

一种半球形天空亮度测量仪器的研制

李 威^{1,2} 詹 杰¹ 邵士勇^{1,2} 梅海平¹ 饶瑞中¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 230031; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 在大气光学领域中,天空亮度分布有着重要的应用。简要介绍了天空亮度的测量原理,在分析同类测量仪器的基础上,提出了一种用于白天的,可见及近红外波段天空亮度测量仪器的设计,介绍了系统的组成和探测器的选择。经过定标,仪器能够得到天空亮度的绝对值,其结果反映了真实天空亮度分布的变化。该仪器弥补了传统的天空亮度测量仪器在测量波段、实时性、便携性等方面的不足,更好地满足了实际的科研需求。

关键词 大气光学; 天空亮度分布; 测量仪器; 辐射传输

中图分类号 P422; TH765.8⁺4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082810.1844

Development of Hemispherical Instrument for Sky Brightness

Li Wei¹ Zhan Jie¹ Shao Shiyong^{1,2} Mei Haiping¹ Rao Ruizhong¹

¹ Center for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract In the field of atmospheric optics, distribution of sky brightness is widely used. The theory of sky brightness measurement is briefly introduced. A new design scheme of instrument for sky brightness measurement used in the day in visible and infrared band is proposed based on kindred instrument analysis, and the structure and selection of detector are introduced. After calibration, the instrument can get absolute value of sky brightness, which can show variety of sky brightness distribution. The instrument perfects traditional instrument for sky brightness in wave bands, characters of real time and portability, and meets practical demand in scientific research.

Key words atmospheric optics; distribution of sky brightness; measurement instrument; radiative transfer

1 引 言

使用地基设备对空中目标进行探测时,大气是不可忽略的^[1,2]。它将部分太阳辐射能量重新分配,形成了大气层内散射光亮度的空间分布,即“天空亮度”的概念。随着探测手段的进步,这个概念也早已由最初的特指可见光推广至红外甚至远红外波段^[3]。

一方面,为了获取空中或空间目标的辐射信息,必须扣除大气的影响。而在观察物体时,物体和背景的亮度差异起决定作用。因此,了解天空亮度分布是识别空间目标的第一步。另一方面,天空亮度主要是由空气分子和大气气溶胶颗粒散射太阳辐射所导致的结果,它包含了大量大气组分和状态的信息。对这一物理量的研究将有助于更进一步了解大

气及其与辐射传输的相互作用^[4~6]。

传统的天空亮度测量仪器大多仅工作于可见光波段。按照工作方式的不同,大体可分为两类:一类是成像固定型,即对特定天空进行图像拍摄,如美国 Yankee 公司的 TSI(Total Sky Imager)^[7]和 California University 研制的 WSI(Whole Sky Imager)^[8],它们用半球镜将全天空的图像反射到带鱼眼镜头的 CCD 上,通过分析图片的灰度信息来测定天空的亮度分布,此类仪器能同时获得天空各个方向的亮度值,但测量亮度的手段较为间接,且实时性不高;另一类是非成像扫描型,即用一个或多个辐射接收装置扫描天空以获得亮度分布,如意大利的 WASBAM(Wide-Angle Sky Brightness Automatic Mapper)^[9]以

收稿日期: 2007-11-27; 收到修改稿日期: 2008-04-23

作者简介: 李 威(1982-),男,硕士研究生,主要从事大气辐射传输方面的研究。E-mail: jeff8042@163.com

导师简介: 饶瑞中(1963-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光大气传输前沿物理问题、光辐射和图像的大气传播、大气湍流的特性及其光学测量方法等方面的研究。E-mail: rao@aiofm.ac.cn

及照明工程中使用的设备^[10~12],此类仪器对天空离散采样,且结构较为复杂,有些需要机械转动,导致测量周期较长。

因此,有必要研制一种新的测量天空亮度的仪器,以弥补传统仪器在测量波段、实时性等方面的不足,更好的满足实际的科研需求。本文首先介绍了天空亮度的测量原理,提出了一种新的设计方案并进行仪器研制,阐述了该仪器在实际中的应用,最后指出了其优势。

