

高空钠层、钾层同时探测的激光雷达

程学武^{1,2} 杨国韬² 杨 勇^{1,3} 李发泉¹ 王继红² 刘迎杰^{1,3} 李勇杰^{1,3} 林 鑫^{1,3} 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重点实验室, 北京 100190
³中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 通过一台 Nd:YAG 激光器抽运两台脉冲染料激光器, 产生 589 nm 和 770 nm 两种可调谐波长激光, 分别激发钠层和钾层原子的共振荧光, 再通过双光纤焦面分光接收, 实现了利用一台激光雷达同时探测高空钠层和钾层, 从而为更经济、更有效地开展高空钠层和钾层比较性探测研究提供了一种新的手段。

关键词 遥感; 激光雷达; 钠层; 钾层; 双波长; 原子稳频

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0214001

Na Layer and K Layer Simultaneous Observation by Lidar

Cheng Xuewu^{1,2} Yang Guotao² Yang Yong^{1,3} Li Faquan¹ Wang Jihong²
Liu Yingjie^{1,3} Li Yongjie^{1,3} Lin Xin^{1,3} Gong Shunsheng¹

¹State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei, 430071, China
²State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China
³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Abstract A Nd:YAG laser emits two 532-nm laser beams to pump two pulsed dye lasers, respectively. Then one dye laser will emit a 589-nm laser beam for Na layer detection, while the 770-nm laser beam for K layer detection is obtained from the other dye laser. The scattering echoes of these two laser beams are collected with the same telescope, and transmitted by two fibers set in the telescope's focal plane, respectively. Therefore, we have realized the simultaneous observation of Na layer and K layer by using only one lidar system and have gotten a new and economic detection tool for upper atmospheric Na layer and K layer observation.

Key words remote sensing; lidar; Na layer; K layer; dual-wavelength; atomic frequency stabilization

OCIS codes 280.3640; 010.3640; 290.1310; 010.3920; 120.0280; 300.6210

1 引 言

在地球大气上空 80~110 km 高度, 存在着一些由金属原子、离子所组成的层段, 这些层段包括钠层、钾层、铁层、钙原子层和钙离子层等, 对这些金属原子和离子层段存在原因以及其发展变化的探测与研究, 在空间物理、大气科学、通信导航等领域具有重要的科学意义和应用价值, 因此, 世界各国发展出

多种类型的激光雷达, 并大量开展了对这一层段的探测和研究^[1~7]。其中由于钠层共振荧光激光雷达的发射激光波长 589 nm 比较容易产生, 而且地球大气层中钠原子的浓度也相对较高, 对钠层的探测也变得相对容易。为此, 国际上大多数激光雷达均以钠原子作为示踪开展对此层段的探测。然而, 近年来人们对钾、铁、钙、钙离子等层段的探测表明, 其

收稿日期: 2010-05-11; **收到修改稿日期**: 2010-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(10978003, 40905012)、中国科学院空间科学与应用研究中心空间大气学国家重点实验室开放课题和武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验基金资助课题。

作者简介: 程学武(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事激光雷达和原子滤光探测技术等方面的研究。

E-mail: lidar@wipm.ac.cn

表现出与钠层不同的特性^[8,9]。如能实现对钠层、钾层的同时探测,将非常有利于了解这些层段大气的光化学、动力学等诸多复杂现象,为大气科学研究和空间天气监测预报提供有效手段和有力证据。

中国科学院武汉物理与数学研究所于 2004 年研制成功一台双波长高空探测激光雷达,通过在一台激光雷达中同时利用瑞利散射和钠层荧光两种工作机制,实现了对 30~110 km 大气高程的连通性探测,并将钠层荧光通道发展到全天时(24 h 连续)探测^[10,11]。在此工作基础上,由中国科学院空间科学与应用研究中心合作项目支持,在发射激光部分采用两次倍频余光复用技术,使一台 Nd:YAG 激光器同时产生两束 532 nm 激光,分别抽运两台脉冲染料激光器,同时获得 589 nm 可调光束激发钠层和

770 nm 可调光束激发钾层;在光学接收部分采用双光纤焦面分光技术,实现一台接收望远镜同时接收钠层和钾层荧光回波。实现了使用一台激光雷达对钠层、钾层原子的同时探测,从而大大拓展了对高空金属层原子的探测效率和能力。本文将主要介绍钠层、钾层同时探测激光雷达的原理、技术及其初步探测结果。

