

文章编号:1002-2082(2010)03-0455-04

## 天空光辐射亮度测量系统设计

刘伟峰<sup>1,2</sup>, 赵国民<sup>1</sup>, 王雷<sup>2</sup>, 李志朝<sup>2</sup>, 赵乐至<sup>2</sup>, 刘泽洵<sup>3</sup>

袁尧臣<sup>2</sup>, 施健康<sup>2</sup>, 陈若望<sup>2</sup>, 姜涛<sup>2</sup>, 朱继亦<sup>3</sup>

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中国人民解放军 63655 部队, 新疆 乌鲁木齐 841700;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 天空光辐射亮度是大气光学特性的重要参数之一, 在空间目标探测与识别中有着重要作用。为了获取天空光辐射亮度, 评价光电系统探测跟踪空间目标的能力, 设计实现了一套天空光辐射亮度测量系统, 详细介绍了光信号收集和信号探测部分的工作原理, 及系统所应用弱辐射信号探测、辐射计量等关键技术。通过该套测量系统的初步应用及对测量结果分析表明: 利用该套测量系统能够准确获取天空光连续光谱(光谱范围从380 nm~1 100 nm)数据, 为应用研究提供了更多的光谱信息。

**关键词:** 天空光; 辐射亮度; 连续光谱; 光电系统

中图分类号: TN06

文献标志码: A

## Design of sky-light radiation luminance measurement system

LIU Wei-feng<sup>1,2</sup>, ZHAO Guo-min<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, LI Zhi-chao<sup>2</sup>, ZHAO Le-zhi<sup>2</sup>, LIU Ze-xun<sup>3</sup>,

YUAN Yao-chen<sup>2</sup>, SHI Jian-kang<sup>2</sup>, CHEN Ruo-wang<sup>2</sup>, JIANG Tao<sup>2</sup>, ZHU Ji-yi<sup>3</sup>

(1. College of Optoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology,

Changsha 410073, China; 2. Unit 63655, PLA, Urumqi 841700, China; 3. Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Since sky-light radiation luminance is a critical parameter of atmospheric optics, it is very important for space target detection and identification. In order to acquire sky-light radiation luminance and evaluate the detection and tracking capability of optoelectronic systems for space target, a measurement system of sky-light luminance was designed and implemented. The work principles of optical signal collection and signal detection, and key techniques such as low-radiation signal detection and metrology of optical radiation used by the system were introduced. The system was applied to measure sky-light radiation luminance and the test result was analyzed. The result indicated that sky-light spectra (380 nm~1 100 nm) could be acquired by the measurement system and more information was provided.

**Key words:** sky-light; radiation luminance; continuous spectrum; optoelectronic system

收稿日期:2009-11-19; 修回日期:2009-12-25

基金项目:国防预研基金项目

作者简介:刘伟峰(1979—),男,吉林公主岭人,工程师,国防科学技术大学在读硕士,主要从事大气光学参数测量技术研究工作。E-mail:xjwfliu@163.com

## 引言

天空的光辐射来自大气对太阳(含星光)的散射和大气自身的热辐射<sup>[1]</sup>。天空光辐射亮度是大气光学特性的重要参数之一,在空间目标探测与识别等应用领域中有着重要的影响,是影响测试精度和稳度性的一个重要因素<sup>[2-3]</sup>。长期以来,为获得太阳的光谱特性,了解光在大气中的传输规律,以及利用光谱探测技术实现对大气污染物的监测与控制,已有人对太阳光和天空光的光谱进行了实验和理论的研究<sup>[4-5]</sup>。但由于实验手段的限制,针对空间目标背景光辐射特性测量研究的报道还不多。根据当前科研试验需要,我们设计了天空光辐射亮度测量系统TFKS01。该系统能够准确有效地测量天空光辐射亮度,并给出辐射亮度光谱变化曲线,通过曲线可以方便、快捷地了解天空光辐射特性,为光电系统跟踪和测量空间目标提供天空背景特性方面的依据。

