

夜晚整层大气透过率与水汽总量同步测量

程久明^{1,2,3}, 李建玉^{1,3**}, 崔朝龙^{1,3***}, 黄尧^{1,3}, 戴聪明^{1,3}, 黄宏华^{1,3*}

¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 为了同步获取夜间晴空视线无云下整层大气透过率和水汽总量, 将望远镜、多波段滤光片与近红外增强型 CCD 相结合, 搭建了利用恒星辐射进行测量的研究平台。首先通过望远镜收集恒星辐射, 辐射通过分波段滤光片滤光, 利用 CCD 采集恒星图像。进一步提取拍摄图像的灰度值, 采用 Langley 标定法计算整层大气透过率, 同时利用改进的 Langley 法计算大气水汽总量。对测量结果、激光雷达和微波辐射计的测量值进行比较, 验证了测量方法的可靠性。所开展的工作丰富了夜晚同步测量整层大气透过率和水汽总量的手段, 对空间遥感和气象研究有一定的应用价值。

关键词 大气光学; 水汽总量; 整层大气透过率; 夜间; 定标

中图分类号 P407.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0401003

Simultaneous Measurement of Total Atmospheric Transmittance and Precipitable Water Vapor at Night

Cheng Jiuming^{1,2,3}, Li Jianyu^{1,3**}, Cui Chaolong^{1,3***}, Huang Yao^{1,3},
Dai Congming^{1,3}, Huang Honghua^{1,3*}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch, Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Anhui Laboratory of Advanced Laser Technology, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract In order to simultaneously obtain the total atmospheric transmittance and precipitable water vapor at night under clear sky and cloudless view conditions, a research platform for stellar radiation measurement is built by combining telescope, multi-band filter, and near infrared enhanced CCD radiometer. First, the stellar radiation is collected by telescope. The radiation is filtered by sub-band filter, and the star image is collected by CCD. The gray value of the acquired image is further extracted, and the total atmospheric transmittance is calculated by Langley calibration method. At the same time, the precipitable water vapor is calculated by using the improved Langley method. The measurement results are compared with those of lidar and microwave radiometer to verify the reliability of the measurement method. The work in this paper enriches the means of simultaneous measurement of total atmospheric transmittance and precipitable water vapor at night, and has certain application value for space remote sensing and meteorological research.

Key words atmospheric optics; precipitable water vapor; total atmospheric transmittance; at night; calibration

OCIS codes 010.7340; 010.1320; 010.1030

收稿日期: 2020-07-31; 修回日期: 2020-08-31; 录用日期: 2020-09-25

基金项目: 国家重点研发计划(2019YF0706004)、中国科学院科技创新重点实验室基金(CXJJ-19S028)

* E-mail: hhhuang@aiofm.ac.cn; ** E-mail: lijianyu@aiofm.ac.cn; *** E-mail: elcui@aiofm.ac.cn

1 引言

光电探测仪器接收的来自于大气中的辐射是经过大气传输衰减后的信号,想要获取目标本身的辐射特性,就必须定量地分析大气参量对传输结果的影响。而整层大气透过率和大气水汽总量是辐射传输中两个重要的参量^[1],在地基天文观测、光学遥感、激光测距等领域有着广泛的应用^[2-5]。因此同步展开大气透过率和水汽总量的测量具有重要意义。

目前主要的同步获得整层大气透过率和水汽总量的探测手段是白天利用太阳辐射信号进行测量的太阳辐射计^[6-7]。在夜晚能够分别实现大气透过率和水汽总量测量的方法有利用恒星辐射计实现整层大气透过率的测量、利用微波辐射计实现水汽总量的测量、采用拉曼激光雷达实现大气透过率和水汽总量的测量^[8]。已有的恒星辐射计已经实现了多个波段整层大气透过率的测量^[9-10],但是并未对水汽在吸收波段的总量进行探测。微波辐射计虽然能够进行水汽总量的探测,但是无法探测整层大气透过率。激光雷达测量透过率的波段单一,测量水汽总量时高度受限。因此缺乏夜间同步获得这两种参量的手段。

鉴于这两种参量在工程应用中的重要性,采用恒星辐射量信息同步获取这两个参数。利用 Langley 定标法获取整层大气透过率,同时利用改进的 Langley 标定法计算大气水汽总量。

