

# 宽波段天空背景辐亮度测量与分析

徐文清<sup>1,2</sup> 詹 杰<sup>1\*</sup> 徐青山<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 为快速获取天空背景辐亮度, 提出了一种基于 DTL-1 型天空辐亮度仪的宽波段测量方案。分析了天空可见到近红外波段(400~1000 nm)积分辐亮度的测量原理, 确定了宽光谱测量的响应系数和光视效率, 并对测量结果进行了误差分析。利用光谱仪对仪器进行了线性度检验与测量数据对比, 结果表明两者相对误差在 10% 之内, 验证了仪器测量的可靠性, 数据精度可以满足工程应用的要求。利用 DTL-1 型天空亮度仪分别在我国西南地区 and 合肥地区开展了全天空辐亮度的扫描测量, 并对两地的实测数据进行了简要分析。

**关键词** 大气光学; 天空亮度; 定标; 测量仪器; 目标探测

中图分类号 P415.3<sup>+</sup>4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0801001

## Measurement and Analysis of Wide-Wave Band Sky Background Radiance

Xu Wenqing<sup>1,2</sup> Zhan Jie<sup>1</sup> Xu Qingshan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** A measurement program of wide-wave band based DTL-1 sky brightness meter is developed to gain the real time sky background radiance fast. The principle for measuring the integral radiance in wave range from visible to near-infrared (400~1000 nm) is analyzed. Furthermore, the response coefficient and luminous efficiency are calculated, and an error analysis for the measurement results is made. The linearity checking of the DTL-1 and the data are carried out using spectrometer. The relative error is below 10%, which indicates the credibility of the instrument. The precision of the instrument can satisfy the requirement on real application. The all sky radiances in Hefei and Southwest districts are measured by using DTL-1, and the measurement data in the two districts are analyzed in brief.

**Key words** atmospheric optics; sky brightness; calibration; measurement instrument; object detection

**OCIS codes** 010.1310; 010.1290; 350.4600

## 1 引 言

天空亮度是指大气吸收、散射部分太阳光能量, 形成大气层内散射光亮度的空间分布。它由太阳位置和大气中的散射质点特性所决定, 包括大气分子和气溶胶粒子对太阳光的散射辐射, 是空间目标探

测与识别<sup>[1-2]</sup>、目标跟踪与成像<sup>[3]</sup>以及气溶胶特性反演<sup>[4-5]</sup>等领域一个重要的研究内容。当对空间的运动目标进行跟踪识别时, 其所在方位上较强的天空背景亮度有时会给目标识别带来困难, 因此需要对目标运行轨迹上的背景亮度进行即时测量以获取

收稿日期: 2013-03-05; 收到修改稿日期: 2013-03-14

基金项目: 装备预研基金(028011ZK09)

作者简介: 徐文清(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事大气辐射测量技术与理论分析等方面的研究。

E-mail: xuwq@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 徐青山(1965—), 男, 研究员, 主要从事大气探测、辐射传输、卫星遥感与图像大气订正等方面的研究。

