

全固态窄带钠层荧光激光雷达系统及初步观测结果

夏媛^{1,3} 王泽龙^{2,3} 程学武^{1*} 杨国韬² 杜丽芳² 王继红² 杨勇¹
李亚娟^{1,3} 熊俊^{1,3} 李发泉¹ 龚顺生¹

¹中国科学院武汉物理与数学研究所 波谱与原子分子物理国家重点实验室 湖北 武汉 430071

²中国科学院空间科学与应用研究中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190

³中国科学院大学 北京 100049

摘要 窄带钠层荧光激光雷达可以获得 80~110 km 钠层风场和温度,是高空大气探测的发展趋势。报道了最新研制成功的国内首台全光纤、全固态窄带钠层荧光激光雷达系统,包括全固态激光雷达整机方案、系统采用关键技术及钠层初步探测结果。该系统已经初步实现北京上空钠层温度和钠原子数密度的探测。该全固态型激光雷达具有稳定性好、可靠性高、硬件调整少等特点,为钠层探测提供了有利手段。

关键词 激光光学;钠层激光雷达;全固态;种子注入;和频;饱和吸收;声光移频

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.s113003

All-Solid-State Narrowband Sodium Lidar System and Preliminary Result

Xia Yuan^{1,3} Wang Zelong^{2,3} Cheng Xuewu¹ Yang GuoTao² Du Lifang²
Wang Jihong² Yang Yong¹ Li Yajuan^{1,3} Xiong Jun^{1,3} Li Faquan¹ Gong Shunsheng¹

¹ State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China

² State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Narrowband sodium fluorescence lidar can be used to measure wind and temperature of sodium layer from 80 km to 110 km, which is the development trend of high-altitude atmospheric sounding. This paper reports a most recently developed fiber-coupled all-solid-state narrowband sodium fluorescence lidar, introducing the whole design, key technologies and the preliminary measurement results. This system has achieved the sodium number density and temperature detection of the sodium layer over Beijing. This all-solid-state lidar has good stability, high reliability and less hardware adjustments, which provides a good means for sodium layer measurement.

Key words laser optics; sodium lidar; all-solid-state; seed injection; sum frequency; saturation absorption; acousto-optic frequency shift

OCIS codes 010.3640; 280.3640; 250.4390

1 引言

钠层荧光激光雷达利用 80~110 km 高度范围大气存在的碱金属钠原子作为示踪物,通过对钠原子的共振荧光散射回波信号的研究实现中层顶区域大气参数的探测。钠层荧光激光雷达根据激光线宽可分为宽带型和窄带型两种,前者只能得到高空钠层的密度廓线及其变化,而后者兼具中层顶温度及风场探测的能

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(41127901、11403085)

作者简介: 夏媛(1990—),女,博士研究生,主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: xiayuanxxxy@163.com

导师简介: 李发泉(1970—),男,博士,研究员,主要从事原子滤光及其应用方面的研究。E-mail: lifaquan@wipm.ac.cn

通信联系人。E-mail: lidar@wipm.ac.cn

力。由于温度和风场对研究大气热力学和动力学传播过程具有重要意义,是中层顶大气极其重要而又很难实现探测的参量,因此窄带钠层荧光激光雷达的技术和应用越来越受到重视。

1969年,Bowman等^[1]用宽带钠层荧光激光雷达技术对高空钠层进行了首次探测。此后在国际上广泛开展了该宽带钠层荧光激光雷达的技术和应用研究。中国科学院武汉物理与数学研究所率先在国内研制成功宽带钠层荧光激光雷达,并对钠层开展了探测研究,获得了一批有价值的研究成果^[2-5]。20世纪90年代,She等^[6-8]首先提出窄带钠层荧光激光雷达概念,通过对高空钠原子多普勒增宽和多普勒频移的高分辨探测,先后实现了中层顶大气温度、风场的高时空分辨测量。国内,中国科学院空间科学与应用研究中心^[9]、中国科学技术大学^[10]、中国科学院武汉物理与数学研究所也先后研制成功窄带钠层荧光激光雷达。上述窄带钠层荧光激光雷达都采用染料型激光器(包括连续波激光器和脉冲激光放大器)作为发射激光源。近年来,国际上开展了窄带钠激光雷达的全固态化的研制。日本信州大学和巴西 Barclay Clemesha先后建成了全固态化的单模脉冲589 nm窄带钠激光雷达系统^[11-12],并获得了钠层温度的观测结果。到目前为止,尚未见有全固态化的钠层荧光激光雷达对钠层风场探测的报道。

