

## 夜间整层大气透过率测量技术研究

冯全全<sup>1,2</sup>, 詹杰<sup>1</sup>, 刘庆<sup>1</sup>, 李学彬<sup>1</sup>, 朱文越<sup>1</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026)

**摘要:** 分析了夜间利用恒星测量整层大气透过率的原理, 研制了用于夜间整层大气透过率测量的设备, 该设备能够对高度角大于  $15^\circ$  的任意天区内的 0~5 等恒星在 400~750 nm 分波段弱辐射大气透过率测量, 测量带宽为 30 nm。采用自动控制 CCD 曝光时间的方法获取分波段恒星的弱辐射信号, 利用图像反馈模式纠正望远镜追星的误差, 实现无人值守自动连续整夜观测。设备定标采用 Langley-plot 定标方法与多目标星定标方法相结合。测量结果分别与 CART 和 Modtran 理论计算值进行了比较, 比较结果证明了测量方法的可行性和设备的可靠性。

**关键词:** 整层大气透过率; 曝光; 定标; CART

中图分类号: P412.4 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0617005

## Study on measurement technology of total atmospheric transmittance at night

Feng Quanquan<sup>1,2</sup>, Zhan Jie<sup>1</sup>, Liu Qing<sup>1</sup>, Li Xuebin<sup>1</sup>, Zhu Wenyue<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Chinese Academy of Sciences, 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:** The principle of measuring nighttime total atmospheric transmittance was analyzed and the equipment was developed to measure weak radiation atmospheric transmittance within any sky zone of elevation angle greater than  $15^\circ$  from level 0 to level 5 magnitude stars during the spectral band of 400–750 nm, and the bandwidth of measurement was 30 nm. The method of automatically controlling CCD exposure time was used to obtain a sub-band weak radiation signal of stars, using image feedback mode to correct errors in the telescope searching –stars, which realized automatic unattended continuous observation all night. The equipment calibration adopted the combination of Langley – plot calibration method and multi-objective star calibration method. The measurement results were compared with the simulated values of CART and Modtran, which verified the feasibility of the measurement method and the reliability of the equipment.

**Key words:** total atmospheric transmittance; exposure; calibration; CART

收稿日期: 2016-10-10; 修订日期: 2016-11-20

基金项目: 中国科学院联合项目(2015AA808036)

作者简介: 冯全全(1990-), 男, 硕士生, 主要从事大气透过率测量系统的测量控制方面的研究。Email: fqq@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 詹杰(1969-), 男, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事大气参数测量技术方面的研究。Email: jzhan@aiofm.ac.cn

## 0 引言

空间目标光学特性的定量测量中,很容易受到大气传输的影响<sup>[1]</sup>,并且在不同的地区、季节、气象条件下的影响不同<sup>[2]</sup>。整层大气透过率是反应大气传输特性的一个重要参数,准确获取整层大气透过率对于大气光学自适应修正工作有着重要意义<sup>[3]</sup>。

在国内,詹杰等人研制的昼夜兼用型大气透过率测量仪器<sup>[4]</sup>,能够实现对不同地区、不同季节下夜间整层大气透过率的直接测量。该仪器利用增强型 CCD (ICCD) 实现对 1~6 等恒星在 350~700 nm 分波段测量,测量带宽为 50 nm。但是 ICCD 线性特性不稳定,隔段时间需要回厂对其重新标定。而且测量带宽较宽,这对透过率的测量有一定的影响。针对以上不足,文中研制了一种新型的夜间整层大气透过率测量仪,采用自动控制 CCD 曝光时间的方法来获取分光后恒星的弱辐射,实现对 0~5 等恒星 400~750 nm 分波段测量,其中测量带宽为 30 nm。且测量结果与 CART 和 Modtran 理论计算值进行了比对,验证了仪器测量数据的可靠性。

