

应用于窄带钠风温探测激光雷达的稳频和移频方法

夏媛^{1*}, 程学武², 李发泉², 李亚娟¹

¹南京晓庄学院电子工程学院, 江苏 南京 211171;

²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 钠多普勒激光雷达通过发射单模窄线宽的 589 nm 脉冲激光, 激发 80~110 km 高度大气中存在的碱金属钠原子获得共振荧光散射回波信号, 可实现中层顶区域大气参数的探测。激光稳频和移频是窄带钠多普勒激光雷达实现中层顶大气风场和温度高分辨探测的关键技术。本文介绍了一种应用于钠激光雷达系统的种子激光稳频和移频方法, 利用归一化的饱和吸收光谱信号实现了 589 nm 种子激光频率的精确锁定, 频率长期稳定在 2.2 MHz 左右; 通过级联双通声光移频装置的设计获得了钠原子 D₂ 线光谱上三个工作频率的窄线宽激光输出。通过钠多普勒激光雷达的探测实验, 获得了高分辨率的钠层风场和温度探测结果, 并将温度探测结果与卫星探测结果进行了对比。

关键词 激光雷达; 激光稳频; 饱和吸收; 声光移频; 风温探测

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.102801

Laser Frequency Stabilization and Shifting Applied in Narrowband Sodium Lidar System for Wind and Temperature Measurement

Xia Yuan^{1*}, Cheng Xuewu², Li Faquan², Li Yajuan¹

¹School of Electronic Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing, Jiangsu 211171, China;

²State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics,

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

Abstract The sodium lidar can achieve atmospheric parameters measurement in the mesosphere by emitting a single-mode narrow-linewidth 589 nm pulsed laser to stimulate the alkali metal sodium atoms in the atmosphere at 80-110 km altitude and obtain the resonance fluorescence scattering echo signal. Laser frequency stabilization and shifting are the key technologies for the narrow-band sodium Doppler lidar to realize mesosphere atmosphere wind and temperature detection with high resolution. This paper introduces the methods of seed laser frequency stabilization and shifting applied in a sodium lidar system. The precise locking of 589 nm seed laser frequency is achieved using the normalized saturation absorption spectrum signal, and the long-term stability of laser frequency is about 2.2 MHz; three laser operating frequencies on the sodium D₂ line spectrum are obtained by designing a cascaded double-pass acousto-optic frequency shift device. Through the experiment with sodium Doppler lidar, the wind and temperature measurement results with high resolution are obtained, and the temperature profile from lidar is compared with the result measured by satellite.

Key words lidar; laser frequency stabilization; saturation absorption; acousto-optic frequency shift; wind and temperature measurement

OCIS codes 280.3640; 010.3640; 250.4390

1 引言

窄带钠多普勒荧光激光雷达技术是实现高空大

气探测的有效手段^[1-2]。利用 80~110 km 高度范围内大气中存在的碱金属钠原子作为示踪物, 窄带钠多普勒荧光激光雷达发射钠原子 D₂ 谱线上的三个不同

收稿日期: 2018-03-16; 修回日期: 2018-04-27; 录用日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(41127901)、南京晓庄学院人才引进科研基金(4177022)

* E-mail: xiayuanxxyy@163.com

频率的窄线宽脉冲激光,该脉冲激光与中层顶附近的钠原子相互作用可获得三频率钠原子共振荧光散射回波信号,由回波信号的比值可反演得到中层顶区域大气的温度和风场信息,进而为开展地球大气波动激发和传播、能量和动量循环过程、高中低大气相互耦合作用等前沿科学问题的研究提供关键数据来源^[3-4]。国际上,科罗拉多州立大学的 She 等^[5-6]利用高光谱分辨率的窄带多普勒激光雷达技术最早实现了钠层温度和风场的同时高分辨探测。近年来,国内的高分辨率钠层探测研究也得到了迅速发展,多个研究团队陆续开展了钠层风温探测激光雷达的研制。中国科学技术大学和中科院国家空间科学中心利用脉冲染料放大技术,分别研制了一套钠多普勒激光雷达系统,实现了钠层风场和温度的同时探测^[7-8];近期,中科院国家空间科学中心和中科院武汉物理与数学研究所联合研制了一套基于全固态激光技术的钠多普勒激光雷达系统,目前已投入子午工程延庆站的观测运行,获得了钠层风场和温度的初步探测结果^[9-10]。国内高分辨钠激光雷达的发展大大提高了我国在该领域的水平及在国际同行中的地位,为大气活动和动力学过程的长期监测和研究提供了有效手段。

为了进行钠层温度和风场的同时高分辨观测,需要使种子激光频率长期精确锁定到钠原子 D_{2a} 对应的峰值频率上,并确保脉冲发射激光频率能在钠原子 D_2 谱线上三个不同工作频率点间循环切换。在中科院大气物理研究所吕达仁院士牵头的国家基金委重大科研仪器设备研制专项“多波段多大气成分主被动综合探测系统”(APSOS)的支持下,中科院武汉物理与数学研究所研制了一套窄带钠多普勒激光雷达^[11]。本文介绍了可应用于该套激光雷达系统的种子激光稳频和移频单元的设计和实验,利用双通道差分饱和吸收光谱实