本文介绍了中国科学院空间科学与应用研究中心与武汉物理与数学研究所联合研制的一套全固态窄带钠层荧光激光雷达系统。该系统通过对其种子光和频以及饱和吸收稳频等技术的改进性设计,特别是光纤声光调制三频切换技术等的采用,大大提高了全固态钠层荧光激光雷达系统整机的可靠性和稳定性。目前,该系统已初步实现北京上空钠层的探测,并反演出钠原子数密度和钠层温度探测结果。

2 钠层荧光激光雷达测量原理

钠层荧光激光雷达基于钠原子的共振荧光机制,地球大气80~110 km大气温度和风场都会对钠原子共振荧光谱线产生明显的展宽和频移(如图1所示)。一方面大气温度效应使Na原子的吸收线被展宽,在中间层顶区域由于大气密度较低,碰撞加宽可以忽略,故Na原子吸收谱线近似为多普勒增宽谱线,通过测量散射光的多普勒增宽谱线的宽度可以得到Na原子的温度;另一方面风场使得Na原子产生多普勒频移,Na原子的宏观运动使Na D₂谱线产生多普勒频移,频移量主要取决于Na原子宏观运动速度,通过测量散射光的多普勒谱线频移量就可得到Na原子群沿激光束方向的视线速度^[13]。

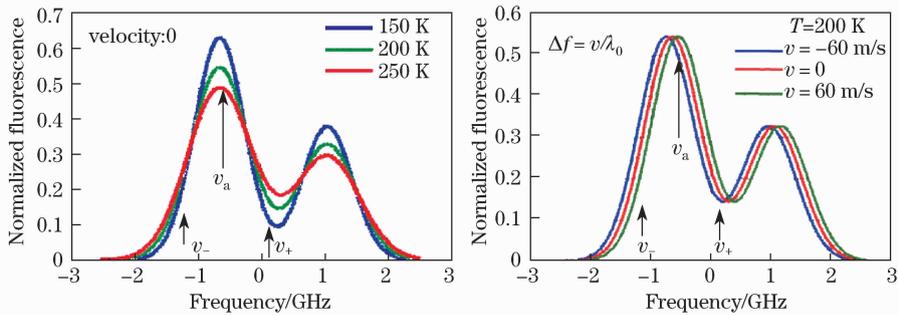


图1 钠原子D₂线多普勒展宽和多普勒频移的荧光光谱

Fig. 1 Na D₂ fluorescence spectrum of Doppler broadening and Doppler shift

在高光谱分辨钠层荧光激光雷达中,为了实现风场和温度的同时测量,She等^[7,14]采用一种声光调制器(AOM)三频调频技术,发射钠D₂线荧光光谱多普勒展宽附近的三个频率($f_0, f_0 \pm 630\text{ MHz}$)的窄线宽激光,根据雷达回波信号强度比值的变化,基于原子物理理论计算可同时测量出大气钠原子谱线的多普勒展宽和频移量。由于温度和风场同时存在,因此还需要对风场和温度进行联合反演,其温度和风场反演矫正曲线如图2所示。

3 全固态钠层荧光激光雷达方案

为了进行钠层的高分辨观测,需要获得单模、大功率589 nm脉冲激光,目前最常用的是脉冲染料放大(PDA)方案,将单模连续589 nm激光经过染料放大得到脉冲589 nm激光。本系统中提出了一种全光纤、全固态窄带钠层荧光激光雷达设计方案,如图3所示。主要包括激光发射单元,光学接收单元,检测控制单

元等。激光发射单元主要用于产生大功率单模三频 589 nm 脉冲激光,用于激发 80~110 km 钠层;光学接收单元主要为接收望远镜,望远镜焦平面处放置 1 根光纤,接收竖直方向回波信号;检测控制单元主要包括光学斩波、窄带滤光、光电转换、光子计数与数据处理,此外,检测控制单元还负责整机时序控制、稳频控制、光纤 AOM 三波长切换控制等。主要技术参数如表 1 所示。