E-mail: qshxu@aiofm.ac.cn

\* 通信联系人。Email: jzhan@aiofm.ac.cn

运动目标所在方位上的背景亮度,并通过一定的算法来减小或消除这种背景辐射干扰<sup>[6-7]</sup>。

当前获取天空辐亮度的手段概括起来主要有三种:1)通过如中分辨率大气辐射传输模式(MODTRAN)等软件对天空辐亮度进行理论计算<sup>[8]</sup>,其优点是应用成本低且计算方便,不足是需要实时测量大气参数作为输入量,且其中的大气模式与气溶胶模型与我国的真实大气状况有一定差异,因此计算精度不高<sup>[9]</sup>;2)利用分光测量获取天空背景光谱并进行积分得到辐亮度<sup>[10]</sup>,其优点是测量精度高,但目前尚没有可实现天空定点与扫描功能的相关专用仪器,且光谱积分需要一定的时间(如海洋光学公司的 Maya2000Pro 光纤光谱仪在正常配置的电脑上对 400~1000 nm 的光谱段积分就需要至少 25 s 时间),对于快速运动的空间目标进行探测和跟踪时没有直接宽谱测量迅速;3)通过对全天空拍照利用灰度信息来反推天空辐亮度的方法,如美国 Yankee 公司的全天空成像仪(TSI)等,其优点是瞬间即可获取全天空的亮度信息,不足是由于通过间接手段获取天空亮度值<sup>[11]</sup>,因此其测量精度不能满足目前的需求。总体来说,上述方案都无法很好地满足当前对于移动目标方位上背景辐亮度获取所提出的高精度、实时性和快速测量三大要求。

为了达到工程上的应用目的,研制了一台光谱范围为 400~1000 nm 的天空背景辐亮度测量仪器<sup>[12]</sup>

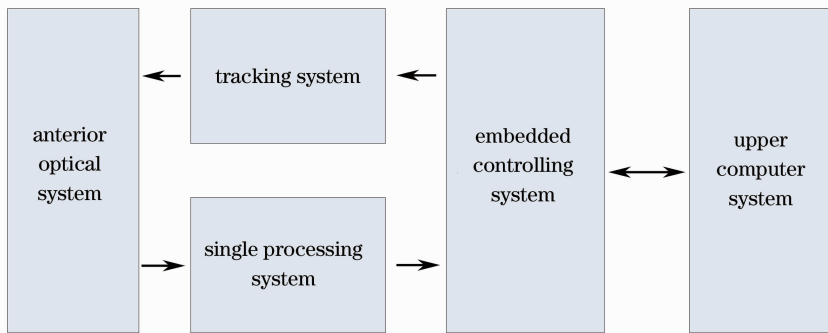


图 1 DTL-1 结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of DTL-1

由于仪器用于探测 400~1000 nm 全谱段范围的天空背景辐射,属于弱信号探测范围<sup>[10]</sup>,因此对探测器的灵敏度、等效噪声功率以及光谱响应特性等性能参数较为关注,综合考虑上述指标后,选择具有雪崩倍增效应的 THORLABS 公司 APD-110A 型 Si 雪崩二极管作为光电探测器,其噪声等效功率(NEP)仅为 0.16 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ,转换增益高达  $2.5 \times 10^6$  V/W。天空背景光通过仪器前端光学系统后到达光电探测器表

(型号 DTL-1)。仪器可在 1 ms 内经内部处理器运算得到所测方位上的背景亮度值,利用软件编程实时跟踪目标的运行轨迹可以即时测量目标运动过程中的背景辐亮度。由于是宽谱段实时绝对辐亮度测量仪器,不同方位天空背景光谱分布特性是影响测量精度的主要因素,基于此分析了宽光谱测量的响应系数和光视效率。本文简要介绍了 DTL-1 的结构组成与测量原理,详细阐述了仪器测量的辐亮度定标与光视效率确定的原理及实现方法;将测量数据与光纤光谱仪进行对比,给出了仪器的测量误差;最后给出了仪器实测的我国中部和西南典型地区的天空亮度分布并对其做了简要分析。

## 2 系统组成及测量原理

### 2.1 系统组成

图 1 是天空亮度仪 DTL-1 的原理框图。它主要由前端光学接收系统、信号采集与处理系统、方位驱动与跟踪系统、嵌入式控制系统以及上位计算机系统 5 部分组成<sup>[12]</sup>。仪器前端光路视场角为  $2^\circ$ ;跟踪测量重复定位精度为  $1'$ ;测量动态范围为  $2.5 \sim 8000$  W/( $\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ ),这是由探测器信噪比(SNR)为 1 时的总输出电压噪声和饱和输出电压所决定的。仪器具有天空扫描和定点观测两种工作模式,分别用于对全天空进行扫描和对用户输入的特定方位进行观测。