2 测量原理

亮度是描述发光面光度学特性的物理量。它的物理意义是,在某一观测方向 θ 上,从单位投影面积 s 在单位立体角 Ω 内发出的辐射通量 Φ ,亮度 B 用公式表示为^[13]

$$B = \frac{d\Phi}{d\Omega ds \cos \theta} \tag{1}$$

对于光电二极管,在一定入射光水平的范围内,输出电流 I 与入射光照度 E 成线性关系^[15]:

$$I = c_1 E + c_2 \tag{2}$$

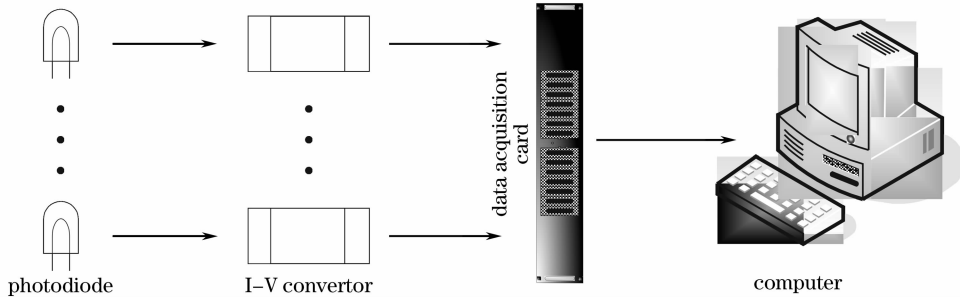


图 1 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of system

将探测器按照高度角、方位角排列,放置在如图 2 所示的半球架上。半球架内径 94 mm,外径 110 mm,考虑到硬度和绝缘性,采用聚四氟乙烯材料。工作时,光电二极管将天空某一方向的照度转换为电流,经高精度运算放大器转换为电压,并用反

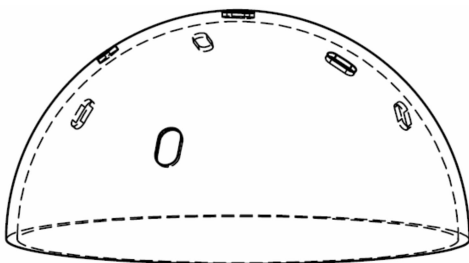


图 2 半球架示意图

Fig. 2 Sketch map of hemispherical shelf

通过由运算放大器组成的电流-电压转换电路后,测量到的电压 V :

$$V = c_3 I + c_4 \tag{3}$$

考虑到在光电二极管的几何参量和位置确定的情况下,作为工程应用中的近似,其探测方向的天空亮度可以认为与探测面所接收到的照度成正比,即

$$B \propto E \tag{4}$$

综合(2)式~(4)式,可知系统探测到的电压 V 与天空亮度 B 成一简单的线性关系:

$$B = aV + b \tag{5}$$

通过测量天空各个方向上系统的电压值便可得到该方向上的天空亮度,而系统响应参量 a, b ,可通过某一方向辐亮度计的定标得到。

3 测量系统的组成

3.1 仪器的结构

图 1 是自主研发的测量系统的原理图。它主要由探测器系统(光电二极管、半球架),信号处理系统(电流-电压转换、电压放大电路)和信号采集系统(采集卡、上位机)三部分组成。

馈电阻将电压调整到所需的幅值。信号采集系统由 7 个通道组成,每通道的采样频率为 2.5 Hz,考虑到实际工作环境中,天空亮度信号的变化主要是由于自然因素,如太阳在天空中的方位和风、云的变化引起的,所以这样的采样频率是足够的。未饱和时,探测面的照度值与其所探测方向的亮度值成正比,所以系统所得到的电压值可反映天空亮度的强弱。通过辐亮度计对某一方向探测器的定标,可得到该方向探测器对亮度的响应函数,在所有探测器性能接近的情况下,便可由各方向探测到的电压值得到天空亮度值。

3.2 光探测器的选择

对于光探测器,主要有光谱响应范围和信号线性响应范围两方面的要求。

太阳光的波谱范围很宽,在 300~3000 nm 的波长范围内均有能量分布。但由于没有响应谱带如此宽的光探测器,所以世界气象组织将集中绝大部分太阳光能量的 400~1100 nm 波段称为总辐射范围,而这正是本仪器应具有的光谱响应范围。另外,仪器是用来测量非恶劣天气条件下白天天空亮度,表 1 列出了自然光源在地球表面形成的光照度^[14],据此要求光探测器应能够对光强为 $10\sim 10^5$ lx 的光产生线性的响应。