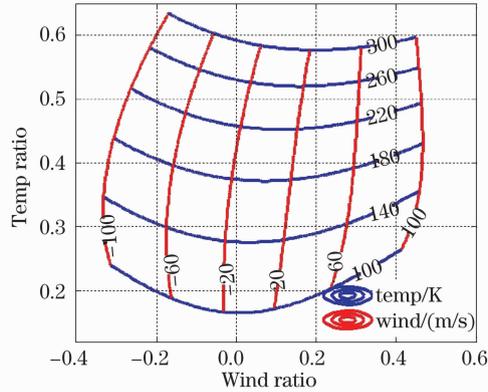


图 2 风场和温度反演校正曲线

Fig. 2 Correction curve of wind and temperature

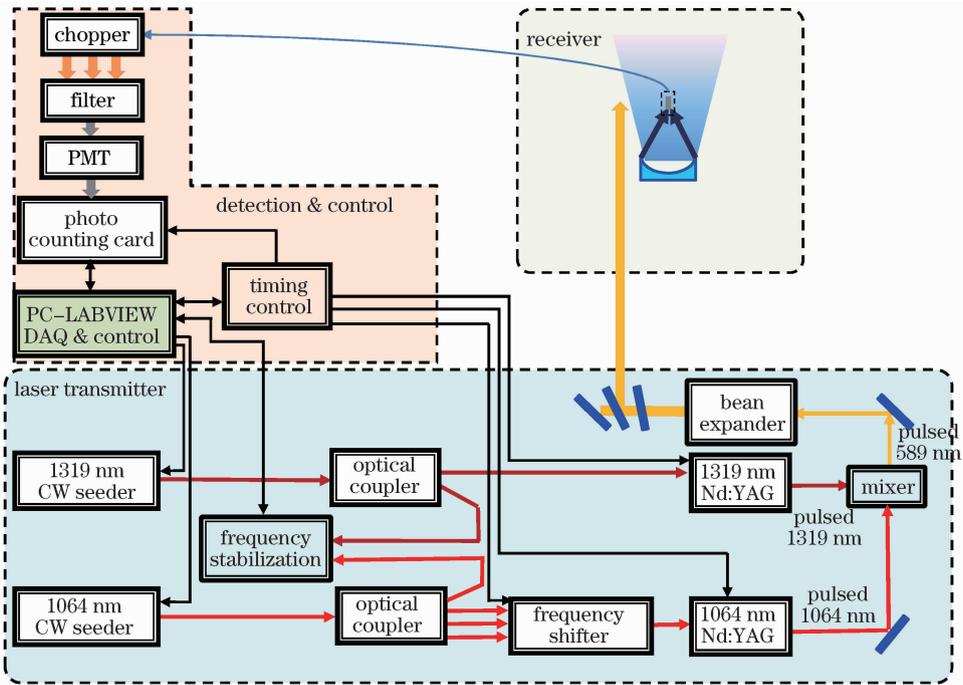


图 3 全固态窄带钠层荧光激光雷达系统设计方案

Fig. 3 System design of all-solid-state narrow-band sodium fluorescence lidar

表 1 全固态窄带钠层激光雷达系统参数

Table 1 System parameters of the all-solid-state narrow-band sodium fluorescence lidar

Parameter	Value
Wavelength/nm	589.1583
Pulse energy/mJ	150
Repetition rate/Hz	15
Linewidth/ MHz	80
Telescope/mm	800
Field of view/mrad	1
Filter bandwidth/nm	1
PMT	H7421-40
Photon counting board	FAST MCA-3Series

3.1 激光发射单元

为了得到稳频的单模 589nm 大功率脉冲激光,必须长期锁定两种子激光频率。本方案采用两台光纤输出的连续光种子激光器,其波长分别为 1064 nm 和 1319 nm,利用非线性光学晶体(LBO 或 PPLN)进行连续光和频,获得单模 589 nm 激光。将此 589 nm 连续激光送入钠饱和吸收池中,利用光电探测器和 NI 的高精度模数(AD)采样卡,扫描种子激光频率,即可获得钠原子 D_2 饱和吸收谱线,如图 4 所示。图中中心频率对应 589.1583 nm,钠原子 D_{2a} 谱线对应 -651.4 MHz。激光稳频利用 Labview 软件编写数字智能反馈程序,同时控制 1064 nm 和 1319 nm 两种子光频率的输出频率,使其连续光和频后 589 nm 激光波长长期锁定在 D_{2a} 谱线峰值上。然后将两种子激光分别注入两台大功率脉冲 Nd:YAG 中,通过和频获得单模、稳定的 589 nm 大功率脉冲激光,高效、稳定地激发钠层。通过实时监测钠原子 D_{2a} 线无多普勒饱和吸收峰值信号强度,计算出 589 nm 激光频率抖动范围(即稳频精度)基本在 ± 2 MHz 以内。1 MHz 的频率偏差对温度反演产生的理论误差约为 0.15 K^[14],故系统由于激光频率抖动带来的测温误差约为 ± 0.3 K。