## 1 测量原理

CCD 靶面受到光照产生电荷<sup>[5]</sup>表示为:

$$Q_{in(\lambda)} = \frac{\eta \delta S}{h\nu} \int E(\lambda) dt \quad (1)$$

式中: $Q_{in(\lambda)}$ 为像素的电荷量; $\eta$ 为光电转换效率; $\delta$ 为电子电荷量; $S$ 为光照面积; $h$ 为普朗克常数; $\nu$ 为入射光频率; $t$ 为曝光时间; $E(\lambda)$ 为靶面接收到的辐照度。在短时间内忽略大气湍流的影响, $E(\lambda)$ 辐照度在积分的过程中可认为是一常数。

因此公式(1)可以改写为:

$$Q_{in(\lambda)} = g_{e(\lambda)} E(\lambda) t \quad (2)$$

式中: $g_{e(\lambda)} = \eta \delta S / h\nu$ 。

图像的灰度值  $Gray(\lambda)$  的大小则是由像素单元产生的电荷量大小决定的,在忽略光电转化噪声的影响下则:

$$Gray(\lambda) = kg_{e(\lambda)} E(\lambda) t \quad (3)$$

式中: $k$ 为像素电荷量与像素灰度值的转化比例系数为一定值。

恒星辐射经过整层大气到地表的辐照度  $E(\lambda)$ <sup>[6]</sup> 可以表示为:

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \exp[-\tau(\lambda)m(\theta)] \quad (4)$$

式中: $E_0(\lambda)$ 为恒星在大气层顶的辐照度; $\tau(\lambda)$ 为总的垂直大气光学厚度; $m(\theta)$ 为大气质量; $\theta$ 为天顶角。

由公式(3)、(4)可推出:

$$E(\lambda) = \frac{Gray(\lambda)}{kg_{e(\lambda)}t} = E_0(\lambda) \exp[-\tau(\lambda)m(\theta)] \quad (5)$$

对公式(5)取对数可得:

$$\ln E(\lambda) = \ln \frac{Gray(\lambda)}{kg_{e(\lambda)}t} = \ln E_0(\lambda) - \tau(\lambda)m(\theta) \quad (6)$$

其中  $m(\theta)$  可表示为:

$$m(\theta) = \frac{1}{\cos \frac{\pi\theta}{180^\circ} + 0.15 \times (93.885 - \theta)^{-1.251}} \quad (7)$$

以  $m(\theta)$  为横坐标,以测量处理后的值  $\ln E(\lambda)$  为纵坐标(其中  $k$  与  $g_{e(\lambda)}$  为定值均可取 1),对公式(6)作图,得到直线的斜率为  $-\tau(\lambda)$ ,直线截距为  $\ln E_0(\lambda)$ 。 $\ln E_0(\lambda)$  的获取就是经典的 Langley-plot 定标方法。

根据多目标恒星定标方法<sup>[5]</sup>可得到其他同光谱类型恒星的定标值:

$$E_1(\lambda) = E_0(\lambda) \times 10^{0.4 \times \Delta m} \quad (8)$$

式中: $E_1(\lambda)$ 为使用多目标恒星定标的同光谱类型恒星的定标值; $\Delta m$ 为使用 Langley-plot 定标的恒星与使用多目标恒星定标的恒星星等差值。

由以上推导可计算出,夜间对某一天顶角,任意时刻整层垂直透过率  $T(\lambda)$  和测量恒星方向斜透过率  $t(\lambda)$  可表示为:

$$T(\lambda) = [E(\lambda) / E_0(\lambda) \times 10^{0.4 \times \Delta m}]^{m(\theta)-1} \quad (9)$$

$$t(\lambda) = E(\lambda) / (E_0(\lambda) \times 10^{0.4 \times \Delta m}) \quad (10)$$

## 2 系统设计及实现

整层大气透过率测量仪由望远镜及跟踪系统、滤光片控制机构、CCD 采集系统构成。采用主从式控制结构,由上位机电脑和下位机嵌入式系统执行机构两部分组成,实现自动测量任务。