表 1 自然光源在地球表面形成的光照度

Table 1 Illuminance at earth surface by natural light source

Natural condition	Illuminance /lx
Direct sunshine	$(1\sim 1.3)\times 10^5$
Light in the day	$(1\sim 2)\times 10^4$
In the day (cloudy)	10^3
Dark day	10^2
Dusky (dawn)	10
Deep dusk	1

综合这两方面的考虑,我们选择了 Hamamatsu 公司的 S1787-12 型光电二极管,它能响应 320~1000 nm 的入射光,线性工作区间为 $10^{-6}\sim 10^5$ lx^[15]。

4 结果与讨论

探测器放置的密集程度决定了仪器对全天空亮度分布的空间分辨率。但就证明性实验来说,恰当的选择探测器的数量和分布,能反映全天空亮度分

布的基本规律即可。实验时,选取 7 个在 4 个天区(东南西北)和 3 个高度角($30^\circ, 55^\circ, 90^\circ$)上分布较为均匀,能够代表全天空亮度分布的观测方位放置探测器,按照天文学的习惯,用地平坐标表示为通道 0($55^\circ, 198^\circ$)、通道 1($30^\circ, 162^\circ$)、通道 2($30^\circ, 54^\circ$)、通道 3($55^\circ, 342^\circ$)、通道 4 天顶、通道 5($30^\circ, 270^\circ$)和通道 6($55^\circ, 126^\circ$),如图 3 所示,括号中第一个量为高度角,从地平线起,向上为正;第二个量为方位角,从南起,沿顺时针,向西为正。

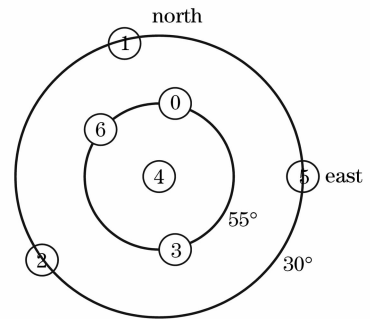


图 3 探测器分布示意图

Fig. 3 Sketch map of detector's distribution

2008 年 3 月 25 日下午天气晴朗,我们在中科院安徽光机所大气光学中心的楼顶使用 ASD-VNIR 型辐亮度计对仪器天顶方向的探测器进行定标,依据(5)式,辐亮度计的结果为 B ,亮度仪的结果为 V ,用一元线性回归的方法拟合,定标结果如图 4 所示,绝大部分数据落在置信度为 95% 的置信区间,且可决系数 R^2 为 0.9962,结果较为理想。

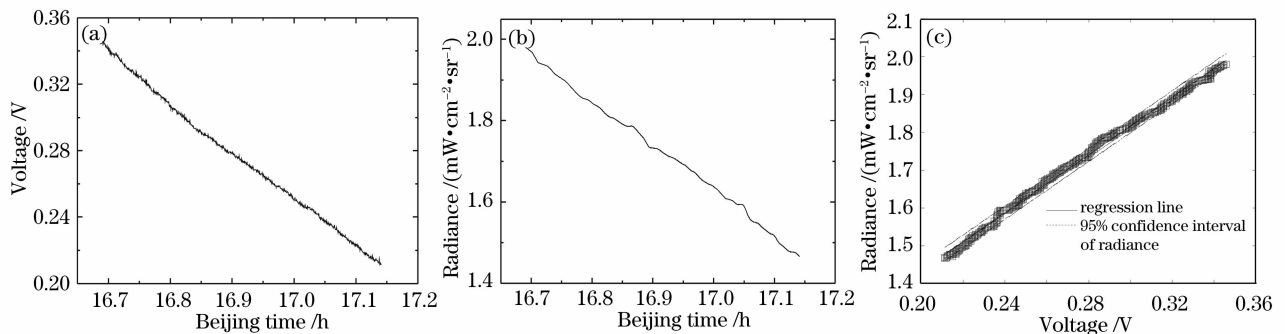


图 4 仪器定标结果。(a) 天空亮度仪测量结果, (b) 辐亮度计测量结果, (c) 一元线性回归

Fig. 4 Result of calibration. (a) Result of sky brightness instrument, (b) result of radiance meter, (c) linear regression result