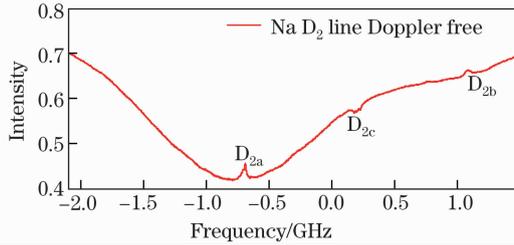


图 4 钠原子 D_2 线无多普勒饱和吸收信号

Fig. 4 Doppler-free saturation absorption signal of Na D_2

为了实现发射激光的三频输出,现有钠层风温测量系统均采用自由空间的 AOM 三频切换技术^[7,9,10],由于 AOM 通光孔径小(约为 0.3 mm),光路较长,其调整和维护困难。本文提出一种全光纤的 AOM 三频切换方案,从 1064 nm 种子光出来的光经一分四光纤分束器后分四路,一路用于和 1319 nm 连续光和频,另三路分别送入 f_0 、AOM+ 和 AOM-,获得频率分别为 $f_0 + 585$ MHz、 f_0 、 $f_0 - 585$ MHz 的三路激光(如图 5 所示),其中 f_0 的频率即为钠原子 D_{2a} 的中心频率。这三个频率由三选一光纤开关分时选择送入 1064 nm 的大功率 Nd:YAG 激光器,用于获得单模大功率脉冲 1064 nm 激光。

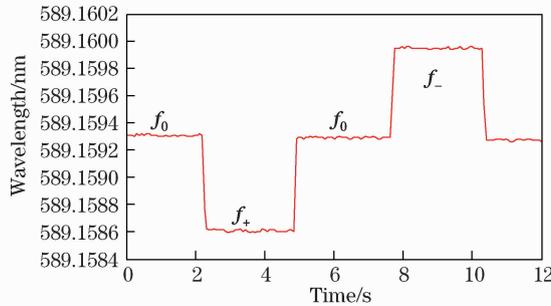


图 5 AOM 三频测量结果

Fig. 5 Measurement result of three frequencies using AOM

整个激光发射部分,除了发射光路外,其余种子激光器、声光调制器、连续光和频等各部件之间均采用光纤连接,并利用 Labview 软件结合系统时序进行自动控制,使系统工作稳定性好、可靠性高、硬件调整少、维护方便,有利于实现移动或无人值守的钠层多参量探测。

3.2 光学接收单元

光学接收部分采用一台 400 mm 口径接收望远镜,望远镜焦平面上放置 1 根光纤接收竖直方向钠层回波光信号。光信号经过准直器和一个 200 mm 直径光学斩波器后,采用带宽为 1 nm 的窄带滤光片对其进行滤光,并利用高灵敏光电探测器 H7421-40 将光信号转换成电信号。

3.3 检测控制单元

MCA-3 光子计数卡用于采集光电倍增管收集到的激光雷达回波信号,不同频率(f_0 、 $f_0 \pm 585$ MHz)的回

波信号会被 MCA-3 采集卡标记并分别保存到各自的数据文件中。此外,计算机还负责整机时序控制,包括三波长光纤开关自动切换、三频回波信号接收、收发同步等,确保各单元协同工作。系统时序图如图 6 所示。

