

## 0.94 $\mu\text{m}$ 差分吸收激光雷达地基工作的进展

洪光烈<sup>1</sup>, 李嘉唐<sup>1,2</sup>, 王建宇<sup>1,2</sup>, 李虎<sup>1,2</sup>, 王一楠<sup>3</sup>, 孔伟<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院空间主动光电技术科技创新重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院大气物理研究所 中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029)

**摘要:** 为了更好地探测对流层大气水汽的垂直廓线, 对已经建立的 935 nm 差分吸收激光雷达进行了部分改进。采取双通道接收的措施, 近场通道望远镜同时也是发射激光的扩束器, 近场通道采用偏振分束器加四分之一波片的方式隔离发射光和回波光, 远场通道(主通道)采用平行旁轴的卡塞格林望远镜, 从而减小激光雷达近地面盲区; 发射机的双波长挪到 936.0~936.5 nm 之间, 增加了注入种子激光的功率, 提高发射光谱纯度, 从而提高探测精度。探测范围从 600~2 000 m, 延展到 250~3 000 m, 随机误差 5%。

**关键词:** 差分吸收激光雷达; 大气对流层水汽; 后向散射; 垂直范围

中图分类号: TN959.4 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.1203009

## Advance of ground based differential absorption lidar at 0.94 $\mu\text{m}$

Hong Guanglie<sup>1</sup>, Li Jiatang<sup>1,2</sup>, Wang Jianyu<sup>1,2</sup>, Li Hu<sup>1,2</sup>, Wang Yinan<sup>3</sup>, Kong Wei<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to better detect the vertical profile of the tropospheric atmospheric water vapor, some improvements have been made to the established 935 nm differential absorption lidar. Taking the dual-channel receiving measure, the near-field channel telescope is also a beam expander that emitted laser light. The polarizing beamsplitter and quarter wave plate were used to isolate emitted light and echoed light in near-field channel, cassegrain telescope was applied in the far-field channel (main channel), thereby the near-ground dead zone of the lidar was reduced. The wavelength was shifted to 936.0–936.5 nm. The power of seed laser and the purity of the emission spectrum was increased, thereby the detection accuracy was improved. The detection span range was extended from 600–2 000 m to 250–3 000 m, and the random error was 5%.

**Key words:** differential absorption lidar(DIAL); vapor of troposphere; backscattering; vertical range

收稿日期: 2019-07-26; 修订日期: 2019-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(61775227)

作者简介: 洪光烈(1966-), 男, 博士生导师, 博士, 主要从事激光遥感方面的研究。Email: glhong@mail.sitp.ac.cn

通讯作者: 李嘉唐(199-), 男, 博士生, 主要从事激光探测大气水汽方面的研究。Email: kasenglee@tju.edu.cn

## 0 引言

差分吸收激光雷达 (Differential Absorption Lidar, DIAL) 回波信号由 Mie 后向散射和 Rayleigh 后向散射组成, 明显比 Raman 后向散射强度大, 结合一些降噪技术在白天仍能够达到较高的探测精度。而且利用两种波长很接近的激光束交替探测, 可以将共同的干扰量差分掉。该系统具有自校准性, 不易受外界干扰。德国大气物理研究所 (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR) 2005~2008 年间研制了 935 nm 附近的四波长差分吸收激光雷达, 并且进行了机载飞行实验<sup>[1-2]</sup>, 获得了 0.5~11.0 km 高度范围水汽混合比的数据, 同低温霜点湿度计 CFH 比对相当吻合。

在对差分吸收激光雷达详细仿真<sup>[3]</sup>的基础上, 2015 年笔者所在课题组试制了一套地基水汽探测差分吸收激光雷达系统, 能够测量对流边界层 600~2 000 m 的水汽浓度垂直分布<sup>[4]</sup>。

参考文献[4]报导了这台被研制的 935 nm 水汽探测差分吸收激光雷达。种子注入的环形腔光参量振荡器, 在窄线宽脉冲激光 (300 mJ/532 nm/10 Hz/7 ns) 的泵浦下, 通过“ramp-hold-fire”方法锁定光参量振荡器的谐振腔, 产生 45 mJ/935 nm/10 Hz/6 ns 的窄线宽的、波长稳定的脉冲激光。接收望远镜直径 305 mm, 使用  $\phi 1.5$  mm/2 MHz 的 APD 作为探测器, 以 935.776 nm 作为探测光波长 (online), 935.852 nm 作为参考光波长 (offline) 进行了地基垂直差分探测实验, 获得了上海地区对流边界层水汽浓度廓线。数据时间分辨率为 60 s, 距离分辨率为 30 m, 在高度 600 m 至大气边界层顶的范围内, 测量误差小于  $0.1 \text{ g/m}^3$ , 将激光雷达数据与附近气象观测站无线电探空仪数据进行了对比, 证实了差分吸收激光雷达的有效性。