面转化成光电压信号,经放大和模数(A/D)转换后传输到上位计算机对电压示值信号进行反演运算得到绝对辐亮度值并进行存储和显示。

### 2.2 测量原理

光谱辐亮度是指某一面元朝某一方向在单位波长、单位面积、单位时间、单位球面度上所发出的能量<sup>[13]</sup>。对于某一波段范围的总辐射能,则是对相应的光谱段进行积分,即积分的辐亮度。在向地球大

气传输的所有波长的太阳辐射中,绝大部分能量集中于 400~1100 nm 之间,世界气象组织称之为总辐射范围,人们所研究和讨论的天空辐亮度也常常集中在这一波段<sup>[14]</sup>。DTL-1 用于测量 400~1000 nm 范围天空背景积分辐亮度,设天空背景光谱辐亮度为  $B(\lambda)$  [单位  $W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)$ ],则在 400~1000 nm 范围内的总辐亮度为

$$L = \int_{400}^{1000} B(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

经仪器进行光电响应转换后即为

$$U_{DN} = K_m \int_{400}^{1000} B(\lambda) R(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中  $U_{DN}$  为仪器的电压示值;  $K_m$  为仪器最大响应波长 (780 nm) 的光电转换系数,即仪器响应系数;  $R(\lambda)$  为探测器归一化相对光谱响应系数,是个无量纲量,其物理意义是探测器对不同波长光谱辐射量的响应效率,其对应为最大响应波长 (780 nm) 的辐亮度与某波长对探测器产生相同响应电压的辐亮度的比值。令

$$L_d = \int_{400}^{1000} B(\lambda) R(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

则  $L_d$  具有辐亮度  $L$  的量纲,称其为相对辐亮度。为了描述  $L_d$  与  $L$  的关系,引入光度学中所谓光视

表 1 标准灯-参考板系统不确定度主要来源

Table 1 Main source of uncertainty of the system of standard lamp-reference board

Impact factor	Wavelength /nm		
	350~400	400~800	800~1000
Current error	0.054	0.054	0.054
Distance error (650 mm) /%	0.13	0.13	0.13
Measurement area error /%	0.74	0.74	0.74
Diffuse error /%	1	1	1
Uncertainty of standard lamp /%	2.0	2.0~1.25	1.25~3.2
Reference board hemispherical reflectance /%	0.51	0.25	0.51
Compositive uncertainty of whole system /%	2.41	2.37~1.79	1.84~3.47

### 3.2 光视效率确定

由(4)式可知,测量系统的光谱响应在响应谱段内尽量接近平坦,即光谱响应  $R(\lambda)$  近似为常数,这是因为不同方位的天空背景具有不同的光谱特性,测量系统的非理想光谱响应将在不同程度上给测量带来误差。但是具有平坦光谱的热探测器由于灵敏度不高而无法应用于天空背景的弱信号探测,而且在实际应用中,测量系统的光谱响应是系统中光学和色散元件的光谱透射、反射、色散特性和探测器光谱响应的乘积,因此很难使系统的光谱响应接近理

效率的概念为

$$V = \frac{L_d}{L} = \frac{\int_{400}^{1000} B(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{1000} B(\lambda) d\lambda}. \quad (4)$$

利用辐射定标可定出仪器响应系数  $K_m$ ,实测天空背景辐亮度时,仪器电压示值  $U_{DN}$  与仪器响应系数  $K_m$  之比即为相对辐亮度  $L_d$ 。

综上所述,仪器能够根据电压信号反演计算得到大气背景绝对积分辐亮度  $L$  的关键在于必须对仪器进行绝对辐射定标以及确定仪器的光视效率  $V$ 。

## 3 辐射定标与光视效率确定

### 3.1 仪器定标

利用标准光源漫反射板系统对仪器进行宽波段绝对辐亮度标定<sup>[15]</sup>。标准光源漫反射板系统由基于低温绝对辐射计初级标准的光谱辐照度标准灯<sup>[16]</sup>、光阑、标准漫反射白板、光谱辐射计和光学导轨组成,定标的联合不确定度在表 1 中给出。标准光源漫反射板系统的光谱辐亮度已知,但亮度不可变,由此可以得到一组辐亮度与对应的仪器响应值。以(2)式作为仪器的定标公式,则可定出仪器响应系数  $K_m = 4.401 \times 10^{-4} V \cdot m^2 \cdot sr \cdot W^{-1}$ 。