2 测量基本原理

对于非水汽吸收波段,可用 Langley 标定法计算整层大气透过率。恒星辐射经整层大气到达地表的辐照度^[11]为

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \exp[-\tau(\lambda)m(\theta)], \quad (1)$$

式中: $E_0(\lambda)$ 为恒星在大气层顶的辐照度; $\tau(\lambda)$ 为大气总光学厚度; $m(\theta)$ 为大气光学质量; θ 为恒星的天顶角。

根据 CCD 采集图像的灰度值与辐照度成正比的关系^[12], (1)式两边取对数后可写为

$$\ln G(\lambda) = \ln G_0(\lambda) - \tau(\lambda)m(\theta), \quad (2)$$

式中: $G(\lambda)$ 为仪器采集图像的灰度值; $G_0(\lambda)$ 为仪器在大气层顶采集的恒星图像的灰度值。以 $m(\theta)$ 为横坐标, $\ln G(\lambda)$ 为纵坐标,拟合得到一条直线,直线的斜率为 $-\tau(\lambda)$, 直线截距为 $\ln G_0(\lambda)$ 。大气垂直透过率 $T_V(\lambda)$ 为

$$T_V(\lambda) = \exp[-\tau(\lambda)]. \quad (3)$$

对于 940 nm 水汽吸收波段,采用改进的 Langley 法计算 $G(\lambda)$ ^[13]:

$$G(\lambda) = G_0(\lambda) \exp[-\tau(\lambda)m(\theta) - am^b(\theta)W^b], \quad (4)$$

式中: a 、 b 均为常数,可以用 MODTRAN 模式得出^[14]; W 为大气路径水汽总量。对(4)式两边取对数,得到

$$\ln G(\lambda) + m(\theta)\tau(\lambda) = \ln G_0(\lambda) - am^b(\theta)W^b, \quad (5)$$

以 $m^b(\theta)$ 为横坐标, $\ln G_0(\lambda) + m(\theta)\tau(\lambda)$ 为纵坐标,拟合得到的一条直线的斜率为 $-aW^b$, 直线截距为 $\ln G_0(\lambda)$, 通过求解直线斜率可以得到大气路径水汽总量 W 。

相较于夜间测量大气透过率,夜间测量水汽总量时恒星辐射信号较弱,需要对测量水汽的信噪比(SNR)进行分析。信噪比为

$$R_{SN} = \frac{n_T}{\sqrt{n_T + n_B}}, \quad (6)$$

式中: n_T 为目标信号的光电子数; n_B 为背景噪声的光电子数。

$$n_T = \frac{\phi_T \cdot A \cdot \tau_{TT} \cdot q_T \cdot \tau_0 \cdot t}{K_T}, \quad (7)$$

$$n_B = \phi_B \cdot A \cdot \tau_{TB} \cdot q_B \cdot \tau_0 \cdot \alpha_u^2 t, \quad (8)$$

式中: ϕ_T 和 ϕ_B 分别为星光的光子流密度和单位立体角内背景光的光子流密度; A 为望远镜接收面积; τ_{TT} 和 τ_{TB} 分别为滤光片对目标信号光谱和背景噪声光谱的透过率系数; q_T 和 q_B 分别为 CCD 对目标信号和背景噪声的平均量子效率; τ_0 为光学系统的透过率; α_u 为 CCD 一个像元对应的空间立体角; t 为 CCD 曝光时间; K_T 为恒星成像所占像素数量。

测量的水汽吸收波段在 940 nm 附近,光谱范围为 935~945 nm 时, m_s 等星在大气层外产生的光子流密度 ϕ_T 为

$$\phi_T = \int_{935}^{945} M_\lambda(T) d\lambda \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot 2.512^{-m_s}, \quad (9)$$

$$M_\lambda(T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/K\lambda T} - 1}, \quad (10)$$

式中: h 为普朗克常数; c 为光速; λ 为波长; K 为玻尔兹曼常数; T 为热力学温度。夜晚单位立体角内背景光的光子流密度为

$$\phi_B = \frac{I_B \lambda}{hc}, \quad (11)$$

式中: I_B 为夜晚天空背景光强。

以星等 $m_s = 2$, 光谱类型为 F5, 对应热力学温

度 $T=6800\text{ K}$ 的恒星为例计算信噪比,具体的计算参量取值如表 1 所示。

表 1 计算信噪比时用到的参量

Table 1 Parameters used in calculating SNR

Parameter	Value
$\phi_T/(\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	4.45×10^8
$\phi_B/(\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$	2.36×10^{14}
A/m^2	0.073
τ_{fr}	0.4
τ_{fb}	0.4
q_T	0.1
q_B	0.1
τ_0	0.2
α_u	1.8×10^{-6}
t/ms	15

