

昼夜观测恒星整层大气透过率测量研究

王浩^{1,2}, 何枫¹, 靖旭¹, 谭逢富¹, 秦来安¹, 张巴龙¹, 张守川¹, 侯再红¹

- (1. 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, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 在昼夜观测恒星测量恒星宽光谱成像信号强度的基础上, 首先通过 MODTRAN 软件结合系统参数、恒星光谱特征研究了宽光谱信标利用 Langley 法标定大气透过率的标定误差, 据此通过标定恒星成像强度得到了整层大气宽光谱透过率; 然后, 利用大气模式研究了晴朗大气条件下宽光谱大气透过率与激光波段大气透过率的关系, 进一步得到了 532 nm 和 1 064 nm 的整层大气透过率; 最后, 将白天时段观测恒星测量的大气透过率与太阳辐射计观测太阳得到的透过率进行了实验对比。结果表明: 两种方法得到的大气透过率时间变化趋势一致、大小相仿。在此基础上开展了整层大气透过率的连续观测, 获得了整层大气透过率的昼夜连续数据、特别是获取了晨昏时段弱湍流时刻的整层大气透过率数据; 文中所开展的工作丰富了整层大气透过率的测量手段, 对地基激光工程研究和应用有促进作用。

关键词: 整层大气透过率; 昼夜观测; 宽光谱测量

中图分类号: P412.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0311001

Study on measurement of total atmospheric transmittance in day and night observation stars

Wang Hao^{1,2}, He Feng¹, Jing Xu¹, Tan Fengfu¹, Qin Laian¹, Zhang Silong¹,
Zhang Shouchuan¹, Hou Zaihong¹

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Based on the stellar broad-spectrum imaging signal intensities measured by observational stars day and night, firstly, the calibration error of atmospheric transmittance by Langley method were studied using MODTRAN software. The system parameters and the spectral characteristics of stellar spectra were taken into account during this process. Wide spectral transmittance of the whole atmosphere was obtained by calibrating the intensity of the star imaging. Then, the relationship between the atmospheric transmittance of wide spectrum and the atmospheric transmittance of the laser band was studied by using the atmospheric model, and the atmospheric transmittance of 532 nm and 1 064 nm were obtained. Finally, the atmospheric transmittance measured by stellar observation during the daytime was compared with the solar transmittance measured by the solar radiometer. The results show that the atmospheric transmittance

收稿日期: 2018-11-10; 修订日期: 2018-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(41405014)

作者简介: 王浩(1990-), 男, 博士生, 主要从事激光大气探测方面的研究。Email: 514262022@qq.com

导师简介: 侯再红(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事激光大气传输方面的研究。Email: zhou@aiofm.ac.cn

obtained by the two methods has the same trend and the similar size. On this basis, the continuous observation of total atmospheric transmittance is carried out, the diurnal continuous data of total atmospheric transmittance is obtained, especially the data of total atmospheric transmittance at weak turbulence moment of dawn and dusk. The work enriches the measurement of total atmospheric transmittance and promoted the research and application of ground-based laser engineering.

Key words: total atmospheric transmittance; day and night observation; wide spectral measurement

0 引言

在地基测量空间目标的光学特性研究或激光大气传输研究领域,大气透过率是反映大气光学特性的重要参数之一^[1];大气透过率的变化会影响到所测量目标的光学特性和激光传输效果,需要根据实际大气透过率修正地基观测结果、修正激光传输效果。

目前直接测量整层大气透过率的方法是:白天利用太阳辐射计采用窄带滤光片观测太阳^[2]、使用可见光谱仪测量太阳辐射强度^[3-4],或者观测太阳利用外差方法测量大气透过率^[5];夜晚利用恒星辐射计采用窄带滤光片观测恒星测量整层大气透过率^[6]。上述方法的优势在于能够直接测量分光谱的透过率,但其不足之处在于不能够测量晨昏时段的整层大气透过率,并且如果需要白天和夜晚的大气透过率需要两套设备测量。对于地基观测而言,由于光波在大气中传播受到大气光学湍流的影响,晨昏时段湍流强度有明显的弱湍流时段^[7-8],该时段对于地基观测或者激光传输而言是窗口时期。因此,地基观测或激光传输研究需要一种能够测量窗口时期整层大气透过率的方法;考虑工程应用的便捷性需要一种昼夜通用的设备完成昼夜整层大气透过率的测量。

文中在前期研制昼夜大气相干长度仪的基础上^[9],研制了昼夜观测恒星测量整层大气透过率的设备,该设备能够昼夜观测恒星得到激光波段的大气透过率。与太阳辐射计的对比结果表明,该方法能够合理的测量昼夜整层大气透过率。

