

研制二维直驱跟星转台测量夜晚整层大气透过率

朱翠汝^{1,2,3}, 孙凤莹^{1,3}, 徐文清^{1,3*}, 程久明^{1,2,3}, 詹杰^{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 为实现夜间可靠跟踪恒星并测量整层大气透过率, 采用直驱力矩电机和圆光栅绝对编码器作为伺服部件, 研制一套二维直驱跟星转台。该转台具有定位精度高、环境适应性好及野外长期运行免维护的优点, 能够实现夜间长期跟踪目标恒星并自动换星功能。结合搭载其上的由望远镜、CCD 相机和滤轮等组成的图像采集系统, 搭建了测量实验平台。搭建的测量实验平台采用主-从式控制方式, 上位工控机对图像采集系统进行相应控制, 同时向下位机反馈转台方位偏差; 下位机跟星转台控制系统采用装载 Linux 系统的 ARM7 数字处理器为控制核心, 并内置自研的星图。通过上、下位机协同软件开发实现整层大气透过率测量的完整功能。开展了转台功能验证实验, 整层大气透过率测量和激光雷达的对比实验。结果表明, 二维直驱跟星转台能够实现夜晚长期跟踪目标恒星并自动换星测量, 转台搭载的望远镜系统根据恒星的图像数据能够可靠地反演出夜间整层大气透过率, 满足测量实验的功能要求。

关键词 大气光学; 力矩电机; 直驱; 跟星; 二维转台; 大气透过率

中图分类号 P414.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1601002

Developed Two-Dimensional Direct-Drive Star-Following Turntable to Measure Whole-Layer Atmospheric Transmittance at Night

Zhu Cuiru^{1,2,3}, Sun Fengying^{1,3}, Xu Wenqing^{1,3*}, Cheng Jiuming^{1,2,3}, Zhan Jie^{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 of University of Science and Technology of China,

Hefei, Anhui 230026, China;

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

Abstract To reliably track stars and measure the transmittance of the whole-layer atmosphere at night, a two-dimensional direct-drive star-following turntable was developed using a direct-drive torque motor and a circular grating absolute encoder as servo parts. These parts offer the advantages for the turntable of high positioning accuracy, good environmental adaptability, and long-term field operation without maintenance. The turntable can realize the functions of the long-term tracking of target stars at night and automatic star change. Combined with the image acquisition system mounted on the turntable, which comprises a telescope, CCD camera, and filter wheel, the measurement experimental platform is built. The measurement experimental platform adopts the master-slave control mode. The upper computer controls the image acquisition system and provides the azimuth deviation feedback of the turntable to the lower computer. The control system of the tracking star turntable of the lower computer adopts the ARM7 digital processor loaded with the Linux system as the control core and a built-in self-developed star map. It realizes the complete function of the transmittance measurement of the whole-layer

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-03-03; 录用日期: 2021-03-19

基金项目: 中国科学院科技创新重点实验室基金(CXJJ-19S028)

通信作者: *wqxu@aiofm, ac, cn

atmosphere by the collaboration of the upper and lower computer software developments. The turntable function verification experiment, the transmissivity measurement experiment of the whole-layer atmosphere, and contrast experiment using radar were conducted. Results show that the two-dimensional direct-drive star-following turntable can track the target star for a long time and automatically change the star for measurements at night. Moreover, the telescope system mounted on the turntable can reliably reverse the transmittance of the whole-layer atmosphere at night based on the image data of stars, meeting the functional requirements of measurement tests.

Key words atmospheric optics; torque motor; direct drive; track star; two-dimensional turntable; atmospheric transmissivity

OCIS codes 010.1320; 120.1880

1 引言

整层大气透过率是反映整层大气光学特性的一个重要参数,在空间遥感、目标探测、红外测距等领域具有重要应用^[1-3],也常常用来对地基观测数据进行大气传输修正^[4]。整层大气透过率参数常用软件模型计算或观测设备直接测量反演的方法来获取^[5-9]。24 h 测量整层大气透过率可通过白天利用太阳直射^[10-11]、夜间利用恒星星光^[12]相结合或者昼夜皆利用恒星星光^[13]的方式来获取。其中白天利用太阳直射、夜间利用恒星星光相结合方式的系统硬件复杂,但相比昼夜皆利用恒星星光的方法,具有测量数据信噪比高、可靠性好的突出优势。本课题组利用太阳辐射计测量白天整层大气透过率技术,该技术成熟度高、测量精度高^[10]。本文主要基于二维直驱跟星转台实现夜间整层大气透过率参数测量,通过夜间对恒星进行实时跟踪,并结合探测元件以完成跟踪恒星测量整层大气透过率的整个过程。结合太阳辐射计,即可获取全天 24 h 整层大气透过率参数。