大气中水汽主要集中在对流边界层内, 而参考文献[4]报导的这台差分吸收激光雷达, 不能给出地面 600 m 以下水汽的数据, 是很大的不足; 上限仅达到 2 000 m 高度大气边界层顶, 还是显得过低, 因此需要向上、向下延展地基差分吸收激光雷达观测的动态范围。

通过不断完善该 DIAL 系统, 首先使之在地基

和车载情况下能准业务化运行, 昼夜探测自地面到 5 km 高度 (对流层下部) 的大气水汽垂直廓线, 为探空气球数据提供补充, 服务于大气边界层研究和天气预报<sup>[5-7]</sup>; 继而安装在飞机上, 垂直向下探测, 期望能够探测 12~5 km 高度之间的大气水汽垂直廓线, 为气候变化的研究 (对流层顶-平流层底水汽交换) 提供基础数据; 笔者的最终目标在于, 条件成熟之后将 DIAL 安装在太阳同步轨道卫星上, 随着卫星的绕飞, 获得不同地区的大气水汽浓度的垂直分布廓线, 服务于数值天气预报和气候变化研究<sup>[9-10]</sup>。

## 1 系统组成与调试

### 1.1 发射机

光束强度平顶分布的 Nd:YAG 激光器有利于光参量振荡器 (Optical Parametric Oscillator, OPO) 运转。考虑到差分吸收激光雷达对输出激光单纵模、窄线宽的要求, 对泵浦激光也要求做到单纵模、窄线宽。选用 1064 nm Continuum<sup>®</sup> SI-2000 作为种子注入 Continuum Surelite EX 型 Nd:YAG 脉冲激光器, Surelite EX 激光器的二倍频 (532 nm) 输出光作为 OPO 泵浦激光, 产生 936 nm 信号光的同时, 也伴生 1 234 nm 的空闲光。

光参量振荡器和光参量放大器 (Optical Parametric Amplifier, OPA) 级联, 是为了得到较高的脉冲输出能量。

如图 1 所示, 300 mJ/532 nm 的泵浦光被偏振分束片以 1:2 分为两束, 33% 进入 OPO, 67% 进入后级 OPA。OPO 谐振腔采用四腔镜环形行波腔结构, 腔镜 M1 是泵浦光入口, 腔镜 M2 是信号光输出口, 腔镜 M3 是空闲光泄漏窗口; OPO 非线性晶体采用磷酸钛氧钾 (KTiOPO<sub>4</sub>, KTP) 晶体, 两个端面均针对泵浦光和信号光的波长镀减反射膜, 晶体的端面尺寸为  $7.5 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$ , 切割晶向角度 ( $\phi=0^\circ$ ,  $\theta=70.7^\circ$ )。一对完全相同的 KTP 晶体安置在振荡腔内形成走离补偿结构。泵浦光 532 nm 是 *o* 光 (*p* 偏振), 信号光 936 nm 是 *e* 光 (*s* 偏振), 这样只有信号光被正反馈而在谐振腔内振荡, 即为单谐振光参量振荡器。OPA 级使用单个 KTP 晶体, 进一步放大 OPO 输出的信号光能量。激光延迟线用来同步 OPA 泵浦光和 OPO 输出的信号光到达 OPA 级晶体的时间。

