

文章编号: 0258-7025(2007)03-0406-05

采用原子滤光的激光雷达白天探测技术

程学武, 龚顺生, 李发泉, 戴 阳, 宋 娟, 王嘉珉, 李奉延

(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)

摘要 在已有的双波长高空探测激光雷达的基础上, 通过采用钠原子滤光器技术以及配合相应的关键技术, 使得其中的钠层荧光通道具有了白天探测能力。由于钠原子滤光器极窄的滤光带宽和极强的带外抑制, 使得即使在中午太阳背景光最强的时段, 也能以光子计数方式探测到 80~110 km 高空钠层的微弱回波信号。实验观测结果表明, 该技术已具备了对高空钠层的全时段探测能力, 从而使利用激光雷达对我国高层大气进行 24 h 连续探测研究成为可能。

关键词 激光技术; 激光雷达; 白天探测; 钠层荧光; 原子滤光; 原子稳频; 光学定位雷达

中图分类号 TN 958.98 **文献标识码** A

Daytime Observation Technology of Lidar by Using Atomic Optical Filter

CHENG Xue-wu, GONG Shun-sheng, LI Fa-quan,
DAI Yang, SONG Juan, WANG Jia-min, LI Feng-yan

(State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics,

Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract Basing on the dual-wavelength high altitude detecting lidar that we have developed, the daytime observation ability has been realized in its sodium fluorescence channel by employing Na (sodium) atomic optical filter and other relevant technologies. Because of very narrow passband and very high out-of-band suppression of the Na atomic optical filter, the lidar echo at 80~110 km altitude can be obtained even in the noon-time when the background light from the sun is very strong. The ability of 24 hours continuous observation of the lidar system has been demonstrated by the preliminary observation result. This development makes the all time detection and investigation of high altitude atmosphere over our country becoming possible.

Key words laser technique; lidar; daytime observation; Na fluorescence; atomic optical filter; atomic frequency stabilization; optic positioning lidar

1 引 言

中国科学院武汉物理与数学研究所已研制成的双波长高空探测激光雷达, 能对 30~80 km 和 80~110 km 两段高空范围进行同时探测^[1]。但该激光雷达只能在夜间工作, 而不具备 24 h 连续探测能力。这是因为, 高空探测激光雷达的回波信号太弱, 需采

用光子计数累加才能获得激光雷达回波。因此, 白天强烈的太阳光就成了一种极为严重的背景光干扰, 迫使绝大多数高空探测激光雷达只能在夜间(地方时约 19:00~5:00)工作。这对中高层大气的连续性探测研究是不利的。原子滤光器是迄今为止滤光带宽最窄、带外抑制最强的一种滤光器件, 特别适用于对背景光抑制要求极高的技术领域。而文献[1]

收稿日期: 2006-07-06; 收到修改稿日期: 2006-10-12

基金项目: 国家 973 计划(G2000078400)资助项目。

作者简介: 程学武(1975—), 男, 土家族, 湖南石门县人, 硕士研究生, 主要从事激光雷达和激光通信方面的研究工作。

E-mail: cxw18@263.net

导师简介: 龚顺生(1942—), 男, 湖北人, 研究员, 博士生导师, 目前研究方向为激光雷达和激光遥感。

E-mail: gongss@wipm.ac.cn (通信联系人)

的双波长高空探测激光雷达中的钠层荧光通道工作波长为589 nm,正好与钠原子滤光器的工作波长匹配,故可用来实现钠层荧光激光雷达的白天探测。目前,利用原子滤光技术实现激光雷达白天探测的只有美、德等少数几个国家^[2,3],我国则是在更为简单的发射激光(成本更低、可靠性更强)和更低纬度的城市环境(需克服更强的背景光干扰)下,实现了钠层荧光的白天探测。