1 仪器简介

直接利用 Langley 法标定太阳/恒星辐射强度得到整层大气透过率的测量设备中^[10],由于太阳与恒星的辐射强度差别巨大,目前尚未有白天观测太阳

与夜晚观测恒星测量透过率的设备集成一体的报道。对于工程应用而言,用两种设备完成昼夜大气透过率的测量稍显不方便。为此,提出了一种昼夜观测恒星测量可见光透过率的设备,该设备具备跟踪恒星功能以保证数据观测的连续性。设备的结构如图1所示,星光被望远镜前的子孔径接收,然后经过望远镜的主镜、次镜和一组滤光片后被安装在焦平面的探测器接收。为抑制天空背景,系统安装了截止波长为 600 nm 的长波通滤光片以提高成像信噪比;由于 940 nm 波段为水汽强吸收波段^[11]并且吸收强度受整层大气水汽柱含量变化的影响,为扣除 940 nm 水汽强吸收波段对所探测到的恒星信号强度的影响,仪器在接收探测器前增加截止波长为 850 nm 的短波通滤光片,两片滤光片的组合使用实现了 600~850 nm 之间带宽为 250 nm 的星光信号探测。设备选用了芯片为硅基底的 CCD,该类型探测器的优势在于其峰值响应在可见光波段,并且其量子效率受温度的影响小设备中不需要增加温控设备,有利于设备的轻型化研制。为了进一步消除天空背景,将图像光斑附近一定区域内像素亮度的平均值作为天空背景进行扣除。

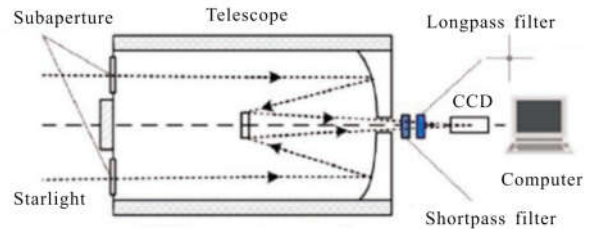


图 1 仪器光路结构示意图

Fig.1 Optical structure of instrument

2 测量数据标定

在可见光波段大气对光波的衰减主要是由气溶胶散射引起的;同时,在可见光波段存在多个分子线

吸收波段,分子线吸收或多或少的影响了到达地面的星光辐射强度。图 2 是利用 MODTRAN5 软件计算的中纬度冬季模式乡村型气溶胶条件、600~1 000 nm 之间整层大气透过率的变化,光谱分辨率 15 cm⁻¹。从该图看出在 600~1 000 nm 之间星光强度的衰减受到气溶胶衰减、水汽分子吸收、氧气吸收的共同影响,存在两个明显的氧气吸收波段和三个水汽吸收波段。即使在 600~800 nm 之间仍然存在氧气吸收和水汽吸收。在测量波段存在分子吸收时仍然利用Langley 法标定需要分析分子吸收对标定带来的误差。

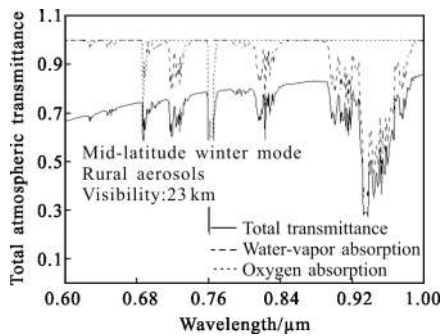


图 2 600~1 000 nm 整层大气透过率计算值(波数分辨率: 15 cm⁻¹)

Fig.2 Calculated value of total atmospheric transmittance in 600–1 000 nm wavelength (Wavenumber resolution: 15 cm⁻¹)

标定误差分析方法为: 利用 MODTRAN5 软件计算不同仰角下整层大气的分光谱透过率、计算该仰角条件下的相对大气质量 m , 大气质量的计算关系式为^[12]:

$$m = [\cos(\theta) + 0.1500(93.885 - \theta)^{-1.253}]^{-1} \quad (1)$$

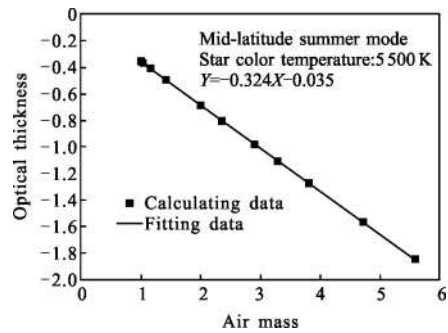
式中: θ 为天顶角; 得到大气质量后即可对 MODTRAN 计算数据进行标定仿真计算。计算了考虑接收系统光谱响应、恒星辐射光谱特征和大气透过率的光谱特征后, 计算了宽光谱条件下的等效大气透过率, 其计算方法为:

$$T_{\text{eff}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda)B(\lambda)T(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda)B(\lambda)d\lambda} \quad (2)$$