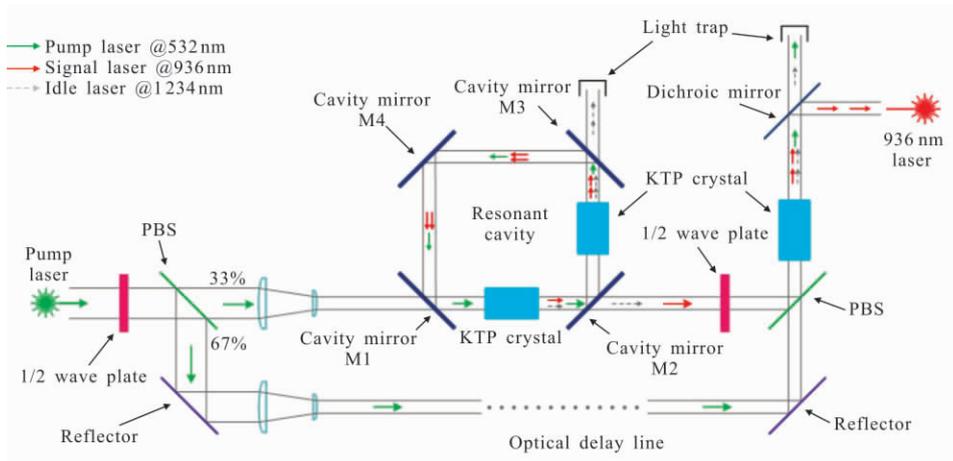


图 1 光参量振荡-放大器结构图

Fig.1 Configuration of optical parametric oscillator and amplifier

图 2 展示了向光参量振荡器注入种子和控制谐振腔腔长的结构。相对于无种子 OPO 而言,种子光的引入,可以降低 OPO 起振阈值,提高能量转换效

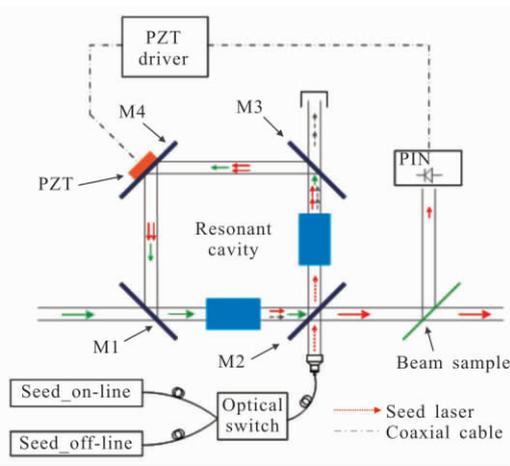


图 2 种子注入和 OPO 谐振腔腔长锁定示意图

Fig.2 Seed-injection and cavity length locking of OPO resonator

率。on-line 和 off-line 种子光通过光开关选通,经过光纤准直器和腔镜 M2 轮流注入 OPO 谐振腔内以选出与种子光频率一致的激光模式。选用波长可调谐的 Toptica DL100 DFB 作为 OPO 注入种子激光器。由于发射波长与注入种子波长的一致性特点,所设计的差分吸收激光雷达发射波长也是可小范围调谐的,可以根据不同天气或季节特点灵活选择 on-line 和 off-line 波长,注意在调整注入种子后需微调 OPO 晶体角度以满足相位匹配。

最终,得到的 532 nm 转换为 936 nm 的净转换效率约为 15%,获得的 936 nm 信号光单脉冲能量在 40 mJ 左右。

### 1.2 接收机

为了获得大动态范围全域测量数据,将近场和远场分立为两个独立的探测通道,分别采用同轴和旁轴结构,如图 3 所示。

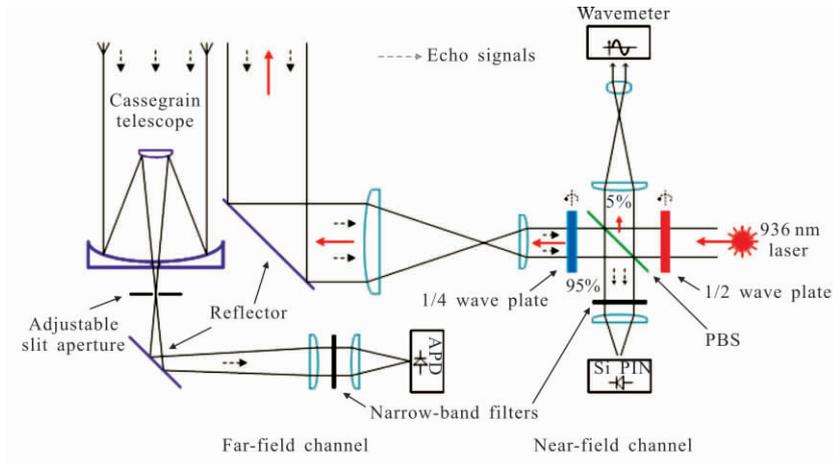


图 3 双通道接收光路示意图

Fig.3 Optical circuit for dual channels receiver

1.2.1 远场通道(主通道)