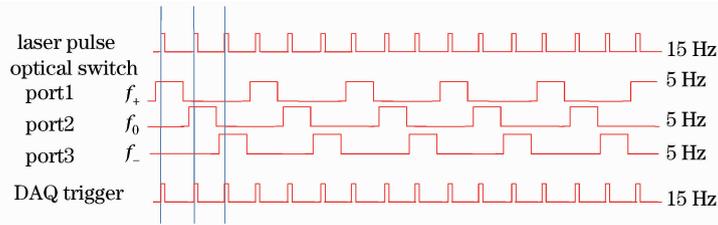


图 6 全固态钠激光雷达系统工作时序

Fig. 6 Timing diagram of the all-solid-state sodium lidar

4 观测结果及分析

该全固态窄带钠层荧光激光雷达系统已初步完成了研制,并在北京延庆激光雷达台站开展了初步观测。图 7 给出了垂直方向上三个频率(f_+ , f_0 , f_-)的激光雷达原始回波光光子数信号,每个数据的积分时间约为 40 s,激光累积脉冲数为 600 发,对应每个频率各 200 发。从图中可看出此时 f_0 通道对应的信号最强, f_+ 和 f_- 两个频率对应于 D_{2a} 谱线峰值两侧,因此信号较弱。

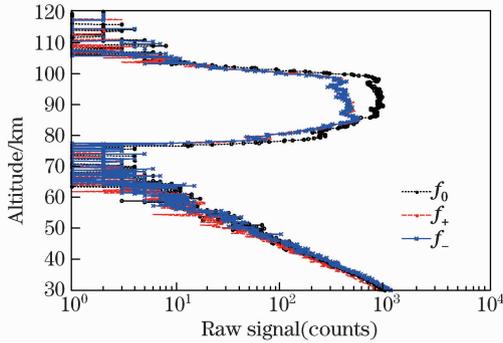


图 7 全固态钠荧光激光雷达回波光光子廓线

Fig. 7 Echo-photon profiles at three frequencies of the all-solid-state sodium fluorescence lidar

利用上述原始回波信号,经过本底噪声扣除、距离平方修正等反演处理,并利用温度反演矫正曲线获得了钠层温度。图 8 给出了利用 2015 年 1 月 8 日观测到的回波信号反演获得的钠原子数密度廓线[图 8(a)]和钠层温度廓线[图 8(b),实线为激光雷达测量的中层顶区域钠层温度,虚线为 NRLMSISE-00 大气模式温度,黑色短横线为回波数据温度反演误差]。两组结果的时间分辨率为 45 min,空间分辨率为 900 m。从图 8(b)中可看出激光雷达的回波数据温度反演误差在 82~102 km 的范围内小于 2 K,在钠层峰值附近的误差最小,绝对误差小于 1 K。激光雷达的温度探测结果与 NRLMSISE-00 模式在同一时间地点给出的随高度变化温度曲线趋势大体一致,从 82 km 开始温度随高度降低,在 100 km 附近温度最低,此后温度随高度再次升高。但激光雷达探测的温度与模式输出的结果在绝对值上存在一定的差异,这是由于模式温度代表气候统计平均结果,本身并不能够准确地模拟出某一地点实时的温度变化,而激光雷达探测的温度属于实测数据,受高空大气环境短时间内剧烈变化的影响,如重力波等对温度结构的调制。因此,该系统温度探测结果与模式的差别仍属于合理的范围之内。这说明本全固态激光雷达已经具备钠层温度的基本探测能力。

5 结 论

报道了我国第一台全固态窄带钠层荧光激光雷达系统。采用 1064 nm 和 1319 nm 单模窄线宽种子激光分别注入两个 Nd:YAG 激光谐振腔并进行脉冲和频的全固态 589 nm 激光系统作为发射光源。利用钠原子无多普勒饱和吸收信号通过数字智能反馈软件进行原子稳频,通过光纤 AOM 三频切换技术结合光纤开关自动控制,实现发射激光在三个频率自动循环切换工作。激光发射和光学接收部分中光学连接部

