

文章编号: 1003-501X(2006)09-0001-04

一台监测高空钠层的激光雷达系统

刘小勤¹, 胡顺星¹, 李琛¹, 胡欢陵¹, 张寅超¹, 窦贤康²(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科技大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 介绍了一台监测高空钠层的激光雷达, 通过共振荧光方法探测 80~110km 高度的钠层密度。雷达系统使用直径为 1m 的大口径接收望远镜, 由 Nd:YAG 激光器泵浦染料激光器, 波长 589nm, 脉冲激光能量 77mJ。文中详细介绍了系统结构及光束自动调整、波长校正等系统特征技术, 最后给出系统实测结果并分析。

关键词: 激光雷达; 共振荧光; 钠密度; 大气探测

中图分类号: TN958

文献标识码: A

Lidar for monitoring sodium layer of atmosphere

LIU Xiao-qin¹, HU Shun-xing¹, LI Chen¹, HU Huan-ling¹, ZHANG Yin-chao¹, DOU Xian-kang²(1. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the CAS, Hefei 230031, China;*
2. *School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China*)

Abstract: A new sodium resonance fluorescence lidar is set up, which is for measurements of Sodium density by resonance fluorescence method over 80~110km altitude. A Dye laser, which emits laser pulse with 77mJ pulse energy at wavelength 589nm, pumped by Nd:YAG laser, and 1m aperture receiving telescope are used to achieve the desired performance levels in the lidar system. This paper presents structures of the lidar system and technologic characters of system such as self-aligned, wavelength corrected and signal acquisition. At last, the field test results are reported and analyzed.

Key words: Lidar; Resonance fluorescence; Sodium density; Atmospheric detection

引言

中高层大气或中间层是复杂光化学和动力学相互作用的区域, 是航天、通信、导航和定位等高新技术关注的领域。对中高层大气探测与研究在大气科学和空间物理中具有举足轻重的地位。但由于气球和卫星达不到, 此区域的观测必须使用地对空火箭探测、星载或使用地基遥感技术, 以至该区域可能是大气中最少为人了解的区域。在可调谐染料激光器出现后, 共振荧光雷达成为用于研究高层大气的最有效工具。而位于中间层的钠由于浓度高、共振散射界面大, 成为中间层大气示踪物。钠共振荧光激光雷达探测高层大气钠层中的钠原子浓度分布, 有助于了解钠原子浓度的时、空演变, 并可由此研究流星的活动、平流层和中间层大气的垂直输送过程以及高层大气的光化学反应等高层大气物理过程。钠共振荧光激光雷达因此得到较快的发展, 并不断在地球不同地区(高纬度、中纬度、低纬度及赤道地区)被建立, 用于观测和研究^[1-5]。

在 2005 年底, 一台以探测高空钠层为主的激光雷达建成于合肥市中国科技大学(31.9°N, 117.17°E), 由中国科学院安徽光机所和中国科学技术大学共同研制。本文详细介绍了此台钠共振荧光激光雷达系统, 并

简述了光束自动调整平台设计、共振荧光波长校正和信号采集等系统特征技术, 给出及探讨了合肥上空首次钠密度实际探测结果。

1 系统结构

共振荧光激光雷达对高空金属层的探测主要是接收金属原子因受激而产生的荧光。利用共振散射原理探测高层大气中钠原子等碱金属微量成分的浓度, 可避免低层大气因密度较大所引起的碰撞猝灭效应而使共振散射原理失效。钠原子在波长 589nm 附近有 D 吸收光谱线(即共振散射谱线), 若激光波长调谐在 D 谱线上, 钠原子在激光照射下将产生共振散射。由于共振散射光强往往比分子瑞利散射光强大好几个数量级, 因此, 根据这一特性探测高空 90km 中间层顶附近的钠原子浓度廓线^[1]。利用可调谐激光器, 调节脉冲激光的频率, 使它处在被观测的 Na 原子的共振频率上, 然后将其发射到天空, 利用接收系统接收钠原子的共振荧光后项散射信号, 根据信号的强弱和到达的前后时间就能反演出金属原子数密度随高度分布廓线。