远场探测通道是系统的主要探测通道,使用旁轴结构。探测光路采用 Meade 公司卡塞格林(Cassegrain)式望远镜 LX200ACF 作为光学接收器,有效口径 305 mm,焦距 3 048 mm。望远镜接收的回波信号经过反射、准直后,透过中心波长 935.81 nm,峰值透过率~65%,光学带宽 1 nm@FWHM 的窄带滤光片(Andover Corp. 010FC37-25),滤除背景和非弹性散射干扰,然后会聚到探测器光敏面。

远场通道担负着探测稍远处弱信号的任务,因此探测器采用 Laser Components 公司 A-CUBE-S3000-25 系列高灵敏度 APD 探测器,峰值波长 905 nm,光敏面直径  $\phi 3.0$  mm,响应度 0.5 MV/W(@905 nm)。

系统安装结束后,需要对整个接收通道光路进行调试,以保证望远镜接收的后向散射光信号能充

分到达探测器光敏面。将望远镜焦点调至无穷远处后,安装后置光路,同时在探测器位置安装工业相机(见图 4(b),北京凯视佳, MU3S231M,黑白成像,230 万像素)。调节时首先使用 632 nm He-Ne 激光作为辅助调节准直透镜,使得准直透镜的焦点位于视场光阑位置;其次借助太阳光调节后置光路反射镜,使得视场光阑的像位于光轴中心;最后调节探测器前的会聚透镜,使得视场光阑的像最小,最清晰。完成上述步骤后便可以认为后置光路已调好。

由于系统的远场通道为旁轴结构,因此在实验前还需要调节发射激光光轴指向和旁轴望远镜光轴指向。希望旁轴望远镜光轴指向与发射激光光轴指向均固定为指向天顶,为此设计了如图 4(图中仅标注需要用到的部件以及相对图 3 添加的部件)的光轴调节方法。图 4 中白色箭头代表调节时光斑移动趋势。

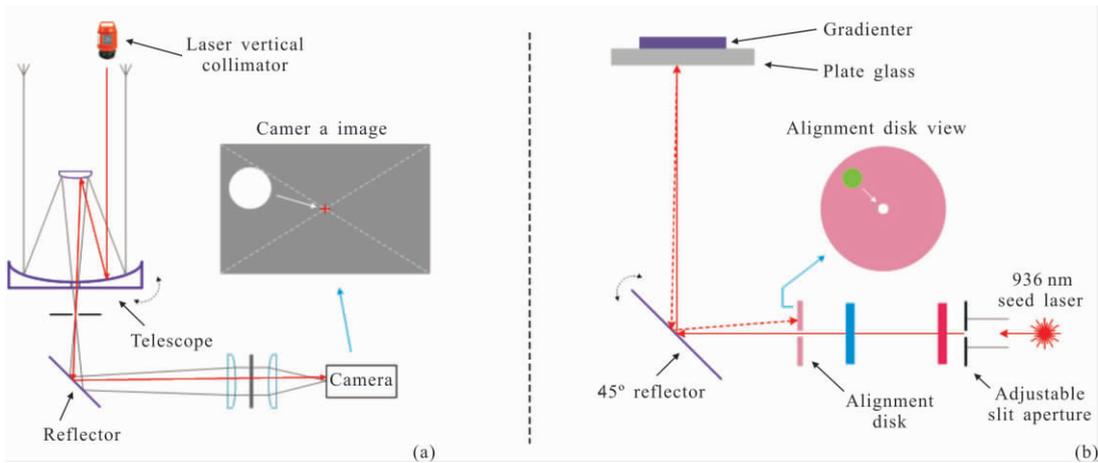


图 4 (a)望远镜光轴调节方式;(b)激光发射光轴调节方式

Fig.4 (a) Telescope optical axes adjusting manner; (b) transmitter axes adjusting manner

调节望远镜光轴时,使用的具有自动安平功能的高精度激光垂准仪(苏州一光辐射仪器有限公司, JC100,垂准偏差 $\pm 1$  mm/100 m)来实现。将激光垂准仪安置在望远镜上方,水平偏差不超过 3°,将其向下发射的与天顶方向共线的激光束打入望远镜;在调节好的后置光路探测器位置使用工业相机观察垂准仪光斑的像,见图 4(a),此时调整望远镜支撑机构,使得垂准光斑的像移动至工业相机像面中心,便可以认为望远镜的指向已与垂准仪激光指向平行。