## 1 工作原理

### 1.1 光信号收集光学示意图

光通过窗口D1入射,经视场光阑D2后,进入内壁涂有聚四氟乙烯材料涂层的积分球F4上,经F4反射的光由光纤导入辐射信号采集部分。其中视场光阑D2具有可调功能,可以切换3个大小不同的视场,还可以全封闭,在测量系统暗电流时可以程序控制挡住入射光。这里的F4起到一个积分器的作用,它对入射光有匀化作用。如图1所示。

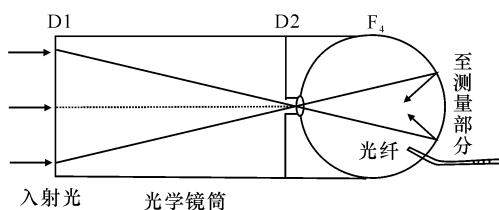


图1 收集信号的光纤部分光路图

Fig.1 Fiber optics collect radiation

### 1.2 辐射测量光学系统

这部分是实现连续光谱数据采集的关键所在。

入射光由上述的光纤导入,经过入射狭缝D射到球面反射镜M1上,经准直后反射到光栅G上,由色散元件光栅G分光后的光是按波长顺序排列的色散光,它经过球面镜M2聚焦后,在焦平面上输出 $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n$ (350 nm~1 100 nm)平面型“多色”辐射,该光谱平面与大尺寸面阵CCD(2 048 W × 128 H)像元对准,使得任意像元都与相应的波

长位置一一对应。在CCD驱动电路和读出电路控制下,在一个积分时间内,全谱段信号被串行扫描读出,经放大电路输出至数据采集部分进行A/D转换,这样采集的数据即是一条连续光谱曲线。

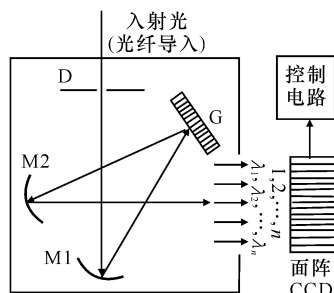


图2 单色仪与面阵CCD探测器光路图

Fig.2 Layout of monochromator and CCD detector

### 1.3 转台控制部分

为了使该测量系统的测量具有一定的方向性,设计了一套转向平台控制系统,通过基准定位,可以实现方位 $0^\circ \sim 360^\circ$ 、俯仰 $0^\circ \sim 90^\circ$ 半球空域内扫描测量。输入方位角、俯仰角能够在预定指向上定时测量;输入轨迹参数,可以沿预设轨迹进行扫描测量;输入区域参数,可以在预定区域内扫描测量,监视指定区域的天空光变化。

## 2 关键技术

### 2.1 弱辐射信号探测技术

由于天空背景光杂散辐射信号比较弱,因此对微弱信号进行探测,提高测量系统信噪比是关键技术。

根据辐射探测系统的能量传递关系,天空背景辐射亮度 $B(\lambda)$ 照在探测器焦面上的辐射通量 $F(\lambda)$ 为

$$F(\lambda) = B(\lambda) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot T_M \cdot T_{SYS} \cdot A_D \cdot \Delta\lambda \quad (1)$$

式中:令 $H(\lambda) = \frac{\pi}{4} \cdot (D/f)^2 \cdot T_M \cdot T_{SYS} \cdot A_D \cdot \Delta\lambda$ ;  $D/f$ 为光学系统相对孔径;  $T_M$ 为单色仪光谱透过率;  $T_{SYS}$ 为光学系统光谱透过率;  $A_D$ 为探测器面积;  $\Delta\lambda$ 为波长宽度。

通常采用噪声等效辐射亮度NE $\Delta$ B评价辐射测量系统的探测能力。其含义是:当测量系统输出信噪比为1(SNR=1)时所对应辐射亮度。天空背景辐射较弱,系统的灵敏度受探测器噪声限制。NE $\Delta$ B表达式为

$$NE\Delta B = \frac{\sqrt{A_D \cdot \Delta B}}{H(\lambda) \cdot D^*} \quad (2)$$