本激光雷达主要有激光发射、光学接收和信号检测三部分组成, 系统结构框图如图 1 所示。

激光发射部分由 Nd:YAG 激光器、染料激光器、激光光束发射平台以及波长定标部分组成。激光发射部分的主要部件是激光器。本雷达需要探测高达 100 多公里高空的钠原子信号, 需要使用大功率激光器来克服低空大气消光和吸收, 同时要使激光器能工作在波长为 589nm 附近的钠 D 吸收光谱线上。因此本激光雷达使用由 Nd:YAG 激光器泵浦染料激光器, 其泵浦激光波长 532nm, 脉冲能量 550mJ, 染料激光波长 589nm, 脉冲可达激光能量 77mJ。染料激光器的调谐波段为 510~715nm 完全包括了钠原子的双重 D 线(D1 和 D2)。系统一部分激光被导入钠共振荧光吸收池用于波长的标定。波长 589.6nm(D1)或 589.0nm(D2)的桔黄色激光经过激光光束发射平台(主要包括 45°全反镜)垂直发射到天空。

激光雷达接收部分主要有接收望远镜、干涉滤光片、衰减片、光电倍增管和导光单元等组成。卡塞格林式接收望远镜(Cassegrain)口径达 1m 是目前国内较大的接收望远镜, 用来收集激光的后向散射光。在接收望远镜的焦平面处安装了可调小孔光阑, 小孔光阑是用来限制望远镜的视场范围以减小天空的背景光, 不同口径的小孔光阑, 可以使望远镜的接收视场角在 0.2~2mrad 范围内可变。根据天气条件和回波信号强弱选择不同透过率的衰减片, 使光电倍增管(PMT)处于线性工作状态。其中置于光电倍增管前的滤光片带宽 1nm, 中心波长 589.4nm。后向散射回波信号由接收望远镜收集, 经小孔光阑再经准直镜和分色片, 将散射光导入光电倍增管靶面。

信号探测系统主要是用来对激光雷达接收到的大气后向散射光进行光电转换和放大, 由光电倍增管、VT120 型前置脉冲放大器、多通道光子计数卡、DG535 延时器和计算机软硬件组成。选用低噪声光电倍增管 9817QB 并配有制冷管, 一般工作在 -20℃。整个测量过程在计算机控制下完成, 采集得到的数据贮存在计算机中。本激光雷达的技术参数如表 1 所示。

2 系统特征技术

2.1 光束自动调整平台设计

本系统中望远镜光轴固定, 通过调整 45°反射镜改变发射光束的指向, 也就是调整发射激光光轴位置, 来使接收望远镜和发射光束两个光轴平行, 这样接收到的测量范围内的后项散射信号最大。本光路的调整

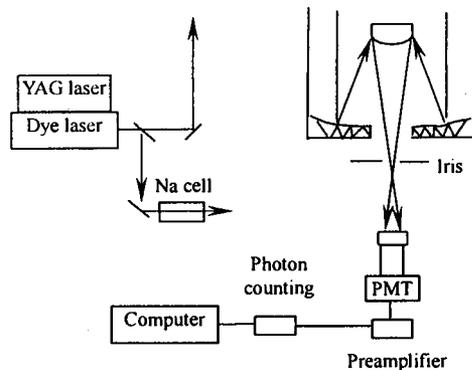


图 1 钠荧光激光雷达原理框图

Fig.1 Schematic diagram of Na fluorescence lidar

表 1 钠共振荧光激光雷达系统主要技术参数

Table 1 Specifications of the lidar	
Laser	Nd:YAG SHG pumped Dye 589nm
Pulse energy	77mJ
Pulserate	20Hz
Linewidth	0.05cm-1@560nm
Telescope	1m diameter cassegrain
Field of view	0.2-2mrad
Filter bandwidth	1nm

对整个激光雷达系统是至关重要的，它决定了系统最终测量结果的准确性。光路的偏差会导致测量结果的偏差。所以发射光束与接收视场相匹配的调整，也就是系统的两个光轴的校准，必须在每次测量之前进行，而此项工作过去一直是人工操作，要求专业训练的高技术人员进行精细的工作，繁琐费时。为保证每次光路调整的有效性，节省时间和提高效率，我们提出了一种在计算机控制下的发射光束自动调整系统。自动控制部分主要包括镜架、传动单元、步进电机、电机控制单元、信号探测单元结构如图2所示。

45°反射镜在计算机的控制下从西向东，再从南向北扫描，找出发射光束与接收视场相匹配的最佳位置。在微机控制下步进电机带动45°反射镜将光束自动从南北西扫描，每移动一步距，微机信号采集系统自动采集一定数量的回波信号P(100个脉冲)，并记录下步进电机位置，保存采集到的数据并分析。图3左图显示发射光束从望远镜外向、进入望远镜到望远镜接收视场的轨迹，可以得到信号强度和光束指向角函数关系如图3右图所示， ω 为发散角和 θ 为接收视场角。理论梯形，轮廓分明，我们可以通过找到梯形半高度两点(如图中A、B)再得到其中心点即可，但是实际测量中由于光斑的不均匀、接收望远镜的虚光以及PMT空间感应的不均匀等，梯形曲线不可能很正规，不能准确地确定中心位置，图4为实测梯形。通过实验分析，采用下面简单但精确的方法确定中心位置。