计算得到信噪比 $R_{\text{SN}}=7.74$ 。理论上,信噪比 R_{SN} 大于 5 时,观测系统就能分辨出恒星的图像^[15],因此本实验的设计方案是可行的。

3 测量系统结构及采集流程

3.1 测量系统结构

测量系统如图 1 所示,由天文望远镜、滤光系统、CCD 采集系统组成。星光被望远镜接收,经望远镜的主、次镜和安装在滤光轮上的窄带滤光片后,被安装在调焦电机上的 CCD 接收。

天文望远镜选用 LX200 型望远镜,该望远镜的通光口径达 305 mm,焦距为 3048 mm。滤光片组由中心波长为 440,500,532,610,671,780,880,940 nm、10 nm 带宽的滤光片,一个中心波长为 1025 nm、50 nm 带宽的滤光片组成。滤光片被安装于滤光轮上,滤光轮可在自带的步进电机带动下进行转动。滤光轮通过 USB 接口与工控机通信,每隔 1 min 依次旋转一周用于采集图像。CCD 选用近红外增强型相机,接收靶面具有 2048×1088 个像素,像元尺寸为 $5.5\ \mu\text{m}$ 。由于夜晚温度会有变化,从而望远系统的焦平面位置发生改变。将 CCD 安装在电机上,由工控机和单片机系统实时根据 CCD 接收的图像控制电机,从而保证 CCD 的接收靶面始终处于焦平面上。

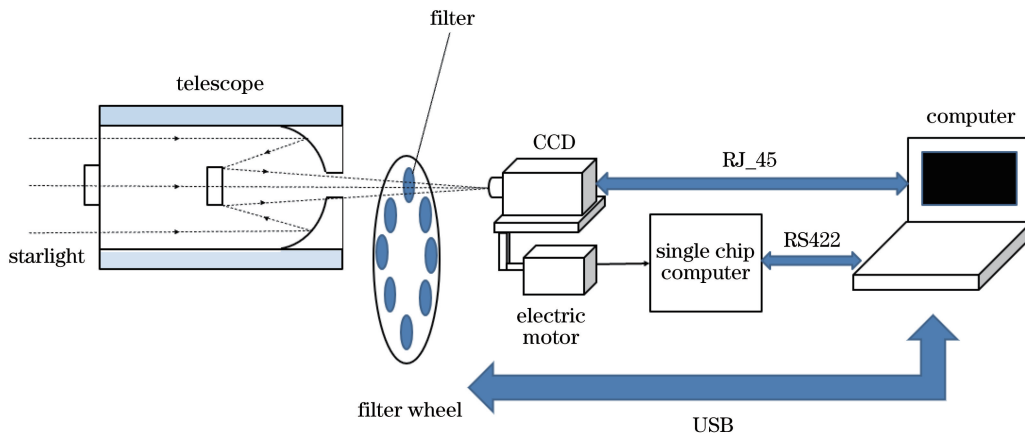


图 1 仪器结构示意图

Fig. 1 Schematic of instrument structure

3.2 数据采集流程

数据采集流程如图 2 所示,流程具体如下。

1) 启动望远镜自动校准系统,计算待测恒星的方位角和高度角。

2) 调整望远镜观测角度,调节 CCD 位置的电机,使恒星的像斑出现在 CCD 采集图像的中央位置。

3) 启动调整 CCD 曝光时间程序,使各个波段下图像的亮度处于非饱和状态。

4) 启动采集程序,采集不同波段的恒星图像,并实时显示采集的图像,将图像存储于指定位置。

5) 减少剩余采集次数,并判断剩余采集次数是否为 0。若不为 0,则修正望远镜角度,使恒星像斑处于图像中央,等待一个采集间隔时间,进行下一次采集;若为 0,则结束采集,关闭采集系统。

