

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905259

测量近中红外激光大气透过率的调制型太阳光度计^{*}

李建玉, 孙凤莹, 李学彬, 崔朝龙, 魏合理

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室 合肥 230031)

摘要:为弥补常用红外波段激光大气透过率测量方法成本高或实时性低的不足,通过模拟计算分析研究,提出基于光源调制太阳光度计技术提取红外波段激光大气透过率的方法,提供一种成本低、操作简单、实时性强的有效测量方法。研制的光源调制型红外太阳光度计可测量宽波段大气透过率,再依据建立的宽带和窄带透过率关系进行修正,最终获取可应用的近中红外多波段激光大气透过率。实际测量结果与对比实验表明,与实验室自研的近红外太阳光度计相比统计误差小于4%,与POM-02相比统计误差小于6%。红外调制型太阳光度计获取的实时结果不但可应用于激光大气传输修正中,也对评估激光通信和激光传输等具有重要意义。

关键词: 光学仪器;太阳光度计;激光大气透过率;红外波段

中图分类号: TH765 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.1520

Measurement of near-mid infrared laser atmospheric transmittance using sunlight modulation sun-photometer

Li Jianyu, Sun Fengying, Li Xuebin, Cui Chaolong, Wei Heli

(Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The infrared laser atmospheric transmittance measurement methods have the problems of high cost and low real-time performance. To address these problems, a method making use of the measurements of sunlight modulation sun-photometer to obtain the atmospheric transmittance of infrared laser is proposed. It is mainly based on measurements and research of analysis on analogy calculation. This method has the advantages of low cost, simple operation, and real-time performance. The infrared sunlight modulation sun-photometer can measure the atmospheric transmittance in wide band. Then, the relationship between the broadband transmittance and the narrowband transmittance can be revised. Finally, the applicable near-mid infrared multi-band laser atmospheric transmittance can be obtained. The actual measurement results and comparison experiments are carried out. Compared with the near infrared sun-photometer developed by the laboratory, experimental results show that the statistical error is less than 4%. Compared with POM-02, the statistical error is less than 6%. The real-time results obtained by infrared sunlight modulation sun-photometer can be used not only in the correction of laser atmospheric transmission, but also in the evaluation of laser communication and laser transmission.

Keywords: optical instrument; sun-photometer; laser atmospheric transmittance; infrared waveband

0 引 言

激光具有高亮度、良好的单色性、方向性及相干性电磁波的一切通性,在很多科学领域都得到了广泛应用。但同时,激光在大气中传输时会因大气中的分子和气溶胶的吸收、散射而引起强度衰减^[1-2],这种衰减可直接影

响其在激光探测、测距、通信等激光工程中的应用^[3-4]。而激光在大气中的传输通常用大气透过特性来表述,因此实时获取激光波段大气透过率,了解与掌握激光大气透过率规律在天文、气象以及国防上都具有重要的应用前景。

目前,获取激光波段大气透过率的实时测量方法主要分为2类:1)主动式探测,如激光雷达,可全天连续观

测,且适应时空变化能力较强^[5-6]。赵明等^[6]研制了一台基于碘分子滤光器的可昼夜观测的激光雷达,可用于大气透过率的测量,新的雷达技术也在不断开发,用于大气监测^[7-8]。2) 被动式探测,常用的为太阳光度计技术,如使用光谱仪和跟踪转台相结合,黄晟等^[9]研制了光栅分光式太阳光度计,进行连续波段测量,得到整层大气连续透过率;冯全全等^[10]为了获得夜晚整层大气光谱透过率,研制了测量 $0.4 \sim 0.75 \mu\text{m}$ 夜晚可见光波段整层大气透过率的恒星辐射计。激光外差法也是被动式探测的一种,利用合束器将本振激光和被测光信号产生相干性,并由光电探测器进行快速响应以实现光学混频,可获得高分辨率的光谱外差信号。吴庆川等^[11]基于此建立了一套分辨率高达 0.006 cm^{-1} 的整层大气透过率测量系统,实现了 $4.4 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 中红外波段范围的整层大气透过率的实时测量。卢兴吉等^[12]同样基于该技术,设计了一套分辨率高达 0.002 cm^{-1} 的激光外差系统,提高了信号的信噪比,测量得到 $3.53 \mu\text{m}$ 波段整层大气透过率。太阳光度计技术成本低、实时性强,可测量多波段大气透过率,不少学者基于此技术开发新的测量方法。如李建玉等^[13]和杨东等^[14-15]研发了一种基于图像跟踪的自动快速变视场太阳光度计,用于测量卷云特性参数。但是可同时测量多个近中红外波段激光大气透过率的光度计技术目前尚未有报导,因此提出从光源调制型红外太阳光度计实测的宽带大气透过率中提取红外激光窄带透过率的测量方法。

本文研制一种红外光源调制型太阳光度计,采用光源调制方法可实测得到多个近中红外激光大气透过率。将该仪器的测量结果与 POM-02 型太阳光度计和自研的 ISP 型近红外太阳光度计的测量结果进行对比,用于检验该设备是否可靠。