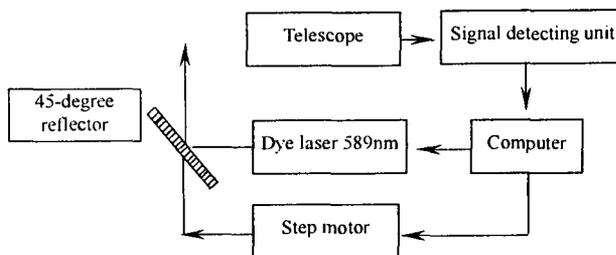


图2 自动对光平台结构图

Fig.2 Diagram of automatic self-aligned flat

上述公式中， W_i 为步进电机位置，此值可以换算成激光移动角度。 P_i 为步进电机每一位置 W_i 所对应的回波强度在选定高度的回波值。 P_b 为当时条件下的系统背景值，利用此公式可以求得中心位置 W ，将光束调到此位置。再从东向西进行扫描结果，方法类似。

$$W = \frac{\sum_i P_i W_i}{\sum_i P_i}, \quad P_i > 2P_b \quad (1)$$

上述公式中， W_i 为步进电机位置，此值可以换算成激光移动角度。 P_i 为步进电机每一位置 W_i 所对应的回波强度在选定高度的回波值。 P_b 为当时条件下的系统背景值，利用此公式可以求得中心位置 W ，将光束调到此位置。再从东向西进行扫描结果，方法类似。

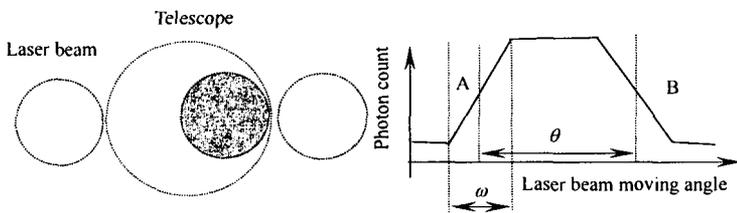


图3 发射光束和望远镜接收视场及信号强度和光束指向角函数关系

Fig.3 Light beam and FOV of telescope signal level as a function of the laser beam direction

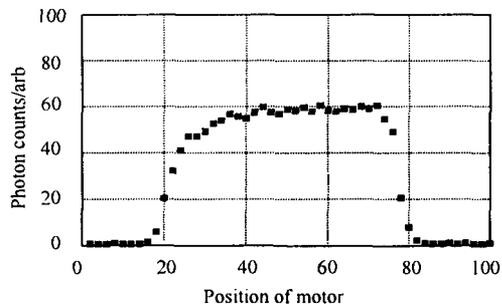


图4 自动对光系统实测信号

Fig.4 Measured signal by self-aligned system

2.2 波长校准

可调谐染料激光器中的输出波长需标定。每次实验观测需要选定钠共振荧光频率。可使用钠泡共振荧光池定标，钠泡共振荧光池需要一精准复杂的系统，包括钠蒸汽池、PMT、F-P、温度控制、波长计及计算机等。这对测风、测温度的窄带钠激光雷达是必要的，而对只测量钠层密度的宽带激光雷达，可以使用更简单节约的方法。为简化系统，只使用一简单钠泡，调节染料激光器波长使钠泡中的钠原子发出共振荧光信号。为准确得到钠共振荧光波长，我们再通过将高空看作是一个钠原子荧光共振池，对激光波长进行pm级微调。主要操作是在钠泡确定的波长附近进行波长扫描，利用接收系统接收回波信号，每一波长积分时间为25s，通过分析回波信号80~110km的信号幅度积分变化，将波长锁定在信号幅度最强位置即可。图5显示本雷达系统两天实际探测前，对波长进行校正的记录，通过波长扫描得到的空中80~105km回波信号幅度积分值随波长的变化。每根扫描曲线虽然幅度值不同但都有一个很明显的峰值，此峰值位置对应