4 数据去噪处理

仪器采集的灰度图像由恒星产生的辐射信号、夜晚暗背景噪声信号、CCD 噪声组成。夜晚的暗背景信号主要形成图像的背景,而 CCD 噪声主要由暗电流噪声、光子散粒噪声、读出噪声等组成。由于定标方式是利用图像中恒星像斑的灰度值进行定标

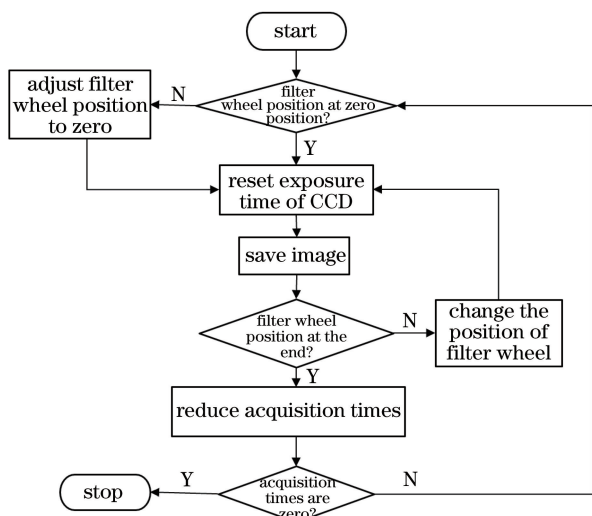


图 2 图像采集流程

Fig. 2 Flow chart of image acquisition

的,灰度值的准确与否直接影响了测量结果的精确性,因此去除噪声的干扰是数据处理过程中必不可少的过程。

选取阈值分割法进行去噪处理,第一步选择适当的阈值,阈值的选择方式^[16]为

$$g_s = g_m + 3g_\sigma, \quad (12)$$

式中: g_s 为选定的阈值; g_m 为整幅图像的灰度均值; g_σ 为整幅图像灰度值的标准差。以阈值 g_s 为标准对图像中每个像素的灰度值进行比较。如果灰度值大于阈值且该像素值周围的 8 个像素点中有 5 个像素点也大于阈值,则将该像素视为有效像素,否

表 2 定标日期与定标恒星参数

Table 2 Calibration dates and calibration star parameters

Date	Star name	Spectral type	Magnitude	Right ascension	Declination
May 18, 2020	HIP37279	F5	0.4	7 h 39 min 18 s	5°13'38"
Jun 26, 2020	HIP86032	A5	2.1	17 h 34 min 56 s	12°33'38"

2020 年 6 月 26 日能见度较差,实验中适当提高了采集系统测量的频率,并利用恒星处于较高高度角时的数据进行拟合。除水汽吸收波段以外,其他波段下的定标结果如图 3 所示,水汽波段定标结果如图 4 所示,得到的各个波段下的定标值 $\ln G_0$ 、

表 3 不同波段下的定标值、相关系数、标准偏差

Table 3 Calibration value, correlation coefficient, and standard deviation under different wavebands

Date	Parameter	440 nm	500 nm	532 nm	610 nm	671 nm	780 nm	880 nm	940 nm	1025 nm
May 18, 2020	$\ln G_0$	12.26	12.22	12.46	12.54	12.50	12.16	11.92	10.92	
	R	0.95	0.91	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90	0.98	
	SD	0.015	0.010	0.010	0.008	0.006	0.005	0.004	0.018	
Jun 26, 2020	$\ln G_0$	11.22	11.69		11.65	11.52	10.86	10.29	10.15	9.50
	R	0.98	0.96		0.92	0.91	0.93	0.91	0.95	0.91
	SD	0.019	0.020		0.021	0.017	0.014	0.014	0.071	0.012

则为无效像素。

第二步,计算图像的质心,这里质心坐标对应着原灰度图像中恒星像斑的中心位置。质心的计算公式为

$$x_o = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, y_o = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (13)$$

式中: x_o, y_o 为质心在图中的横纵坐标; x_i, y_i 为有效像素的横纵坐标; n 为有效像素的数量。

第三步,提取恒星光斑的总灰度值:

$$G(\lambda) = \sum_{i=x_o-25}^{x_o+25} \sum_{j=y_o-25}^{y_o+25} g_{ij} - 51^2 \cdot g_{bm}, \quad (14)$$

式中: $G(\lambda)$ 为提取出的恒星信号灰度值; g_{ij} 为以质心坐标为中心, 51×51 大小的方框内像素的灰度值; g_{bm} 为原灰度图像背景区域的灰度值均值。

