MHz		
激光重复频率	30 Hz		
激光发散角	约 0.7 ~ 0.8 mrad		
接收机			
望远镜	直径: 762 mm, $f/\#$: $f/2.2$		
光纤	芯径: 1.5 mm, 数值孔径: 0.37		
滤光片	中心波长: 589.1 nm, 带宽: 1 nm		
光电倍增管模块	量子效率 ~40%@589 nm, 脉宽: 8 ns, 分辨率: 20 ns		
光子计数卡	典型计数频率: 350 MHz, 驻留时间: 1 μ s		
时序发生器	DG645		

Dye Laser、脉冲泵浦激光器 Pulsed YAG 和脉冲染料放大器 PDA)、激光频率绝对锁定跟踪系统 Doppler Free System、声光调制系统 AOM 和自动准直系统组成。半导体连续激光器泵浦环形染料激光器产生钠原子荧光谱线 D_{2a} 峰值频率处的窄带激光 589.158 nm。激光频率主动锁定跟踪锁定系统用于将环形染料激光器产生的激光频率长时间高精度地锁定在其 D_{2a} 的峰值频率处。声光调制系统用于将环形染料激光器输出的窄带激光产生该激光雷达所需的三个频率的种子光源。脉冲泵浦激光器泵浦脉冲染料放大器和三频率的种子光源相互作用, 放大三个频率的激光功率。自动准直系统用于自动准直激光发射光束光轴和望远镜的接收光轴。

钠测温测风激光雷达接收系统用于接收钠原子共振荧光后向散射回波信号。其主要由望远镜, 斩光盘系统、后继接收光路组成。斩光盘系统用于抑制低空

的强回波信号, 使其不能到达光电倍增管阴极感光材料, 从根本上消除了近场强散射回波信号对光电倍增管产生的非线性失真的影响。后继接收光路用于将光纤传输的回波光信号耦合到光电倍增管 (PMT) 的探测靶面上。

回波信号的光电转换由光电倍增管模块直接转换成正电平脉冲信号, 电脉冲信号由光子计数卡记录采集到计算机。时序控制系统用于保证整个激光雷达系统各个部件按照一定秩序运行。我们设计接收斩光盘输出信号作为整个时序系统的主脉冲信号。其他部件需要的信号通过两台 DG645 数字延迟发生器的脉冲通道输出。

3 钠测温测风激光雷达探测结果

图 3 是光谱分辨钠测温测风激光雷达于 2011 年 11 月 20 日晚采集的 2 min 积分时间的光子回波信号。激光累积脉冲数为 3600 发, 由于我们采用三频率序列交替发射 (ν_0 , ($\nu_0 + 630$) MHz, ($\nu_0 - 630$) MHz), 因此 2 min 每一频率累计了 1200 个激光脉冲 (约 40 s 时间)。

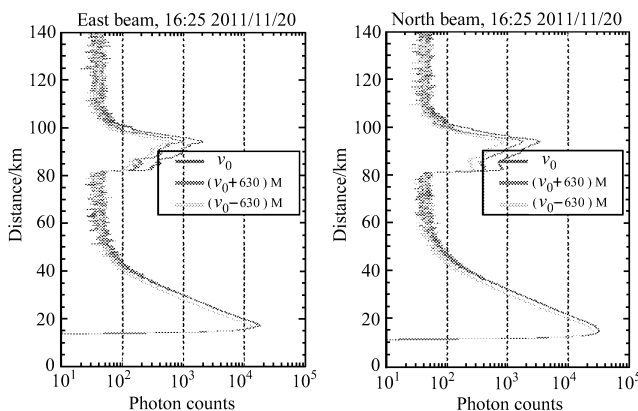


Fig.3 The echo of sodium temperature/wind lidar

时刻两观测仪器温度结果的对比。图中带有误差棒的为钠测温测风激光雷达观测结果, 另一曲线为 SABER 观测结果。激光雷达数据是时间分辨率 15 min, 垂直分辨率 2 km 的结果, 卫星数据是 1 min 内的结果。从图中

图 4 是 2011 年 10 月 16 日探测整晚大气温度的等值线填充图。从图中可以看出, 在 82~102 km 高度范围内, 温度基本上在 160~220 K 之间。另外, 从图中也可看出, 从 15:00 UT 到 20:30 UT 左右, 在 90 km、91 km 高度出现明显的逆温层结构, 其幅度最大值约 30 K, 20:30 UT 之后, 在此高度处的逆温层基本消失。可以发现其相位向下的传播速度缓慢, 从 15:00 UT 到 20:30 UT, 传播了约 3.5 km, 速度约为 0.7 km/h。