### 2.1 望远镜及跟踪系统

望远镜采用 LX200GPS-SMT 天文望远镜,主要作用是对恒星辐射光信号的收集和对恒星的跟踪。望远镜在初始化校准时会产生不可避免的误差,这样会造成望远镜对恒星的追踪偏离视野的现象。该

设备采用图像反馈式纠正望远镜追踪偏移现象。

根据拍摄图像计算恒星在图片中的质心 $(x,y)$ 与视野中心位置 $(x_0,y_0)$ 的偏差:

$$\Delta x = x - x_0, \Delta y = y - y_0 \quad (11)$$

根据  $\Delta x, \Delta y$  的大小转化为望远镜需要转移的步数,上位机通过 RS232 串口发送转移指令控制望远镜进行相应的调整。其中  $x$  方向视为水平方向,  $y$  方向为垂直方向。经过反馈后,望远镜在无遮挡的情况下可进行整夜连续跟踪,不会失去目标恒星。

### 2.2 滤光片控制机构

滤光片由 350、400、450、500、550、600、650、700、750 nm 波段组成,带宽为 30 nm。

滤光片放置在密闭的盒子内的圆形转盘上,由步进电机带动转盘旋转切换滤光片。每个波段采集结束后,上位机发送切换指令,下位机接收指令转化为电机转动步数,控制步进电机旋转,从而实现滤光片的切换如图 1 所示。

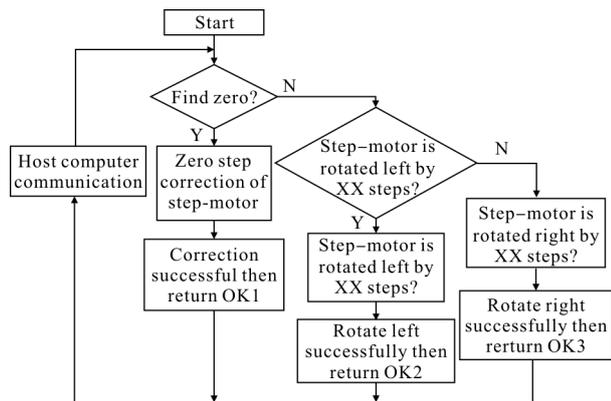


图 1 滤光片旋转控制流程图

Fig.1 Flow chart of optical filter rotation control

### 2.3 CCD 采集系统

CCD 采集系统包括上位机图像采集、下位机控制系统。

仪器采用调整 CCD 曝光时间的方法来实现测量范围动态控制,因此在选用 CCD 时,需要选择 CCD 曝光时间可编程控制的,并且需带有制冷功能。因为制冷可以有效降低 CCD 长曝光时产生的热噪声。该仪器选用 QHYCCD 公司的 IMG2PRO 深度制冷 16 位黑白 CCD,制冷温度可达零下 24℃,光谱响应在 400~1 000 nm。CCD 对于同一波段的响应度(见图 2)是不变的,由公式(9)和(10)可看出,光谱响应度在数据处理过程中被消除掉。因此 CCD 只需在

400~750 nm 波段范围内有较好的响应度即可,不需考虑具体大小。

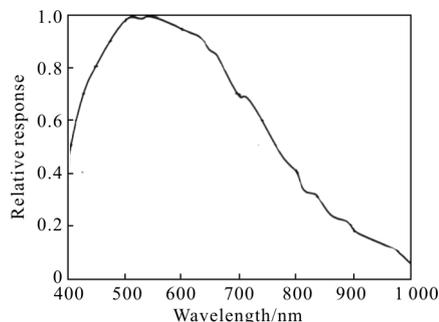


图 2 CCD 光谱响应曲线

Fig.2 CCD spectral response curve

CCD 控制程序使用 VC++6.0 编写,控制曝光时间  $T$  在 1~2 000 ms 之间自动调节。自曝光算法实现依据拍摄采样图片信息检测其峰值信号。在曝光时间和光圈一定的情况下,用均匀积分球测得 CCD 对辐亮度的响应情况如图 3 所示。