5 测量结果对比与分析

5.1 仪器的定标结果

由于大气状态的变化总有波动,不同大气质量 $m(\theta)$ 与 $\ln G(\lambda)$ 并不总是呈良好的线性关系,因此定标日必须选择天气晴朗、无风、视线无云、无露水的时间进行测量定标。

根据观测地点的经纬度和依巴谷星表提供的赤经、赤纬数据,计算定标日能够观测到的 0 到 2 等星的高度角和方位角。选择高度角合适的恒星进行定标,定标日期和恒星的参数如表 2 所示。

相关系数 R 、标准差(SD)如表 3 所示。

从表 3 可以看出,拟合直线的相关系数 R 均高于 0.9,标准差 SD 均小于 0.021,表明测量当日适于定标,测量值可作为定标结果使用。利用定标结果计算各个波段的垂直透过率,结果如图 5 所示。

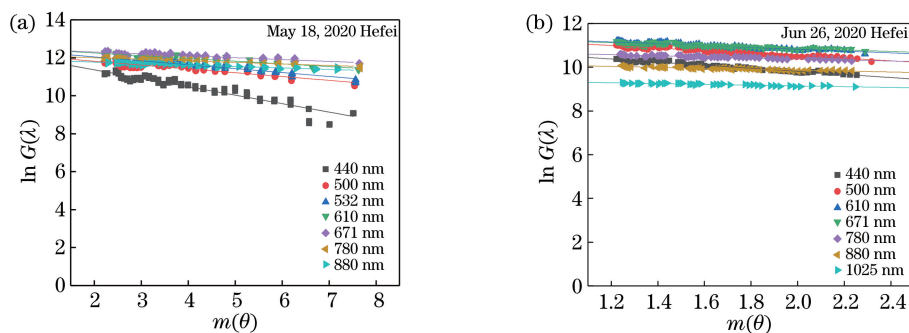


图 3 除水汽吸收波段外各波段定标曲线。(a) 2020 年 5 月 18 日;(b) 2020 年 6 月 26 日

Fig. 3 Calibration curves of all bands except water vapor absorption band. (a) May 18, 2020; (b) Jun 26, 2020

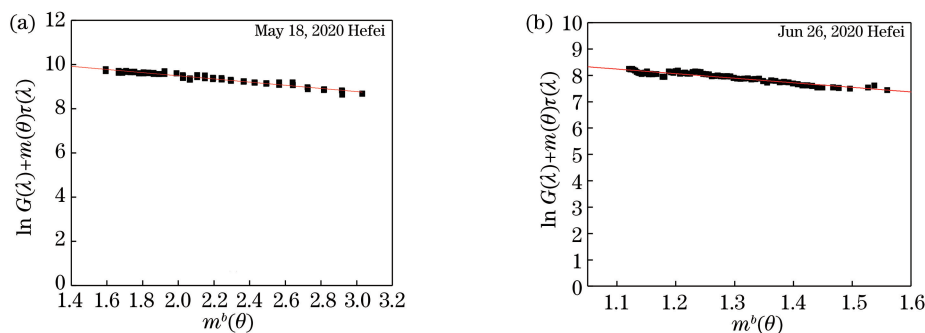


图 4 水汽吸收波段 940 nm 定标曲线。(a) 2020 年 5 月 18 日;(b) 2020 年 6 月 26 日

Fig. 4 Calibration curve of water vapor absorption band of 940 nm. (a) May 18, 2020; (b) Jun 26, 2020

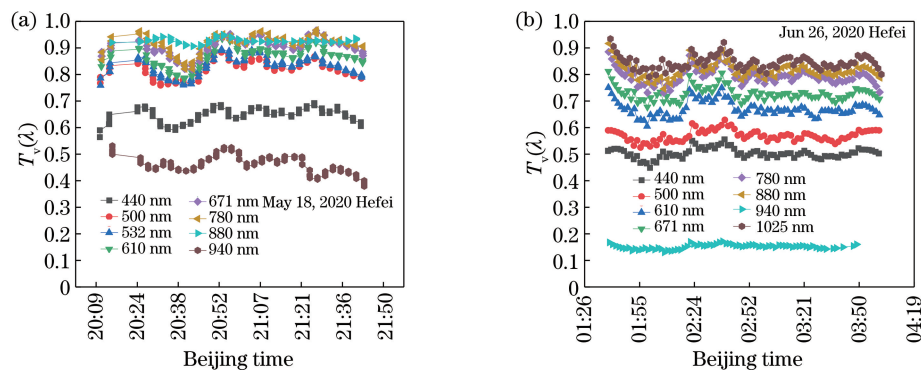


图 5 大气垂直透过率变化。(a) 2020 年 5 月 18 日;(b) 2020 年 6 月 26 日

Fig. 5 Change of atmospheric vertical transmittance. (a) May 18, 2020; (b) Jun 26, 2020