调节发射激光光轴时,使用了一块定制的双面平行度极高的平板玻璃(武汉优光科技有限责任公

司,平行度 5",光洁度 60/40,一面镀银膜,一面不镀膜)。如图 4(b)所示,使用安装机构将平板玻璃放置在发射光路 45°反射镜上方,镀银膜表面向下,上表面放置精密水平仪(上海水平仪厂, ST150, 0.02 mm/m),调整安装机构使得平板玻璃尽可能保持水平;在二分之一波片后方安装一个可变孔径光阑(Thorlabs, SM1D12D),去掉发射光路上的扩束镜和 PBS,在扩束镜位置安装一片中心带有  $\phi 1.5$  mm 通孔的荧光对准盘(Thorlabs, VRC4D1)。调节时将光阑孔径调至 1 mm,打开 936 nm 种子激光器,首先调整整个光路位置及角度,使得种子激光光斑中心部位能同时通

过光阑小孔和对准盘小孔并出射;其次调节 45°反射镜角度,使得被平板玻璃银膜表面反射后的激光光斑恰好在对准盘的通孔处,此时发射激光被反射后原路返回。由于反射面是水平的,因此可以认为此时发射激光光轴已与水平面垂直;最后安装扩束镜,对准扩束镜光轴与已调好的激光发射光轴,此时便可以认为发射激光光轴已指向天顶。该方法调节的结果误差较大,在每次实验时,还需根据实际回波波形微调优化发射光轴指向。

### 1.2.2 近场通道

设置的近场通道为同轴结构,利用偏振进行收/发光,发射机产生的竖直偏振的激光,经过二分之一波片后,5%被偏振分束器(Thorlabs, PBS252)反射进入波长计进行发射波长监视;95%透过分束器,经过四分之一波片变为圆偏振态,扩束后射入大气。大气的后向散射回波仍为圆偏振态,但偏振旋转方向

与发射激光相反,在反向经过四分之一波片后变为水平偏振态,被 PBS 反射进入探测通道,经过衰减和滤光(Thorlabs, FB940-10)后聚焦到探测器。考虑到最底层大气二次散射效应强烈,对近场通道数据的有效区域的设定为距离地面 250~1 000 m 高度范围。近场散射信号较远场强得多,可以使用较低增益或可变增益的探测器以方便调试和探测。选用 Thorlabs PDA36A 系列 Si PIN 探测器,光敏面大小 3.6 mm×3.6 mm,峰值波长 970 nm,响应度 0.49 kV/W。

近场通道的调试方法类似于激光光轴调节。如图 5 所示(图中仅标注相对图 3 添加的部件名称),在完成发射激光光轴指向调节后,保持平板玻璃与荧光对准盘 1 的位置不变,使用可调立方体平台(Thorlabs, B4C/M)安装 PBS;在近场通道探测器位置安装荧光对准盘 2(Thorlabs, VRC2SM1);在波长计位置放置激光功率计(Ophir Star Bright)。

