

文章编号 1004-924X(2013)01-0046-07

## 天空背景亮度测量系统的研制

徐文清<sup>1,2</sup>, 詹 杰\*, 徐青山<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. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:** 研制了一台用于实时测量天空背景辐亮度的大气辐射测量设备(DTL-1), 该设备具有全天空扫描与给定方向测量两种测量模式, 可完成 400~1 000 nm 波段积分辐亮度的测量。基于 DTL-1 系统组成结构原理图, 详细说明了各功能部件的研制方案, 给出了仪器的各项主要技术指标。对仪器进行了光谱辐亮度定标与恒定亮度下测量稳定性的测试实验; 选取不同地区的天空辐亮度实测数据与 MODTRAN5 理论计算值进行了对比分析。结果表明: DTL-1 稳定性测试的平均辐亮度示值为  $36.496 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ , 均方根误差为  $0.463 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ , 与 MODTRAN 软件模拟结果比较其相对误差在 20% 以内, 能够满足科研与实际应用对天空背景辐亮度测量可靠性和精度的要求。

**关键词:** 天空亮度; 背景亮度; 积分辐亮度测量; 测量仪器; 辐射定标

**中图分类号:** P415.34 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132101.0046

## Development of measuring instrument for sky background brightness

XU Wen-qing<sup>1,2</sup>, ZHAN Jie\*, XU Qing-shan

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

\* Corresponding author, E-mail: jzhan@aiofm.ac.cn

**Abstract:** An atmospheric radiation measuring instrument (DTL-1) was developed to research the sky brightness radiance in real time, which could measure the integral radiance at wavelength of 400 to 1 000 nm in two working modes of all-sky scanning and given direction sounding. The design scheme was introduced in detail by the functional-block diagrams of system structure and the flowchart of signal acquisition about DTL-1 and the main technical parameters of instrument were also presented. Then, the absolute integral radiance of the DTL-1 was calibrated in the spectral range of 400 to 1 000 nm by using a wide wave range absolute calibration method, and measuring stability under a constant brightness was tested. At last, the results measured by DTL-1 for practical data from different regions were compared to simulation of MODTRAN5. The results show that the average radiance of work stable test and the root-mean-square error are  $36.496 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ , and  $0.463 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ , respectively, and the variance between measurements of DTL-1 and simulations of MODTRAN is under 20%. It demonstrates that DTL-1 can satisfy the requirement of scientific research and actual application.

收稿日期: 2012-08-12; 修订日期: 2012-09-29.

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(No. 11040606M40)

**Key words:** sky brightness; background brightness; integral radiance measurement; measuring instrument; radiating calibration

## 1 引言

受空气分子和大气气溶胶颗粒的吸收和散射,太阳辐射在大气中传输时会在大气层内形成散射光亮度空间分布,即天空亮度<sup>[1]</sup>。这是地基空间目标探测时必须考虑的一个重要因素<sup>[2-3]</sup>,因为较强的天空背景辐射往往给空间目标的跟踪或探测带来困难<sup>[4]</sup>。天空亮度的实时测量可以对目标探测系统的目标探测能力进行评估;同时,实时测量天空背景辐射的光谱特性能够得出目标与天空背景的光谱辐射差异,进而根据当前的背景实时选择最优的光谱滤波波段<sup>[5-6]</sup>,从而提高目标的探测能力。另一方面,天空亮度分布也是气溶胶光学特性反演的一个重要手段<sup>[7]</sup>。天空各方向的散射辐射可以用来反演气溶胶粒子的谱分布和散射相函数<sup>[8]</sup>,进而获取气溶胶的多个光学参数<sup>[9]</sup>。为了能够实时获取所需方位背景亮度和全天空亮度分布,研制了一台用于观测天空背景在 400~1 000 nm 光谱段积分辐亮度的测量设备,命名为天空亮度仪(型号:DTL-1)。DTL-1 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,可在天空扫描和定点观测两种模式下进行天空亮度测量。

DTL-1 工作时正面朝南水平摆放,下位机嵌入式系统控制自动零位校正模块,使得仪器能够在水平和俯仰 2 个自由度上正确回到初始位置,用户通过上位计算机的测量软件下发测量命令后,由下位机嵌入式系统控制太阳跟踪模块和电机驱动控制模块,使仪器转向天空中给定的预设方向或对全天空进行扫描测量;天空散射光经前端光路系统接收后转化为模拟电压信号,经信号处理系统后转换为数字信号量送入下位机嵌入式系统;下位机嵌入式系统控制串行通信模块将信号上传给上位计算机保存并实时显示。本文详细介绍了 DTL-1 的组成结构,通过对仪器的光谱辐亮度定标实现对 400~1 000 nm 光谱段绝对积分辐亮度测量,测量数据与 MODTRAN 理论计算值进行了对比分析,验证了 DTL-1 具有很好的