因直驱力矩电机具有低速性能好、扭矩大并可直接驱动负载的特点,本文采用无刷直驱力矩电机直接驱动负载的直驱方式,避免了减速器引入的定位误差;并搭配绝对式圆光栅编码器与嵌入式伺服驱动器形成闭环控制伺服系统,研制了具有高精度、高负载的二维跟踪转台,该转台可实现夜间对恒星目标的长时间自动跟踪和自动换星功能。同时,转台搭载望远镜和 CCD 相机采集系统作为信号探测单元进行恒星图像的灰度数据采集,经过 Langley 定标,即可反演获取夜间整层大气透过率,实现目标跟踪与数据探测一体化。

2 大气透过率测量原理及系统工作流程

2.1 测量原理

实现目标恒星跟踪后,通过切换滤光片,能够获

取不同波段下的恒星灰度图像。对恒星的灰度图像进行处理可得到恒星辐亮度数值,利用 Langley 标定法^[14-15]可计算非水汽吸收波段的整层大气透过率数值。

经过大气衰减,恒星辐射到达地基的辐照度 $E(\lambda)$ 为

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

式中: $m(\theta)$ 为大气质量; θ 为天顶角; $\tau(\lambda)$ 为大气总光学厚度; $E_0(\lambda)$ 为恒星在大气层顶的辐照度。CCD 相机在地基采集的恒星图像灰度值 $G_{\text{gray}}(\lambda)$ 与 $E(\lambda)$ 之间存在比例关系^[16]:

$$\ln[G_{\text{gray}}(\lambda)] = \ln[G_{\text{gray}0}(\lambda)] - \tau(\lambda)m(\theta), \quad (2)$$

式中: $G_{\text{gray}0}(\lambda)$ 为 CCD 相机在大气层顶获取的恒星图像的灰度值。整层大气的垂直透过率计算公式为

$$T(\lambda) = \exp[-\tau(\lambda)] = \exp\left\{\frac{\ln[G_{\text{gray}}(\lambda)] - \ln[G_{\text{gray}0}(\lambda)]}{m(\theta)}\right\}. \quad (3)$$

对图像进行处理,得到图像灰度值 $G_{\text{gray}}(\lambda)$, 根据(2)式,由 $m(\theta)$ 和 $\ln[G_{\text{gray}}(\lambda)]$ 可拟合出斜率为 $-\tau(\lambda)$ 、截距为 $\ln[G_{\text{gray}0}(\lambda)]$ 的直线,其中截距 $\ln[G_{\text{gray}0}(\lambda)]$ 就是该波段的定标值,结合定标值,由(3)式计算得到不同波段整层大气垂直透过率。

为实现二维转台对某恒星的长期定位追踪,需准确将目标恒星光斑成像在 CCD 靶面上。由于 CCD 靶面大小有限,对二维转台定位精度提出指标要求,图 1 为 CCD 靶面视场角计算示意图。

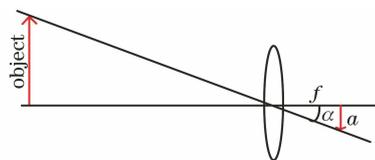


图 1 视场角计算示意图

Fig. 1 Schematic of viewing angle calculation

采用型号为 LX200、通光口径为 350 mm 的米德望远镜,焦距 $f=3.55$ m。CCD 相机靶面像素尺寸为 2048×1088 , 像元尺寸为 $5.5 \mu\text{m}$ 。水平方向视场角的计算公式为

$$\varphi = 2\alpha, \alpha = \arctan(a/f), \quad (4)$$

式中: α 为一半视场角; a 为 CCD 靶面长度的一半。 $2a = 5.5 \times 10^{-6} \times 2048 = 1.1264 \times 10^{-2}$ m, 即可计算得到 CCD 靶面水平方向视场大小 $\varphi = 10.8'$, 同理计算得到 CCD 靶面沿垂直方向的视场大小为 $5.78'$ 。 综上分析, 二维转台定位误差需控制在 $5'$ 内, 可实现对目标恒星的长期跟踪, 对此选用直流力矩电机直接驱动负载的方式搭建二维转台, 该转台具有精度高、速度快等优点。