2 白天探测激光雷达技术方案

在双波长高空探测激光雷达中,与钠层荧光通道白天探测技术相关的原理框图如图 1 所示。和普通钠层荧光激光雷达一样^[4,5],白天探测钠层荧光激光雷达也由激光发射、回波接收和信号处理三大主要部分组成。但对于白天探测技术而言,首先必须在其接收通道采用极为严格的滤光技术。这里,采用的是钠原子法拉第滤光器(FADOF),并采用窄带干涉滤光器作为辅助滤光。与此同时,其发射通道的激光器还必须具有与钠原子滤光器相匹配的带宽和中心波长。为此采用了腔内标准具技术,压缩多模脉冲染料激光器的线宽,并采用原子稳频技术,使激光器的波长能长期自动地稳定在钠原子滤光器的透射波长上。

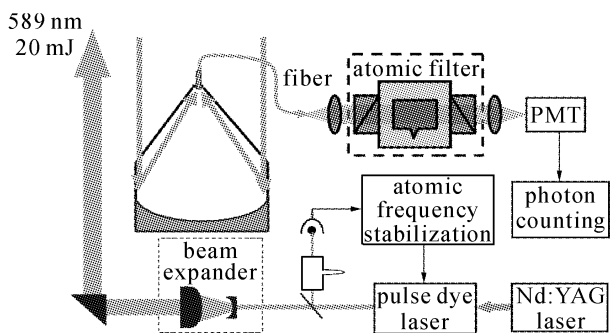


图 1 白天探测钠层荧光激光雷达原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of the daytime detection lidar

3 钠原子滤光器的原理与技术

原子法拉第滤光器的原理如图 2 所示^[6]。它由置于纵向磁场及恒温炉中的钠原子泡和位于其两端的一对正交偏振棱镜组成。从其左边入射的光,如果波长不能激发钠原子泡中特定的能级跃迁,则将被正交偏振棱镜所阻挡;只有某些特定波长的入射光,如钠原子的 D_2 共振光(588.995 nm),才能激发泡中钠原子的能级跃迁,在合适的纵向磁场和恒温温度设定下,可使该波长的光在泡中发生 90° (或其

奇数倍)的偏振旋转,从而顺利地透过正交偏振棱镜。由于原子泡对其共振波长有极其严格的选择性,以及正交偏振棱镜对非共振波长的极高抑制性,使原子滤光器具有比普通光学干涉滤光片窄得多的滤光带宽和高得多的带外抑制性能,因此很适合用于激光雷达或自由空间激光通信等应用领域,以提高其对强烈太阳背景光的抑制能力^[7,8]。

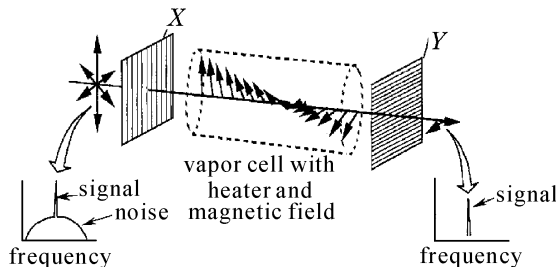


图 2 原子滤光器原理图

Fig. 2 Principle of atomic optical filter

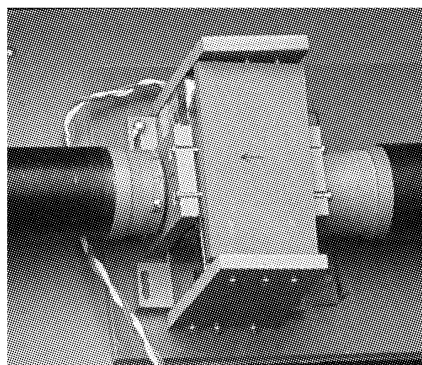


图 3 钠原子滤光器实物照片

Fig. 3 A photograph of Na atom optical filter

钠原子滤光器外形示于图 3。该原子滤光器的磁场由永久磁体产生,磁场强度约为0.2 T。所用钠原子泡的泡长为2 cm。偏振棱镜选用格兰-汤姆逊型,正交抑制率约为 10^{-5} 。钠泡恒温温度可在 $50 \sim 200^\circ\text{C}$ 以内调整,恒温精度优于0.5%。实验上,可通过调整钠泡温度来改变透射谱型,以达到激光雷达所需的最佳滤光带宽和透射率。由于原子滤光器的特性主要由原子自身的属性确定,磁场、温度等参数对其特性的影响较小,而且,激光器线宽和原子滤光器带宽均在 $2 \sim 3\text{ GHz}$ 左右,微小的温度、磁场变化,以及热运动产生的多普勒频移对原子滤光器特性的影响更小^[9]。例如,宽带系统的实验表明,当温度改变 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以上时,才能对原子滤光器的透射或带宽产生可以观测到的影响。