1 仪器的研制

1.1 硬件总体设计

该调制型太阳光度计主要由上位机、底座、光学跟踪系统组成。上位机机箱中有数据采集卡,以实现波形信号采集。底座内装有各种模块电源、电机驱动器、恒温控制器、信号增益控制电路和 I/O 驱动电路等。光学跟踪系统有四象限探测器、红外调制系统、3 路电机和光学探测单元组成。图 1 所示为该系统硬件组成。

其中:

1) 上位机即计算机,完成数据的存储和处理,并实时显示波形信号。

2) RS422 作为串口实现上位机与单片机控制系统之间的数据通信。

3) AVR 单片机控制系统参与太阳的追踪、数据采集处理、温控和通讯等功能。

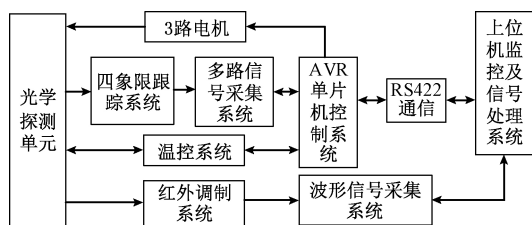


图1 仪器硬件组成

Fig.1 Hardware of the instrument

4) 信号采集系统完成光电转换与光强信号的采集。

5) 3 路电机中俯仰和水平电机分别控制探头的俯仰和水平旋转,另外 1 路电机负责旋转 7 个波段的滤光片。

6) 四象限跟踪系统使用四象限探测器,将太阳光强信号转换为电压信号后,通过检测各象限电压信号的差值从而驱动探头自动跟踪太阳。

7) 红外调制系统是由于 PbSe 探测器需要输入交变信号,采用微型斩波器对太阳光进行调制。

8) 温度控制系统保证探测器在恒温环境下工作,提高信号处理的精度,减少温漂对测量信号的影响。

1.2 光学系统设计

以改进现阶段获取激光波段大气透过率方法的不足为目的,要同时获取红外激光波段 (1.064 、 1.315 、 1.54 、 $3.8 \mu\text{m}$) 大气透过率,需选取 $1.0 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 波段范围的热电制冷型高性能碲化铅探测器,该型探测器对交变的弱信号响应较敏感,输出的交变信号信噪比高,因此,需对红外波段太阳光源进行调制,并对探测器输出的信号进行光强解调。设计调制和解调系统如图 2 所示,太阳平行光经透镜聚焦后通过光学斩波器形成的交变信号再经一定带宽滤光片滤波后入射到红外探测器感光面,探测器输出的交变信号再经信号检测处理后进行存储,得到与光强成正比的电压信号,该电压信号即红外波段太阳光强变化信号。由衰减片、光阑、组合透镜组成的光接收系统要满足 $32'$ 的太阳视场,考虑跟踪精度设计视场为 1° ,既能让太阳光斑完全进入视场内,又能保证 1° 视场外的杂散光不能进入,设计透镜焦距 $f=100 \text{ mm}$,太阳光斑大小约 0.93 mm ,选择探测器感光面不小于 2.0 mm ,既能让太阳光斑完全进入探测器感光面,又有足够余量用于调节燕尾槽来实现测量光筒和跟踪光筒光轴的平行度。

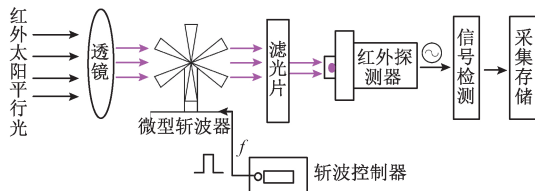


图2 太阳红外光源调制系统

Fig.2 Modulation system for infrared sunlight

1.3 仪器原理及详细设计

工控机的控制软件发送命令给采集控制电路,通过光电开关 0 位检测找到水平和俯仰 0 位后控制二维旋转转台回到正南和水平初始位置,根据天文视日轨迹粗跟踪方法使太阳跟踪测量探头指向太阳,并启动四象限跟踪,使探头的测量光筒精确对准太阳。太阳平行光经测量光筒内透镜聚焦后,通过斩波器形成的交变信号再经一定带宽滤光片滤波后入射到近中红外探测器的感光面,探测器输出的交变信号再经波形信号采集处理后,得到与光强成正比的电压信号进行存储。通过滤光片旋转,可将 7 个波段和背景信号进行存储和显示。循环跟踪和采集,可得到全天时间序列变化 1.0~4.5 μm 中 1.05、1.064、1.31、1.32、1.54、1.62、3.8 μm 共 7 个近中红外波段与太阳直接辐射成正比的电信号,对测量的各波段电信号采用 Langley 法和改进的 Langley 法进行相对定标得到该测量仪的定标值,进而根据红外激光大气透过率获取方法,可得到近中红外激光大气透过率,仪器原理设计如图 3 所示。