式中: $F(\lambda)$ 为星光辐射强度的光谱分布; $B(\lambda)$ 为接收系统的光谱响应(包含探测器的光谱响应); $T(\lambda)$ 为整层大气的分光谱透过率; T_{eff} 表示考虑星光辐射强度谱分布、接收系统光谱响应后的综合透过率(称等效透过率)。然后以 m 为横坐标、以对数等效透过率 ($\ln(T_{\text{eff}})$ 表示光学厚度)为纵坐标进行线性拟合, 截距

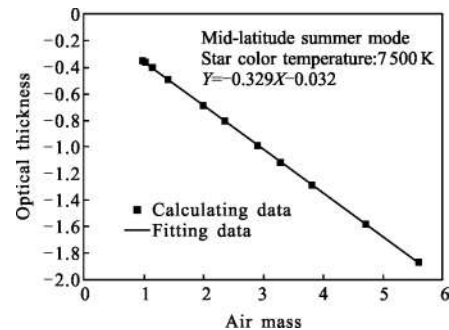
表示标定系数。截距为 0 表示透过率为 1, 该值为标定系数真值; 截距不为 0 时标定系数与真值的偏差即表示分子吸收对标定带来的误差。

在仿真过程中笔者以水汽最大的中纬度夏季模式为大气输入条件; 在该模式下近地面的水汽浓度 14 g/m³, 整层水汽柱含量为 2.95 cm, 属于水汽含量较高的大气模式。以常用的两颗恒星(大角、Capella) 为例, 得到色温为 5 500、7 500 K 时的仿真结果如图 3 所示。



(a) 色温 5 500 K

(a) Color temperature is 5 500 K



(b) 色温 7 500 K

(b) Color temperature is 7 500 K

图 3 Langley 法标定误差仿真结果(600~850 nm)

Fig.3 Simulation results of calibration error by Langley method (600–850 nm)

为提高分析结果的普适性, 以中纬度冬季、中纬度夏季和美国标准大气为例, 分析了恒星色温从 3 500~12 000 K 之间变化时标定误差的变化如图 4 所示。

从图 4 看出, 在不同的大气模式下, 中纬度夏季模式下标定系数的偏差最大, 其次是美国标准大气, 最小是中纬度冬季模式。出现该变化的原因是在三种大气模式下中纬度夏季的整层大气水汽含量最

高、美国标准大气次之,中纬度冬季模式最小,而标定系数与真值的偏差是由于分子吸收特别是水汽吸收引起的。

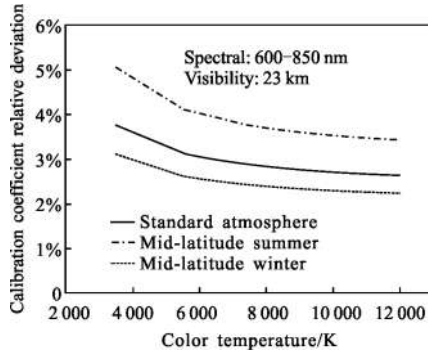


图 4 不同大气模式标定系数偏差随恒星色温的变化

Fig.4 Deviation of calibration coefficient varies with the star color temperature in different atmospheric modes

同时,随着恒星色温的降低标定系数偏差逐渐变大,该现象可解释为色温降低时恒星的辐射强度在近红外波段辐射强度相对变强,导致水汽吸收对透过率的影响逐渐变大因此标定系数的偏差逐渐变大。但是,从图 4 也可看出,在所仿真的范围内标定系数带来的偏差最大为 5%,因此在 600~850 nm 范围内考虑探测器的光谱响应和恒星色温的变化后,可以对该波段采用经典的 Langley 法进行标定;在标定过程中根据数值计算结合观测季节对标定系数进行修正,能够订正弱分子吸收对 Langley 法标定的影响。

通过 Langley 标定后能够得到整层大气透过率进而能够计算光学厚度。以中纬度夏季典型气溶胶条件为例,考虑探测器光谱响应、恒星辐射光谱特征后计算了不同色温条件下的光学厚度,并计算了相同条件下 532 nm、1 064 nm 的光学厚度,统计等效光学厚度与 532 nm 光学厚度和 1 064 nm 光学厚度的转换关系如图 5 所示。