为方便起见,直接利用激光雷达系统本身的脉冲染料激光器来测量原子滤光器的透射特性,以确定合适的原子滤光工作参数。典型的测量结果如图

4 所示。可见,由于激光处于脉冲工作状态,使透射谱型的噪声稍大。但从这些结果仍可正确地确定所需要的原子滤光器工作参数。图中同时给出了在激光波长(频率)扫描下,钠原子空心阴极灯的光电流信号(图中幅度较低的单峰曲线)和钠原子滤光器的透射信号(图中幅度较高的多峰曲线)。其中,前者用于标定钠原子的共振波长,后者则用于表征原子滤光器的透射特性。图 4(a)表示钠原子滤光器在钠原子的共振波长处有单峰透射,但由于工作温度太低,透射率很小;图 4(b)是工作温度合适的结果,透射率较高,且透射主峰也在钠原子共振波长处;图

4(c)则是工作温度太高的情形,虽然透射率很高,但透射不在钠原子的共振波长上,而是出现在其两侧。实验选用图 4(b)所示的工作参数:泡温约 165 °C,磁场约 0.21 T。在此条件下,原子滤光器的峰值透射约为 50% (对偏振光),其滤光带宽约为 2~3 GHz(图 4(b)显示透射带宽稍大于 2~3 GHz,是因为原子滤光器带宽和激光器线宽卷积叠加的结果)。上述原子滤光器参数与国外报道的结果相近^[2],所不同的是,所用的原子泡较长,磁场较高,因此可在更低的工作温度(低 10~20 °C)下获得相近的结果,有利于提高原子滤光器的可靠性和寿命。

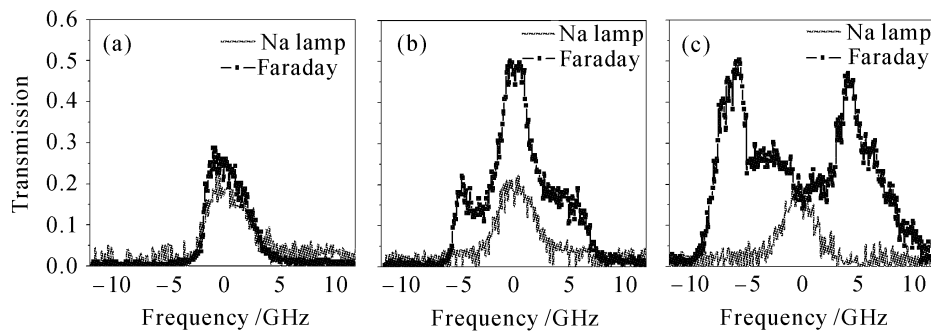


图 4 钠原子滤光器的几种透射谱型

Fig. 4 Several transmission curves of Na atomic optical filter

4 白天探测的系统技术

为实现激光雷达的白天探测,采用原子滤光技术是其前提条件。除此之外,在激光雷达的发射系统和接收系统还必须采取一些相应的技术措施,才能最终达到实现白天探测的目的。

首先,仅用原子滤光器尚不足以克服太阳背景光噪声对激光雷达信号的干扰,还必须压缩激光雷达的接收视场,以便从空间上进一步降低背景光的影响。激光雷达采用 $\phi 1.5\sim 2$ mm 光纤在望远镜焦面接收,将接收视场控制在 $0.75\sim 1$ mrad。相应地,在 589 nm 发射激光束中采用扩束镜技术,将其发散控制在 0.5 mrad 以内。这种参数设置要配合有效的联调手段,才能保证良好的收发匹配。此外,为使来自接收光纤的钠层荧光回波光顺利地通过具有一定长度的原子滤光器,需对接收光纤的出射光采用严格的光路准直技术,以增加对回波光的透射效率,并尽量避免背景光在原子滤光器中的散射;由于原子滤光器磁场会向外泄漏,而光电倍增管对磁场又非常敏感,因此需要将两者间隔一定距离并采用良好的磁场屏蔽措施;对整个接收通道必须进行严格的蔽光处理,防止背景日光的直接漏入。