现了 589 nm 种子激光长期稳定的频率输出,并设计了级联双通声光移频装置,结合精确的时序控制实现了发射激光在钠原子 D_{2a} 谱线峰值频率及 ± 630 MHz 的两个侧翼频率上的循环切换输出。

2 种子激光稳频设计与实现

钠激光雷达采用环形染料激光器输出单模窄线宽连续 589 nm 种子激光,将其注入到脉冲染料放大器中而实现高功率的 589 nm 脉冲激光输出。系统利用一个恒温控制的外部参考腔,结合侧边缘锁定技术,将环形染料激光器输出的激光进行线宽压窄,使得激光线宽均方根值在 500 kHz 以内,从而获得较好的短期频率稳定度,并可通过扫描参考腔实现激光输出频率的精细扫描。参考腔会受环境温度变化、震动等的影响,且其自身压电陶瓷(PZT)原件会有松弛情况,所以参考腔只能相对锁定激光器的频率,频率的长期漂移可达每分钟几百 MHz,会使风速和温度测量产生较大的误差。因此,还需要对激光器输出激光的频率进行绝对锁定,保证钠层的高效激发和回波信号的可靠性。

由于原子跃迁谱线是原子的固有物理特性,不会随环境变化而变化,因此采用原子能级跃迁谱线作为激光频率锁定的参考,具有很高的频率稳定性^[12-14]。钠原子的普通吸收或荧光光谱存在多普勒展宽,其谱线的鉴频灵敏度较低,难以实现稳定可靠的高精度激光频率锁定,因此本系统中设计了基于钠原子饱和吸收光谱的频率长期稳定单元,根据饱和吸收光谱信号的变化来反馈控制参考腔的腔镜,由于种子激光器锁定到参考腔透射峰的边沿,因此这种方式可最终实现将种子激光器输出的 589 nm 激光的频率长期锁定到 D_{2a} 谱线对应的峰值频率上。

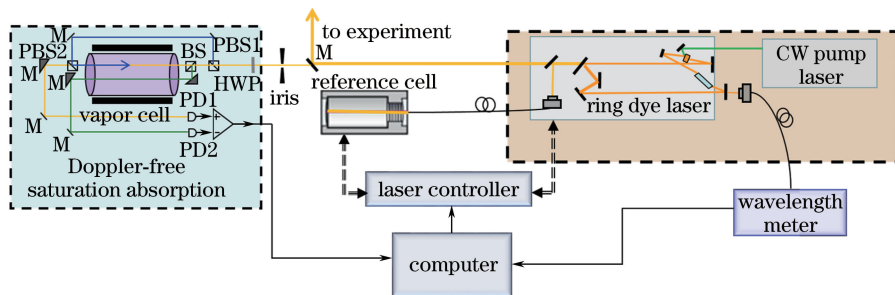


图 1 基于钠原子饱和吸收光谱的 589 nm 种子激光频率稳定实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for 589 nm seed laser frequency stabilization based on saturation absorption spectroscopy of Na atom

种子激光稳频控制实验装置如图 1 所示,环形染料激光器输出的 589 nm 激光被分出一小部分进

入到饱和吸收装置中,经过半波片(HWP)和偏振分束器(PBS1)后被分为两束,功率较大的一束光垂直

反射出去作为抽运光(图中蓝线),另一束功率较小的光透射后再经过一个分束镜(BS)被分为两束,直接透射进入钠原子泡的光作为探测光(图中黄线),反射后与探测光平行通过钠原子泡的光为参考光(图中绿线)。通过调节反射镜,使抽运光和探测光光路重合,探测光和参考光通道的光谱信号分别由两个光电探测器(PD1 和 PD2)进行探测,并通过多通道高速数据采集卡采集。饱和吸收装置的所有光学元件都安装到特殊设计的小型光学调整架上,并均集成到一个 45 cm×30 cm×15 cm 的黑盒中,降低周围环境对信号的干扰,同时也使饱和吸收装置的体积更为紧凑。

为了提高频率锁定灵敏度,需要对饱和和吸收的入射光功率密度和钠原子泡的温度进行优化。一般来说,激光功率密度越高,光谱信号强度越强,特征谱线信噪比越高,但激光功率超过一定范围时,由于谱线产生功率展宽,鉴频灵敏度会大大降低。一方面利用一个小孔光阑(iris)调节饱和和吸收装置的入射激光功率;另一方面通过调节半波片的角度优化抽运光和探测光的比例,提高饱和吸收光谱的信噪比。钠原子泡由保温材料包裹,并利用电热丝对其进行加热,泡温由热敏传感器探测,输入智能控温电