测量稳定性和可靠性。

## 2 研制方案

图 1 给出了 DTL-1 的硬件结构,下面结合此图介绍仪器各功能部件的研制方案。

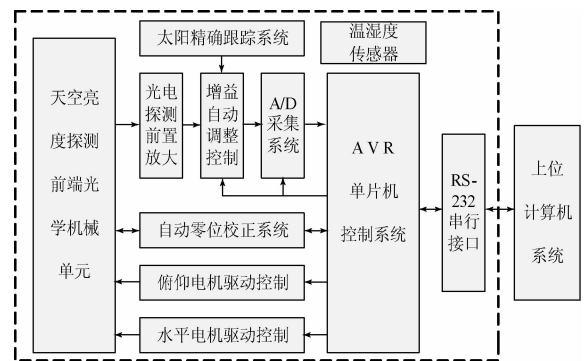


图 1 DTL-1 结构组成原理图

Fig. 1 Schematic diagram of structure about DTL-1

### 2.1 光学系统与机械结构

白天晴朗天空背景亮度基本在  $5 \sim 200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ <sup>[10]</sup>,实验表明,偏移太阳  $5^\circ$  时亮度即可达到  $200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$  以上,若要探测包括冬日晨昏到夏日正午等天气条件下或者更靠近太阳时的天空亮度值,则应在以上范围基础上扩展至少一个量级。DTL-1 测量动态为  $2 \sim 2\,000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ ,测量光谱为 400~1 000 nm,光信号接收视场角

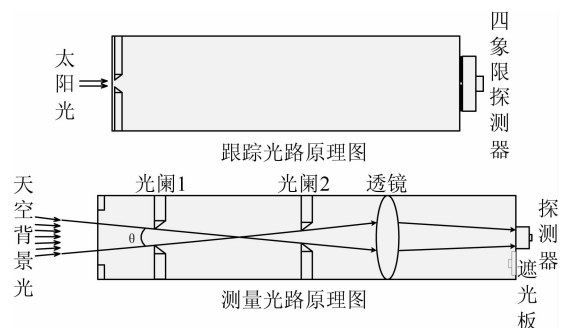


图 2 DTL-1 光学系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of optics about DTL-1

为  $2^\circ$ 。采用圆孔光阑与透镜组合的方式设计光路,图 2 是仪器光学系统原理图,包括太阳跟踪光路与信号接收光路两个部分。DTL-1 采用主从式的控制结构,且上位计算机和下位机嵌入式系统装在一起置于仪器跟踪台下的机箱里,增加了其便携性和稳定性,可以被置于任何场地使用。DTL-1 扫描镜筒设计成能够分别在水平  $360^\circ$  范围和俯仰  $180^\circ$  范围内的 2 个自由度上任意转动,可实现对全天空的自动扫描观测。

## 2.2 自动零位校正系统

DTL-1 工作时须正面朝南水平摆放,测量之前需校正零位以便确认并记录自己所处的水平与俯仰方位,并据此计算太阳方位角和高度角。开机后,DTL-1 能够自动在水平和俯仰 2 个自由度上检测零位位置并且在测量结束后会自动转回到零位,这一功能的实现使 DTL-1 在测量和跟踪时的重复定位精度能够达到  $0.1^\circ$ ,充分保证了在所测天空方位上的定位精度。

## 2.3 太阳跟踪与测量方式

DTL-1 具有定点观测和天空扫描两种工作模式,定点观测模式用于控制 DTL-1 自动转向用户输入的特定方位(天顶角和方位角)进行持续的辐亮度测量,每隔 10 s 测量 1 次;天空扫描模式用于控制 DTL-1 对太阳高度角所在的平纬圈和太阳方位角所在的天顶极化方向进行非等间隔扫描观测,一次完整扫描约用时 2 min。在扫描观测之前需先对太阳进行跟踪,以太阳为参照计算出所测的天空方位值,这一过程由软件计算太阳运行轨迹初步跟踪,再结合四象限传感器精确跟踪,保证测量方位的偏移精度。