想响应。

为此,采用等效理想矩形带宽代替系统实际光谱响应,它表示在一定条件下,使用理想响应在测量结果上等效于实际测量系统的响应。该方法的基本出发点是:当待测光源的光谱能量分布曲线可用一个二次函数来表示时,系统的等效理想响应可通过精确的计算来确定<sup>[17]</sup>。对于具有连续光谱的天空背景,其不同方位上的光谱特性如图 2 所示,可用二次函数近似逼近。将(4)式变形为

$$L_d = \int_{400}^{1000} B(\lambda)R(\lambda)d\lambda = V \int_{400}^{1000} B(\lambda)d\lambda. \quad (5)$$

$$B(\lambda) = X + Y\lambda + Z\lambda^2, \quad (6)$$

代入(5)式,有

将天空背景连续光谱  $B(\lambda)$  表示成二次函数,即

$$L_d = X \int_{400}^{1000} R(\lambda)d\lambda + Y \int_{400}^{1000} \lambda R(\lambda)d\lambda + Z \int_{400}^{1000} \lambda^2 R(\lambda)d\lambda. \quad (7)$$

选择波段范围 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 对天空背景光谱进行积分,则

$$L_d = V \int_{400}^{1000} B(\lambda)d\lambda = V \left[ X(\lambda_2 - \lambda_1) + \frac{Y}{2}(\lambda_2^2 - \lambda_1^2) + \frac{Z}{3}(\lambda_2^3 - \lambda_1^3) \right] =$$

$$V \left[ X + \frac{Y}{2}(\lambda_2 + \lambda_1) + \frac{Z}{3}(\lambda_2^2 + \lambda_1\lambda_2 + \lambda_1^2) \right] (\lambda_2 - \lambda_1), \quad (8)$$

令

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)}{2} &= \frac{\int_{400}^{1000} \lambda R(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{1000} R(\lambda) d\lambda} \\ \frac{\lambda_1^2 + \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2^2}{3} &= \frac{\int_{400}^{1000} \lambda^2 R(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{1000} R(\lambda) d\lambda} \end{aligned} \right., \quad (9)$$

比较(7)式和(8)式,即可得到仪器光视效率  $V = 0.808$ ,表示为

$$V = \int_{400}^{1000} R(\lambda)d\lambda / (\lambda_2 - \lambda_1). \quad (10)$$

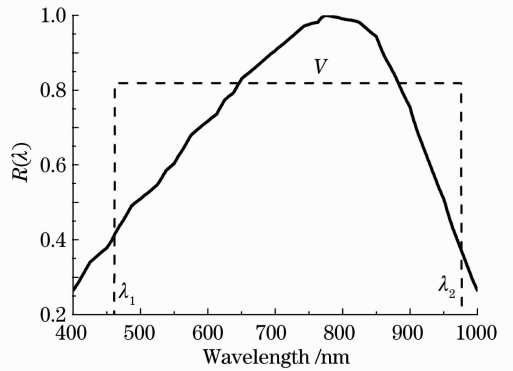


图3 APD-110A 归一化相对光谱响应曲线(实线)与等效理想响应曲线(虚线)

Fig. 3 Normalized relative response curve (solid line) and equivalent ideal response curve (dashed line) of APD-110A

来一定的误差。

## 4 误差分析与数据验证

### 4.1 误差分析

天空辐亮度仪的测量误差来源主要包括仪器固有误差、大气影响、定标误差。其中仪器固有误差包括探测器非线性、仪器灵敏度变化、温度灵敏度、输出电压转换误差;大气影响包括天空背景光谱分布影响、气体吸收峰近似误差;定标误差包括灯-板系统不确定度、光学系统杂散光。