路,采用精密数字 PID 温度控制技术调节加热功率,实现对钠原子泡温度的调节控制。在设置钠原子泡的温度时,一方面要保证钠原子的蒸气浓度可以提供足够强的原子吸收信号以保证鉴频灵敏度,另一方面要避免温度过高产生过强的温度展宽效应,该效应过强时会降低鉴频灵敏度以及缩短钠原子泡的寿命。实验表明,将钠原子泡的温度控制到 130 °C,可获得较高的特征光谱信噪比和鉴频灵敏度。

利用 Labview 图形化编程软件设计的激光频率锁定应用程序的图形用户界面如图 2 所示。种子激光器锁定到参考腔时,控制程序通过扫描参考腔可以实现 589 nm 激光输出频率的大范围连续扫描和小范围精细扫描,并获取和显示双通道光谱信号,此外还具有查找峰值点、锁定峰值点、跳模报警等功能。图 2 右侧图形显示窗口中红色线为钠原子 D_2 线多普勒展宽的吸收光谱信号,黑色线为消多普勒饱和吸收光谱信号。光谱信号从左至右出现的三个饱和吸收特征峰结构依次为钠原子 D_{2a} 、Crossover 和 D_{2b} ,其中 Crossover 为 D_{2a} 与 D_{2b} 之间的交叉共振。三个精细结构相对于 D_2 线权重中心的频率依次为 -651.4, 187.8, 1067.8 MHz。

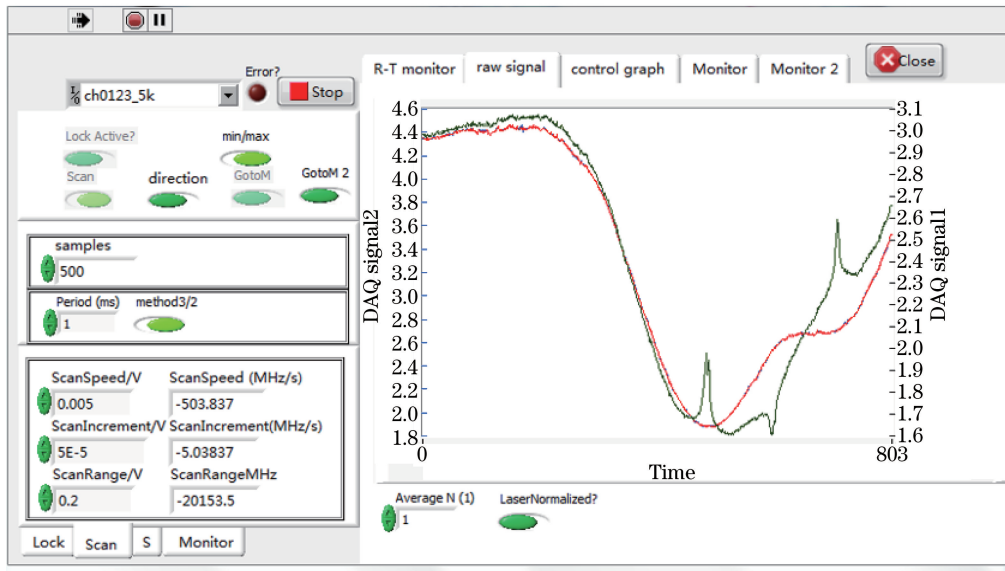


图 2 基于 Labview 的激光稳频程序图形用户界面

Fig. 2 Program graphical user interface for laser frequency stabilization based on Labview

在该系统中,利用双通道归一化探测方法获得扣除多普勒背景的钠原子饱和吸收光谱信号,将该信号直接作为稳频反馈的误差信号,可降低激光强度抖动和背景噪声对信号的影响,提高稳频的可靠性和精度。系统工作时控制程序先通过 PZT 大范围粗

扫描将激光频率调节到稳频工作点 D_{2a} 跃迁峰值频率附近,再通过小范围(约 300 MHz)精细扫描参考腔的 PZT 电压获得 D_{2a} 超精细结构光谱,通过查找归一化光谱信号的最大值,可以得到使激光输出频率预设到 D_{2a} 饱和吸收峰值跃迁频率附近所需的参考腔 PZT 扫