## 2.4 信号处理

DTL-1 的信号采集过程如图 3 所示,输入信号包括用于太阳跟踪的 4 个象限信号以及天空亮度信号共 5 路,由单片机通过信号选通器选择所要采集的信号后进行增益自动调节控制,共有 1、2、5、10、20、50、100、200、500、1000 倍 10 种放大倍数档,嵌入式程序先预设放大 50 倍进行采集,之后判断采集到的信号值是否在  $50\text{ mV} \sim 5\text{ V}$  内,如果小于此范围,则通过查表的方法将放大倍数增加一档,反之则减小一档,重复以上过程直到采集到的信号满足上述的范围要求,之后将采集到的信号值再除以此时的放大倍数即为原始信号幅值,最后将数据输出到串行口供上位计算机接

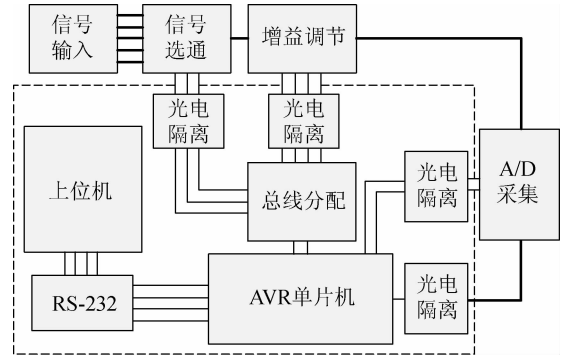


图 3 DTL-1 信号采集原理图

Fig. 3 Schematic diagram of signal acquisition about DTL-1

收保存,图 4 给出了 DTL-1 的数据采集程序流程,图 3 中虚线框内为数字电路部分,框外为模拟部分,两者进行光电隔离处理,保证了模拟信号在传输过程中不受干扰,以提高测量精度。

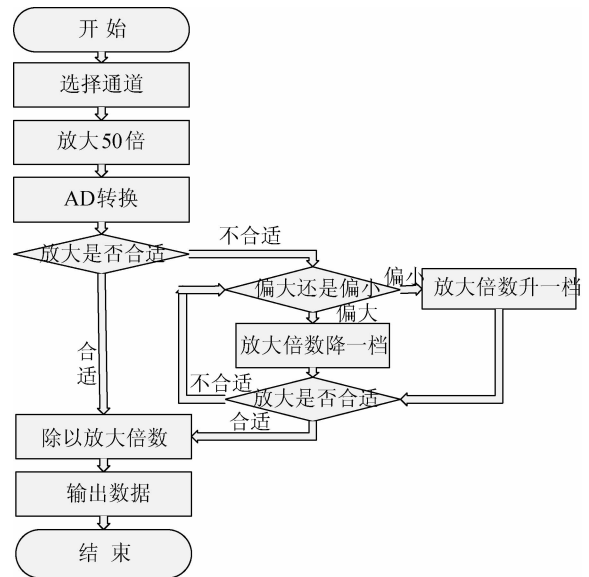


图 4 DTL-1 信号采集程序流程图

Fig. 4 Flowchart of signal acquisition about DTL-1

## 2.5 主控系统

AVR 单片机嵌入式系统是 DTL-1 整个下位执行机构的控制核心,其在内部驻有的测量程序的引导下负责协调信号处理系统、太阳跟踪系统、自动零位校正系统、电机驱动控制模块和串行通信模块之间的相互配合来保证整个测量过程的顺利实现。采用 AVR 单片机作为控制核心可使 DTL-1 硬件结构变得简单且集成度提高,降低电

路的故障率,提高可靠性和智能化程度。

## 2.6 上位机软件

软件作为设备的控制程序和人机交互接口,用于引导和控制 DTL-1 进行大气背景辐射测量的整个过程,同时负责处理、存储和输出测量结果等。上位计算机通过 RS-232 串行口与下位机系统通信。软件开发环境为 Microsoft Visual Basic 6.0,操作简便,性能可靠。

## 2.7 主要技术指标

波长为 400~1 000 nm,动态范围 2~2 000  $W/m^2 \cdot sr$ ,工作温度为  $-20 \sim +50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,光信号测量视场角为  $2^\circ$ ,重复定位精度为  $0.1^\circ$ ,工作模式为天空扫描模式、定点测量模式。

## 2.8 标定

DTL-1 用于测量 400~1 000 nm 的绝对积分辐亮度,仪器探测器选用美国 THORLABS 公司的 APD-110A 型 Si 雪崩二极管,图 5 给出了其归一化的相对光谱响应曲线。