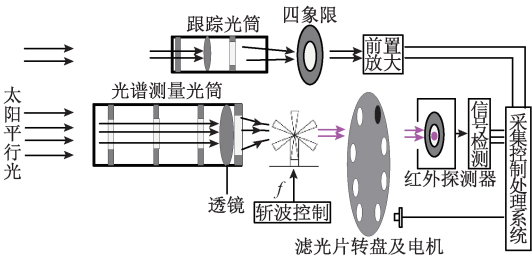


图 3 测量原理
Fig.3 Schematic of measuring principle

要测量太阳平行光就需要可以实时跟踪太阳的转台,水平和俯仰传动机构采用交叉滚子轴承与步进马达构成的中空旋转平台,采用直接驱动,具有高扭矩,高可靠性的优点,可以野外长期运行免维护。设定设备转动 360°,需脉冲数 90 000 个,跟踪角分辨率为 0.004°,保障跟踪定位精度优于±1'。

1.4 仪器性能指标

最终研制的红外光源调制 SP 型太阳光度计实物如图 4 所示,仪器所能达到的性能和指标如表 1 所示。

2 红外激光大气透过率获取方法

模拟计算分析可知,所有激光波段在大气中传输时都受到气溶胶的影响而衰减,而 1.315 和 3.8 μm 透过率还会受水汽吸收影响较大,尤其 1.315 μm 波段,一定大气模式下,在激光波数上的水汽透过率是 0.956,而一定带宽下的平均透过率却仅 0.756,并不像 1.064 μm 虽



图 4 SP 型红外太阳光度计实物
Fig.4 Physical chart of SP infrared sun-photometer

表 1 光源调制红外太阳光度计性能指标
Table 1 Performance index of infrared sunlight modulation sun-photometer

性能	指标
测量中心波长/μm	1.05、1.064、1.31、1.32、1.54、1.62、3.8
接收视场角/(°)	1 (1.05 μm、1.064 μm)@10 nm, (1.31 μm、1.32 μm、1.54 μm、1.62 μm)@12 nm, (3.8 μm)@80 nm
滤光片半高带宽	
跟踪精度/(′)	±1
非激光波段透过率测量精度/%	优于 10
激光波段透过率测量精度/%	优于 15
水汽总量测量精度/%	优于 15
温控误差/℃	±0.5
工作环境温度/℃	-30~55

受到 O₃、O₂ 的些许影响,但整个带宽上 O₃、O₂ 的吸收比较平缓,故宽带平均透过率与窄带平均透过率差别不大。部分激光波段受 CO₂、O₂、CH₄、N₂O 的影响很小,选取合适的带宽也可减少一些吸收气体的影响,如 3.8 μm 波段,选取 80 nm 带宽以下时可以减少 N₂O 的影响。通过对我国不同典型地区月均值和年均值大气模式下 1.064、1.31、1.315、1.32、1.54、3.8 μm 各波段在窄带宽与宽带宽下水汽透过率比值随水汽含量的变化分析可知:1)有水汽吸收线更多且强的 1.32 μm 波段的水汽透过率随水汽含量的变化在不同月份的变化比其它波段要明显,其它波段不同月份变化很小,故后面可考虑利用 1.32 μm 来反演得到水汽总量;2) 1.31、1.315、1.32、3.8 μm 各波段窄带和宽带水汽透过率比值受水汽含量影响很大,不同地区也有差异,随着水汽含量的增大,变

化趋势明显不同。基于这些模拟计算分析,本文提出实测法获取红外激光大气透过率的方法,即直接测量激光波段的太阳宽谱直接辐射,采用 Langley 法和改进的 Langley 法定标后^[16],可直接得到对应激光波段的宽谱透过率,为了实现该测量,实验室研制了 SP 型红外太阳光度计,用于 1.05、1.064、1.31、1.32、1.54、1.62、3.8 μm 波段的测量,模拟计算可知 1.315 μm 的激光谱线上水汽吸收较弱,而 1.315 μm 的宽波段上水汽吸收线很多且较强,由于太阳光度计实测的 1.31 μm 波段透过率是宽波段(市场上无现成的 1.315 μm 中心波段的滤光片,如果定制,价格昂贵,且设计的中心波段也不完全在 1.315 μm ,1.31 μm 滤光片带宽 12 nm,都含有 1.315 μm),故,对于新研制的太阳光度计实测的 1.315 μm 和 3.8 μm 透过率需要扣除水汽的影响,方法如下:

$$T_{\text{all}_L} = T_{a_L} * T_{\text{cw}_L} * T_{\text{other}_L} \quad (1)$$

$$T_{\text{all}_W} = T_{a_W} * T_{\text{cw}_W} * T_{\text{other}_W} \quad (2)$$

式中: T_{all_L} 是激光窄带总的透过率; T_{all_W} 是太阳光度计实测的宽带总的透过率; T_{a_L} 和 T_{a_W} 、 T_{cw_L} 和 T_{cw_W} 、 T_{other_L} 和 T_{other_W} 依次对应的分别是窄带和宽带的气溶胶吸收和散射透过率、水汽吸收透过率、其它气体吸收和分子散射透过率。由模式计算可知,在 1.315 和 3.8 μm 的窄波段和宽波段中,气溶胶的吸收和散射透过率基本不变,其它气体的吸收和分子散射透过率也基本不变,故有:

$$T_{a_L} = T_{a_W}, T_{\text{other}_L} = T_{\text{other}_W} \quad (3)$$

式(3)代入式(2)有:

$$T_{\text{all}_L} = T_{\text{all}_W} * T_{\text{cw}_L} / T_{\text{cw}_W} \quad (4)$$