描电压。查找峰值时,对程序计算的回扫 PZT 电压设置可适当地补偿增量,以减小 PZT 调节的非线性误差和反方向扫描的回差。当激光频率偏离 D_{2a} 吸收谱线峰值时,程序可根据误差信号的变化判断出激光频率漂移方向,并给出合适的补偿量,利用与计算机连接的激光控制器发送控制命令来调节参考腔 PZT 电压以最大化光谱强度,从而实现输出 589 nm 激光频率漂移的实时有效补偿。图 3 给出了频率自动补偿模块跟踪 D_{2a} 峰值频率的具体过程。在这个过程中,对应于参考腔 PZT 电压 U_p 的归一化饱和吸收信号 S_i 被采集,接着调整 U_p 到 $U_p + d$,采集对应于 $U_p + d$ 的信号 S_{i+1} ,并与前一个值 S_i 进行比较。如果 S_{i+1} 小于 S_i ,则程序认为上一步的调整方向有误,导致激光频率进一步偏离了共振峰值,于是将电压 U_p 更新到一个新值 $U_p - Kd$;反之,更新到 $U_p + Kd$ 。 K 和 d 分别是正的增益系数和调节步长,两者的大小均会影响反馈控制的性能,需要在控制过程中进行优化。为了避免 PZT 电压超过其电压调节极限范围,当 PZT 电压值达到极限值的 ± 1 V 以内时,反馈程序进行报警并停止。

超精细结构特征频率进行标定。根据理论计算结果,中心峰右边的小峰与 D_{2a} 中心峰之间的频率间隔约为 16 MHz。图 4(b)给出了激光频率锁定到 D_{2a} 峰值跃迁频率时归一化的饱和吸收光谱信号,从图 4(b)中可看出,归一化后的光谱信号幅度维持在离峰值偏差 0.05 左右,根据图 4(a)中频率扫描得到的 D_{2a} 光谱信号,峰值附近的鉴频可以用图中虚线所示的线性拟合函数近似,其斜率为 $S = 0.023$,计算得到 589 nm 种子激光的频率锁定精度约为 $\delta_\nu = 0.05/0.023 \text{ MHz} \approx 2.2 \text{ MHz}$ 。1 MHz 的频率偏差对钠激光雷达温度和风速测量产生的理论误差分别约为 0.15 K 和 0.6 m/s,故系统由于种子激光频率漂移带来的温度和视线风速测量误差分别约为 0.33 K 和 1.32 m/s。锁定的同时记录参考腔 PZT 电压和实验室环境温度的变化情况,如图 4(c)和 (d)所示。实验室环境温度在 $21.2 \sim 22 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内波动时,参考腔 PZT 电压在 $0.2478 \sim 0.248 \text{ V}$ 范围内抖动,电压变化的规律与实验室环境温度的变化规律相似,说明稳频控制单元可以很好地补偿环境温度所引起的激光频率漂移。

3 三频输出设计与实现

钠多普勒激光雷达采用简单方便的基于声光调频的三频率工作方案,即三频比率技术:通过发射钠原子 D_2 谱线上三个特定频率的窄带激光主动激发中层顶区域大气中的中性钠原子。为了减小光子噪声引起的风场和温度测量误差,三频探测时主探测频率选在钠原子 D_{2a} 谱线峰值对应的频率(f_0),另外两个探测频率选在吸收峰两翼接近半峰全宽的区域,本文所述的钠激光雷达系统的两个侧翼频率分别为 $f_0 + 630 \text{ MHz}$ 和 $f_0 - 630 \text{ MHz}$ 。在温度升高时,吸收谱会展宽,主频率处的吸收强度会相对减弱,而两个侧翼频率处的吸收强度都会相对增强。在钠原子气团随着风场相对光源以一定速度运动时,主频率处的吸收强度变化较小,而另外两个频率处的吸收强度会有趋势相反的明显变化。通过分析钠原子气团被三个频率的脉冲激光分别激发所产生的后向散射荧光强度比值的变化,获取钠原子共振吸收谱的多普勒展宽和频移信息,反演其所处中性大气环境的温度和风速。利用声光介质在超声波作用下产生的声光效应可以快速精确地改变种子激光的频率^[15],有效避免钠层密度变化和频率调谐偏差所引起的风温探测误差。基于声光移频器(AOM)的三频率输出的工作原理如图5所示。首先,环形

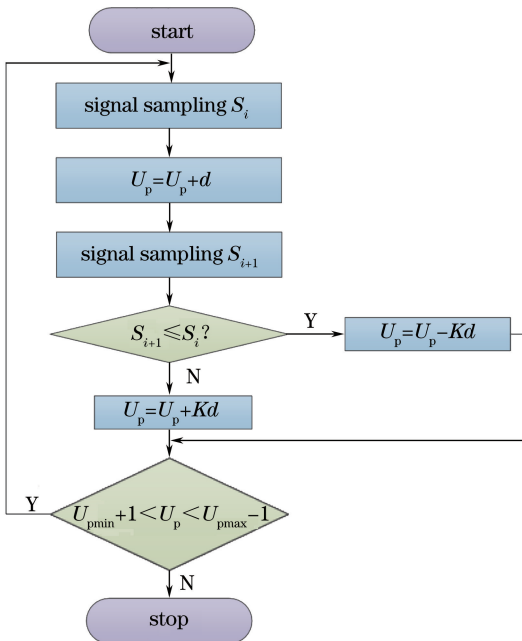


图 3 利用归一化的钠原子饱和吸收光谱稳频的软件设计流程图

Fig. 3 Flow chart of laser frequency stabilization using the normalized sodium saturation absorption spectrum