2020 年 5 月 18 日前后合肥天气持续晴朗,能见度较高,水汽含量较低,当日夜晚的大气透过率较高。而 2020 年 6 月 26 日,合肥进入梅雨季节,空气潮湿,940 nm 水汽吸收波段的透过率较 5 月 18 日低,从侧面说明 6 月 26 日空气中的水汽含量较高。

5.2 实验测量结果对比

图 6 为 2020 年 5 月 18 日实验仪器与同时同地的激光雷达各自测量的 532 nm 波段垂直透过率 T_v 对比结果及相对测量误差。图 7 为 2020 年 5 月 18 日实验仪器与同时同地的微波辐射计各自测量的水汽总量 W 对比结果及相对测量误差。其中激光雷

达采用波长为 532 nm 的固体激光光源,在晴朗夜空条件下最大探测高度为 10 km,其透过率测量结果能够近似反映整层的大气透过率。MP-3000A 型微波辐射计探测高度能够达到 10 km,其水汽总量测量结果能够代表整层大气的水汽总量。

从图 6、7 可以看出:恒星辐射计的测量结果与激光雷达、微波辐射计的测量结果相差不大;在 20:45 时,垂直透过率的相对测量误差最小 1.03%,在 20:53 时,相对测量误差最大 11.86%;在 20:49 时,大气水汽总量的相对测量误差最小 0.23%,21:29 时,相对测量误差最大为 13.00%。夜晚大气变

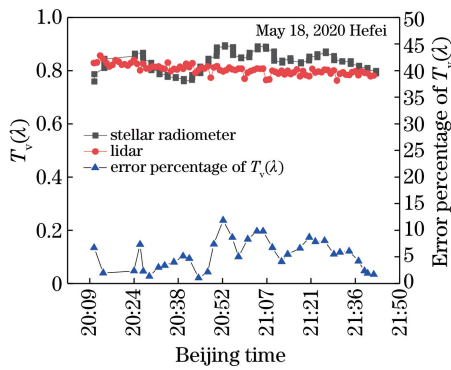


图 6 恒星辐射计与激光雷达测量结果比较

Fig. 6 Comparison of measurement results between stellar radiometer and lidar

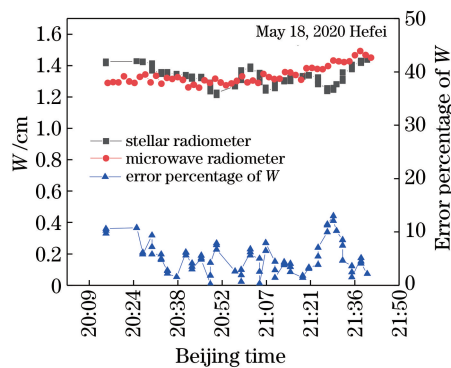


图 7 恒星辐射计与微波辐射计测量结果比较

Fig. 7 Comparison of measurement results between stellar radiometer and microwave radiometer

化具有复杂性且仪器本身在测量时会引入一定的测量误差,整层大气透过率和水汽总量的测量误差都是可以接受的。

6 结 论

在夜晚晴空视线无云条件下,实现了 440~1025 nm 中 8 个波段整层大气透过率和大气水汽总量的同步测量。针对恒星辐射信号随高度角变化的慢变化过程,采用固定 CCD 曝光时间分波段测量的采集方案,该方案不仅减小了数据的波动幅度,同时提高了采样频率,从而提高测量的精度。整层大气透过率和水汽总量的测量结果分别与激光雷达和微波辐射计的测量结果进行比较分析,其中大气透过率的最小相对误差为 1.03%,最大相对测量误差为 11.86%;水汽总量的最小相对测量误差为 0.23%,最大相对测量误差为 13.00%。这验证了测量方法的可靠性。

参 考 文 献

[1] Wei H L, Dai C M. Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric

radiative transfer model and the analysis of key atmospheric parameters [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 884-890.