实际大气中,其他气体和分子含量在某一地区常年可认为是一恒量,但气溶胶和水汽含量是大气中时间和季节上最不确定的量,故需要实时测量得到,本文的 SP 型红外太阳光度计可以实时测得 T_{all_W} 和水汽含量,利用实测的水汽含量通过大气辐射传输软件,再结合我国区域大气模式,计算得到窄带和宽带上的水汽透过率谱线,并与滤光片的谱线进行卷积平均后可以得到 T_{cw_L} 和 T_{cw_W} ,故即可得到 T_{all_L} 。建立的实测法激光谱线大气透过率提取流程如图 5 所示。

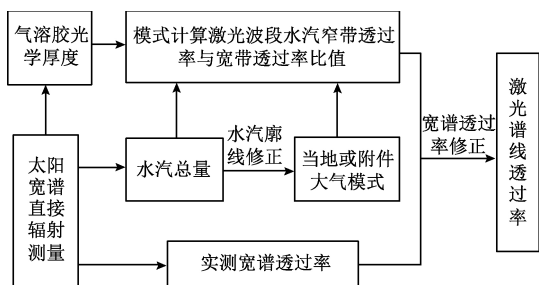


图5 实测法提取激光谱线大气透过率流程

Fig.5 Calculation model flow of measurement method for extracting laser atmospheric transmittance

该方法首先利用改进的 Langley 法对有水汽吸收的激光波段进行定标,定标后的红外太阳光度计可直接测得激光宽波段下的总的透过率 T_{all_W} (含有气溶胶衰减、分子散射、宽带上水汽吸收、其它气体吸收),然后利用 0.94 μm 波段反演得到水汽总量^[17],并对当地大气模式的水汽廓线进行修正,根据实测的水汽总量及修正后的水汽廓线借助于辐射传输模式进行模拟计算得到水汽窄带透过率和宽带透过率,并与滤光片的谱线进行卷积平均后可以得到 T_{cw_L} 和 T_{cw_W} ,最后根据式(4)进行透过率的修正可得到激光波段透过率 T_{all_L} 。气溶胶和水汽都是大气中最不确定的因素,由于增加了实际测量的气溶胶衰减和实际测量的水汽总量对水汽宽带透过率进行修正,相对仅用模式计算,获得激光大气透过率的精度有很大的提高。已知大气层外夜晚某颗恒星的光谱,以上方法同样适用于利用夜晚恒星提取激光谱线透过率。

对比试验测量中提到的外推法,该方法首先利用 POM 太阳光度计测量的 0.4、0.5、0.675、0.87、1.02、1.627 μm 6 个非吸收波段太阳直接辐射得到气溶胶光学厚度,再根据光学厚度与透过率转换公式得到需要的激光波段气溶胶透过率,然后利用 0.94 μm 波段反演得到水汽总量,并对当地大气模式的水汽廓线进行修正,根据实测的水汽总量及修正后的水汽廓线借助于辐射传输模式进行模拟计算得到水汽窄带透过率,其它气体吸收和分子散射透过率也可根据当地大气模式模拟计算得到,最后对各透过率进行综合,可得到激光波段总透过率。该方法不仅适用于日本 POM 型太阳光度计,也适用于法国的 CE 型和我所自行研制的 DTF 型和 ISP 型近红外太阳光度计来获取多波段激光大气透过率。

3 实验测量结果分析及比较

3.1 利用 1.32 μm 波段反演水汽总量及其误差分析

水汽作为大气中最不确定的因素,不同地域不同季节,其值变化较大,实时获取水汽总量,对从宽谱透过率中提取激光波段大气透过率尤为重要。一般情况下,测量水汽总量可以通过强水汽吸收波段 0.94 μm 波段进行反演得到,而本文中研制的 1.0~4.5 μm 光源调制型红外太阳光度计无法测量 0.94 μm 波段,考虑到 1.32 μm 水汽吸收也较强,因此,本文提出采用 1.32 μm 进行反演水汽总量,反演方法类似 0.94 μm 波段^[17],由改进的 Langley 法定标后^[16],便可得出整层大气可降水量。

在合肥地区将本文提出 1.0~4.5 μm 光源调制 SP 型红外太阳光度计与 0.8~1.8 μm 实验室自研的可用于激光波段测量的 ISP 型近红外太阳光度计和日本进口的 POM-02 型太阳光度计进行同时同地对比试验,将 SP 型红外太阳光度计利用 1.32 μm 反演的水汽总量分别与 ISP 型近