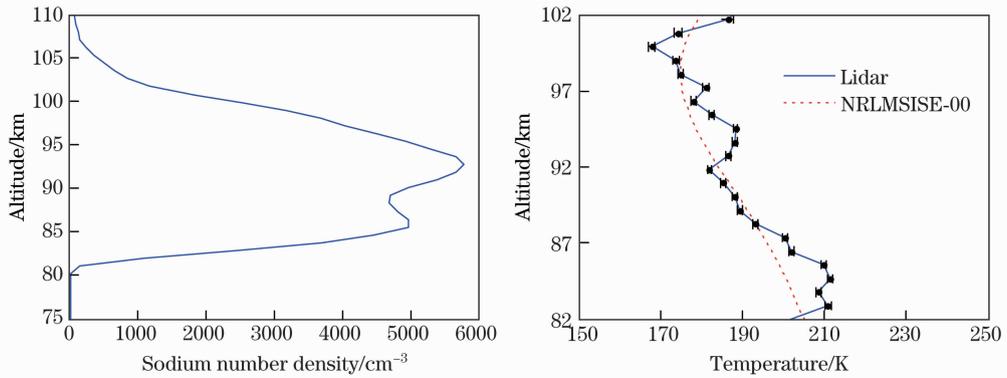


图 8 北京上空钠层原子数密度和温度测量结果

Fig. 8 The sodium number density and temperature measurement results over Beijing

件均采用光纤方式,增加了系统可靠性,降低了系统调整难度。本系统已在北京延庆激光雷达台站进行了初步测试实验,目前已实现钠密度和顶层温度的探测,并将温度探测结果与模式进行了对比,结果显示两者符合较好。这些结果初步表明了该方案的技术可行性,验证了其初步探测功能。

参 考 文 献

- 1 Bowman M R, Gibson A J, Sandford M C W. Atmospheric sodium measured by a tuned Laser Radar[J]. Nature, 1969, 221(5179): 456-457.
- 2 Gong Shunsheng, Zeng Xizhi, Xue Xinjian, et al.. First sodium layer observation over Wuhan, China by lidar[J]. Science in China (Series A), 1997, 27(4): 369-373.
龚顺生, 曾锡之, 薛新建, 等. 中国武汉上空钠层的首次激光雷达观测[J]. 中国科学: A 辑, 1997, 27(4): 369-373.
- 3 S S Gong, G T Yang, J M Wang, et al.. Occurrence and characteristics of sporadic sodium layer observed by lidar at a mid-latitude location [J]. J Atmos Solar-Terr Phys, 2002, 64(18): 1957-1966.
- 4 S S Gong, G T Yang, J M Wang, et al.. A double sodium layer event observed over Wuhan, China by lidar[J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(5): 1209.
- 5 Cheng Xuewu, Gong Shunsheng, Li Faquan, et al.. Daytime observation technology of lidar by using atomic optical filter[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(3): 406-410.
程学武, 龚顺生, 李发泉, 等. 采用原子滤光的激光雷达白天观测技术[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 406-410.
- 6 She C Y, Latifi H, Yu J R, et al.. Two-frequency lidar technique for mesospheric Na temperature measurements[J]. Geophys Res Lett, 1990, 17(7): 929-932.
- 7 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(17): 1771-1774.
- 8 She C Y, Sherman J, Yuan T, et al.. The first 80-hour continuous lidar campaign for simultaneous observation of mesopause region temperature and wind[J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(6): 1319-1323.
- 9 Hu Xiong, Yan Zhaoai, Guo Shangyong, et al.. Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region[J]. Chinese Sci Bull, 2011, 56(3): 247-253.
胡 雄, 闫召爱, 郭商勇, 等. 钠荧光多普勒激光雷达测量中间层顶区域大气温度[J]. 科学通报, 2011, 56(3): 247-253.
- 10 T Li, X Fang, W Liu, et al.. Narrow band sodium lidar for the measurements of mesopause region temperature and wind[J]. Appl Opt, 2012, 51(22): 5401-5411.
- 11 T D Kawahara, T Kitahara, F Kobayashi. First mesopause temperature measurements using sodium lidar observations in the Antarctic region[J]. Adv Polar Upper Atmos Res, 2001, 15: 23-31.
- 12 Barclay Clemesha, Dale Simonich, Paulo Batista. Sodium lidar measurements of mesopause region temperatures at 23°S[J]. Adv Space Res, 2011, 47(7): 1165-1171.
- 13 She C Y, Yu J R, Latifi H, et al.. High-spectral-resolution fluorescence light detection and ranging for mesospheric sodium temperature measurements[J]. Appl Opt, 1992, 31(12): 2095-2106.
- 14 Papen G C, Pfenninger W M, Simonich D M. Sensitivity analysis of Na narrowband wind-temperature lidar systems[J]. Appl Opt, 1995, 34(3): 480-498.

栏目编辑: 何卓铭