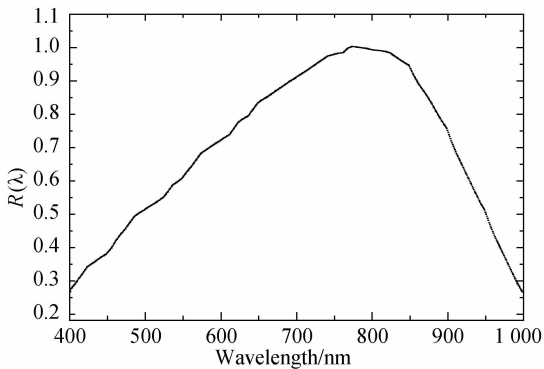


图 5 APD-110A 相对光谱响应曲线

Fig. 5 Relative spectrum response curve of APD-110A

采用宽波段绝对定标法对仪器进行标定。所用定标公式如下:

$$DN = A + B \cdot \int_{400}^{1000} B(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (1)$$

式中:  $B(\lambda)$  为波长  $\lambda$  处的单色辐亮度值,  $\int_{400}^{1000} B(\lambda) \cdot d\lambda$  为波长 400~1 000 nm 的积分辐亮度值,  $DN$  为仪器对  $\int_{400}^{1000} B(\lambda) \cdot d\lambda$  所响应的电压示值,  $A$  和  $B$  即为所要定出的常数。定标所用设备为标准光源漫反射板系统和大口径积分球。在利用天空亮度仪实测天空亮度时,实际的 400~

1 000 nm 的天空积分辐亮度为:

$$\int_{400}^{1000} B(\lambda) \cdot d\lambda = (DN - A)/B. \quad (2)$$

标准光源漫反射板系统由标准光谱辐照度灯、光阑、标准漫反射白板、光谱辐射计和光学导轨等组成,其光谱辐亮度已知,但亮度不可变;大口径积分球系统由内部涂满漫反射材料、直径 3 m 的反光球体、出光直径 1 m 的光出口以及在光出口均匀分布的 64 盏参数一致的标准灯组成,可以产生稳定的光谱辐亮度且能够按倍数变化,但其光谱辐亮度值未知,因此需要利用标准光源漫反射板系统和大口径积分球相互配合才可以同时定出  $A$  和  $B$  的值。

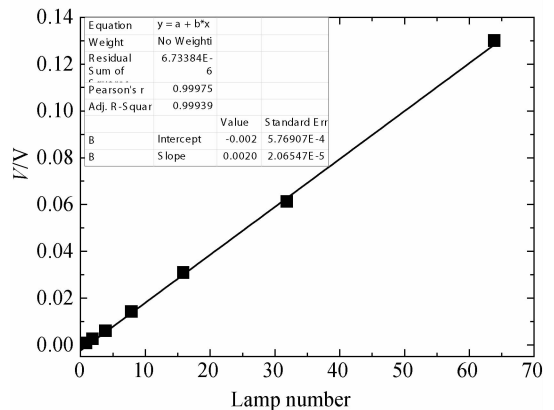


图 6 积分球实验响应曲线

Fig. 6 Response curve of integrating sphere

由积分球做出的仪器响应曲线如图 6 所示。由图可见,仪器的线性相关性达到 99.9%,与 Y 轴截距电压值为  $-0.00241 \text{ V}$ 。由于积分球亮度值未知,即响应曲线的横坐标未知,故无法从图中直接获得响应曲线的斜率和截距。但标准光源漫反射板系统实验所得的电压示值和亮度值所对应的点必定在仪器的响应曲线上。因此通过标准光源漫反射板系统来确定响应曲线的斜率和截距,即可求得仪器常数  $A = -0.00241 \text{ V}$  和  $B = \frac{DN - A}{L} = 4.401 \times 10^{-4} \text{ V} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

为了检验 DTL-1 在恒定亮度下的测量稳定性,利用积分球对仪器进行了稳定性测试。测试时保持积分球点亮 8 盏灯,测试时间为 1 h,共计约 360 个测量数据点,结果如图 7。