2.2 系统工作流程

整个测量系统的工作分为两个部分, 即下位机对恒星的定位追踪和上位机对恒星灰度图像信号的实时采集。 在完成恒星持续定位追踪的基础上, 通过驱动滤轮, 完成目标恒星灰度信息的数据采集, 并根据定标数据反演计算出整层大气透过率数值。 系统工作流程如图 2 所示。

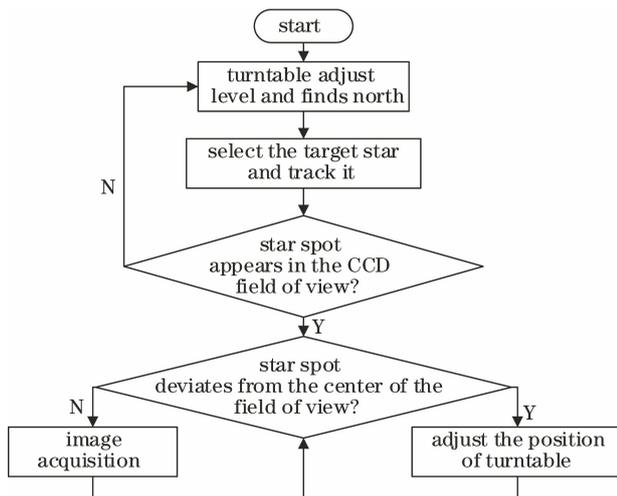


图 2 测量系统工作流程

Fig. 2 Flowchart of measurement system

校准二维转台的姿态与水平后, 选中某颗目标恒星进行追踪。 下位机系统通过自研的星图库并结合当前时间、当地经纬度与海拔, 实时计算出目标恒星的高度角与方位角, 并驱动二维转台在水平和俯仰方向指向对应的方位角和高度角, 并将高度角与方位角定时写入伺服驱动器, 保证转台始终指向该目标恒星。 在实时追踪过程中, 一旦恒星光斑偏离靶面中心一定范围 ($2/3$ 视场), 就及时修正转台的位置, 以保证目标恒星不会偏离视场。 在稳定的追踪下, 展开滤轮切换与图像数据采集的相关工作。

3 大气透过率测量系统的搭建

3.1 总体组成

大气透过率测量系统的结构如图 3 所示, 由上

位机 PC、图像采集系统和下位机跟星转台系统 3 部分组成。 图像采集系统主要包括 CCD 相机采集系统, 放置在 CCD 相机前的滤光轮和前端望远镜光学系统, 通过切换滤光轮即可实现在不同波段下对恒星灰度图像的采集。 下位机跟星转台系统由以 ARM7 数字信号处理器为核心的嵌入式控制系统、水平伺服系统和俯仰伺服系统构成。 其中, 嵌入式控制系统通过 CAN 总线通讯实现对水平和俯仰伺服系统的闭环控制, 完成对目标恒星的可靠跟踪。 下位机跟星转台系统通过传输控制协议 (TCP) 通信将二维转台的姿态信息和工作状态发送给上位机。 上位机根据当前采集的图像信息给下位机反馈信息。

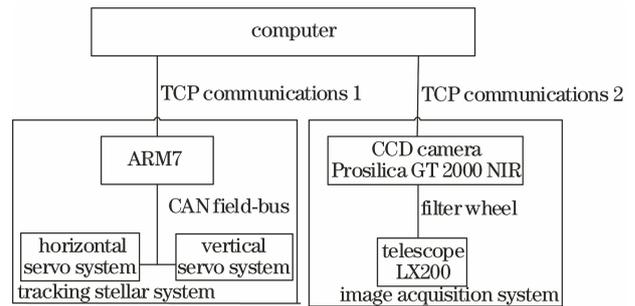


图 3 大气透过率测量系统结构框图

Fig. 3 Structural diagram of atmospheric transmittance measurement system

3.2 二维伺服转台

二维转台主要实现对恒星目标的追踪, 对环境适应性和定位精度要求较高, 且需要在户外长期低速可靠运行, 因此选择电机、编码器及驱动器等部件时以满足以上需求为原则。 电机选用直流力矩电机, 其具有精度高、输出扭矩大且低速运转可靠等优势, 适用于环境恶劣场景; 选用的圆光栅绝对编码器精度为 18 位, 理论分辨率约 $5''$, 满足转台定位精度需求; 驱动器选用能同时匹配电机驱动和圆光栅编码器通信方式的绝对闭环伺服驱动器; 轴承选用 P2 级的交叉滚子轴承, 其刚度和强度等机械特性满足使用要求。 设计了如图 4 所示的二维转台伺服结构^[17], 水平轴采用 U 型结构, U 型臂的一端放置俯仰电机, 利用轴承将负载与俯仰电机直连, 能够消除传动误差, 实现高刚度、高精度的负载运转。 为保证二维转台的指向精度, 伺服装配中需要尽量减小轴系跳动^[18]和转台正交性^[19]这两方面存在的误差。 在装配过程中, 尽可能保证转台水平和俯仰间的正交性, 以减小转台的过顶盲区。