仪器的固有误差对于不同的仪器有所不同,并且在出厂时都会进行严格的检验以满足测量要求。对于大气影响,利用二次函数拟合天空背景光谱特性时,不同方位上光谱分布差异以及气体吸收峰的存在会引入误差,例如图2中拟合效果最差的45°天顶角、150°方位角处的光谱与拟合曲线的相关系数只有0.89,引入了12%的误差。定标过程中的灯-

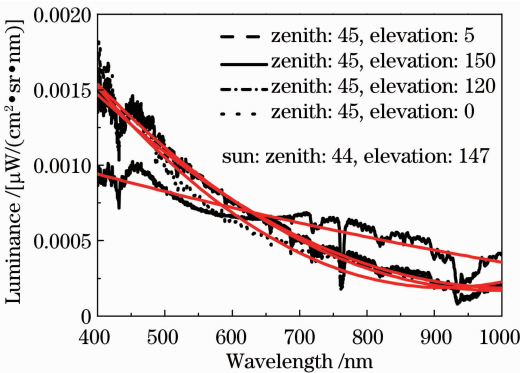


图2 不同方位的天空背景光谱分布曲线

Fig. 2 Spectral distribution curves of sky background at different azimuths

图3为天空亮度仪探测器实际的归一化光谱响应曲线与等效理想响应曲线。图2中不同方位的天空背景光谱特性与二次函数有所不同,显然这种假定会给用理想等效响应曲线代替实际光电探测器带

板系统的不确定度在表 1 中给出,引入综合不确定度误差约为 2.47%;光学系统的杂散光主要由系统各部件的反射、衍射、散射等造成,通常用高吸收率的黑色颜料对内壁做涂黑处理,可将杂散光降低到  $10^{-7}$  以下。

## 4.2 数据验证

在实验室利用大口径积分球对仪器分别进行了线性度和测量稳定性的测试<sup>[9]</sup>。测量稳定性测试结果表明,对于  $36.496 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$  的恒定辐亮度,仪器测量的均方根误差为  $0.463 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ ,具有良好的测量稳定性;线性度测试结果表明,仪器具有很好的线性度,相关系数大于 99.93%。此外,为了检验实际大气背景辐射光谱分布变化对仪器线性度的影响,分别在安徽合肥和四川西昌两地将光谱仪测得的天空辐亮度与 DTL-1 的电压响应示值进行了线性拟合。实验过程为先将光谱仪的光纤探头固定

在 DTL-1 的探测镜筒上保持二者平行,以保证光谱仪和 DTL-1 在同一时刻测量同一天空方位的天空辐亮度。合肥地区的对比时间为上午 8:00 到中午 12:20 每隔 30 s 测量一次共计 4 h 20 min,测量方位角为  $180^\circ$ (方位角以正北为  $0^\circ$  并按顺时针方向增大),高度角为  $45^\circ$ ;西昌地区的对比时间从 18:15 到 19:15 每隔 10 s 测量一次共计 1 h,测量方位角为  $255^\circ$ ,高度角为  $13^\circ$ 。图 4 给出了线性拟合结果,由图中可见相关系数大于 99%,说明仪器对实际的大气背景辐射也呈现线性响应的特性,从而验证了标准光源漫反射板系统线性定标方法的正确性。

另外在上述两地进行了 DTL-1 测量结果与光纤光谱仪的数据对比。实验过程仍将光谱仪探头固定在 DTL-1 的探测镜筒上并保证二者在同一时刻测量同一天空方位的天空辐亮度,两地的对比结果如图 5 所示。