红外太阳光度计和 POM-02 型太阳光度计利用 0.94 μm 反演的水汽总量进行对比,结果如图 6 和 7 所示。

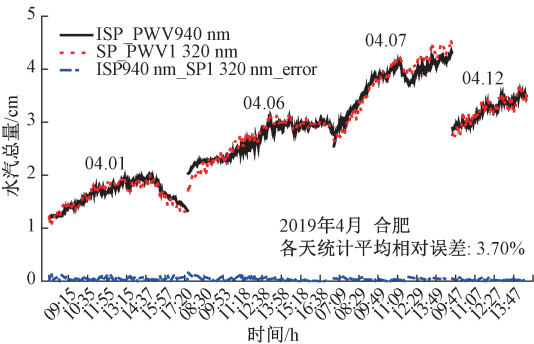


图 6 与 ISP 型近红外太阳光度计 0.94 μm 反演的水汽总量对比结果

Fig.6 Comparison of water vapor retrieved from ISP near infrared sun-photometer at 0.94 μm

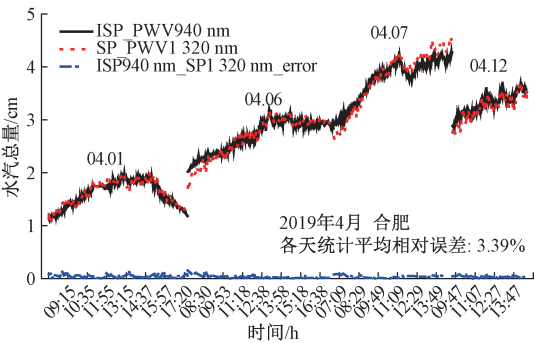


图 7 与 POM 型近红外太阳光度计 0.94 μm 反演的水汽总量对比结果

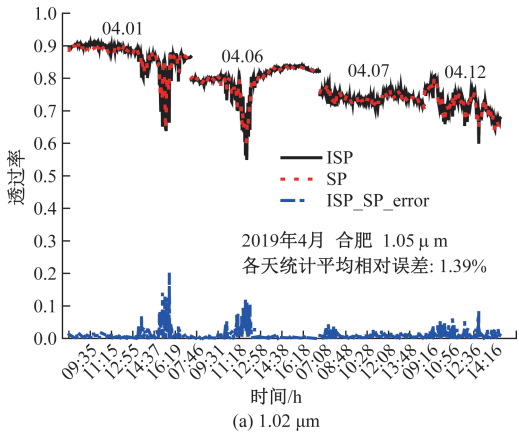
Fig.7 Comparison of water vapor retrieved from POM near infrared sun-photometer at 0.94 μm

由于太阳光谱在红外波段较弱,且 1.32 μm 相对 0.94 μm 波段的水汽吸收要弱的多,因此,光源调制 SP 型红外太阳光度计利用 1.32 μm 反演的水汽总量结果噪声波动较大,图 6、7 给出的是 SP 型红外太阳光度计反演的水汽总量经平滑后的对比结果,后面透过率也进行了平滑处理。由图 6 和 7 的对比结果可见,SP 型红外太阳光度计利用 1.32 μm 反演的水汽总量与 ISP 型近红外太阳光度计和 POM-02 型太阳光度计利用 0.94 μm 反演的水汽总量各天变化趋势基本一致,各天统计平均相对误差分别为 3.7% 和 3.39%,都小于 4%。可见,由 1.32 μm 反演的水汽总量具有一定的可靠性,可以将其反演的水汽总量用于激光波段大气透过率的提取。