为了评估频率锁定的长期稳定度,程序自动记录了频率锁定时光谱信号的变化。图 4(a)给出了扫描激光频率得到的归一化钠 D_{2a} 超精细结构光谱,对横轴显示的频率坐标利用 D_{2a} 光谱上的三个

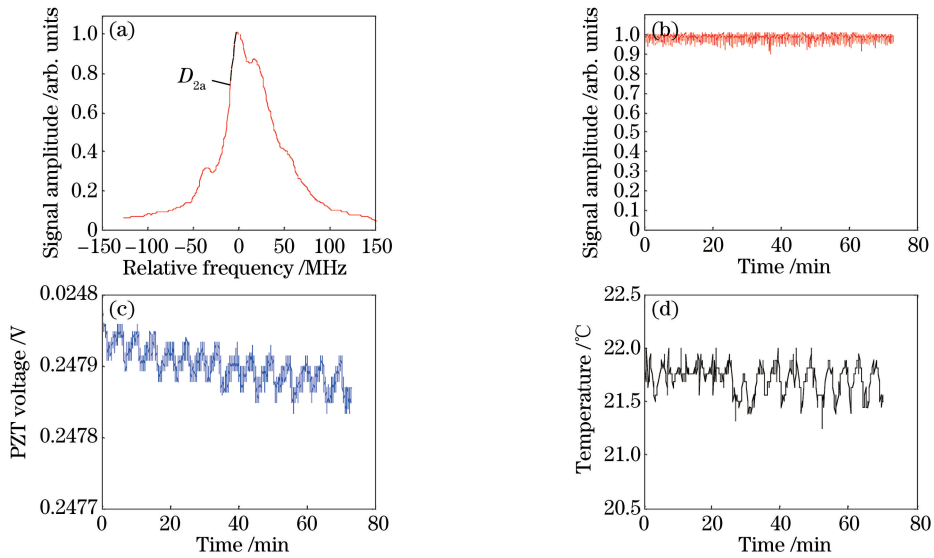


图 4 种子激光频率锁定性能评估。(a) 钠 D_{2a} 超精细结构光谱扫描结果(虚线为峰值附近光谱数据的线性拟合结果); (b) 频率锁定时归一化饱和吸收信号;(c) 频率锁定时参考腔 PZT 电压输出变化;(d) 频率锁定时记录的随时间变化的实验室温度

Fig. 4 Evaluation of seed laser frequency locking performance. (a) Spectral scanning results of sodium D_{2a} hyperfine structure (The dotted line shows the linear fitting result of spectrum data near peak); (b) normalized saturation absorption signal with frequency locked; (c) PZT voltage of the reference cell changes with frequency locked; (d) laboratory temperature changes with frequency locked

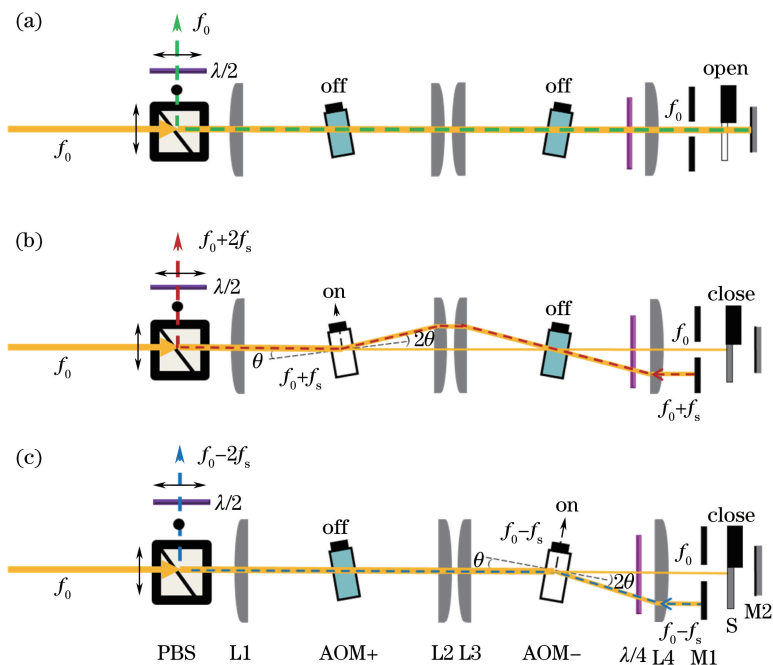


图 5 三频率激光输出原理。(a) 输出 f_0 频率的激光;(b) 输出 $f_0 + 2f_s$ 频率的激光;(c) 输出 $f_0 - 2f_s$ 频率的激光(f_0 为种子激光器稳频后输出的激光频率, $f_s = 315$ MHz, 为 AOM 射频驱动工作频率)