式中:  $\Delta B$  为后续电路的带宽;  $D^*$  为探测器的探测率。

根据(1)式和(2)式,光学系统的相对孔径  $D/f$  和透过率越大,噪声等效辐射亮度就越低,或选择  $D^*$  值高的探测器以及有效地限制放大带宽都可以得到较低的  $NE\Delta B$ ,达到提高信噪比的目的。

为此,采用如下技术手段:(1) 设计大的相对孔径光学系统,  $D/f=4:1$ ; (2) 所有光学部件均采用高反射高透射的镀金工艺,保证系统总透过率  $>40\%$  (包括单色仪); (3) 采用高灵敏度的面阵 CCD 实现光谱辐射测量。

另外,噪声是随机的,当连续测量  $N$  次累加取平均时,其信噪比提高  $\sqrt{N}$  倍。

## 2.2 辐射计量技术

测量系统输出的信号是经过模拟放大和 A/D 转换后的数字量,需用辐射计量技术对系统进行绝对响应函数定标<sup>[6]</sup>,并把定标数据固化到数据采集/处理程序中,测量系统在实际观测中才能正确地将其采集的数字量反演成相应的天空光辐射亮度信息。

整个定标实验在国家标准计量部门进行,定标采用高色温与内表面涂  $F_4$  反射材料的积分球光源作为标准光源,其输出绝对辐射量值从国家计量部门传递得到。

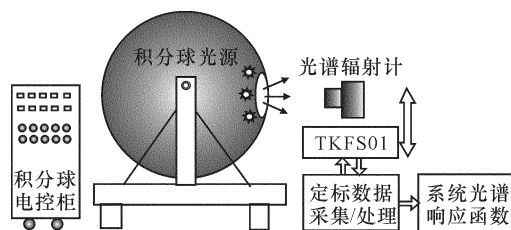


图3 定标原理示意图

Fig. 3 Diagram of calibration principle

定标方法如图3所示。在积分球的每一个亮度等级下先利用标准光谱辐射计(经过标准漫反射系统定标)测量积分球绝对辐射亮度,然后用 TKFS01 型天空光测量系统在相同照明条件下测量积分球光源,这样就通过标准光谱辐射计将积分球的亮度信息传递给了 TKSF01,即建立光谱辐射亮度  $L(\lambda)$  和辐射测量系统的数字化输出  $DN(\lambda)$  之间的函数关系:

$$DN(\lambda) = A_0 + A_1 L(\lambda) + \dots + A_n L^n(\lambda) \quad (3)$$

式中:  $A_0, A_1, \dots, A_n$  是待定系数,将每一个亮度等级下的积分球绝对辐射亮度  $L(\lambda)$  及相应的 TKFS01 数字化输出  $DN(\lambda)$  带入(3)式,即可确定  $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$ 。  $A_0$  的物理含义是包括探测器、电子学系统和杂散辐射产生的暗信号输出;  $A_1$  为线性响应系数;  $A_2, A_3, \dots, A_n$  为高次响应系数,很小可以忽略。

## 3 主要技术指标

TKFS01 型连续分光光谱天空光辐射亮度测量系统的主要性能指标如表1所示。

表1 TKFS01 主要技术指标

Table 1 Main characteristics of TKFS01

名称	技术指标
光谱范围	380 nm~1 100 nm
测量范围	$(10^{-2} \sim 10^3) \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$
灵敏度	$10^{-3} \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$
光谱分辨率	1 nm
视场角	20', 1°, 3°
供电方式	交、直流
工作温度	$(-10 \sim 40) \text{ }^\circ\text{C}$