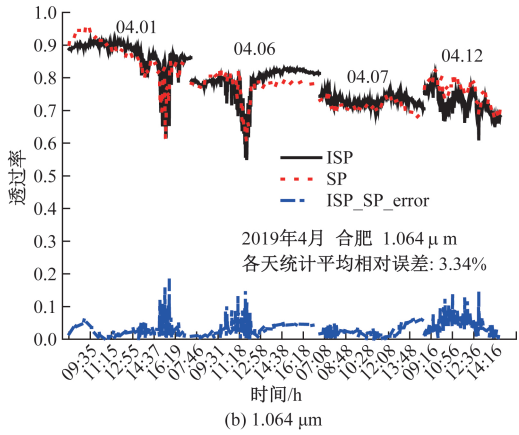
3.2 提取的各激光波段透过率与 ISP 型太阳光度计对比

ISP 型近红外太阳光度计是实验室自研的 0.8 ~ 1.8 μm 的铟镓砷型太阳光度计,测量波段有 0.87、0.94、

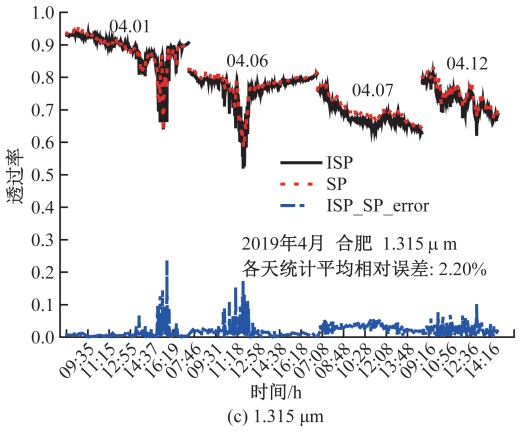
1.05、1.064、1.31、1.54、1.63 μm 共 7 个波段,其测量的 1.05、1.064、1.54 μm 波段的透过率误差 < 2%,由 1.31 μm 提取的 1.315 μm 透过率,和激光大气传输评估软件 CLAP^[18] 依据实测大气参数模式计算的 1.315 μm 波段透过率进行对比误差 < 6%,将其与新研制的 SP 型红外太阳光度计在合肥地区进行同时同地对比试验,对应各波段对比结果如图 8 所示,因 ISP 型无 3.8 μm ,采用外推的方法进行对比。图 8 中透过率变化较大的时段是因为有薄云影响,为了比较 2 台设备测量结果的变化趋势,未进行删除。



(a) 1.02 μm



(b) 1.064 μm



(c) 1.315 μm

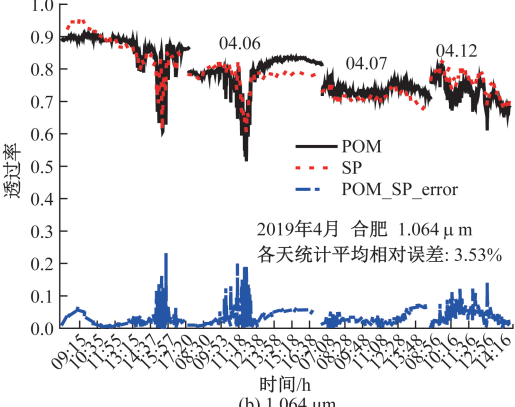
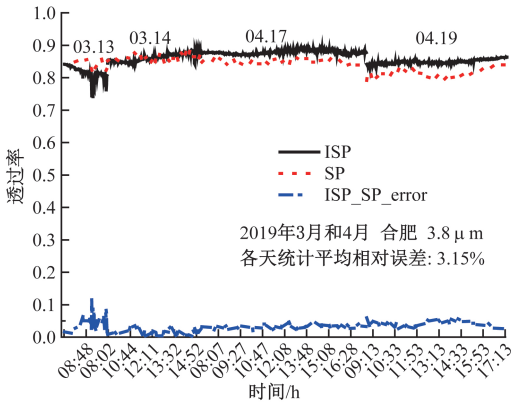
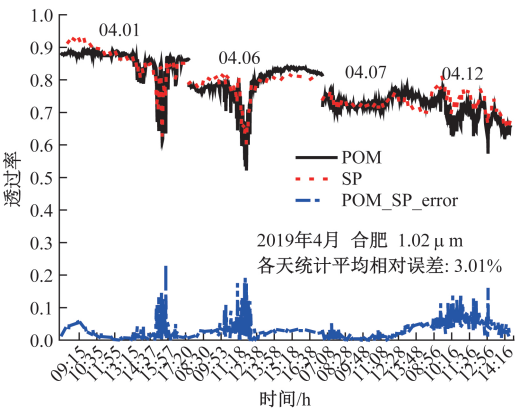
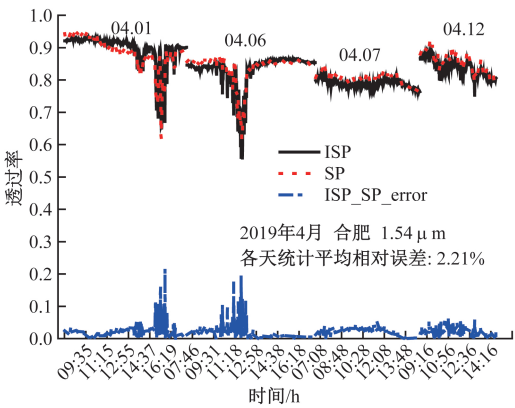
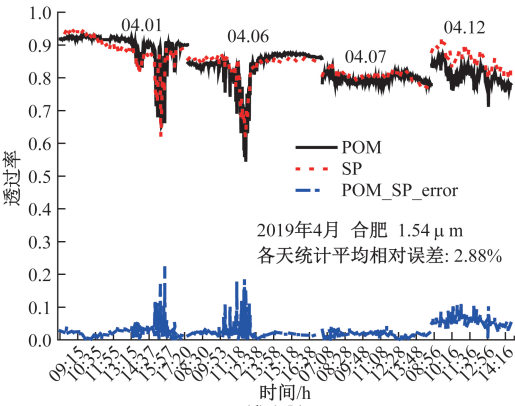
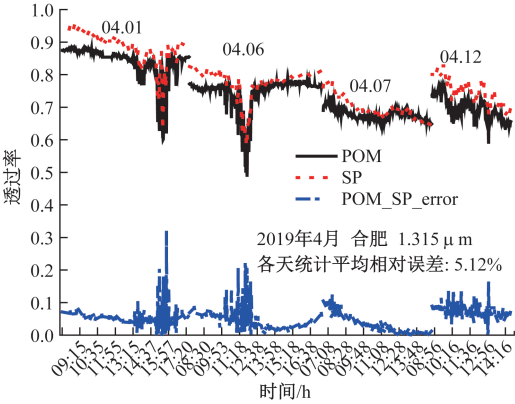