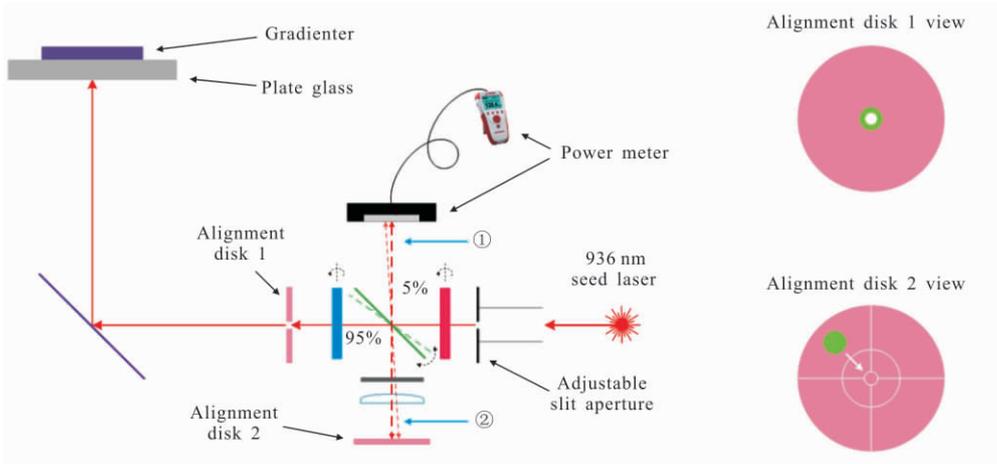


图 5 近场通道调节示意图

Fig.5 Alignment for near field channel

调节时打开 936 nm 种子激光器,首先粗调 PBS,找到两束 PBS 的反射光线①和②,然后精细调节 PBS 俯仰和偏摆,使得对准盘 2 上的光斑恰好位于对准盘中心;之后旋转二分之一波片,通过功率计观察反射光线①的功率来选择合适的分束比;最后旋转四分之一波片,使得对准盘 2 上观察到的反射光线②的光斑亮度达到最高,此时便认为近场通道光路已调好。为了预留微调裕量,调节完成后,在安装近场通道探测器时添加了 XY 调节机构(Thorlabs, CXY1)。

### 1.3 数据采集传输电路

数据采集与传输电路主要由信号调理、数据采

集和数据传输三部分组成。采集系统的非线性会给测量带来误差,要使得该项误差小到可以忽略的程度,需要仔细选择合适的 ADC 芯片。评价一块 ADC 芯片的性能常有三项指标:采样率、分辨率和非线性度,这三项指标分别对应了激光雷达系统的理想高度分辨率、信噪比和测量精度。综合考虑下,采用了 LT 公司 LTC2270,采样率 20 Msps,分辨率 16 bit,积分非线性度(INL)和微分非线性度(DNL)典型值分别为±1 LSB 和±0.2 LSB。

其次设计信号调理电路。信号调理的目的是使得探测器的输出信号与 ADC 的输入要求相匹配。

LTC2270 要求差分输入并且共模电压为 0.9 V, 则信号调理电路需要将单端输入的探测信号转换为所要求的差分信号。为了尽可能保留信号低频成分, 此处使用差分放大器芯片 AD8138 和基准电压芯片 TL4050C20(2.048 V) 的组合来间接充当单端转差分器件。数据采集传输电路主要指标如表 1 所示。

表 1 数据采集传输电路主要指标

Tab.1 Main indicators of data capture transport circuit

Item	Value
Sampling rate/Msps	20
Resolution/bit	16
Simulation bandwidth/MHz	DC~10
Input range/V	-0.052~4.148
SNR/dB	84.1
Data transport way	USB 2.0

最后设计采集卡控制和数据传输电路。采集控制逻辑由 Xilinx 公司生产的 XC6SLX16 这款 FPGA 芯片执行, 电路与 PC 客户端的数据传输由 CY7C68013A 芯片通过 USB2.0 协议执行。整个数据采集与传输逻辑为: 每次触发到来后, FPGA 从 ADC 中读取 8 000 点采样数据存入内部先入先出队列 (First In First Out, FIFO), 然后读取光开关状态, 向暂存的数据帧添加记号码用以标识 on-line 和 off-line 数据, 最后通过 USB 芯片传输至 PC 客户端。

1.4 进一步向上延展探测范围的计划

为了将水汽的有效数据高度提升到 5 km, 由于水汽 935 nm 的吸收很严重, 高程回波信号很弱, 需要用到光子计数技术。主望远镜采用双探测器, 都是长波增强型硅雪崩二极管, 一个为  $\phi 3.0$  mm 的雪崩二极管, 工作在线性模式下; 另一个光敏面直径为  $\phi 0.2$  mm 以下的雪崩二极管 (HAMAMATSU-S8890-02; EG&G C30902S APD), 工作盖格模式下。激光束一旦发射, 第一个线性模式雪崩二极管开始工作, 输出模拟电压给 AD 采集器; 给第一个雪崩二极管信噪比设置阈值, 当信噪比阈值低于此阈值时, 电光偏转器工作, 把回波偏转切换到到第二个雪崩二极管光敏面, 以盖格模式探测主望远镜接收的回波, 输出光子计数信号。这样的安排可以实现水汽有效数据向上延伸。这种设计还没有真正落实, 有待进