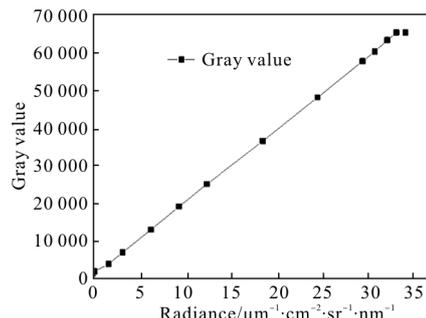


图 3 CCD 辐亮度响应曲线

Fig.3 Response curve of radiance of CCD

由图 3 可看出 CCD 对辐亮度的响应在灰度值 5000~60000 时,有很好的线性关系,在两端线性度较差。由此将采样灰度峰值信号分为四个区间分别为 (0,8000), (8001,35000), (35001,60000), (60001,65535), 对应曝光时间  $T$ (初始  $T=300$ ms)调整如表 1 所示。

表 1 CCD 曝光时间调整

Tab.1 CCD exposure time adjustment

| Peak gray value  | Exposure time  |
|------------------|--|
| (0, 8 000)       | $T = T + 500$ ms   |
| (8 001, 35 000)  | $T = T + 300$ ms   |
| (35 001, 60 000) | Save data  |
| (60 001, 65 535) | $T >= 1000$ ms, $T = T - 300$ ms;<br>$T >= 100$ ms & $T < 1000$ ms, $T = T - 10$ ms;<br>$T > 10$ ms, $T = T - 1$ ms; |

表 1 中, 设置的曝光时间调整是针对夜间观测恒星多次实验得到的经验数据, 尽量保证图像足够亮, 并避免落在灰度值两端。在曝光时间调整时, 若发现  $T > 2000 \text{ ms}$ , 则程序会保存当前的数据, 说明辐射光信号太弱无法采集, 在数据处理的过程中剔除相应的数据。

每个波段采集结束后, 上位机经串口发送信号通知下位机切换滤光片, 滤光片切换成功后, 下位机经串口通知上位机进行下一波段的光信号采集。

### 3 数据测量分析

#### 3.1 仪器的定标

仪器的定标测量需要的大气条件: 天气晴朗、大气稳定、气溶胶含量小且背景光弱(若恒星方向有月光, 测量的数据也会受影响)。

2016 年 5 月 3 日合肥地区夜晚, 天气晴朗, 无风, 无云, 无露水满足仪器定标要求。测量选择 HIP40526 恒星, RA: 8 h 16 m 30 s, DEC: 9° 11' 8", 星等: 3.5, 光谱类型 K4III。观测高度角从 50° 8' ~ 14° 59'。实验观测 4 min 采集一组数据, 高度角值根据当地时间、经纬度、恒星的赤经赤纬由编写软件实时记录采集时恒星高度角。根据公式(7)计算得到大气质量  $m(\theta)$ 。由测量值根据公式(5)、(6)计算得到测量时  $\ln E(\lambda)$ 。以  $m(\theta)$  为横坐标, 以  $\ln E(\lambda)$  为纵坐标得到图 4(a), 对图 4(a)进行线性拟合得到图 4(b)。由图 4(b)可看出, 测量结果符合 Langley-plot 定标方法。