2008 年 3 月 24 日是合肥一年中少有的好天气,无云、无风、能见度好(最高达到 49.43 km),图 5 为当天的测量结果。从图中可以看出,仪器能够反映各个探测方向的天空亮度的差异,同时各路又具有相似的变化趋势,这是太阳在天空中的方位变化以及云和大气要素影响的结果。就南北方向来看,处于北半球的 0、1、6 通道由于始终背向太阳,所

以全天的值都较低;而处于南半球的 2、3 通道由于始终朝向太阳,所以值较高。就东西方向来看,处于东半球的通道 0、3、5 均在正午之前达到极大值;而位于西半球的通道 2、6 则在正午之后达到极大,这与太阳正午之前偏东,正午之后偏西有关。就南半球来看,早晨,位于正东方向的通道 5 是各通道中最大的;中午,接近正南方向的通道 3 最大,且为全天

极大值；而下午，位于西南方向的通道 2 始终保持最大；黄昏时，各通道均趋于零，这完全符合一天中太阳在天空中方位的变化。此外，由于通道 0 与 1, 3 与 4, 2 与 6, 在方位上分别相近，所以全天的变化规律也分别相似。

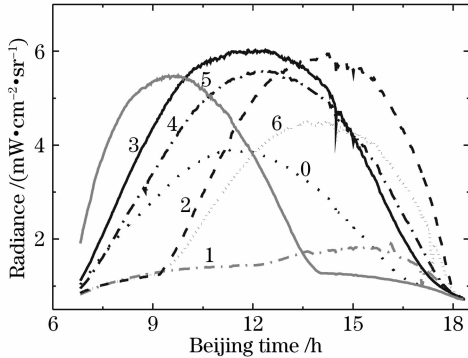


图 5 天空亮度分布的时间变化

Fig. 5 Temporal variation of sky brightness distribution

为检验仪器设计的合理性和测量数据的可靠性，我们选择辐射传输软件 PCModWin 进行对比试验。图 6 中曲线 a 是 2008 年 3 月 24 日使用我们的仪器测量的天顶方向的天空亮度，曲线 b 是根据当天的大气、地表条件用 MODTRAN 计算的结果。计算的主要参数为：中纬度夏季大气，下垫面草地，乡村气溶胶，能见度 40 km，无云， $0.32\sim 1\ \mu\text{m}$ ，时间间隔为 0.5 h。两者结果的趋势相一致，考虑到 PCModWin 无法精确反映局地的大气、地表条件以及气象参数的实时变化，结果存在一定的差异是不可避免的。