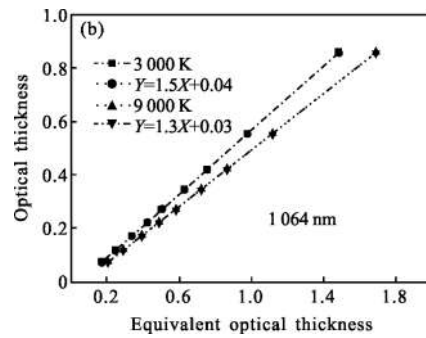
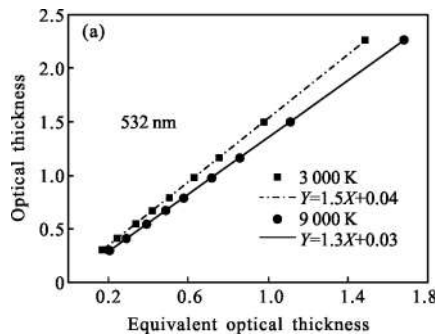


图 5 等效光学厚度与 532、1 064 nm 转换关系

Fig.5 Conversion relationship between equivalent optical thickness and 532, 1 064 nm

从图 5 可以看出,等效光学厚度与 532、1 064 nm 光学厚度之间呈现良好的线性关系;即使恒星色温不同等效光学厚度与 532、1 064 nm 之间线性关系均相同。同时看出,在色温不同时转换系数稍有差异。因此在实际观测时,按照恒星的色温建立不同色温条件下的具体转换关系库,按照对应条件进行转换,以提高测量准确性。

3 观测数据及对比试验

将按照上述方法得到的整层大气透过率与商业化的太阳辐射计(型号:POM2)进行了对比。将观测恒星测量的结果与 POM2 观测太阳测量的气溶胶通道整层大气透过率对比如图 6 所示。由于 POM2 与 532、1 064 nm 最接近的通道为 500、1 020 通道,在对比过程中将 POM2 的 500、1 020 通道按照上述方式转换到 532、1 064 nm 通道进行了对比。

从图 6 看出,在晴朗天气,文中所述方法测量的双波段大气透过率与 POM2 观测太阳测量的整层大气透过率时间变化趋势一致、大小相仿。该对比结果验证了文中所述方法测量整层透过率的合理性。但是,在上午 9~10 点期间两方法的测量结果出现差异,POM2 观测太阳的测量值出现了变小的跳变。该现象是由于观测期间为早晨,早晨时段太阳仰角低东边天区低仰角区域有云所致;由于云层粒子为大粒子对两波段的光波阻断作用相同,表现为两波长的透过率均显著下降。而文中所述方法通过观测恒星测量整层大气透过率可选择观测恒星的数目多,因此能够有效避开有云区域实现整层大气透过率的准确观测。观测恒星测量大气透过率在晨昏时段天空低仰角有云、高仰角无云时有显著的优势,能够合