2 钠、钾层同时探测激光雷达技术

该钠层、钾层多物种同时探测激光雷达方案是在已有的双波长高空探测激光雷达基础上,对其进行系统改进和升级而成。其原理如图 1 所示,主要技术指标如表 1 所示。

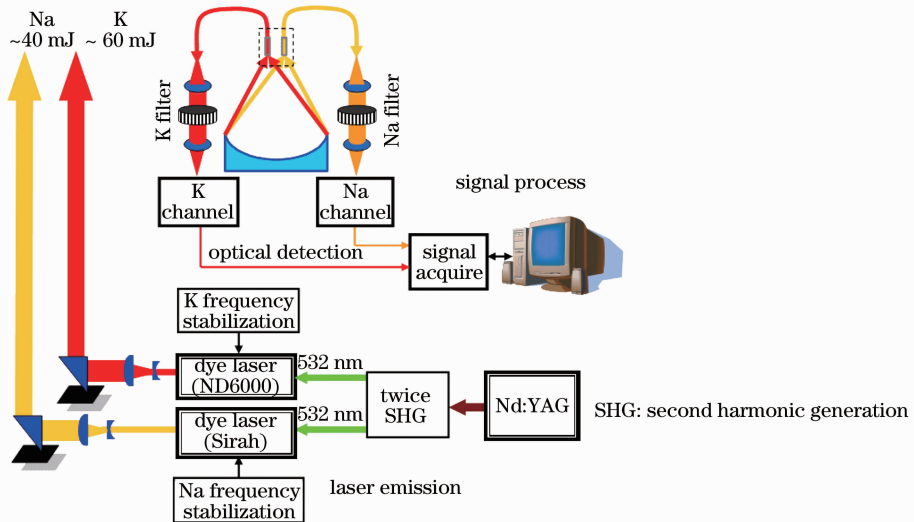


图 1 钠、钾层同时探测的激光雷达原理

Fig. 1 Principle of Na and K layer simultaneous observation by lidar

表 1 钠、钾层同时探测激光雷达的主要技术指标

Table 1 Key parameters of Na and K lidar

Detection species	K atomic	Na atomic
Laser type	ND6000	Sirah
Wavelength /nm	770	589
Pulse energy /mJ	~60	~40
Beam divergence /mrad	~0.5	~0.5
Repetition rate /Hz	30	30
Telescope diameter /mm	~φ1000	~φ1000
Telescope focal length /mm	~2100	~2100
Field of view /mrad	~1	~1
Filter bandwidth /nm	1	1
Detector	Photon counts	Photon counts
Time resolution /min	2.8	2.8
Range resolution /m	192	192

该激光雷达系统由激光发射部分、光学检测部

分和信号处理部分组成。激光发射部分采用了两次倍频余光复用技术: Nd:YAG 激光器的基波光经第一次倍频后产生一束高功率 532 nm 激光,剩余的基波光通常被耗散掉,将其剩余的基波光抽运第二倍频器,再产生另一束高功率 532 nm 光束,此后,剩余的基波光才被耗散。通过该技术,使一台 Nd:YAG 激光器同时产生了两束高功率 532 nm 激光束,不仅大大提高了基波激光能量的利用效率,还能通过对两倍频效率的调节灵活控制两束 532 nm 激光的强度。将两束 532 nm 激光束中的一束用于抽运 Continuum ND6000 脉冲染料激光器,获得 770 nm 输出激光波长,其能量大约为 60 mJ,用于激发高空钾层荧光;另一束 532 nm 激光用于抽运 Sirah Cobra Stretch 脉冲染料激光器,获得 589 nm 输出激光波长,其能量大约为 40 mJ,用于激发高空

钠层荧光。光学检测部分采用了双光纤焦面分光技术：用一台接收望远镜对双波长回波的同时接收与分光。两根光纤的一端并排地置于望远镜焦平面，使之分别接收 589 nm 和 770 nm 回波光信号。由于两光束相对偏角极小，使约 100 km 高空处两光束中心距仅约 100 m。考虑到激光束的发散，故两光束在高空金属层的照射区域基本相连，即基本为双光束共区域(或邻区域)探测。光纤的另一端分别送入钠层通道和钾层通道，均经各自的准直和滤光后，送入各自的光电倍增管，用于同时获得 80~110 km 高空的钠层和钾层回波信号。