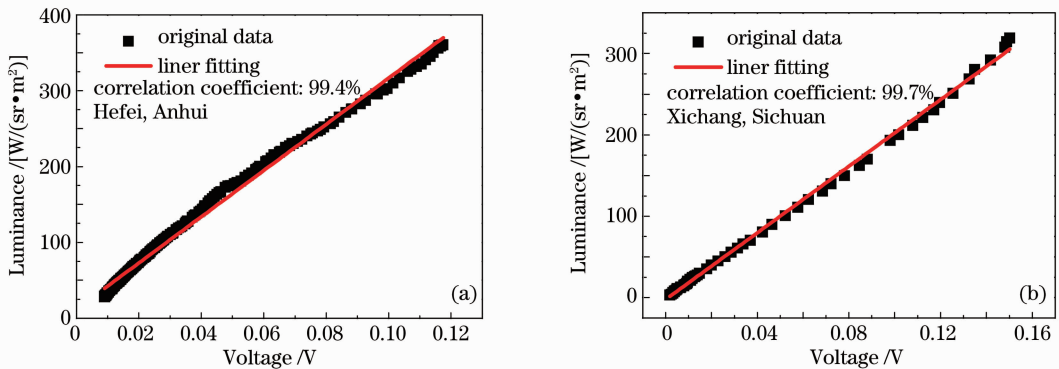


图 4 DTL-1 线性度验证。(a)安徽;(b)四川

Fig. 4 Linearity verification of DTL-1. (a) Anhui; (b) Sichuan

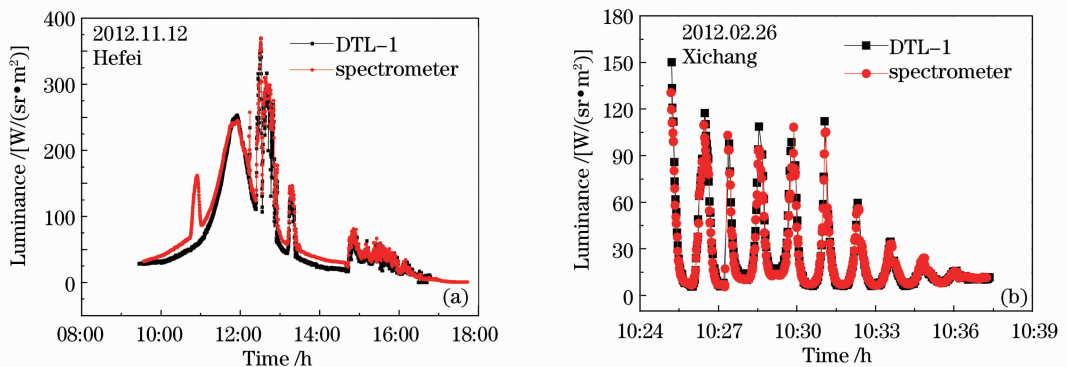


图 5 DTL-1 与光纤光谱仪测量数据对比。(a)安徽;(b)四川

Fig. 5 Comparison between DTL-1 and optical fiber spectrometer. (a) Anhui; (b) Sichuan

图 5 中左图为合肥地区(2012 年 11 月 12 日)对正南方向、高度角为  $45^\circ$  的定点方位一整天的对比结果,这天合肥天气上午全天空无云,中午 12:00 以后在探测方位周围开始出现薄云,所以图中从 13:40~14:40 之间的数据与光谱仪数据相对偏差

超过了 16%,其余时间的相对误差均小于 12%,这主要是因为存在有云条件下的全天空辐亮度呈随机起伏的不规则分布,而两台仪器的测量视场角不一致(分别为  $1^\circ$  和  $2^\circ$ )导致了在各自不同探测区域内的平均亮度值不相同。其中上午 11:00 左右光纤光谱

仪测量结果有一个尖峰,这可能是由于光谱仪探头附近有异物干扰导致。右图为西昌地区(2012年2月26日)对全天空扫描的对比结果,实验过程中西昌全天空无云,由图可见两者测量结果符合得很好,相对误差也均不超过10%。