理的得到无云天气条件下的整层大气透过率测量值。

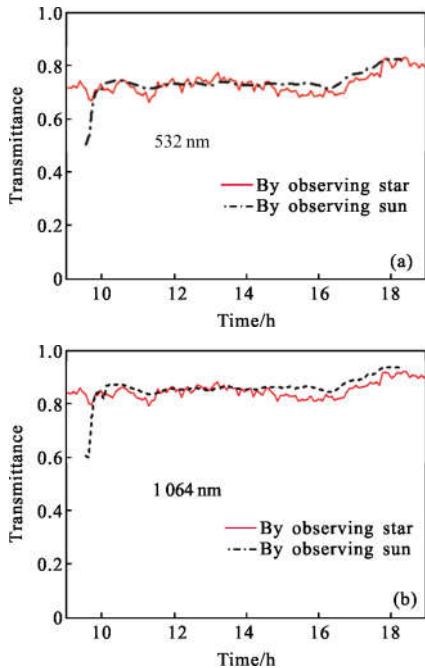


图 6 与 POM2 观测太阳测量透过率对比结果

Fig.6 Comparison with POM2 which observes solar measuring transmittance

在完成对比试验后，利用该设备开展了整层大气透过率的昼夜观测，获取了冷空气过境后晴朗天气条件下的整层大气透过率昼夜观测数据如下。

图 7 是冷空气天气过程后连续两天晴朗天气的

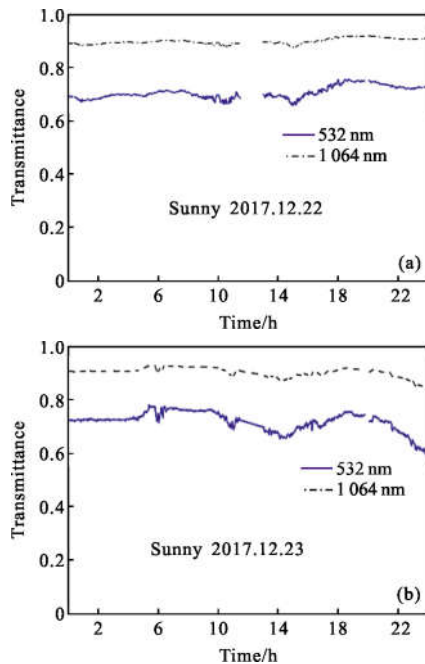


图 7 仪器实测结果

Fig.7 Actual measurement results of instrument

观测数据；图 7(a)中约从 11~13 时，由于观测的恒星被云遮挡而没有获得有效的观测数据。从图 7(a)看出，在天气过程后第一天整层大气透过率昼夜变化不明显，大气透过率稳定；从图 7(b)看出，在天气过程第二天的中午后整层大气透过率开始下降，在深夜整层大气透过率已经比白天时段有明显下降。该现象可解释为在冷空气过境后空气清洁，但是随着时间的推移空气清洁度开始下降；反映在整层透过率上即表现出透过率先维持在高值、然后从高值逐渐下降。该观测过程进一步说明了文中所述方法能够合理的昼夜观测整层大气透过率。

4 结 论

文中通过昼夜观测恒星得到了恒星宽光谱的成像信号强度，数值仿真了对存在分子弱吸收时 Langley 法标定宽光谱信号透过率的误差；以光谱分辨率为 15 cm^{-1} 的仿真结果表明在恒星色温 $3500 \sim 12000 \text{ K}$ 、波长 $600 \sim 850 \text{ nm}$ 范围内 Langley 法标定理论误差不超过 5%，据此对宽光谱信号标定得到了宽光谱波段的大气透过率。数值仿真得到上述宽光谱透过率与 532、1064 nm 波段的透过率关系，据此得到了两常用激光波段的整层大气透过率。在晴朗天气条件下将实验观测结果与 POM2 观测太阳得到的数据进行了对比，对比结果表明两种方法得到的大气透过率时间变化趋势一致，大小相仿。在此基础上开展了整层大气透过率的昼夜观测，获取了 532 nm 和 1064 nm 整层大气透过率的昼夜连续观测数据；文中所述方法丰富了整层大气透过率的获取手段，弥补了目前大气透过率测量手段在晨昏时段测量的不足。

参考文献：

- [1] Dai Congming, Zhang Zhiyong, Ma Li, 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. (in Chinese)
- [2] Li Jianyu, Xu Wenqing, Qie Lili, et al. Development and application of the portable full autocontrol sun-photometer [J]. *Optical Technique*, 2012, 38(1): 30-35. (in Chinese)
- [3] Huang Sheng, Jing Xu, Tan Fengfu, et al. Measurement and calibration methods for total atmospheric continuous

- transmittance [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0710001. (in Chinese)
- [4] Kindel B C, Qu Z, Goetz F H. Direct solar spectral irradiance and transmittance measurements from 350 to 2 500 nm [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(21): 3483–3494.
- [5] Wu Qingchuan, Huang Yinbo, Tan Tu, et al. High-resolution atmospheric-transmission measurement with a laser heterodyne radiometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(6): 1678–1682. (in Chinese)
- [6] Feng Quanquan, Zhan Jie, Liu Qing, et al. Study on measurement technology of total atmospheric transmittance at night [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0617005. (in Chinese)
- [7] Wang Jianye, Liu Xiaochun, Rao Ruizhong, et al. Measurement of atmospheric coherence length in daytime and at night [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(1): 000001. (in Chinese)
- [8] Jing Xu, Hou Zaihong, Qin Laian, et al. Measurement of whole layer atmospheric coherence length by observing stars in daytime [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1352–1355. (in Chinese)
- [9] Lu Qianqian, HouZaihong, Jing Xu, et al. Influence of sky background on data of day-night atmospheric coherence length monitor [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(8): 921–924. (in Chinese)
- [10] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation [J]. *Physics Today*, 1981, 34(7): 104–112.
- [11] Thome K J, Smith M W, Palmer J M, et al. Three-channel solar radiometer for the determination of atmospheric columnar water vapor [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(24): 5811–5819.
- [12] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. Atmospheric Physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2005. (in Chinese)