图 8 SP 型与 ISP 型太阳光度计各波段对比结果
Fig.8 Comparison between SP and ISP sun-photometers
in different bands

由图 8 可以看出,本文的 SP 型红外太阳光度计与 ISP 型太阳光度计根据实测激光波段提取的 1.064、1.315、1.54 μm 激光波段透过率对比,各天统计平均相对误差分别为:3.34%、2.2%、2.21%,与 ISP 型太阳光度计外推的 3.8 μm 激光透过率对比误差为 3.15%,都小于 4%,且各天全天透过率变化趋势基本一致。

3.3 获取的各激光波段透过率与 POM-02 型太阳光度计的对比

POM-02 型太阳光度计是从日本进口的 0.3 ~ 2.2 μm 的硅加钢镓型双筒太阳光度计,测量波段有 0.315、0.34、0.38、0.4、0.5、0.675、0.87、0.94、1.02、1.627、2.2 μm ,将其与本文的 SP 红外太阳光度计在合肥地区进行同时同地对比试验,因 POM-02 型太阳光度计无实测激光波段,其采用外推法获取的激光波段透过率与激光大气传输评估软件 CLAP^[12] 依据实测大气参数模式计算的 1.315 和 3.8 μm 透过率进行对比误差分别 < 8.5% 和 < 8%。将其与新研制的 SP 型太阳光度计对应波段透过率对比,结果如图 9 所示。



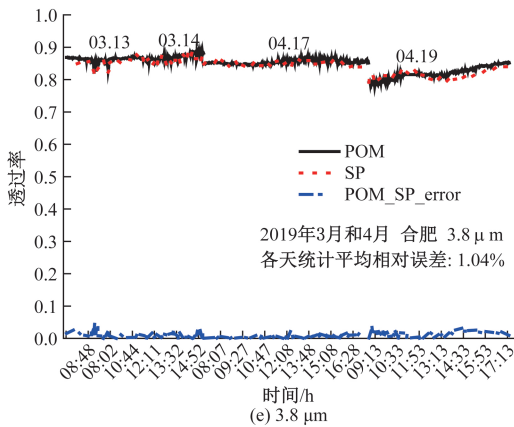


图 9 SP 型与 POM 型太阳光度计各波段对比结果
Fig.9 Comparison between SP and POM solar photometers in different bands

由图 9 可以看出, POM-02 外推的各激光波段透过率与本文的 SP 型红外激光波段太阳光度计根据实测的激光波段提取的 1.064、1.315、1.54、3.8 μm 激光波段透过率对比, 各天统计平均相对误差分别为: 3.53%、5.12%、2.88%、1.04%, 都小于 6%, 且各天全天透过率的变化趋势基本一致。

4 结 论

本文研制了一种调制型太阳光度计,对仪器的硬件系统、光学系统、工作原理进行了较为详细的介绍,并给出了该仪器能实现的性能指标,最终实现 1.0~4.5 μm 范围内 1.05、1.064、1.31、1.32、1.54、1.62、3.8 μm 等 7 个波段信号的测量。依据建立的激光红外大气透过率获取方法,最终提取 1.064、1.315、1.54 和 3.8 μm 这 4 个红外波段激光大气透过率。并由 1.32 μm 反演得到水汽总量,可用于激光波段大气透过率的提取。该仪器与实验室自研的 ISP 型太阳光度计获取的 1.064、1.315、1.54、3.8 μm 激光大气透过率对比,误差都小于 4%;其根据实测的宽波段提取的 1.064、1.315、1.54、3.8 μm 激光大气透过率与 POM-02 外推的激光大气透过率对比误差都小于 6%,表明新研制的可用于近中红外激光大气透过率测量的调制型太阳光度计的测量结果是可靠的,该设备获取的近中红外激光大气透过率对激光工程在实际大气中的应用具有参考价值。

参考文献

[1] ABASS W D H, KHALEEL J M, SALMAN S A. Calculation of the attenuation of infrared laser beam propagation in the atmosphere[J]. Journal of Research Diyala Humanity, 2009(37): 81-91.

[2] CHEN D, ZHANG B SH, HUANG Y B, et al. Research on the influence of optical properties of atmosphere to laser engineering application based on statistical characterization[C]. International Symposium on Photo-electronic Detection & Imaging, 2009: 73823F.

[3] 刘伟超,齐琳琳,高贤志,等. 激光制导波段大气透过特性的仿真计算[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(2): 64-68.

LIU W CH, QI L L, GAO X ZH, et al. Simulation calculation on atmospheric transmission properties of laser-guided band[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2011, 34(2): 64-68.

[4] 齐琳琳,吉微,姚海军,等. 大气气溶胶对激光制导探测作用距离影响的数值分析[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(6): 60-63.

QI L L, JI W, YAO H J, et al. Numerical analysis on the detection range of laser due to atmospheric aerosol[J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(6): 60-63.