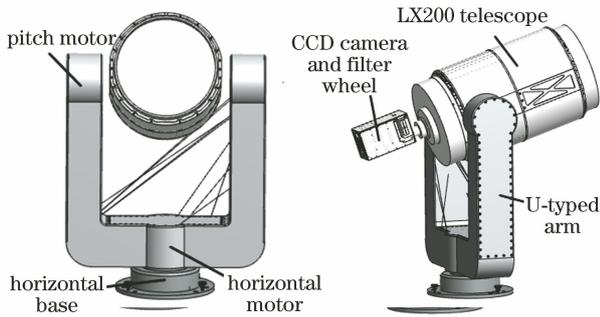


图 4 转台伺服结构

Fig. 4 Turntable servo structure

3.3 系统控制软件

系统控制软件分为下位机转台控制系统软件与上位机信号采集系统软件。下位机控制系统完成对二维转台的实时控制,结合自研的星图数据库实现对恒星的长期定位跟踪及自动换星功能。上位机系统控制滤轮切换及 CCD 图像采集,同时利用 TCP 通信向下位机反馈转台方位偏差。

下位机控制系统结构框图如图 5 所示,整个控制系统以 ARM7 数字处理器为控制核心。数字处理器通过 CAN 总线^[20-21]与水平、俯仰伺服驱动器进行通信,实现对水平、俯仰电机的闭环控制^[22]。在下位机软件程序中封装伺服驱动器类对象,并分别定义使能电机、设置电机进入速度模式、设置电机进入位置模式、设定电机目标速度、设定电机目标位置、读取电机当前速度、读取电机当前位置等类成员函数。

上位机软件控制流程如图 6 所示。上位机与下位机软件建立 TCP 通信连接后,提供下位机所需要跟踪的恒星信息。当二维转台完成精准定位恒星后,上位机软件控制开启滤轮切换与图像采集工作。

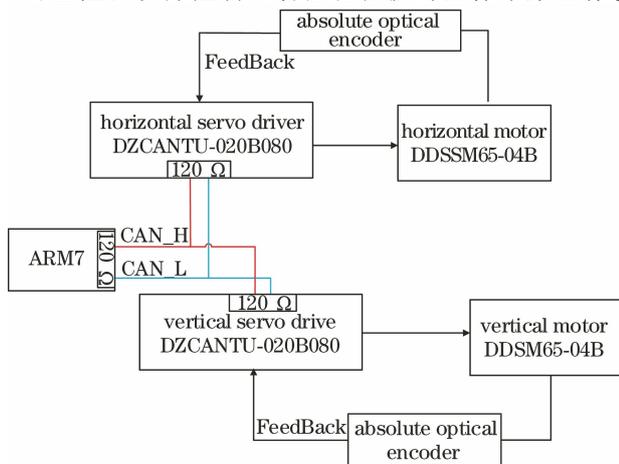


图 5 下位机控制系统结构框图

Fig. 5 Structure diagram of lower computer control system

对采集到的图像进行分析,当恒星光斑被云层遮挡时,上位机通知下位机进行换星操作;当恒星光斑质心偏离靶面中央时,向下位机发送修正转台位置命令,使恒星光斑处于 CCD 靶面中央。