图中最大亮度示值为  $37.68 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ ,最小

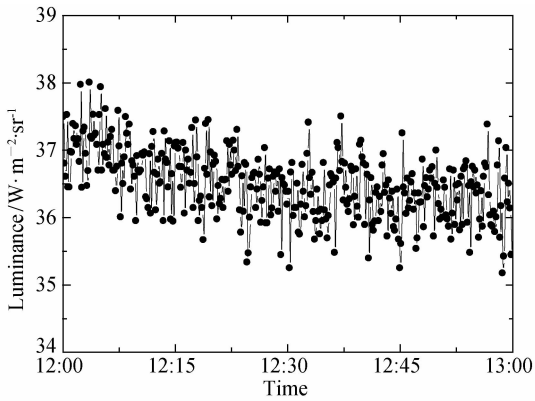


图 7 DTL-1 稳定性测试曲线

Fig. 7 Testing curve of stability of DTL-1

亮度示值为  $35.242 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ , 平均示值为  $36.496 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ , 均方根误差为  $0.463 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ , 仪器具有良好的测量稳定性。

### 3 数据测量

分别选取 2012 年 1 月 5 日在合肥地区和 2012 年 2 月 24 日在西南地区的天空背景辐亮度仪器实测数据与 MODTRAN5 软件模拟计算结果进行了对比分析。1 月 5 日合肥天气晴朗, 实测能见度超过 10 km, 上午全天空无云, 只在下午观测方位上有少量薄云。MODTRAN 软件模拟所需的参数有: 气溶胶类型、能见度以及相对湿度。因测量地点为合肥西郊科学岛, 因此选择乡村型气溶胶, 实时能见度及相对湿度由 BEL-FORT6000 型能见度仪和当天的气象数据获得, 对比方位为  $180^\circ$  方位角 (正南方向)、 $45^\circ$  高度角。图 8 给出了 DTL-1 实测与 MODTRAN5 理论计算的对比分析。结果表明, 仪器实测数据与 MODTRAN 理论计算结果相对误差最大为 20%, 这可能是由于理论计算所选的气溶胶类型与实际气溶胶有一定差距所致。此外, 根据当天的天气记录, 从 15 时开始观测方位上出现少量丝状薄卷云, 卷云的出现会强烈反射太阳光照而增大其周围的背景亮度, 使得此时的背景辐亮度相比无云情形有所增大, 因此图 8 中的仪器实测曲线在 14 时 20 分以后略有上翘并且出现振荡。

选取 2 月 25 日在我国西南地区的 DTL-1 实

测数据和 MODTRAN5 理论计算数据进行了对比分析, 这天天气晴朗, 肉眼观察大气较为洁净, 中午时间全天空无云。对比方位为随机选取的靠近太阳和偏离太阳的各种不同角度, MODTRAN 软件模拟计算的输入参数为城市型气溶胶, 地面能见度为 26 km, 相对湿度为 32%。由图 9 给出的对比结果表明, 两者测量结果吻合得较好, 与最近的数据相比较, 两者相对误差为 16%。

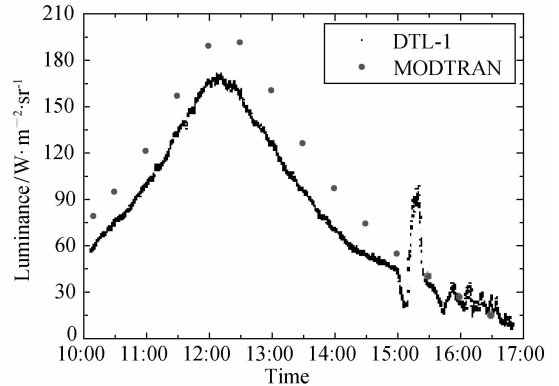


图 8 合肥地区 DTL-1 与 MODTRAN 数据对比结果

Fig. 8 Comparison of data between DTL-1 and MODTRAN in Hefei

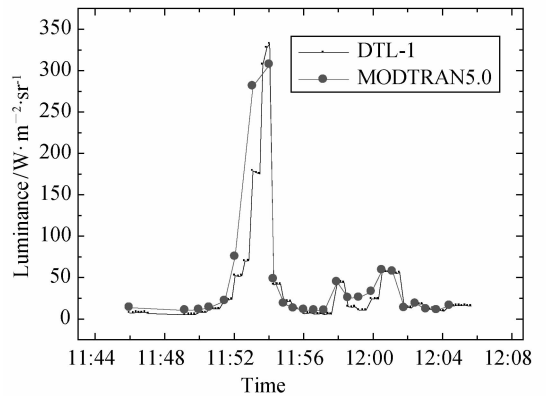


图 9 西南地区 DTL-1 与 MODTRAN 对比结果

Fig. 9 Comparison of data between DTL-1 and MODTRAN in southwest region

### 4 结论

DTL-1 是我单位自主研发的一种用于实时测量天空背景辐亮度的大气辐射测量设备, 具有天空扫描与定点观测两种测量模式, 分别用于全天空扫描和特定方位观测。仪器采用主从式的控