同时,在激光雷达接收通道采用窄带原子滤光

器后,其发射激光的线宽也必须与之匹配,以提高激光能量利用率。在普通多模脉冲染料激光器中采用腔内标准具技术,将激光线宽从约 10 GHz 压缩到约 2 GHz,达到与原子滤光器带宽和钠原子吸收线宽均基本匹配的目的。与国际上采用的单模脉冲激光相比,具有成本低和可靠性高的优点。此外,为克服脉冲染料激光波长的漂移,使之能长期与稳定的原子滤光器透射波长一致,对激光频率(波长)采用了原子稳频技术。稳频基准来自空芯阴极灯中钠原子的 D_2 跃迁,并采用了数字智能控制方式,使激光频率能自动地长期稳定于钠原子的 D_2 线跃迁波长。智能控制是通过实时检测钠原子空芯阴极灯的光电流信号,并通过一定的算法驱动染料激光器的频率微调机构,从而使光电流信号最大化的原理进行的^[10],与在半导体激光原子稳频中利用的原理相同^[11]。实验结果表明,采用此稳频技术后,在 24 h 的连续观测时间内,可使光电流信号的变化控制在 $\pm 5\%$ 以内,相应的频率稳定度优于 ± 250 MHz,从而有效地克服了发射激光波长的长期漂移对回波信号的影响。

在原子滤光接收通道中采用光纤耦合后,虽然大大方便了系统的安装和调整,但由于光纤的退偏

作用,会使原子滤光器的透射率降低大约一半。因此,下一步的改进是在接收通道中采用两个相同的原子滤光器,以分别接收回波中的各种偏振分量。

白天探测激光雷达的发射系统和接收系统的照片分别示于图 5(a)和(b)。

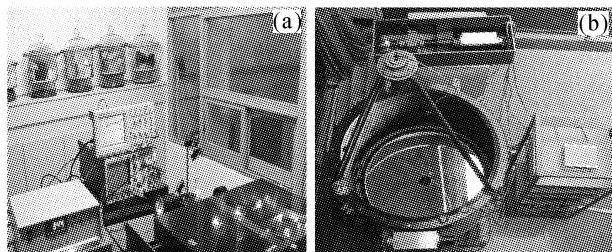


图 5 白天观测激光雷达实物照片

(a) 发射系统;(b) 接收系统

Fig. 5 Pictures of daytime observation lidar system

(a) emitting system; (b) receiving system

5 探测性能检验

为考察原子滤光器对背景光噪声的实际抑制能力,分别采用原子滤光器和干涉滤光器对天空背景光进行了24 h连续的对比测量。测量采用激光雷达的接收系统进行,在两个条件相同的原子滤光器通道和干涉滤光器通道中对天空背景进行同时探测,其结果示于图 6。由图 6 可见,采用干涉滤光器时,在清晨大约5:00以后,背景光噪声将很快地成数量级增长,大约到6:00左右,钠层荧光信号就会被完全淹没在背景光噪声中,并很快使光电探测器饱和;而采用原子滤光器时,即使到正午时段,背景光噪声虽然也有很大增加,但并没有导致光电探测器的饱和,也没有将探测信号淹没。图 6 显示,原子滤光器对其背景光的抑制能力比干涉滤光片提高约 3 个数量级,从而使激光雷达具有了在白天太阳辐射最强时段对高空钠层回波信号的探测能力。