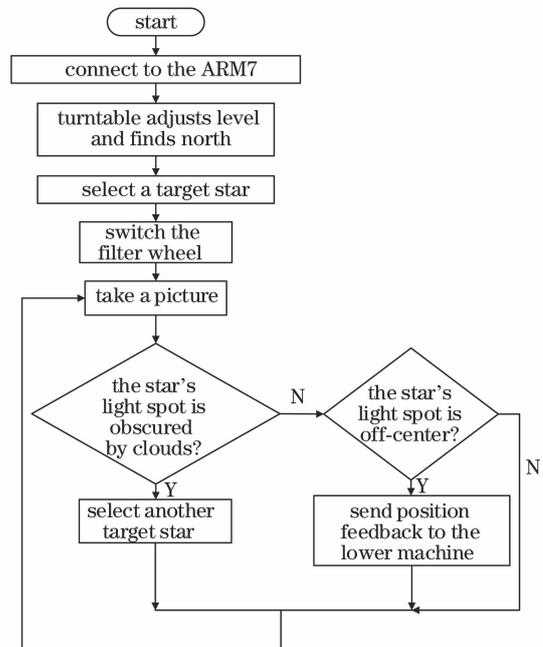


图 6 上位机软件控制流程图

Fig. 6 Flowchart of upper computer software

4 实验验证

4.1 二维转台功能验证

在完成转台系统研制和软件联调后,搭建了夜间测量整层大气透过率实验平台,如图 7 所示。

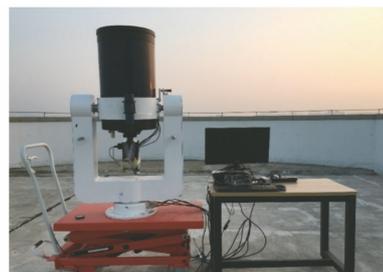


图 7 转台实物图

Fig. 7 Physical picture of the turntable

为了验证转台跟踪恒星功能的有效性,在 2020 年 11 月 12 日(晴朗无云)开展了夜间实验。首先启动下位机与上位机软件并对转台进行调平和找北,然后随机选择 15°以上高度角的恒星进行跟踪和自动换星验证。图 8 给出了实验过程中 8 颗恒星自动换星后的图像,结果表明,在自动换星过程中,系统能够准确指向目标恒星方位,并能保证恒星图像一次性进入测量视场,验证了转台的跟星能力。

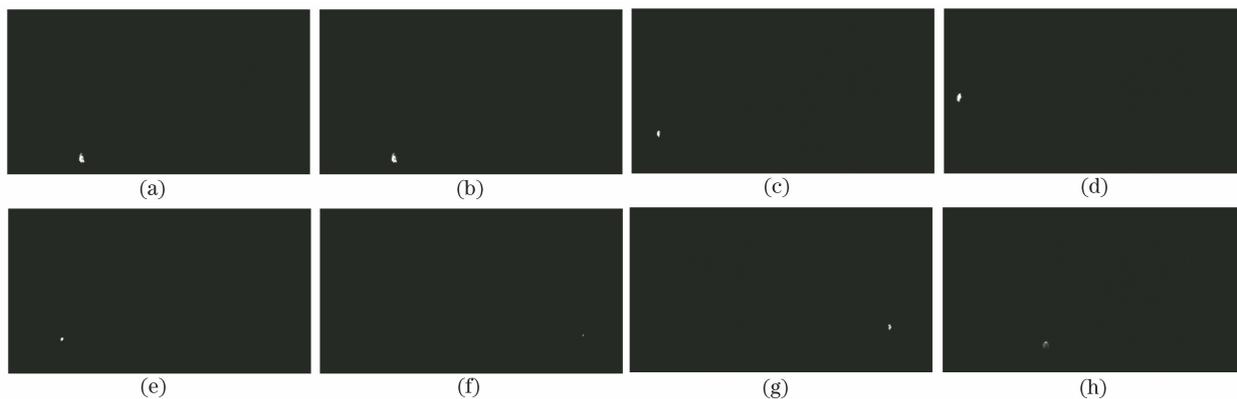


图 8 实验采集图片。(a)依巴谷星表 HIP15863;(b)依巴谷星表 HIP9640;(c)依巴谷星表 HIP14576;(d)依巴谷星表 HIP5447;(e)依巴谷星表 HIP24608;(f)依巴谷星表 HIP28360;(g)依巴谷星表 HIP23416;(h)依巴谷星表 HIP17358

Fig. 8 Images from the experiment. (a) Hipparcos catalogue HIP15863; (b) Hipparcos catalogue HIP9640; (c) Hipparcos catalogue HIP14576; (d) Hipparcos catalogue HIP5447; (e) Hipparcos catalogue HIP24608; (f) Hipparcos catalogue HIP28360; (g) Hipparcos catalogue HIP23416; (h) Hipparcos catalogue HIP17358

为保证长时间可靠跟踪某一目标恒星,在目标恒星进入视场后计算恒星光斑质心距视场中央的位置偏差,并对二维转台进行指向修正,从而可以将恒星光斑长期锁定在视场中央位置。图 9 给出了转台对 HIP15863 星在视场内进行位置偏差修正后的图像对比结果。