为了实现钠、钾层的长期稳定探测，在激光发射部分还采用了原子稳频技术^[12]。利用钠泡和钾泡作为鉴频基准源，从两脉冲染料激光器的输出激光中分出少量光作为参考光，分别送入钠、钾原子共振泡中，产生的鉴频共振信号经 A/D 采样转换成数字信号后送到计算机，经计算机处理后，由计算机反馈控制脉冲染料激光器内的步进电机，进而推动光栅改变输出激光波长，实现输出激光波长长期稳定地锁定在钠、钾原子共振波长上。

3 钠钾 D1 和 D2 线探测比较

根据激光雷达方程^[1]，共振荧光回波信号强度除了与发射激光能量、望远镜面积、接收系统效率等相关外，更重要的是还与大气透射率、振子强度、大气中金属层原子浓度等密切相关。激光雷达方程为

$$N(z, \lambda) = k \frac{P \Delta t \Delta z}{z^2} n_c(z) \sigma_{\text{eff}}(\lambda) T_a^2(\lambda) + N_B \Delta t, \quad (1)$$

式中 $N(z, \lambda)$ 为探测回波信号的强度，当回波信号强度微弱到约 10^{-9} W 以下时，通常采用单光子计数的方式， z 为探测高度， λ 为激光波长， k 为系统效率，通常为一个比例常数， P 为激光功率， Δt 、 Δz 分别表示时间分辨率和空间分辨率， $n_c(z)$ 为金属层原子数密度， $\sigma_{\text{eff}}(\lambda)$ 为荧光散射截面，它与吸收振子强度成正比， $T_a(\lambda)$ 为大气单程透射率， N_B 为背景噪声。

由于钠、钾原子都有两条共振谱线(D1 和 D2 线)，对于钠层、钾层激光雷达来说，原则可以使用两条共振谱线中的任意一条作为探测波长，但从(1)式的激光雷达方程仔细分析，其中还存在着很大差异。

对于钠 D1 线和 D2 线，(1)式所有项中最大差别在荧光散射截面不同，钠 D2 线的荧光散射截面约为 D1 线荧光散射截面的 2 倍，因此钠 D2 线回波信号强度应为 D1 线的 2 倍。而对于钾 D2 线与 D1 线，虽然 D2 线的荧光散射截面大约为 D1 线荧光散射截面的 2 倍，但是由于大气中氧气对钾 D2 线(776 nm)波长激光的强烈吸收，其大气单程透射率远远小于钾 D1 线的大气单程透射率。因此在同一探测高度，钾 D2 线回波强度应远远小于钾 D1 线回波强度。为了从实验上进行验证，针对钠、钾激光雷达的 D1 和 D2 谱线进行了实际对比探测，所用激光雷达系统主要参数^[13,14]如表 2 所示。

表 2 钠、钾激光雷达 D1 和 D2 共振线探测参数

Table 2 Parameters of Na and K lidar with D1 and D2 line

Detection species	Na D2 line	Na D1 line	K D2 line	K D1 line
Wavelength /nm	589.158	589.776	766.701	770.108
Pulse energy /mJ	~40	~40	~60	~60
Linewidth(FWHM) /GHz	~1.5	~1.5	~1.8	~1.8
Oscillator strength	0.6408	0.3201	0.6682	0.3327
Filter bandwidth /nm	10	10	10	10

激光雷达探测到的钠原子 D2 线和 D1 线的回波信号比较如图 2(a)所示。比较表明，钠层 D1 和 D2 线都能探测到，且探测钠层高度、形态、廓线等都基本相像，甚至钠层的双峰和尖峰都非常相似。只不过钠层 D2 线的回波信号强度是 D1 线的 2 倍，这也与表 2 中钠 D2 线的振子强度是 D1 线的 2 倍的结果相吻合。

激光雷达探测到的钾原子 D2 线和 D1 线的探测结果比较如图 2(b)所示。探测表明，在相近的激光能量下，钾原子 D1 线能探测到钾层，而 D2 线则

探测不到钾层。其瑞利部分探测高度 D2 线比 D1 线低 20 多千米。原因在于钾原子 D2 线激光波长 766 nm 正好处于大气中氧气的吸收波长上，因此激光能量衰减非常严重，这导致地基探测激光雷达用钾 D2 线探测不到钾层。