一步工作。

2 激光双波长的调整与实验结果

选用 TOPICA 公司的产品 LD-0937-0100-DFB-1 (可调谐范围 936.1~938.5 nm) 代替在用的 LD-0935-0030-DFB-1 (可调谐范围 934.9~936.3 nm), 因为后者的功率是前者的三倍, 可增加连续波种子激光的注入功率, 从而有利于提高光参量振荡器的信号光光谱纯度(注入种子光的更高功率, 意味着信号光的光谱纯度更高) 两个型号的半导体激光器的参数对比如表 2 所示。将 936.250 0 nm 作为 offline 参考波长, 而将 936.18 nm 作为 online 探测波长。水汽在 936.250 0 nm 附近的吸收截面与水汽在 935.852 nm 附近的吸收截面相当。图 6 表征了 935.2~937.2 nm 地表水汽的吸收截面。

表 2 LD-0937-0100-DFB-1 和 LD-0935-0030-DFB-1 型号半导体激光器的特性对比

Tab.2 Characteristics comparison between LD-0937-0100-DFB-1 和 LD-0935-0030-DFB-1 semiconductor laser

DFB laser type	Typical output fiber power/output power/mW	Wavelength adjust scope /nm	Working temperature /°C	Typical working current /mA
LD-0935-0030-DFB-1	15/30	935.0-936.3	26.5-44.0	55.0
LD-0937-0100-DFB-1	50/100	936.1-938.5	5.0-45	150.0

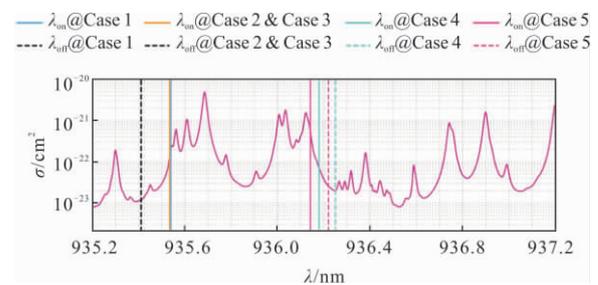


图 6 935.2~937.2 nm 水汽吸收截面(地表压力值 1 atm, 地表温度 290 K;  $\lambda_{on}$  为探测波长,  $\lambda_{off}$  表示参考波长)

Fig.6 Absorption cross section of water vapor at 935.2~937.2 nm (surface pressure 1 atm, surface temperature 290 K;  $\lambda_{on}$ -detection wavelength,  $\lambda_{off}$ -reference wavelength)

2018 年 09 月 28 日,天气状况:晴转多云,21~27℃,东北风 3~4 级。此次实验从当地时间 19:28 开始,持续约 15 h。实验结果如图 7、8 所示。

探测波长: on-line: 936.180 0 nm; off-line: 参考波长 936.250 0 nm。

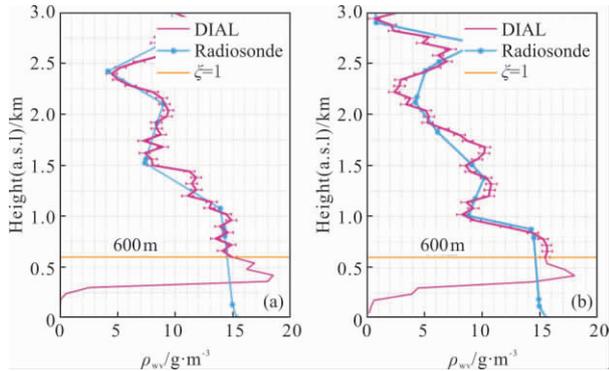


图 7 2018 年 9 月 28 日(a)、2018 年 9 月 29 日(b)主通道探测的大气水汽扩线(600 m 以下无效),蓝色是无线电探空数据,红颜色是激光雷达反演的数据,a.s.l 表示海拔

Fig.7 Profile for atmospheric water vapor of main channel (600 m down no available) 2018.09.28(a), 2018.09.29(b); (blue) data from radio sounding balloon, (red) profile determined with the lidar, (a.s.l) meanings above sea level