Fig. 5 Principle of three-frequency laser output. (a) Laser output with frequency of f_0 ; (b) laser output with frequency of $f_0 + 2f_s$; (c) laser output with frequency of $f_0 - 2f_s$ (f_0 is the laser frequency output from the locked seed laser, and $f_s = 315$ MHz, which is the operating frequency of AOM radio frequency drive)

激光器输出的 589 nm 稳频种子激光会在偏振分束棱镜 (PBS) 处透射;之后因为两个声光移频器 AOM1 和 AOM2(调制频率为 ± 315 MHz)级联,分别放置在两个透镜对(L1-L2, L3-L4)的共焦点处,可调整入射光方向并利用精密五维调节架调节 AOM1 和 AOM2 的中心位置和俯仰角度,保证激光以布拉格入射角 θ 入射并优化一级衍射效率;最后,通过外部输入周期的 TTL 电平时序信号给声光晶体和光开关(S)的控制信号源,控制声光晶体及光开关的状态,可实现对三频率激光输出顺序和时间间隔的灵活调节。

如图 5(a)所示,如果控制器控制 AOM1 和 AOM2 均不工作,同时打开光开关,这时入射光经过 AOM1 和 AOM2 不发生调制,透过中心孔反射镜(M1)被光路末端的全反镜(M2)反射并原路返回,输出的激光频率仍为 f_0 ;如果控制器控制 AOM1 工作,AOM2 不工作,同时关闭光开关快门,这时入射光第一次经过 AOM1 后发生一次正向调制,根据声光移频的布拉格衍射特性,移频光偏离入射光光轴,偏转角度为 2θ ,经过透镜后垂直入射到中心孔反射镜上并原路返回,再次通过 AOM1 发生二次正向调制,移频光偏离同样的角度从而返回到光轴上,巧妙地实现了输入光与输出光的光路重合。由于光束两次通过 $\lambda/4$ 波片,移频光偏振方向改变 90° ,由 PBS 垂直反射出去实现调制光与入射光的分离。同时,经过 AOM1 后的小部分未调制光仍沿光轴方向传播,之后被关闭的光快门阻挡,最终输出的调制光频率为 $f_0 + 630$ MHz,如图 5(b)所示。同理,AOM2 工作,AOM1 不工作,同时关闭光开关快门,可以实现 $f_0 - 630$ MHz 的 589 nm 激光输出,如图 5(c)所示。该方案一方面通过使用中心孔反射镜,使移频光的光路缩短,降低光路损耗,同时使得光路调节和维护也更加方便;另一方面,用光快门对非移频光光路进行阻断,有利于实现三频率激光输出的灵活控制。种子激光器锁定到钠 D_{2a} 峰值跃迁后,波长计记录的三频率切换输出的测试结果如图 6 所示。从声光调制器输出的三频率连续种子激光通过隔离器、小孔光阑等后入射到脉冲染料放大器中,从而实现高功率窄线宽的脉冲激光输出。

4 观测结果

将上述稳频和移频技术应用于窄带钠荧光激光雷达系统,在中科院大气物理研究所淮南气候环境综合观测试验站开展了初步观测。钠激光雷达系统

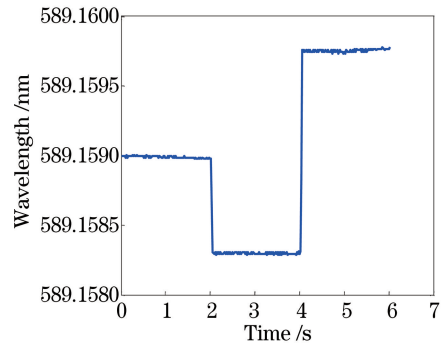


图 6 波长计记录的三频切换输出的测试结果

Fig. 6 Test results of three-frequency switching output recorded by wavelength meter

主要由激光发射单元、光学接收单元以及检测和控制单元组成,如图 7 所示。表 1 给出了该激光雷达系统的主要技术参数。图 8 为用 2016 年 12 月 30 日进行了 30 min 时间积分和 2 km 高度平滑之后的观测数据,反演而得到的钠层温度随高度和时间变化的伪彩图。从图 8(a)中可看出,在 80~106 km 的高度范围内,温度基本在 140~230 K 之间变化,从 23:30 到 05:30 左右,在 86~94 km 高度段出现温度的最大值,并表现出明显的相位向下的波动传播结构,速度约为 1.3 km/h。图 8(b)给出了探测时间和经纬度都接近时,激光雷达测量的温度廓线(黑色实线)与 TIMED 卫星的温度探测结果(红色星号线)的对比。卫星数据的经纬度为(117.6°E, 33°N),激光雷达的经纬度为(117°E, 32°N)。从图中可看出在 82~106 km 范围内,激光雷达的温度探测结果与卫星的探测结果随高度的变化趋势非常接近,激光雷达探测的温度从 87 km 高度附近开始随高度增加而逐渐降低,在 101 km 附近温度达到最小值,此后温度随高度再次缓慢增高。但在 87 km 以下和 101 km 以上,卫星探测的温度与激光雷达探测的温度在绝对值上存在一定的差异。对同一地点垂直高度上大气的温度变化进行探测时,由于卫星探测的温度廓线的时间分辨率是 1 min,而激光雷达探测的温度廓线是 30 min 数据积分反演,此外卫星是采用轨道扫描方式,而激光雷达是地基观测,因此两者的探测差异在合理的范围之内。图 9 给出了 2017 年 1 月 13 日晚上钠激光雷达探测的经向风[图 9(a)]和纬向风[图 9(b)]探测结果,从图中可看出,从 20:30 到 06:30 左右,在 80~102 km 高度范围内,经向向北和纬向向东的风速最大值约为 70 m/s,同时经向风的探测结果表现出更明显的潮汐波动结构。