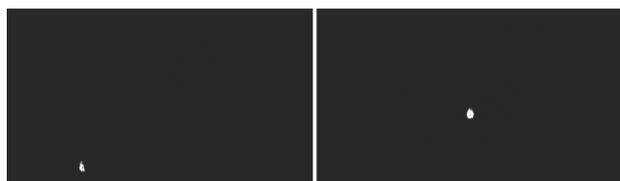


图 9 HIP15863 恒星位置偏差修正前后的对比
Fig. 9 Comparison of HIP15863 star before and after position deviation correction

以上跟星和换星实验结果表明,所设计的系统可实现恒星的准确定位和长时间追踪功能。在此基础上,开展了夜间整层大气透过率测量实验。

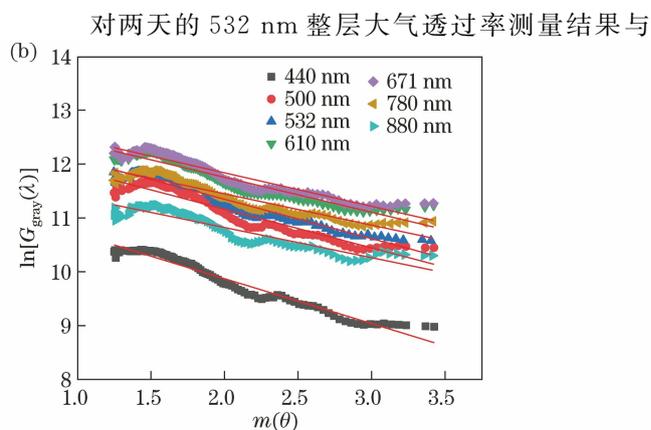
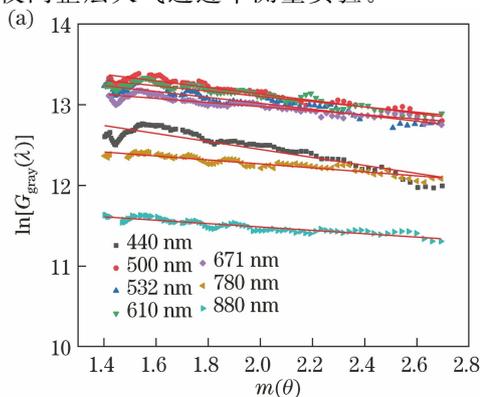


图 10 各波段定标曲线。(a) 2020 年 12 月 30 日;(b) 2021 年 1 月 11 日
Fig. 10 Calibration curves of each band. (a) 2020-12-30; (b) 2021-01-11

4.2 整层大气透过率测量和验证

选用同时同地激光雷达测量结果与本系统测量结果作对比,激光雷达竖直向上进行探测,为保证数据对比的有效性,实验天气需晴朗无云,大气稳定。选取满足对比条件的 2020 年 12 月 30 日与 2021 年 1 月 11 日这两天测量结果进行说明。12 月 30 日雪后初晴,大气情况较稳定,满足数据对比条件,对 HIP24436(参宿七)星进行观测。由于冬日夜间 21:00 后,气温下降,镜头结霜,仅选取夜间 19:00 至 21:00 数据进行计算。各个波段定标曲线如图 10(a)所示,不同波段下的整层大气垂直透过率结果如图 11(a)所示。1 月 11 日全天无云,选择 HIP37826(北河三)星进行观测,选取夜间 18:00 至 21:00 数据进行计算,各个波段定标曲线如图 10(b)所示,不同波段下的整层大气垂直透过率结果如图 11(b)所示。

对两天的 532 nm 整层大气透过率测量结果与

激光雷达 532 nm 透过率进行对比,结果如图 12 所示。结果表明:当前测量系统的测量结果与激光雷达测量结果变化一致,都呈现随着时间推移,大气透过率逐渐增大的趋势;12 月 30 日夜间测量结果的相对误差最小为 6%,最大为 16%;1 月 11 日测量结果的相对误差最小为 4%,最大为 13%。本文测

量的是整层大气透过率,而激光雷达只能获取近地面层(最大 10 km)的大气透过率,因此本系统测得的整层大气透过率结果会略小于激光雷达的透过率测量结果,与图 12 情况一致。综上分析,本系统可以实现整层大气透过率的实时测量,且能得到较为准确的数据。