与改造前的钠层荧光激光雷达相比，钠层回波强度并没有因采用钠钾同时探测技术后探测性能下降，其主要原因在于，该改造对染料激光器的激光能量、激光线宽等几乎没有改变。

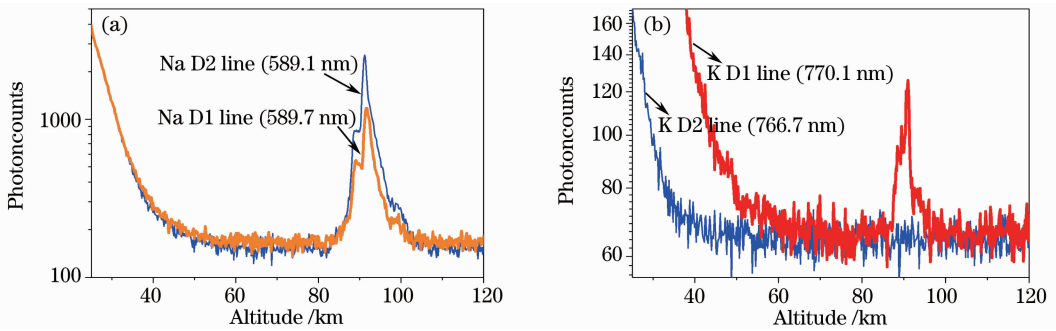


图 2 钠、钾 D1 和 D2 线激光雷达探测比较。(a)钠回波,(b)钾回波

Fig. 2 Comparison of Na and K D2 line and D1 line detection by lidar. (a) Na echo, (b) K echo

4 初步探测结果

基于 3 节的实验结果,分别选用钠原子 D2 线(589.158 nm)和钾原子 D1 线(770.108 nm)作为钠层、钾层同时探测激光雷达的两种工作波长,由此所获得的钠层、钾层激光雷达典型回波如图 3 所示。由此可见,虽然钾层的回波信号比钠层的回波信号要小很多,但在约 3 min 和 200 m 的时空分辨率下,钾层回波信号仍具有足够的信噪比,能分辨高空钾

层的结构和细节,可有效地用于钠层、钾层结构及变化的比较研究。钠层、钾层同时探测还表明,钾层回波信号强度比钠层回波信号强度小约 2 个数量级,而钠、钾原子在激光能量、共振线的振子强度、大气透射等均处于同一数量级(见表 2),说明钾层原子数密度比钠层小得多,这导致激光雷达对钾层的探测极其困难。

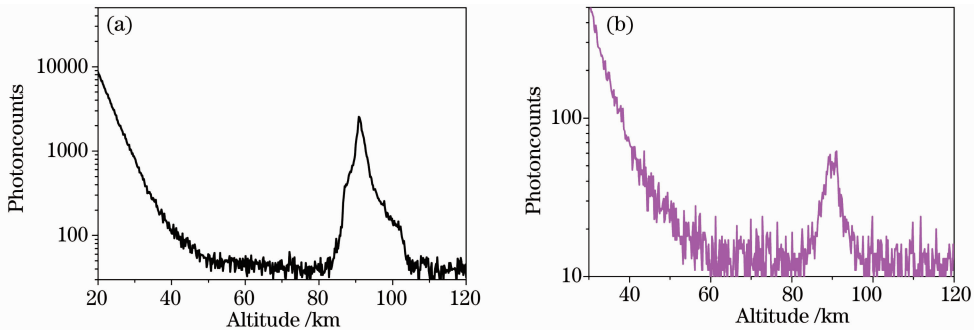


图 3 钠层、钾层原始回波结果。(a)钠层,(b)钾层

Fig. 3 Original echo and density of Na layer and K layer. (a) Na layer, (b) K layer

作为一个例子,图 4 为利用钠层、钾层同时探测激光雷达所获得的一组钠层、钾层同时探测结果,观

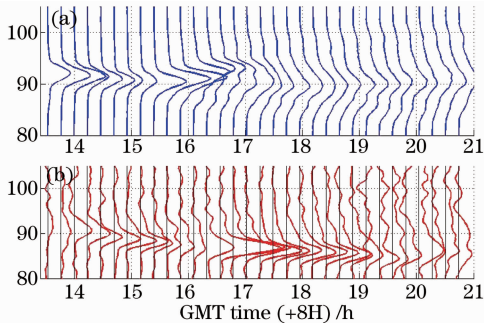


图 4 激光雷达探测的钠层、钾层随时间的演化 (a)钠层,(b)钾层

Fig. 4 Na and K layer evolution with time by lidar observation. (a) Na layer, (b) K layer