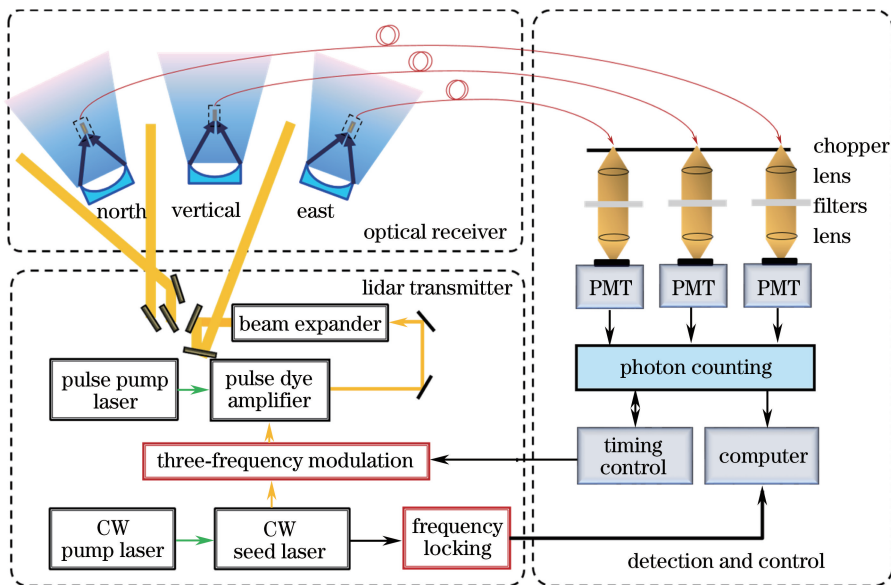


图 7 钠测温测风激光雷达系统组成

Fig. 7 Setup of sodium lidar system for wind and temperature measurement

表 1 钠激光雷达系统主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of sodium lidar system

Parameter	Value
Wavelength /nm	589.159
Modulation frequency /MHz	±630
Laser average power /mW	~450
Repetition rate /Hz	30
Receiver telescope diameter /mm	Φ1000
Field of view /mrad	~0.83
Filter bandwidth /nm	1
PMT quantum efficiency /%	40
Photon counting board	FAST MCA-3 Series
Range resolution (raw data) /m	150
Time resolution (raw data) /s	50

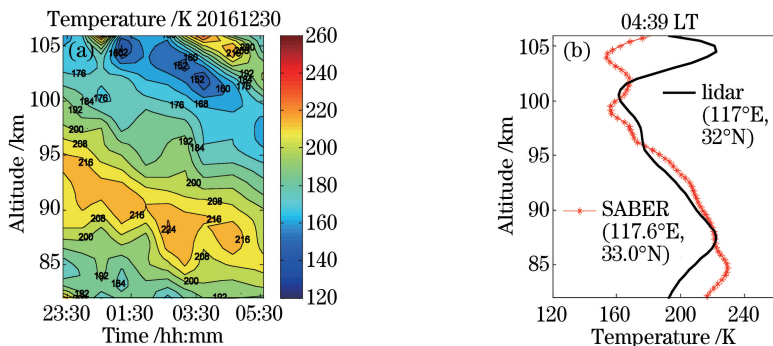


图 8 钠激光雷达探测的中层顶温度。(a)时空演化结果;(b)与卫星探测结果的对比

Fig. 8 Temperature measurement results in the mesosphere by sodium lidar.