为验证钠测温测风激光雷达探测温度结果的有效性和可靠性, 我们和 TIMED 卫星的 SABER 仪器进行了对比。图 5 是 2011 年 10 月 16 日 ~20 UT

可以看出, 激光雷达站点和卫星测量位置 (经度和纬度) 有一定的差别, 卫星数据的经纬度为 (30°N, 116°E), 激光雷达的经纬度为 (31°30'N, 117°E), 从趋势上看两种不同测量原理的仪器观测结果基本一致。但图中卫星观测的 1 min 的温度垂直廓线中有明显的重力波振荡, 垂直波长小于 7 km, 而钠激光雷达观测的结果无明显短波长振荡结构, 这是由于钠激光雷达数据结果是 15 min 内积分的结果, 只能看到周期大于 30 min 的重力波活动, 不能反映出短周期的重力波活动。这说明了钠测温测风激光雷达的探测大气温度是有效和可靠的。

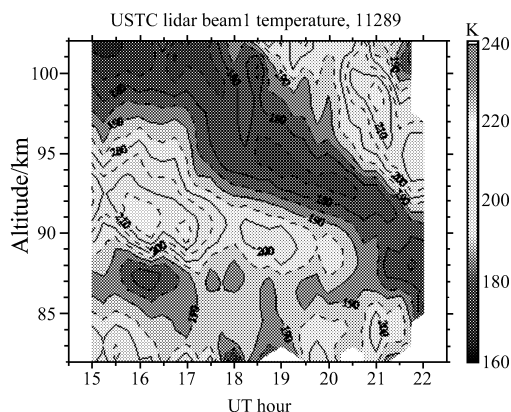


Fig 4 Temperature contour of sodium temperature/wind lidar on October 16, 2011

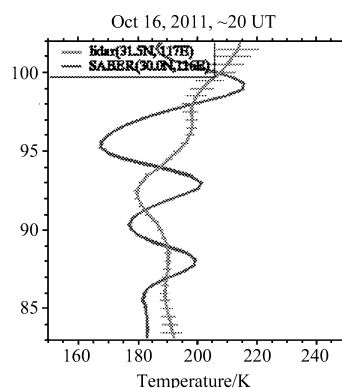


Fig 5 Comparison of the vertical temperature profile between lidar and SABER

同样, 为了验证钠测温测风激光雷达探测大气风场结果的有效性和可靠性。图 6 是 2011 年 11 月 12 日武汉流星雷达 [6] 和合肥钠激光雷达观测的纬向风的结果对比。图 7 是经向风的结果。图中左侧是武汉流星雷达的分析结果, 右侧是钠测温测风激光雷达的结果。两数据的垂直分辨率均为 3 km, 时间分辨率为 2 h。从纬向风的结果中可以看出, 两观测结果在趋势上基本一致, 武汉流星雷达观测的风速最大值出现在当地时间 03:00 左右, 高度约在 98 km, 风速值约为 70 m/s。激光雷达观测的风速最大值出现在当地时间 0:00~1:00, 高度约 102 km, 风速最大值约 70 m/s。在 90~105 km 高度两观测仪器都能看到明显的相位向下传播的潮汐波结构。相位上激光雷达稍领先于武汉流星雷达。两观测仪器经向风同样可以看到相位向下传播的潮汐波。两者较大区别出现在 100 km 左右高度 21:00 UT 左右, 激光雷达观测的经向向南的风速明显大于武汉流星雷达, 约 -50 m/s, 且无明显的相位向下的传播, 这可能和重力波活动有关, 具体原因尚不明确。