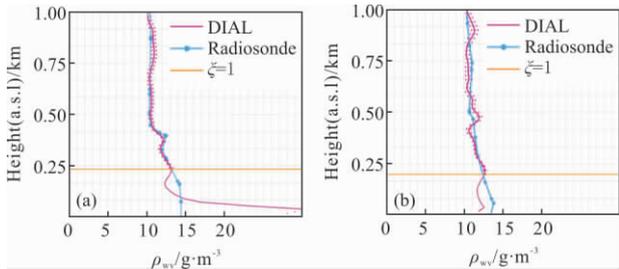


图 8 2018 年 9 月 28 日(a)、2018 年 9 月 29 日(b)近场通道探测的大气水汽扩线(250 m 以下无效)蓝色是无线电探空数据,红色是激光雷达反演的数据

Fig.8 Profile for atmospheric water vapor of near field channel (250 m down no available) 2018.09.28(a), 2018.09.29(b); (blue) data from radio sounding balloon, (red) profile determined with the lidar

从图 7 可以看出,(1) 在大气水汽浓度整体较高时,通过选择合适的探测波长,系统主通道可以有效探测 600~3 000 m 范围内的大气水汽廓线;(2) 若不考虑云层效应,秋季大气水汽集中分布在 1.2 km 以下大气区域。从图 8 可以看出,(3) 近场通道在 250~

1 000 m 高度范围内探测结果与最近时刻的无线电探空结果具有较好的相似性;(4) 在夜间,大气结构较为稳定,水汽浓度空间分布同样较为稳定。

### 3 结束语

(1) 利用发射激光的准直扩束器,同时也作为近场回波的接收器,和主望远镜一道工作,从而减小激光雷达的盲区,向下延展水汽廓线的探测范围;(2) 水汽探测的高程范围由此扩展达到 250~3 000 m;(3) 以 LD-0937-0100-DFB-1 半导体激光器代替原来的 LD-0935-0030-DFB-1 半导体激光器,显著提高种子激光器的功率,进而提高光发射机的光谱纯度。随机误差在 5% 以内;(4) 主探测通道采用两种雪崩二极管工作,一种先工作在线性模式下面,另一种随后工作在光子计数模式下面,可以进一步期待,向上拓展水汽探测高度。

### 参考文献:

- [1] Poberaj G, Fix A, Assion A, et al. Airborne all-solid-state DIAL for water vapour measurements in the tropopause region: system description and assessment of accuracy [J]. *Appl Phys B*, 2002, 75: 165-172.
- [2] Wirth M, Fix A, Mahnke P, et al. The airborne multiwavelength water vapor differential absorption lidar WALES: system design and performance [J]. *Appl Phys B*, 2009, 96: 201-213.
- [3] Ge Ye, Shu Rong, Hu Yihua, et al. System design and performance simulation of ground-based differential absorption lidar for water-vapor measurements[J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(20): 204301. (in Chinese)
- 葛焯, 舒嵘, 胡以华, 等. 大气水汽探测地基差分吸收激光雷达系统设计与性能仿真[J]. *物理学报*, 2014, 63(20): 204301.
- [4] Hong Guanglie, Li Jiatang, Kong Wei, et al. 935 nm differential absorption lidar and water vapor profiles in convective boundary [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0201003. (in Chinese)
- 洪光烈, 李嘉唐, 孔伟, 等. 935 nm 差分吸收激光雷达及对流边界层水汽探测[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0201003.
- [5] Andreas Behrendt, Volker Wulfmeyer, Andrea Riede, et al. 3-dimensional observations of atmospheric humidity with a scanning differential absorption lidar [C]//SPIE, 2009, 7475: 74750L.

- [6] Volker Wulfmeyer, Jens Bösenberg. Ground-based differential absorption lidar for water-vapor profiling: assessment of accuracy, resolution, and meteorological applications [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(18): 3825–3844.
- [7] Vogelmann H, Trickl T. Wide-range sounding of free-tropospheric water vapor with a differential absorption lidar (DIAL) at a high-altitude station [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(12): 2116–2132.
- [8] Florian Späth, Simon Metzendorf, Andreas Behrendt, et al. Online offline injection seeding system with high frequency-stability and low cross talk for water vapor DIAL [J]. *Optics Communications*, 2013, 309: 37–43.
- [9] Volker Wulfmeyer, Craig Walther. Future performance of ground-based and airborne water-vapor differential absorption lidar. I. Overview and theory [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(30): 5304–5320.
- [10] Volker Wulfmeyer, Craig Walther. Future performance of ground-based and airborne water-vapor differential absorption lidar. II. Simulations of the precision of a near-infrared, high-power system [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(30): 5321–5338.