(a) Temporal and spatial evolution results; (b) comparison with temperature profile measured by satellite

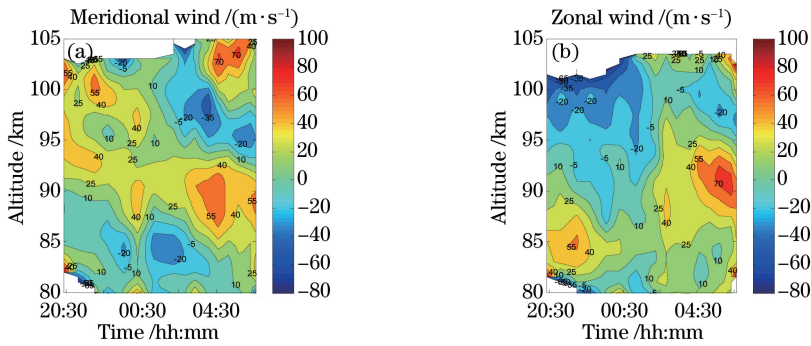


图9 钠激光雷达探测的水平风速演化结果。(a)经向风;(b)纬向风

Fig. 9 Horizontal wind results measured by sodium lidar. (a) Meridional wind; (b) zonal wind

5 结 论

报道了应用于钠多普勒激光雷达的激光稳频和声光移频技术,利用双通道钠原子饱和和吸收光谱装置,结合软件反馈控制,实现了将钠风温激光雷达中的589 nm连续种子激光频率精确地锁定到钠原子 D_{2a} 谱线对应的峰值频率上,长期频率稳定在2.2 MHz左右。与基于硬件锁相放大的稳频控制方式相比,基于软件实现的峰值频率锁定方法不需要专门的锁相放大器进行调制解调,简化了实验硬件装置,降低了硬件成本;设计了级联双通声光移频装置,利用光开关和中心孔反射镜结合精确的时序控制,实现了高分辨钠风温激光雷达在中心频率和两个侧翼工作频率快速循环切换工作,降低了三波长激光输出单元的光路损耗,也使系统控制更加灵活方便;将激光稳频和移频方法应用于窄带钠多普勒激光雷达系统中,获得了中层顶大气温度和水平风速高分辨观测结果,验证了其可靠性。

参 考 文 献

- [1] Plane J M C, Gardner C S, Yu J, *et al.* Mesospheric Na layer at 40° N: modeling and observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D3): 3773-3788.
- [2] Chu X Z, Papen G. Resonance fluorescence lidar for measurements of the middle and upper atmosphere[M]// Fujii T, Fukuchi T. *Laser Remote Sensing*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2005: 235-240.
- [3] Bills R E, Gardner C S, She C Y. Narrowband lidar technique for sodium temperature and Doppler wind observations of the upper atmosphere [J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(1): 13-21.
- [4] Kaifler B. Na Lidar at ALOMAR: electrooptic improvements, analysis algorithms, and selected

atmospheric observations 80 to 100 km above Northern Norway[D]. Ulm: Ulm University, 2009.

- [5] She C Y, Yu J R. Simultaneous three-frequency Na lidar measurements of radial wind and temperature in the mesopause region [J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(17): 1771-1774.
- [6] 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]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(6): 1319-1323.
- [7] Hu X, Yan Z A, Guo S Y, *et al.* Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(4/5): 417-423.
- [8] Li T, Fang X, Liu W, *et al.* Narrowband sodium lidar for the measurements of mesopause region temperature and wind [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22): 5401-5411.
- [9] Xia Y, Du L F, Cheng X W, *et al.* Development of a solid-state sodium Doppler lidar using an all-fiber-coupled injection seeding unit for simultaneous temperature and wind measurements in the mesopause region [J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5264-5278.
- [10] Xia Y, Wang Z L, Cheng X W, *et al.* All-solid-state narrowband sodium lidar system and preliminary result [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(s1): s113003.
夏媛, 王泽龙, 程学武, 等. 全固态窄带钠层荧光激光雷达系统及初步观测结果 [J]. *中国激光*, 2015, 42(s1): s113003.
- [11] Li F Q, Yang Y, Cheng X W, *et al.* The techniques and progress of wind and temperature lidar in WIPM [C]// *The 27th International Laser Radar Conference*, July 10, 2015, New York, USA. Les Ulis: EDP

- Sciences, 2016, 119: 12002.
- [12] Xiang J F, Wang L G, Li L, *et al.* Automatic frequency stabilization system of external cavity diode laser based on digital signal processing technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0914002.
项静峰, 王利国, 李琳, 等. 基于 DSP 技术的外腔半导体激光器自动稳频系统 [J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0914002.
- [13] Yu Q, Xiong W, Zhang Y, *et al.* Design and implementation of miniaturized frequency-stabilized laser system with low power consumption [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0801010.
于齐, 熊炜, 张胤, 等. 低功耗、小型化稳频激光系统的设计与实现 [J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0801010.
- [14] Yuan D D, Hu S L, Liu H H, *et al.* Research of laser frequency stabilization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 081401.
苑丹丹, 胡姝玲, 刘宏海, 等. 激光器稳频技术研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(8): 081401.
- [15] Qu Z, Zhang L, Tong S F, *et al.* Insertion loss characteristics of acousto-optic frequency shifter in optical phase-locked loop and its optimization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100609.
曲正, 张磊, 佟首峰, 等. 光锁相环路中声光移频器插入损耗特性研究及优化 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100609.