## 5 全天空辐亮度分布实测结果分析

利用 DTL-1 对我国四川西昌(东经 102.24°,北

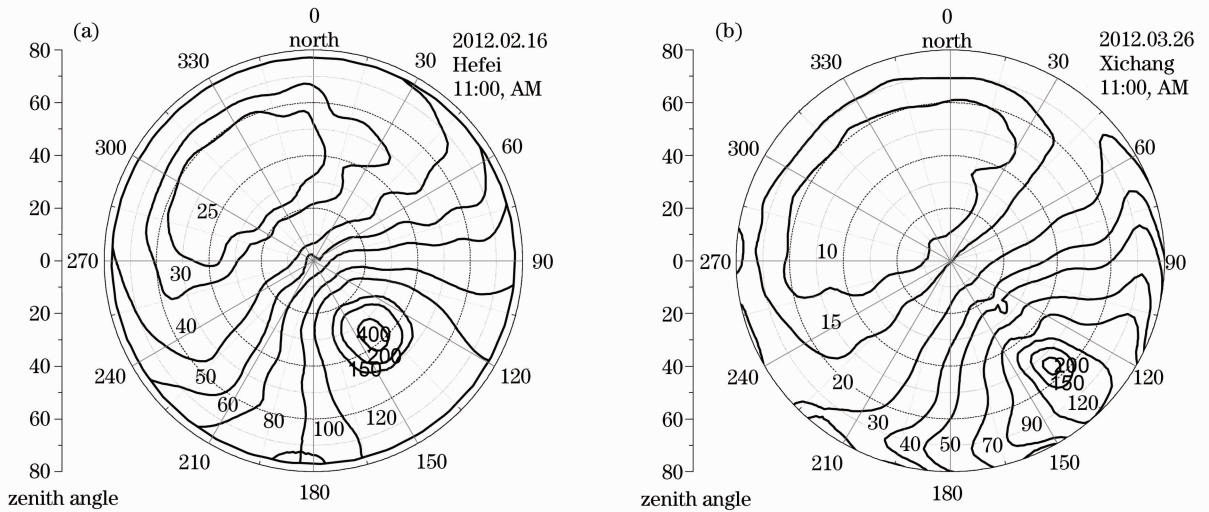


图6 合肥地区(a)和西昌地区(b)天空亮度分布

Fig. 6 Distribution of sky brightness in (a) Hefei and (b) Xichang

对比分析结果表明:

1) 无云天气下,天空亮度以太阳方位角为界呈左右对称分布,且在太阳方位角上背对太阳一侧的辐亮度为全天空的最小值,这说明地基观测空间目标时,在顺光观测方向上的背景为最弱。

2) 背对太阳一侧在天顶角超过 60°以后逐渐增大过程中天空背景又十分明显地逐渐增强,这是由于低层大气中气溶胶浓度较大,从而使斜程路径上的后向散射增强。这说明当在地面对低仰角目标进行识别跟踪或者低空飞行器对地面目标进行探测识别时,探测路径上的低层大气对目标辐射特性的影响是十分显著的,应该予以重视。

3) 由图6可明显看出,合肥地区天空各方位上的背景辐亮度都普遍大于西南地区,主要是因为,合肥地区的海拔较低,相对湿度较大,水平能见度远小于西南地区,导致大气对太阳光的散射效应大大增强。

## 6 结 论

DTL-1 是本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背景辐射测量设备,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。对其进行了宽谱段绝对辐射定标与误差分析,并将测量数据与光谱仪进行了对比,结果表明两者相对误差在10%之内,验证了仪器测量的可靠性,数据精度可以满足工程应用的要求。利用 DTL-1 分别在我国西昌地区和合肥地区开展了天空辐亮度的测量任务,对两地的测量数据进行了简要分析,结果表明仪器的实测结果与理论分析结论相一致,从而证明了基于宽谱段测量方案的快速天空辐亮度获取方法的可行性。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Weiguo. Research of Space Object Detecting Under Bright Background [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005. 11-16.  
王伟国. 空间目标白天光电探测技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2005. 11-16.
- 2 Huang Kang, Mao Xia, Liang Xiaogeng. Background clutter quantification method for infrared image of small targets [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0310001.  
黄康, 毛峡, 梁晓庚. 红外小目标图像的背景杂波量化方法[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0310001.
- 3 Wu Pengfei, Xu Qingshan, Fang Shuai, et al.. Optical model of