的波长被作为探测使用的波长, 图中横坐标为预设波长值, 它与激光器实际输出波长不一致, 所以需要校正。

2.3 信号采集方法

在上一节曾提到为保证得到高空回波信号, 采用大功率激光器和口径望远镜, 这样的设计使 100km 高空信号能接收到, 但带来另一个大的问题就是近处的信号太强, 光电倍增管会因过饱和出现非线性效应, 使探测结果无效。本激光雷达通过非同轴系统(光束发射平台与望远镜距离 7m), 通过几何压缩, 降低近处回波强度。同时通过光电倍增管的门控, 延迟光电倍增管开门时间来避开近距离超强信号。通过 SRS DG535 延时器设置门控延时时间, 可以使某高度以上的后向散射信号到达光电倍增管靶面时, 光电倍增管处于工作状态, 而在这一高度以下的后向散射强信号到达光电倍增管靶面时, 光电倍增管处于不工作状态, 避免光电倍增管在非线性状态下工作。通过使用此方法保证探测的信号正确有效。

光子计数方法被使用来接收回波信号。本激光雷达使用光子计数卡 MCS 带替通常被采用的光子计数器, 一方面节省了部分探测时间, 因为光子计数器需要不停的花时间将光子计数器中的数值传入计算机, 而光子计数卡是内插于微机, 只需极短的时间保存数据; 另一方面光子计数卡可以保存每个脉冲回波信号, 所以可以分析任意个数的脉冲回波信号, 而光子计数器只传送设定好脉冲数的平均值。

3 实验结果

本激光雷达建成后于 2005 年 12 月 14 日对高空钠层进行了首次探测。图 6 为当天探测的多组回波信号中的一组。该回波信号的时间约为 4min, 相应于对 5000 个激光脉冲的累积结果; 光子计数器的门宽设定为 500ns, 相应的高度分辨率约为 75m。该回波信号主要有两部分组成: 20~50km 段为大气分子瑞利散射信号; 80~105km 段为钠层的共振荧光回波信号。

图 7 显示了 Na 密度剖面随时间的变化, 包含了当天晚上测量所得到的所有回波数据。从图中可以看到当天钠层峰值高度在 91km 附近的上下移动, 峰值高度约 90.8km, 钠原子密度峰值一半处的宽度约 10km, 底边较陡, 钠层分布范围约在 80~105km 之间。夜变化明显, 上半夜钠密度低, 下半夜钠密度加强。高于 85km 的钠密度整晚变化明显, 有增加趋势。而低于 86km 处的钠层密度变化幅度小, 与文献 E. S. Richter 报道的 Urbana(40°N, 88°W)上空钠层夜间变化相一致。