魏合理,戴聪明. 辐射特性测量大气传输修正研究: 大气辐射传输模式和关键大气参数分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 884-890.

[2] Dai C M, Zhang Z Y, Ma L, et al. Measuring and analysis of atmospheric transfer and environment background character on infrared telescope site [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45 (12): 1204005.

戴聪明,张志勇,马力,等. 红外望远镜站址大气传输和环境背景特性的测量分析研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1204005.

[3] Sica D S, Castro E H, Voelz D G, et al. Conditions for free-air laser communications in Buenos aires [J]. The International Society for Optical Engineering, 2005, 5892: 589209.

[4] Khatri Chhetri B R, Gurung S. Estimation of total solar radiation using RadEst 3.00 software at Jumla, Nepal [J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2017, 8(S2): 1527-1533.

[5] An N, Chen Y F, Liu C Z, et al. Maximum detection range of satellite laser ranging system based on characteristics of laser transmission in atmosphere [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0901003.

安宁,陈煜丰,刘承志,等. 基于激光大气传输特性的卫星激光测距系统的最大探测距离[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0901003.

[6] Li J Y, Zhan J, Gao Y Q, et al. Development and calibration of DTF-5 sun-photometer [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2009, 4(2): 141-149.

李建玉,詹杰,高亦桥,等. 新型太阳光度计 DTF-5 的研制及标定 [J]. 大气与环境光学学报, 2009, 4 (2): 141-149.

[7] Li J Y, Huang Y, Huang H H, et al. Laser atmospheric transmittance extraction using broadband direct solar radiation measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0201001.

李建玉,黄尧,黄宏华,等. 基于太阳宽谱直接辐射测量获取激光大气透过率 [J]. 光学学报, 2020, 40 (2): 0201001.

[8] Ma X M, Tao Z M, Shan H H, et al. Statistical distribution of extinction coefficients of tropospheric aerosols detected by lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1101003.

麻晓敏,陶宗明,单会会,等. 激光雷达探测对流层气溶胶消光系数的统计分布 [J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1101003.

- [9] 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): 0617005.
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): 0617005.
- [10] Wang H, He F, Jing X, et al. Study on measurement of total atmospheric transmittance in day and night observation stars [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0311001.
王浩, 何枫, 靖旭, 等. 昼夜观测恒星整层大气透过率测量研究 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(3): 0311001.
- [11] Liu H Y, Wang Y C, Wang J L, et al. Preliminary analysis of the characteristics of precipitable water vapor measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer in Beijing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(2): 388-396.
刘红燕, 王迎春, 王京丽, 等. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析 [J]. *大气科学*, 2009, 33(2): 388-396.
- [12] Qin L, Dong L L, Xu W H, et al. Method for conversion calibration between CCD image gray value and illumination [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(3): 639-644.
秦莉, 董丽丽, 许文海, 等. CCD 图像灰度与照度的转换标定方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(3): 639-644.
- [13] Hu Z Y, Bi J R, Huang J P, et al. An inversion algorithm of columnar water vapor amount derived from sun-sky radiometer [J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(1): 232-240.
胡志远, 闭建荣, 黄建平, 等. 一种利用天空辐射计反演大气总水汽量的算法研究 [J]. *高原气象*, 2014, 33(1): 232-240.
- [14] Xu Q S, Li X B, Li C, et al. Retrieval of atmospheric aerosol optical depths and precipitable water from ground-based extinction measurements in Beijing area [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2006, 6(z2): 20-24.
徐青山, 李学彬, 李琛, 等. 消光测量反演北京地区整层大气气溶胶光学厚度与可降水量 [J]. *过程工程学报*, 2006, 6(z2): 20-24.
- [15] Wang X Z, Liu Y, Tang M L, et al. Spectral width selection and detectability analysis of starlight refraction sensor [J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(2): 722-730.
王献忠, 刘禹, 汤敏兰, 等. 星光折射敏感器谱宽选择及探测能力分析 [J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(2): 722-730.
- [16] Li L. Star map recognition and matching method in digital zenith telescope [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
李琳. 数字天顶望远镜中的星图识别与匹配方法 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.