- image degradation in atmospheric inhomogeneous path [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0501002.
- 武鹏飞, 徐青山, 方 帅, 等. 大气非均匀路径中图像退化光学模型[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0501002.
- 4 Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua, *et al.*. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(5): 625–634.
- 毛节泰, 张军华, 王美华, 等. 中国大气气溶胶研究综述[J]. *气象学报*, 2002, 60(5): 625–634.
- 5 Qiu Jinhuan, Lü Daren, Chen Hongbin, *et al.*. Modern research progresses in atmospheric physics [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2003, 27(4): 628–652.
- 邱金恒, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 现代大气物理学研究进展[J]. *大气科学*, 2003, 27(4): 628–652.
- 6 Wang Jianjun. An analysis of detection capability to space object in daytime strong sky background [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2007, 26(6): 45–49.
- 王建军. 白天强光背景条件下空间目标探测能力分析[J]. *飞行器测控学报*, 2007, 26(6): 45–49.
- 7 Zhang Ruijin, Xian Hao, Rao Changhui, *et al.*. Study by effect of polarization filter for suppressing sky background light in daytime [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0501002.
- 张锐进, 鲜 浩, 饶长辉, 等. 偏振滤光片白天抑制天光背景作用分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0501002.
- 8 M Kocifaj. Sky luminance/radiance model with multiple scattering effect [J]. *Sol Energy*, 2009, 83(10): 1914–1922.
- 9 Norio Igawa, Yasuko Koga, Tomoko Matsuzawa, *et al.*. Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution [J]. *Sol Energy*, 2004, 77(2): 137–157.
- 10 Liu Weifeng, Zhao Guomin, Wang Lei, *et al.*. Design of sky-light radiation luminance measurement system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3): 455–458.
- 刘伟峰, 赵国民, 王 雷, 等. 天空光辐射亮度测量系统设计[J]. *应用光学*, 2010, 31(3): 455–458.
- 11 Huo Juan, Lü Daren. A method to retrieve the radiance from all-sky visible images [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 68(6): 800–807.
- 霍 娟, 吕达仁. 利用全天空可见光图像反演天空辐亮度[J]. *气象学报*, 2010, 68(6): 800–807.
- 12 Xu Wenqing, Zhan Jie, Xu Qingshan. Development of instrument for sky background brightness [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 46–52.
- 徐文清, 詹 杰, 徐青山, 等. 天空背景亮度测量系统的研制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 46–52.
- 13 Liao Guonan. An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition) [M]. Guo Caili, Zhou Shijian Transl. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 4–34.
- 廖国男. 大气辐射导论(第二版)[M]. 郭彩丽, 周诗健译. 北京: 气象出版社, 2004. 4–34.
- 14 Rao Ruizhong. *Modern Atmospheric Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2012. 326–343.
- 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 326–343.
- 15 Liu Weifeng, Zhao Guomin, Xie Yongjie, *et al.*. Calibration and data analysis of sky-light radiation luminance measurement system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 713–717.
- 刘伟峰, 赵国民, 谢永杰, 等. 天空光辐射亮度测量系统定标及数据分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 713–717.
- 16 Chen Hongyao, Zhang Liming, Zou Peng, *et al.*. 400~900 nm spectral irradiance of cryogenic radiometer-based irradiance standard lamp using system level calibration method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3349–3353.
- 陈洪耀, 张黎明, 邹 鹏, 等. 系统级定标方法实现基于低温辐射计的标准灯 400~900 nm 波段光谱辐照度[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3349–3353.
- 17 Jin Weiqi, Hu Weijie. *Radiance, Luminosity, Chrominance and the Measurement* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. 186–187.
- 金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006. 186–187.

栏目编辑: 王晓瑛