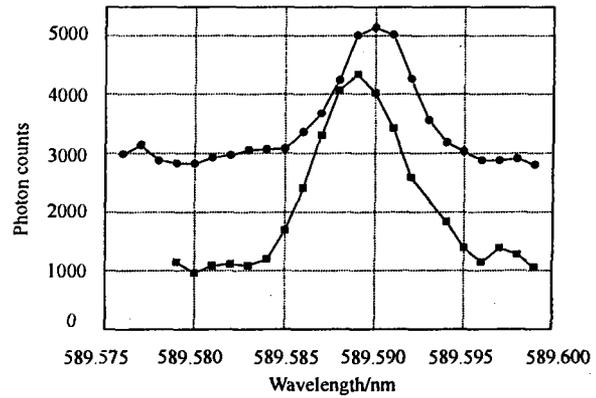


图 5 钠层波长扫描廓线

Fig.5 Signal profile of Na layer by wavelength scanning

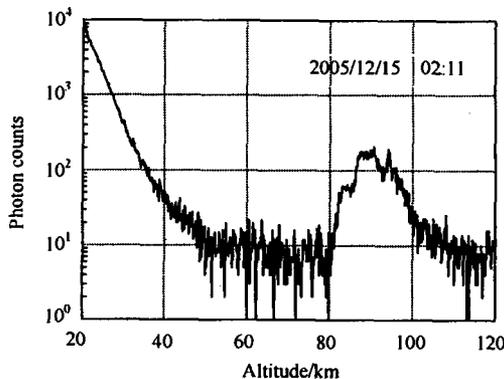


图 6 钠共振荧光激光雷达的回波信号

Fig.6 Return signal of Na fluorescence lidar

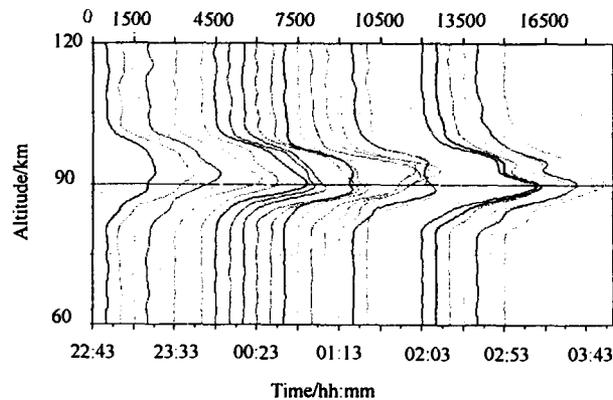


图 7 Na 密度剖面随时间的变化

Fig.7 Na density distribution with time variation

结束语

实时变焦跟踪系统是对 ATP 系统功能的改进和完善, 它拓宽了 ATP 系统的应用领域, 使系统更加灵活和智能化。仿真和实验表明, 系统在实时变焦的过程中, 不仅能快速捕获各种复杂目标, 且能稳定跟踪目标, 跟踪精度也能达到系统要求。成功完成粗跟踪和捕获的功能, 具有很强的实用价值。

参考文献:

- [1] 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光电工程, 1989, 16(3): 1-42.
MAI Jia-guang. The Basic Technologies of the Acquisition Tracking and Pointing Systems[J]. **Opto-Electronic Engineering**, 1989, 16(3): 1-42.
- [2] TMS320LF/LC240xA DSP Controllers Reference Guide System and Peripherals[Z]. Texas Instruments, 2001.
- [3] 何照才, 胡保安. 光学测量系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
HE Zhao-cai, HU Bao-an. **Optical Measurement System**[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [4] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
LIU Jin-kun. **Advanced PID control MATLAB simulation**[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

~~~~~  
(上接第 4 页)

## 4 结 论

本台钠荧光雷达是在我们多年来激光雷达设计的经验基础上开发完成的, 它充分继承了已有雷达系统设计优良特点, 在光路调整、波长校正以及数据采集等方面进行完善和创新, 提高了系统的性能和自动化程度。从回波的探测结果可以看到系统有着良好的信噪比, 可以探测到 100km 高空钠层。本文以系统第一天探测的回波信号为例进行反演分析, 表明当天钠层主要分布在 80~105km, 钠层峰值高度在 91km, 钠原子密度峰值一半处的宽度约 10km, 钠层夜间变化与文献 E. S. Richter 报道的 Urbana(40°N, 88°W)相一致。

### 参考文献:

- [1] Chester S. Gardner. Sodium Resonance Fluorescence Lidar Applications in Atmospheric Science and Astronomy[J]. **Proceedings of the IEEE**, 1989, 77(33): 408-418.
- [2] E. S. Rithter, J. R. Rowlett, C. S. Gardner, et al. Lidar observation of the mesospheric sodium layer over Urbana, Illiuois[J]. **Journal of Armospheric and Tmestrial Physics**, 1981, 43(4): 327-337.
- [3] Clemesha B.R, Simonich D.M, Takashashi H, et al. The annual variation of the high of the atmospheric sodium layer at 23°s, Possible evidence for convective transport[J]. **J. Geophys. Res.**, 1992, 97: 5981-5985.
- [4] B.R.Clemesha, D.M.Simonich, P.P.Batista. Lidar observations of atmospheric sodium at an equatorial Location[J]. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 1998, 60: 1773-1778.
- [5] Luca Fiorani, Mario Armenante, Roberta Capobianco. Self-aligning lidar for the continuous monitoring of the atmosphere[J]. **Appl. Opt.**, 1998, 37(21): 4758-4764.
- [6] Chester S. Gardner. Performance capabilities of middle-atmosphere temperature lidars: comparison of Na, Fe, K, Ca, and Rayleigh systems[J]. **Appl. Opt.**, 2004, 43(25): 4941-4956.
- [7] 李洪均, 龚顺生, 郑文钢, 等. 中国武汉上空钠层分布的实验观测与理论模拟[J]. 空间科学学报, 1999, 9(1): 54-60.  
LI Hong-jun, GONG Shun-sheng, ZHENG Wen-gang, et al. The observation and theoretic simulation of the sodium layer over Wuhan, China[J]. **Chinese Journal of Space Science**, 1999, 19(1): 54-60.
- [8] 邹 华, 张孟伟. 用步进电动机实现连续变焦距光学镜头的变焦控制[J]. 光电工程, 2003, 30(1): 29-31.  
ZOU Hua, ZHANG Meng-wei. Realization of Zooming Control for a Continuous Zoom Optional Lens with Step Motor [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2003, 30(1): 29-31.