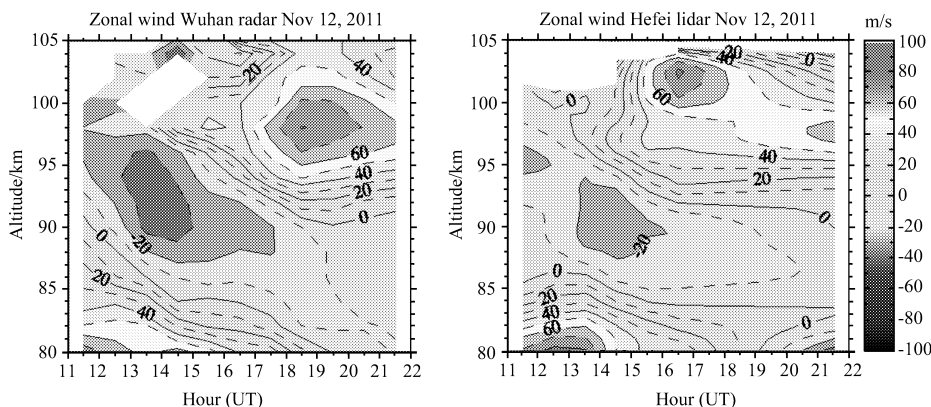


Fig 6 The zonal wind of meteor radar over Wuhan and sodium temperature/wind lidar over Hefei, (a) for radar, (b) for lidar

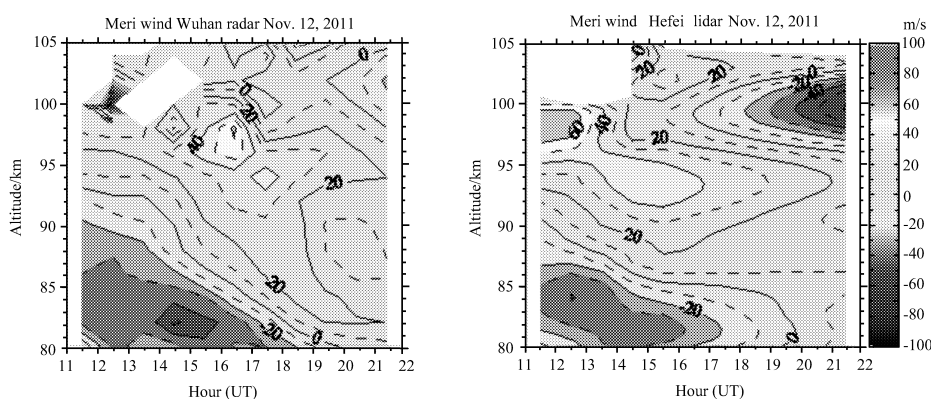


Fig.7 The zonal wind of meteor radar over Wuhan and sodium temperature/wind lidar over Hefei:
the left for radar and the right for lidar

4 结 论

文中简要介绍了中国科技大学钠测温测风激光雷达系统。该激光雷达系统通过序列发射钠原子 D_{2a} 谱线的三个频率激光, D_{2a} 峰值频率 ν_0 , 两个侧翼频率 $(\nu_0 + 630)$ MHz 和 $(\nu_0 - 630)$ MHz, 可同时对中间层顶区域大气温度和风场进行探测。其探测的温度结果和风场结果分别与 SABER 卫星仪器和武汉地基流星雷达观测结果进行了对比。对比分析结果表明, 该钠测温测风激光雷达探测大气温度和风场是有效和可靠的。另外, 利用钠测温测风激光雷达的探测数据, 可对大气半日潮汐进行探测分析, 也可对重力波的动量通量以及重力波和背景风场的相互作用进行研究 [7]。

参考文献:

- [1] She C Y, Li Tao, Collins R L, *et al.* Tidal perturbations and variability in the mesopause region over Fort Collins, CO (41°N , 105°W): Continuous multi-day temperature and wind lidar observations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31: L24111.
- [2] Li T, She C Y, Liu H L, *et al.* Evidence of a gravity wave breaking event and the estimation of the wave characteristics from sodium lidar observation over Fort Collins, CO (41°N , 105°W) [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, 34(5): L05815.
- [3] She C Y, Yu J R. Simultaneous three-frequency Na lidar measurements of radial wind and temperature in the mesopause region [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, 21: 1771-1774.
- [4] White M A. *A Frequency-agile Na Lidar for the Measurement of Temperature and Velocity in the Mesopause Region* [D]. Fort Collins: Doctorial Dissertation of Colorado State University, 1999.
- [5] Li Tao, Fang Xin, Liu Wei, *et al.* A narrowband sodium lidar for the measurements of mesopause region temperature and wind [J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(21): 5401-5411.
- [6] Xiong J G, Wan W, Ning B, *et al.* First results of the tidal structure in the MLT revealed by Wuhan meteor radar ($30^\circ40'\text{N}$, $114^\circ30'\text{E}$) [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, 66: 675-682.
- [7] Li Tao, Fang Xin, Gu Shengyang, *et al.* The initial results of gravity wave momentum flux measured by a sodium temperature/wind lidar over Hefei, China [C]. The 26th laser radar meeting, 2012.