为考察激光雷达在采用原子滤光器后,对钠层

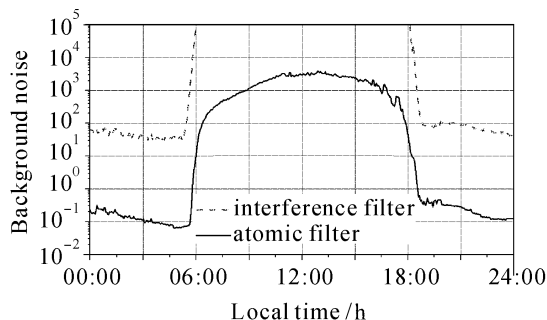


图 6 干涉滤光和原子滤光的背景光噪声比较

Fig. 6 Comparison of lidar background noise by using interference filter and atomic filter

特性的探测是否会有影响,在夜间同一时段,对采用普通干涉滤光器和采用钠原子滤光器所探测的高空钠层廓线进行了比较。为使两种测量的条件尽量相同,测量在同一接收系统中进行:先用原子滤光器获取一组回波,然后迅速去掉原子滤光器,仅用干涉滤光器获另一组回波。测量结果如图 7 所示。由图 7 可见,采用干涉滤光器和采用钠原子滤光器所探测到的钠层廓线,虽然强度不同,但经相对归一化处理,其在形态和分布等方面都非常一致。说明采用原子滤光技术后,并不影响激光雷达对高空钠层各种特性的探测。

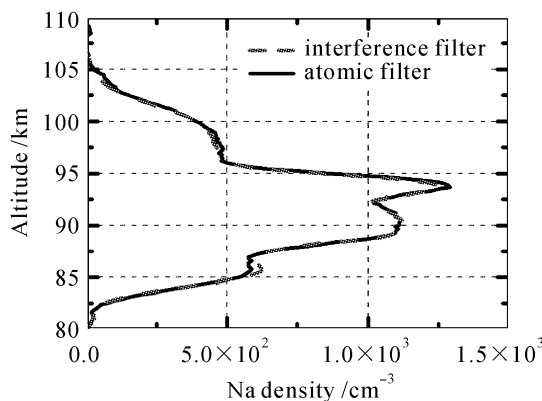


图 7 干涉滤光和原子滤光的探测性能比较

Fig. 7 Comparison of detection performance by using interference filter and atomic filter

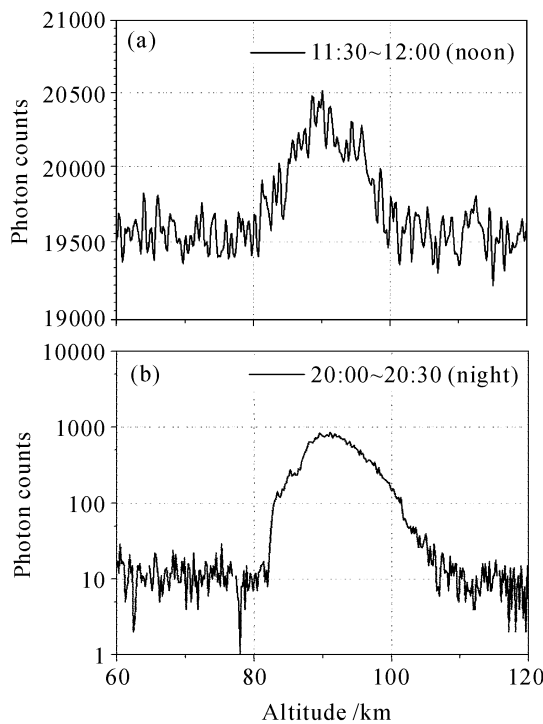


图 8 中午(a)和夜间(b)钠层探测结果 (经 0.5 min 累加处理)

Fig. 8 A Na layer profile in the midday (a) and midnight (b) (after 30 min average)