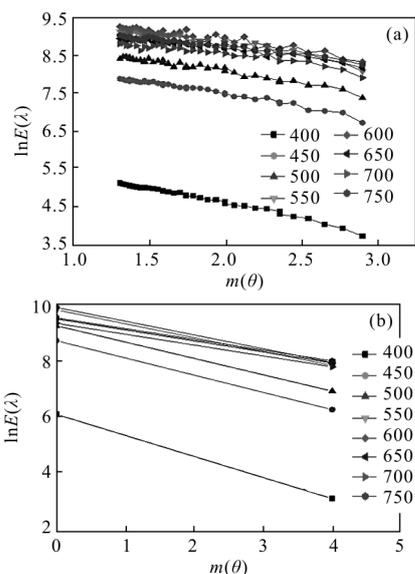


图 4 测量照度与大气质量关系图

Fig.4 Relationship between measurement light intensity and air quality

由 Langley-Plot 方法得到仪器的定标值  $\ln E_0(\lambda)$ , 从而求得  $E_0(\lambda)$ 。根据公式(9)、(10), 则可以分别得到整层大气垂直透过率  $T(\lambda)$  和整层大气斜程透过率  $t(\lambda)$ 。分别以时间、恒星高度角为横坐标, 分别以  $T(\lambda)$ 、 $t(\lambda)$  为纵坐标, 分别得到整层大气垂直透过率随时间变化关系见图 5(a) 和整层大气斜程透过率随恒星高度角变化关系如图 5(b) 所示。

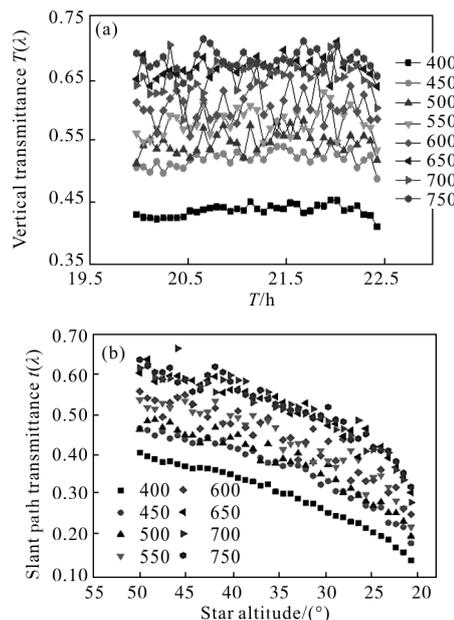
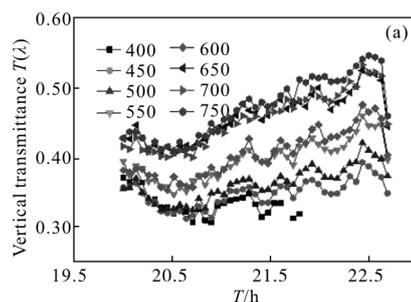


图 5 定标日测得整层大气透过率信息

Fig.5 Information of total atmospheric transmittance measured on the calibration day

#### 3.2 整层大气透过率测量

以 2016 年 4 月 27 日测量合肥地区数据为例, 当晚选择 HIP34693 恒星, RA: 7 h 11 m 8 s, DEC: 30° 14' 42", 星等: 4.4, 光谱类型 K2III。由测量值  $E(\lambda)$  和利用多目标恒星定标得到的  $E_0(\lambda)$ , 根据公式(9)和(10)计算出整层大气垂直透过率  $T(\lambda)$  见图 6(a) 和整层大气斜程透过率  $t(\lambda)$  见图 6(b)。



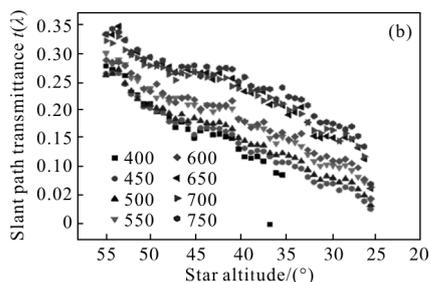


图 6 非定标日测得整层大气透过率信息

Fig.6 Information of total atmospheric transmittance measured on the non calibration day

## 4 结果验证及噪声分析

### 4.1 结果验证

以 2016 年 5 月 3 日定标日测量的数据计算得到的整层大气斜程透过率与 CART<sup>[6-7]</sup>和 Modtran 模拟计算得到的大气斜程透过率结果进行比较。对比结果如图 5(a)~(h)所示,图中圆点代表 CART 计算值,三角形代表 Modtran 计算值,正方形代表实际测量值。