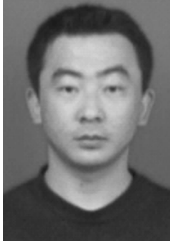
制结构,由上位工控计算机和下位嵌入式系统执行机构两部分组成,两者被集成一体组装在机箱内,增加了便携性和稳定性,使得仪器可以更好地在野外实验场地使用。利用标准光源漫反射板系统和口径积分球对仪器进行了绝对辐亮度定

标,使得 DTL-1 能够测量 400~1 000 nm 的绝对积分辐亮度。对标定后的 DTL-1 测量数据和光谱仪以及 MODTRAN5 软件模拟计算结果进行了对比分析,结果表明 DTL-1 测量数据可信,完全能满足实际的科研应用。

## 参考文献:

- [1] 李威,詹杰,陈秀红,等. 针对测量仪器设计的天空亮度分析[J]. 光学技术,2008,34(6): 939-945.  
LI W, ZHAN J, CHEN X H, *et al.*. Analysis on sky brightness for design of measurement instrument[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(6): 939-945. (in Chinese)
- [2] 吴振森,窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. 光学学报, 2003,23(10):1250-1254.  
WU ZH S, DOU Y H. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1250-1254. (in Chinese)
- [3] 张己化,姚东升,谈斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. 光学学报,2008, 28(6):1178-1182.  
ZHANG Y H, YAO D SH, TAN B. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6):1178-1182. (in Chinese)
- [4] 罗林,廖胜,樊敏. 天文望远镜像差对斑点成像技术的影响[J]. 光学学报,2005, 25(11):1447-1451.  
LUO L, LIAO SH, FAN M. Effects of large telescope aberrations on speckle imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(11): 1447-1451. (in Chinese)
- [5] 魏合理,陈秀红,戴聪明,等. 地基大气背景红外光谱辐射特性测量[J]. 红外与激光工程,2012,41(2):285-291.  
WEI H L, CHEN X H, DAI C M, *et al.*. Ground-based measurements of infrared atmospheric background spectral radiances [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012,41(2):285-291. (in Chinese)
- [6] 卢栋. 空间目标白天光电探测能力分析[J]. 现代电子技术,2011,34(16):176-179.  
LU D. Detection capability of space object in daytime [J]. *Modern Electronics Technique*, 2011,34(16):176-179. (in Chinese)
- [7] 黎洁,毛洁泰. 光学遥感大气气溶胶特性[J]. 气象学报,1989,47(4):450-456.  
LI J, MAO J T. Inverse of the property of atmospheric aerosols by optical remote sensing [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1989, 47(4): 450-456. (in Chinese)
- [8] NAKAJIMA T, TANAKA M. Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere [J]. *J Quant Spectrosc Ra-diat Transfer*, 1986, 35:13-21.
- [9] 徐青山,胡欢陵,魏合理. 地基消光测量确定大气气溶胶模型[J]. 强激光与粒子束,2006, 18(9): 1451-1456.  
XU Q SH, HU H L, WEI H L. Determination of the atmospheric aerosol model by ground-based spectral extinction measurements [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006,18(9):1451-1456. (in Chinese)
- [10] 景春元,谭碧涛,刘玮峰,等. 西北地区天空背景测量与分析[J]. 大气与环境光学学报,2010,5(6): 421-426.  
JING CH Y, TAN B T, LIU W F, *et al.*. Measurement and analysis on sky background in north-west region [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(6): 421-426. (in Chinese)

## 作者简介:



徐文清(1984—),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,2008年于内蒙古大学获得学士学位,主要从事大气辐射测量技术与理论分析方面的研究。E-mail: xuwq@mail.ustc.edu.cn



詹杰(1969—),男,湖北人,研究员,硕士生导师,1992年于合肥工业大学获得学士学位,1995年、2007年于安徽光学精密机械研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事大气参数测量与激光大气传输测量技术方面的研究。E-mail: jzhan@aiofm.ac.cn

## 导师简介:



徐青山(1965—),男,安徽霍邱人,研究员,博士生导师,1986年于武汉测绘科技大学获得学士学位,2004年、2007年于安徽光学精密机械研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事大气探测、辐射传输、卫星遥感与图像大气订正方面的研究。E-mail: qshxu@aiofm.ac.cn

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)