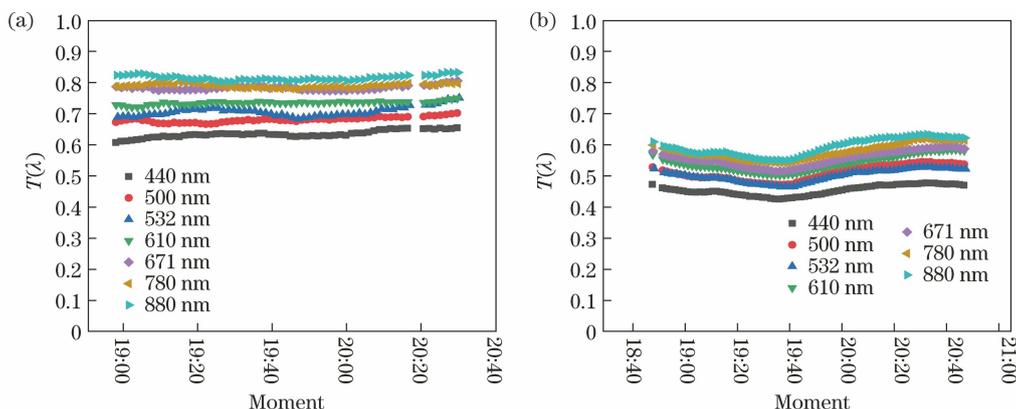


图 11 大气垂直透过率变化。(a) 2020 年 12 月 30 日;(b) 2021 年 1 月 11 日

Fig. 11 Changes of atmospheric vertical transmittance. (a) 2020-12-30; (b) 2021-01-11

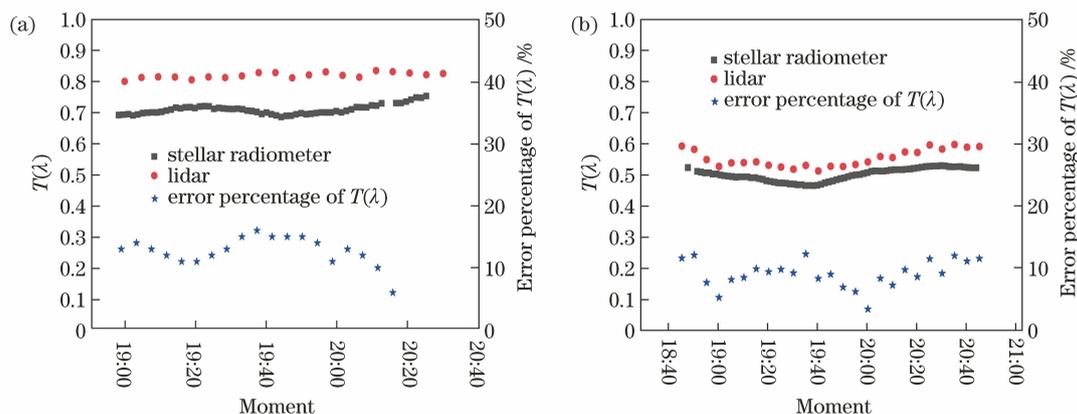


图 12 恒星辐射计与激光雷达测量结果对比。(a) 2020 年 12 月 30 日;(b) 2021 年 1 月 11 日

Fig. 12 Comparison of measurement results between stellar radiometer and lidar. (a) 2020-12-30; (b) 2021-01-11

5 结 论

研制了一套二维直驱跟星转台,并结合望远镜和 CCD 相机系统搭建了夜间整层大气透过率测量实验平台。在此基础上,开展了转台跟踪恒星和自动换星的验证实验及大气透过率测量实验。通过对目标恒星进行稳定追踪,获取不同波段的恒星图像数据,采用 Langley 标定法反演出非水汽吸收波段的整层大气透过率,并与激光雷达测量数据进行比较分析。实验结果表明:二维直驱转台能够实现夜间长期稳定跟踪目标恒星与自动换星功能;整层大气垂直透过率计算结果与激光雷达测量结果相比,最小相对误差为 4%,最大相对误差为 16%。二维

跟踪转台搭载望远镜系统可以实现夜间测量整层大气透过率的功能。

参 考 文 献

- [1] Xu W W, Zhang L M, Li X, et al. On-orbit radiometric calibration of high-resolution optical remote sensing satellite based on sub-pixel targets [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1001001. 徐伟伟, 张黎明, 李鑫, 等. 基于亚像元目标的高分辨率光学遥感卫星在轨辐射定标方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1001001.
- [2] Liu X M, Li Z, Chen D M, et al. Measurement of infrared radiation characteristics of ship based on reference source method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 230401.