## 4 测量系统初步应用

测量系统经过定标实验后,放置于空旷场坪(或楼顶),打开测量系统电源及测试软件,通过控制程序,使测量系统到达预定指向,准备就绪以后按下开始采集触发按钮,开始采集数据。数据采集完成后进行分析和计算。为避免探测器饱和,尽量避免光学镜筒直接指向太阳。图4给出了新疆某地2009年10月6日天顶角为  $0^\circ$  时天顶光谱变化曲线。

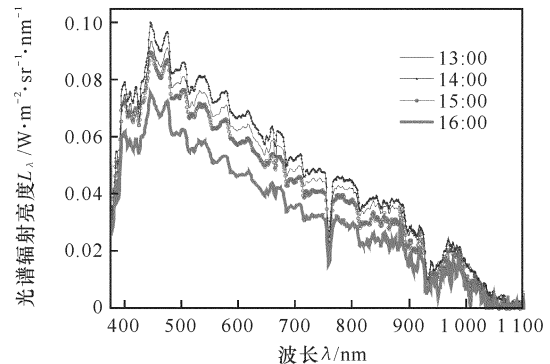


图4 天空顶角为  $0^\circ$  时天顶光谱曲线

Fig. 4 Spectra of Zenith light

2009年10月6日晴朗无云,图4的4条曲线的采集时间分别为13:00,14:00,15:00及16:00,比

较4个不同时期的测量数据可知:

1) 天顶光谱亮度随着太阳高度角的变化而变化,14:00时段太阳高度角最大,天顶光谱亮度最强,早晚较弱;

2) 天顶光光谱的分布保持不变,该地区污染很小,天空很蓝,光谱峰值出现在450 nm左右,然后随着波长的增大,光谱辐射亮度呈下降趋势;

3) 940 nm左右出现较强的吸收峰,主要是因为该波段处于水汽吸收带。

从测量数据的分析结果看,实测结果与理论具有较好的一致性。

## 5 结束语

该套天空光辐射亮度测量系统已经在科研试验中投入了使用,取得了良好的使用效果。该系统具有以下特点:

1) 测量精度高,主要依赖于系统定标的精度,总的测量不确定度小于8%;

2) 采样速度快,测量数据能够实时处理与显示,并自动存储;

3) 系统操作简单,由程序引导,自动沿空间目标运行轨迹实时测量;

4) 实用性强,为今后此应用领域的进一步拓展奠定了基础。

### 参考文献:

[1] 张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004:108-109.  
ZHANG Jian-qi, FANG Xiao-ping. Infrared physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 108-

109. (in Chinese)

[2] 周彦平,舒锐,陶坤宇,等. 空间目标光电探测与识别技术的研究[J]. 光学技术, 2007,33(1):68-76.  
ZHOU Yan-ping, SHU Rui, TAO Kun-yu, et al. Study of photoelectric detecting and identifying of space target[J]. Optical Technique, 2007, 33(1): 68-76. (in Chinese with an English abstract)

[3] 陈桂芬,于林韬,宋璐,等. 背景光智能测试技术研究[J]. 长春光学精密机械学院学报, 2000,23(2):40-43.  
CHEN Gui-fen, YU Lin-tao, SONG Lu, et al. Study on measuring background light by intelligent technology [J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 2000, 23(2): 40-43. (in Chinese with an English abstract)

[4] ZHOU Bin, LIU Wen-qing, ZHENG Chao-hui, et al. Measurement of NO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere by sun spectroscopy method[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(12): 2507-2513.

[5] 苏毅,万敏,胡晓洋,等. 晴朗无云天光谱辐射的近似计算模型[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(10): 1468-1473.  
SU Yi, WAN Min, HU Xiao-yang, et al. Approximate computation model of clear sky spectral luminance [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(10): 1468-1473. (in Chinese with an English abstract)

[6] 杨照金,范纪红,岳文龙. 光辐射计量测试技术[J]. 应用光学, 2003, 24(2): 39-42.  
YANG Zhao-jin, FAN Ji-hong, YUE Wen-long. Metrological and test technology of optical radiation [J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24(2): 39-42. (in Chinese with an English abstract)