从图 7 的验证结果可以看出,测量值与 CART 和 Modtran 计算值变化的趋势一致,说明了仪器测量的可靠性;由于大气变化的复杂性与测量误差的

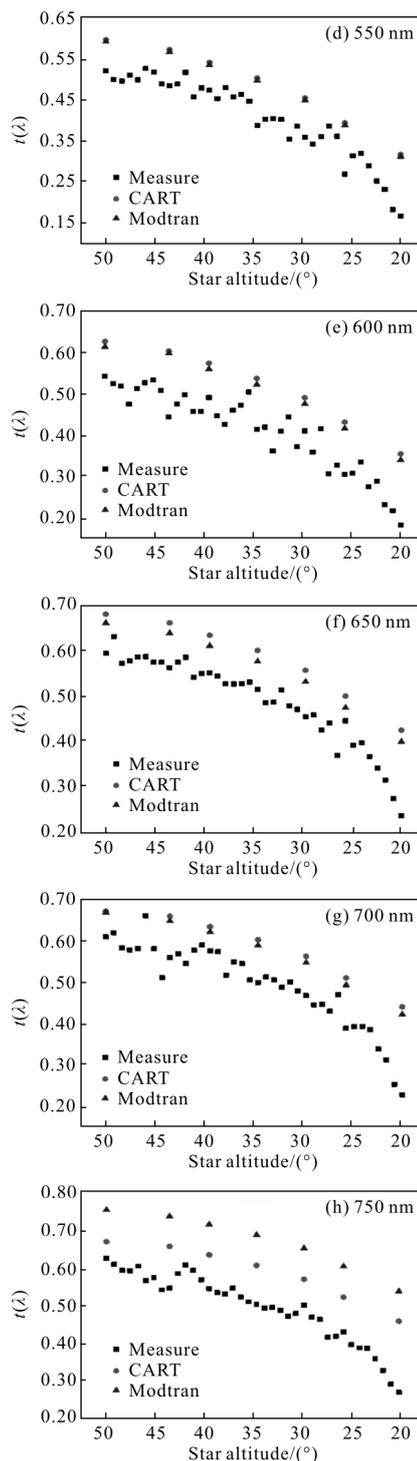
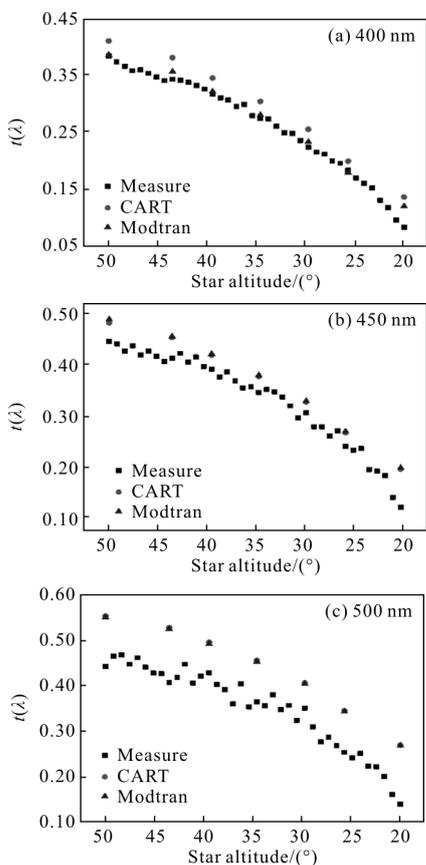


图 7 不同波段下,实际测量结果与 CART 和 Modtran 比较

Fig.7 Comparison of actual measurement results with CART and Modtran under different wavelengths

影响,造成了测量值在变化趋势上略有波动;图 7 中可看出恒星高度角小于 25° 后测量的整层大气斜程透过率与 CART 和 Modtran 模拟计算值相差较大,这是由于恒星高度角较低,大气受到人类活动影响