- 刘新明, 李周, 陈德明, 等. 采用参考源法实现船舶红外辐射特性的测量[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 230401.
- [3] Gao W J, Wang Y L, Yin Z Y, et al. Influence analysis of atmospheric transmittance on operating range of infrared system [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(7): 832-837.
高文静, 王亚莉, 殷智勇, 等. 大气透过率对红外系统作用距离的影响分析[J]. 激光与红外, 2016, 46(7): 832-837.
- [4] Wei H L, Dai C M. Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric transfer correction system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1019-1024.
魏合理, 戴聪明. 辐射特性测量大气传输修正研究: 大气传输修正系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1019-1024.
- [5] Cao Z S, Huang Y B, Wei H L, et al. Research progress and related problems on the acquisition method of total atmospheric transmittance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 37-49.
曹振松, 黄印博, 魏合理, 等. 整层大气透过率获取方法研究进展及相关问题探讨[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(12): 37-49.
- [6] Meng F B, Zheng L. LOWTRAN7-based calculation method of IR transmittance in the atmosphere [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, 24(3): 29-32, 66.
孟凡斌, 郑丽. 基于 LOWTRAN7 的红外大气透过率计算方法[J]. 光电技术应用, 2009, 24(3): 29-32, 66.
- [7] Ostrikov V N, Plakhotnikov O V, Kirienko A V. Estimation of spectral resolution of imaging spectrometers from Fraunhofer lines with the MODTRAN atmospheric model [J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2019, 32(6): 622-627.
- [8] Huang Y B, Cao Z S, Lu X J, et al. Measurement of high-resolution total atmospheric transmittance and retrieval of water vapor with laser heterodyne technology [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(4): 497-505.
黄印博, 曹振松, 卢兴吉, 等. 激光外差技术高分辨整层大气透过率测量及水汽浓度反演研究[J]. 量子电子学报, 2020, 37(4): 497-505.
- [9] Zheng X, Wu P F, Miao X K, et al. Measurement of atmospheric transmittance from multi-spectral image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7): 26-34.
郑鑫, 武鹏飞, 苗锡奎, 等. 从多波段图像中获取大气透过率的测量方法[J]. 光子学报, 2017, 46(7): 26-34.
- [10] 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.
- [11] Chen X M, Li J Y, Wei H L, et al. Extraction of atmospheric transmittance of laser waveband using sun-photometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S2): S209002.
陈新民, 李建玉, 魏合理, 等. 用太阳光度计获取激光波段大气透过率[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(S2): S209002.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Kiedron P W, Michalsky J J. Non-parametric and least squares Langley plot methods [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(1): 215-225.
- [15] Zhu M, Zhan J. Multi-objective star calibration study of total atmospheric transmittance measurement with stellar irradiance [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12): 2843-2847.
朱明, 詹杰. 利用恒星辐射测量整层大气透过率的多目标星定标[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(12): 2843-2847.
- [16] 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.
- [17] Wang Z C, Huang M, Qian L L, et al. Near-earth space two-dimension opto-electronic turntable design [J]. *Optik*, 2020, 200: 163387.
- [18] Yu F N, Xu S Y. Shafting design for precise two-dimensional turntable applied to $\Phi 300$ mm plane mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020,

- 28(5): 1075-1082.
- 于夫男, 徐抒岩. 应用于 $\Phi 300$ mm 平面反射镜的精密二维转台轴系设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(5): 1075-1082.
- [19] Wang J Y, Zhang C Y, Zhao W F, et al. Effects of orthogonality on the measurement precision of high-accuracy two-dimensional turntable [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(3): 94-101.
- 王建永, 张晨阳, 赵文峰, 等. 正交度对高精度二维转台测量精度的影响[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(3): 94-101.
- [20] Qian J Z, Ma W L, Lin M Y. Dual-motor synchronization control based on the CANopen protocol[J]. Electrical Automation, 2017, 39(6): 17-18, 50.
- 钱俊璋, 马文礼, 林梦云. 基于 CANopen 协议的转台双电机同步控制[J]. 电气自动化, 2017, 39(6): 17-18, 50.
- [21] Qiang M H, Zhang Y L, Ma Y W, et al. Research and application of multi-axial servo control system based on CAN bus[J]. Electric Drive, 2016, 46(2): 60-64.
- 强明辉, 张彦龙, 马永炜, 等. 基于 CAN 总线多轴伺服控制系统的应用[J]. 电气传动, 2016, 46(2): 60-64.
- [22] Tang H, Wu Y S. Design and realization of a dual-motor driving servo system for a 2D precise test turntable[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2009, 25(5): 38-40.
- 汤辉, 吴影生. 双电机驱动精密二维测试转台伺服系统设计及实现[J]. 电子机械工程, 2009, 25(5): 38-40.