测日期为 2009 年 11 月 13 日。从图中可看出,钠层和钾层的时空演化并非完全一致。特别是在格林威治 16 时(当地时间晚上 0 点)左右发生于钠层的突发现象并未在钾层同时产生。可以推测,通过激光雷达对钠层和钾层的进一步比较观测研究,必将获得更多的高空金属原子层结构和变化的相关信息,为空间物理研究和空间环境监测提供一种更加有效的新手段。

5 结 论

采用两次倍频余光复用技术,使一台 Nd:YAG 激光器同时抽运两台脉冲染料激光器,分别产生 589 nm 和 770 nm 两种可调波长激光。并通过原子稳频技术,将两种发射激光波长分别准确和稳定地

锁定于钠原子 D2 共振线和钾原子 D1 共振线上。再配合双光纤焦面分光接收技术,实现一台激光雷达同时探测高空钠层和高空钾层。对钠层和钾层回波强度进行了比较性探测,发现在相类似的条件下,钾层回波信号仅比钠层回波信号小约 2 个数量级。初步探测结果表明,利用该激光雷达,即使信号较弱的钾层回波也具有足够的信噪比,从单个原始回波即可分辨钾层的结构和细节,可有效地应用于高空钠层和高空钾层的比较性探测研究,从而为大气科学研究及空间环境监测提供了一种新型的探测手段。

参 考 文 献

- 1 Takashi Fujii, Tetsuo Fukuchi. Laser Remote Sensing[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005. 179~432
- 2 Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhishen. Environment Monitoring Lidar[M]. Beijing: Science Press, 2001
阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- 3 M. Gerding, M. Alpers, U. von Zahn *et al.*. Atmospheric Ca and Ca⁺ layers: midlatitude observations and modeling[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(A12): 27131~27146
- 4 Xinzhaoh Chu, George C. Papen, Weilin Pan *et al.*. Fe boltzmann temperature lidar: design, error analysis, and initial results from the North and South Poles[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(21): 4400~4410
- 5 Xiankang Dou, Xianghui Xue, Tingdi Chen *et al.*. A statistical study of sporadic sodium layer observed by Sodium lidar at Hefei (31. 8° N, 117. 3° E) [J]. *Ann. Geophys.*, 2009, **27**(6): 2247~2257
- 6 Fan Yi, Shaodong Zhang, Changming Yu *et al.*. Simultaneous observations of sporadic Fe and Na layers by two closely collocated resonance fluorescence lidars at Wuhan (30. 5° N, 114. 4° E), China[J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**: D04303
- 7 Gong Shunsheng, Zen Xizhi, Xue Xinjian *et al.*. First time observation of sodium layer over Wuhan, China by sodium florescence lidar[J]. *Science in China (Series A)*, 1997, **40**(11): 1228~1232
- 8 Chester S. Gardner, Timothy J. Kane, Daniel C. Senft *et al.*. Simultaneous observations of sporadic E, Na, Fe, and Ca⁺ layers at Urbana, Illinois; three case studies[J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(D9): 16865~16873
- 9 Chester S. Gardner. Performance capabilities of middle atmosphere temperature lidars: comparison of Na, Fe, K, Ca, Ca⁺, and Rayleigh system[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(25): 4941~4956
- 10 Cheng Xuewu, Song Juan, Li Faquan *et al.*. Dual-wavelength high altitude 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
- 11 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探测技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 406~410
- 12 Cheng Xuewu, Li Faquan, Song Juan *et al.*. Atomic and molecular frequency stabilization of pulse dye laser and its method [P]. Chinese 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]. 中国专利, 专利号: 200510019816. X
- 13 S. D. Harrell, C. Y. She, Tao Yuan *et al.*. Sodium and potassium vapor Faraday filters revisited: theory and applications [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2009, **26**(4): 659~670
- 14 Donald C. Morton. Atomic data for resonance lines. III. wavelengths longward of the lyman limit for the elements hydrogen to gallium[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2003, **149**(1): 205~238