较大,因而与理想大气有很大偏差,因此测量值与理论计算相差较大是合理的;在恒星高度角大于  $25^\circ$  时,在  $400\sim 700\text{ nm}$ ,实际测量值与两种模拟计算值最大相对误差为 0.15,其主要原因是理论计算选择的气溶胶类型与实际气溶胶有一定差距。在  $750\text{ nm}$  时,可看到 CART 与 Modtran 两种模拟计算值自身也存在一定的偏差,但是两者与测量值的趋势是一致的,这也说明理论计算自身就存在误差。

#### 4.2 噪声分析

仪器噪声主要来源:

(一)是望远系统杂散光和天空背景引起的背景噪声。背景噪声的存在会使得测量值偏大,甚至会淹没微弱的恒星光信号。

在数据处理过程中,利用图像识别技术,找到恒星像的位置,在像的四周各取一块区域,与恒星像的区域大小相同。对四块区域的灰度值进行求和后取平均值。将恒星像区域的灰度减掉四块区域的平均值,可认为是对背景噪声的扣除,从而减弱了背景噪声对测量结果的影响。

(二)是 CCD 探测器在加偏置电压未进行光照时会存在一个偏置灰度值。这个值的大小与 CCD 的偏置电压有关。在数据处理时,背景噪声的处理过程就包括了对本底的偏置灰度值扣除。

(三)是 CCD 曝光时间增加,散粒噪声的增大。散粒噪声通过多幅图像累加取平均的方法,提高仪器的精度。设备在采集图像时,连续拍摄三次取平均图。

## 5 结 论

文中实现了对  $400\sim 750\text{ nm}$  可见光分波段夜间整层大气透过率的直接测量,可对高度角大于  $15^\circ$  的任意天区进行直接测量,测量结果与 CART 进行了对比分析,验证了数据的合理性。对于地平式安装望远镜带来长时间跟踪恒星会失去目标的问题,采用了图像反馈模式实现连续整夜观测,且不会失去目标。仪器采用控制 CCD 曝光时间分波段采集光信号,不仅提高了对弱信号的探测能力,而且 CCD 曝光时间与光照度有很好的线性关系,不需要对曝光时间与光照度进行单独定标。设备针对夜间对恒星进行观测,在白天受到强背景光的影响,不易进行观测,但可与太阳辐射计配合使用,实现昼夜整层大气透过率直接测量。

#### 参考文献:

- [1] Zang Shouhong, Bai Yunta, Ouyang Yi. Research on atmospheric transmittance measuring method[J]. *Infrared*, 2009, 30(3): 26-29. (in Chinese)  
臧寿洪,白云塔,欧阳艺. 大气透过率测量方法的研究[J]. 红外, 2009, 30(3): 26-29.
- [2] Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming, et al. Profile and character of atmospheric structure constants of refractive index [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17 (4): 485-490. (in Chinese)  
孙刚,翁宁泉,肖黎明,等. 不同地区大气折射率结构常数分布特性及分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 485-490.
- [3] Kambezidis H D, Vera D-P, Adamopoulos A D. Radiative transfer atmospheric transmission monitoring with modeling and ground-based multispectral measurements [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(27): 6976-6982.
- [4] Zhan Jie, Guo Ruipeng, Huang Honghua, et al. Measurement of total atmospheric transmittance with stellar irradiance[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(11): 1761-1765. (in Chinese)  
詹杰,郭瑞鹏,黄宏华,等. 利用恒星测量整层大气透过率[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1761-1765.
- [5] Zhu Ming, Zhan Jie. 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. (in Chinese)
- [6] Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming. Combined atmospheric radiative transfer (CART) model and its applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3361-3365. (in Chinese)  
魏合理,陈秀红,戴聪明. 通用大气辐射传输软件[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3361-3365.
- [7] Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming, et al. The ground-based measurements of infrared atmospheric background spectral radiances [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 284-290. (in Chinese)
- [8] Qin Li, Dong Lili, Xu Wenhai, et al. Method for conversion calibration between CCD image gray value and illumination[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36 (3): 639-644. (in Chinese)
- [9] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 21-37.