[5] WANG W, GONG W, MAO F Y, et al. Long-term measurement for low-tropospheric water vapor and aerosol by Raman Lidar in Wuhan [J]. Atmosphere, 2015, 6(4): 521-533.

[6] 赵明,谢晨波,钟志庆,等. 高光谱分辨率激光雷达探测大气透过率[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(z1): 76-80.

ZHAO M, XIE CH B, ZHONG ZH Q, et al, High spectral resolution lidar for measuring atmospheric transmission[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(z1): 76-80.

[7] 王界,刘文清,张天舒,等. 便携式双视场米散射激光雷达系统的研制[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 148-154.

WANG J, LIU W Q, ZHANG T SH, et al. Development of a portable dual field-of-view mie-scattering lidar[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 148-154.

[8] 李红旭,常建华,朱玲嫵,等. 基于微脉冲激光雷达的能见度反演算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(10): 1555-1560.

LI H X, CHANG J H, ZHU L Y, et al. Visibility inversion algorithm based on micro pulse lidar [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(10): 1555-1560.

[9] 黄晟,靖旭,谭逢富,等. 整层大气连续透过率的测量与标定方法[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 352-358.

HUANG SH, JING X, TAN F F, et al. Measurement and calibration methods for total atmospheric continuous

- transmittance [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7):352-358.
- [10] 冯全全, 詹杰, 刘庆, 等. 夜间整层大气透过率测量技术研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6):167-172.
FENG Q Q, ZHAN J, LIU Q, et al. Study on measurement technology of total atmospheric transmittance at night [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(6):167-172.
- [11] 吴庆川, 黄印博, 谈图, 等. 基于激光外差技术的高分辨率整层大气透过率测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(6):1678-1682.
WU Q CH, HUANG Y B, TAN T, et al. High-resolution atmospheric-transmission measurement with a laser heterodyne radiometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(6):1678-1682.
- [12] 卢兴吉, 曹振松, 黄印博, 等. 3.53 μm 激光外差太阳光谱测量系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8):1846-1854.
LU X J, CAO ZH S, HUANG Y B, et al. Laser heterodyne spectrometer for solar spectrum measurement in the 3.53 μm region [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8):1846-1854.
- [13] 李建玉, 李多扬, 徐青山, 等. 双筒多视场太阳光度计研制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5):1022-1028.
LI J Y, LI D Y, XU Q SH, et al. Development of binocular multi-FOV sun-photometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5):1022-1028.
- [14] 杨东, 李建玉, 徐文清, 等. 基于图像跟踪变视场光度计的研制[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9):194-201.
YANG D, LI J Y, XU W Q, et al. Development of variable field photometer based on image tracking [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9):194-201.
- [15] 杨东, 李建玉, 徐文清, 等. 不同视场下太阳透射比值的快速测量与云检测[J]. 光学学报, 2018, 38(10):178-185.
YANG D, LI J Y, XU W Q, et al. Fast measurement and cloud detection of solar transmission ratio at different fields of view [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10):178-185.
- [16] 伽丽丽, 戴聪明, 徐青山, 等. 近红外大气吸收波段太阳辐射计定标[J]. 遥感学报, 2012, 16(5):928-938.
QIE L L, DAI C M, XU Q SH, et al. Calibration of near-infrared absorption band for a sun-photometer [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(5):928-938.
- [17] 伽丽丽, 魏合理, 徐青山, 等. 中国区域 940 nm 带整层大气水汽透过率的参数化模式[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2011, 36(2):204-207.
QIE L L, WEI H L, XU Q SH, et al. Parameterization of total atmospheric absorbing transmittance by water vapor at 940 nm in China [J]. Geometrics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(2):204-207.
- [18] 朱文越, 黄印博, 钱仙妹, 等. 激光大气传输模拟程序 CLAP 及其应用[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6):451-458.
ZHU W Y, HUANG Y B, QIAN X M, et al. Code for laser atmosphere propagation and its applications [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(6):451-458.

作者简介



李建玉, 2006 年于安徽师范大学获取学士学位, 2009 年于中国科学院研究生院获得硕士学位, 2013 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为安徽光学精密机械研究所的副研究员, 主要研究方向为大气探测技术和大气辐射传输研究。

E-mail: lijianyu@aiofm.ac.cn

Li Jianyu received her B.Sc. degree from Anhui Normal University in 2006, received her M.Sc. degree from Graduate School of the Chinese Academy of Sciences in 2009, and received her Ph.D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2013. She is currently an associate research fellow at Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics. Her main research interests include atmospheric sounding technology and atmospheric radiation transmission.



崔朝龙 (通信作者), 2007 年于贵州大学获取学士学位, 2013 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为安徽光学精密机械研究所的助理研究员, 主要研究方向为激光雷达大气探测技术和大气湍流特性研究。

E-mail: clcui@aiofm.ac.cn

Cui Chaolong received his B.Sc. degree from Guizhou University in 2007, and received his Ph.D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2013. He is currently an assistant research fellow at Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics. His main research interests include laser radar atmospheric sounding technology and atmospheric turbulent characteristic.