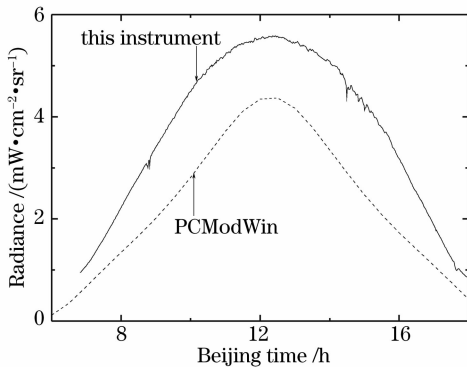


图 6 仪器与 MODTRAN 的对比

Fig. 6 Comparison of results between this instrument and PCModWin

5 结 论

本文介绍了一种新的天空亮度测量仪器的研制，通过与 PCModWin 的对比，验证了仪器的可靠

性，实验结果表明，仪器能够较好的反映天空亮度分布，经过长时间的使用，仪器性能稳定。与以往的其它仪器相比，该仪器具有以下优势：

1) 将探测器波谱范围从可见光扩展至近红外波段，更加符合太阳光能量分布的真实范围，也更符合大气光学研究的实际。

2) 可在很短的时间内(0.4 s)获得天空亮度的分布，有利于研究天空亮度分布的瞬时变化。

3) 既可监测某一固定方向的天空亮度，也可同时监测多个方向，方便了实际中的应用。

4) 可得到辐射的绝对值，同时也为拍照型天空亮度测量仪器提供了一种新的定标手段。

5) 结构简单，携带方便。

致谢 感谢郑小兵研究员、邹鹏和袁银麟在实验方面给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1250~1254
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
- 2 Luo Lin, Liao Sheng, Fan Min. Effects of large telescope aberrations on speckle imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1447~1451
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
- 3 Fan Wei. *The Wavelength Band Selection Method for Target Detection Based on Atmospheric Background Radiance Characteristic* [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, 2005. 10~11
范伟. 基于大气背景光学性质的目标探测波段选择方法研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光机所博士论文, 2005. 10~11
- 4 Qiu Jinhuan, Sun Jinhui, Xia Qilin *et al.*. Remote sensing and analysis of aerosol optical properties in Beijing [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1988, **46**(1): 49~58
邱金桓, 孙金辉, 夏其林等. 北京大气气溶胶光学特性的综合遥感和分析[J]. *气象学报*, 1988, **46**(1): 49~58
- 5 Zhao Zengliang, Mao Jietai. Simultaneous retrieval of optical characteristics of atmospheric aerosol and surface albedo [J]. *Chin. J. Atmospheric Sciences*, 1999, **23**(6): 722~732
赵增亮, 毛节泰. 联合反演大气气溶胶光学特性和地面反照率[J]. *大气科学*, 1999, **23**(6): 722~732
- 6 Guan Hong, Liu Renda, Wu Beiyong. Retrieval of the profile of stratospheric aerosols from the intensity of skylight during twilight periods [J]. *Chin. J. Atmospheric Sciences*, 1992, **16**(2): 216~227
关虹, 吕达仁, 吴北婴. 用曙暮光时的天光光强反演平流层气溶胶散射系数廓线[J]. *大气科学*, 1992, **16**(2): 216~227
- 7 <http://www.yesinc.com/products/data/tsi880>
- 8 <http://www.arm.gov/instruments/instrument.php?id=ws1>
- 9 P. Cinzano, F. Falchi. A portable wide-field instrument for mapping night sky brightness automatically [J]. *Mem. S. A. It.*, 2003, **74**: 458

- 10 W. Ross, McCluney. Daylight availability research at the florida solar center [C]. *Proc. China-North America daylighting Conference*, 1988
- 11 Lin Ruoci, Tan Hua, Zhu Changhan. Development of daylight sources and its application[J]. *China Illuminating Engineering J.*, 1994, **5**(4): 22~32
林若慈,谭 华,祝昌汉. 昼光资源的开发与应用[J]. 照明工程学报, 1994, **5**(4): 22~32
- 12 Zhao Dongtian, Ye Guanrong, Kang Wengang *et al.*. A novel system for sampling the daylight information [J]. *China Illuminating Engineering J.*, 1994, **5**(3): 28~33
赵冬田,叶关荣,康文刚 等. 一种新颖的昼光信息采集系统[J]. 照明工程学报, 1994, **5**(3): 28~33
- 13 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. *Optics* [M]. Beijing: Peking University Press, 2002. 126
赵凯华,钟锡华. 光学[M]. 北京:北京大学出版社, 2002. 126
- 14 Luster LightVision Corp. *CCD&CMOS Image and Machine Vision Manual* [M]. second edition, 25
凌云光视数字图像公司. CCD&CMOS 图像和机器视觉产品手册[M]. 第二版, 25
- 15 HAMAMATSU S1787 Datasheet

光学前沿——首届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动的通知

为了进一步提高我国光学期刊的学术水平和论文质量,吸引和催生优秀稿件,鼓励和培育优秀作者,促进我国光学、激光科技事业发展,《光学学报》、《中国激光》、*Chinese Optics Letters* 特发起“光学期刊优秀论文评选活动”,在光学泰斗王大珩先生的支持下,本活动特命名为光学前沿——首届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动。自 2008 年起,期刊编辑部将每年举办优秀论文评选活动。

主办单位: 中国科学院上海光学精密机械研究所

联合主办单位: 相干(北京)商业有限公司

协办单位: 江西连胜实验装备有限公司

重庆师范大学光学工程重点实验室

时间安排:

参评论文统计截止时间: 2008 年 8 月 30 日。

论文作者提交申请材料时间: 2008 年 7 月 1 日~9 月 30 日(论文被引的材料和论文所在项目或课题获奖的证明),请在 中国光学期刊网上提交。

审核时间: 2008 年 10 月 8 日~10 月 30 日。

编辑部将在 2008 年年底对获奖作者进行公开表彰,并颁发证书和奖金。

希望作者踊跃参加。

详情请浏览: <http://www.opticsjournal.net/Daheng.htm>

咨询电话: 021-69918427 胡 冰 E-mail: hubing@siom.ac.cn

光学期刊联合编辑部

2008-06-16