图 8(a)所示即为采用本钠层荧光激光雷达在白天中午时段经约 30 min 累加所获得的高空钠层回波。可见,虽然这时太阳背景噪声的绝对值还是很高,但噪声的相对起伏则已低于钠层回波信号的强度。虽然按噪声的绝对值计算,图 8(a)所示回波的信噪比只有大约 0.05。但由于太阳背景噪声的直流成分容易扣除,影响信号提取的是背景噪声的相对起伏。若按噪声的相对起伏计算,此时信噪比约为 5~6,故从图 8(a)中已可明显地看出高空钠层回波的轮廓和细节,即可以提取高空钠层的信息。这是太阳辐射背景最强时段的情况,作为对比,图 8(b)中还给出了夜间探测的结果。可见,这时背景光噪声很小,无论按其绝对值或相对起伏计算的信噪比都很高(约 10^2 以上),可以很好地提取钠层信息。

6 结 论

采用原子滤光技术和相应的发射激光技术,实现了对我国高空钠层的 24 h 连续观测。目前,该激光雷达已进入观测实验状态,最长的连续观测时间约 50 h。这种强背景光抑制能力的获得,提升了我国高空探测激光雷达的技术水平,有利于开展太阳和潮汐波作用对高空钠层结构及动力学影响的研究,也有利于推广原子滤光技术在其他光电探测系统中的应用。

参 考 文 献

- 1 Cheng Xuewu, Song Juan, Li Faquan *et al.*. Dual-wavelength high altitude detecting lidar technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):601~606
程学武,宋娟,李发泉等. 双波长高空探测激光雷达技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):601~606
- 2 H. Chen, M. A. White, David A. Krueger *et al.*. Daytime mesopause temperature measurements with a sodium-vapor dispersive Faraday filter in a lidar receiver [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(15):1903~1905
- 3 Cord Fricke-Begemann, Matthias Alpers, Josef Hoffner. Daylight rejection with a new receiver for potassium resonance temperature lidars [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(21):1932~1934
- 4 Gong Shunsheng, Zeng Xizhi, Xue Xinjian *et al.*. First time observation of sodium layer over Wuhan, China by sodium fluorescence lidar [J]. *Science in China*, 1997, **40**(11):1228~1235
- 5 Ai Yong, Zhang Xunxie, Lu Shu *et al.*. The shape characteristics of Na atomic layer over Wuhan observed by lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(7):652~656
艾勇,张训械,鲁述等. 激光雷达观测的武汉上空钠原子层形态特征[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(7):652~656
- 6 Cheng Xuewu, Li Faquan, Lin Zhaoxiang *et al.*. Properties and applications of Faraday anomalous dispersion optical filter [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2003, **1**(1):41~43
程学武,李发泉,林兆祥等. 法拉第原子滤光器的特性及应用[J]. *光学与光电技术*, 2003, **1**(1):41~43
- 7 H. Chen, C. Y. She, Paul Searcy *et al.*. Sodium-vapor dispersive Faraday filter [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(12):1019~1021
- 8 Zhilin Hu, Xianping Sun, Yiping Liu *et al.*. Temperature properties of Na dispersive Faraday optical filter at D_1 and D_2 line [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(4):289~293
- 9 Zhang Yundong, Jiang Xin, Bi Yong *et al.*. Numerical calculation of sodium Faraday anomalous dispersion optical filter [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1999, **31**(5):18~21
掌蕴东,姜心,毕勇等. 钠 Faraday 反常色散光学滤光器的数值计算[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1999, **31**(5):18~21
- 10 Cheng Xuewu, Li Faquan, Song Juan *et al.*. Atomic and molecular frequency stabilization of pulse dye laser and its method [P]. China Invention Patent, No. 200510019816. X
程学武,李发泉,宋娟等. 原子分子稳频的脉冲染料激光器及其稳频方法[P]. 中国发明专利,申请号:200510019816. X
- 11 Li Faquan, Wang Yuping, Cheng Xuewu *et al.*. Faraday anomalous dispersion optical filter atomic frequency-stabilized semiconductor laser through optical feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1317~1320
李发泉,王玉平,程学武等. 半导体激光器的原子法拉第反常色散光学滤波器光反馈稳频[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1317~1320