

# 基于光纤光谱仪的全天空光谱成像研究

孙凤莹<sup>1,2</sup> 梅海平<sup>2\*</sup> 武鹏飞<sup>2</sup> 饶瑞中<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026

<sup>2</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

**摘要** 为获取更精细的背景辐亮度分布信息, 提出基于光纤光谱仪和二维转台对全天空背景光谱辐射进行测量的方法。可实现定点观测及全天空扫描两种工作方式。详细介绍了测量原理、系统的组成、定标的原理及方法等。经过一次全天空扫描可获得 649 个光谱辐射亮度采样样本, 每个样本的光谱分辨率为 0.5 nm。各个样本测量位置作为像素点, 相应位置上各波段的辐亮度值作为灰度值, 可得到各波段的全天空背景光谱辐射分布图。该方法为之后的科学研究提供了更详细的信息。

**关键词** 大气光学; 天空背景辐亮度; 定标; 光谱成像

**中图分类号** P412.14 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.070104

## Research on Whole Sky Spectra Imaging Based on Fiber Spectrometer

Sun Fengying<sup>1,2</sup> Mei Haiping<sup>2</sup> Wu Pengfei<sup>2</sup> Rao Ruizhong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China*

**Abstract** In order to obtain the detailed distribution information of background radial brightness, the measuring method of ground-based whole sky background radiance spectra is developed based on the fiber optical spectrometer and two-dimensional turntable. It can realize the fixed point observation and scanning all the sky. Structure of system, scheme of data detection, principle and method of calibration are introduced in detail. After one scanning, 649 samples of radiance can be obtained. Spectral resolution of each sample is 0.5 nm. Measuring position of each sample is used as pixel and each wavelength radiance of the position is used as gray level. The distribution of whole sky background radiation spectrum band is obtained. The proposed method provides more detailed information for further scientific research.

**Key words** atmospheric optics; sky background radiance brightness; calibration; spectra imaging

**OCIS codes** 010.1290; 010.1320; 040.1880; 060.2350

## 1 引言

天空背景辐射是指太阳光经过大气时, 被大气分子和气溶胶粒子吸收、散射, 在大气层内形成的散射光亮度分布<sup>[1]</sup>。它是大气科学的一个重要研究对象, 也是气溶胶光学特性反演的有效手段, 根据日晕区域的散射辐射可以反演气溶胶粒子的散射相函数和粒子谱分布。天空背景辐射作为地基空间目标探测与识别的主

**收稿日期:** 2016-03-01; **收到修改稿日期:** 2016-03-25; **网络出版日期:** 2016-06-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(41205010)、航空科学基金(201427T3001)

**作者简介:** 孙凤莹(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事天空背景辐射测量技术及理论分析等方面的研究。

E-mail: sfy0717@mail.ustc.edu.cn

**导师简介:** 饶瑞中(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光大气传输、大气湍流、光辐射与图像的大气传输等方面的研究。E-mail: rao@aiofm.cas.cn

\* **通信联系人.** E-mail: hpmei@aiofm.ac.cn

要背景噪声,是目标探测中必须考虑的因素<sup>[2-4]</sup>。较强的天空背景辐射亮度,会给目标识别带来一定的困难,要想准确获取观测目标的光学遥感数据,就必须将其与背景区分开来。另外,对天空背景光谱的实时探测,有助于了解当前目标与背景在不同光谱波段范围内的差别,从而选择出最优的光谱滤波波段,用以提取所需的目标信号<sup>[5]</sup>。因此,对天空背景光谱辐射的测量研究无论在大气科学还是在涉及光波辐射大气传输的工程应用中,都具有非常重要的意义。

目前,常见的天空背景辐射测量设备主要分为以下几种类型:1)测量特定波段通道的辐亮度,如法国CE318有8个带宽为10 nm的测量通道<sup>[6]</sup>;2)测量积分辐亮度,如国内研制的DTL-1和TKFS01天空亮度计,可获得可见光波段的积分辐亮度<sup>[7-8]</sup>;3)对天空进行拍照成像,如全天空成像仪(WSI),根据图像中每个像素的灰度值来获得天空的亮度信息<sup>[9]</sup>。但上述设备的光谱分辨率普遍较低,有些还不能直接获得绝对辐射亮度,因而对于天空背景光谱辐射及其时空变化特征定量的研究还有所欠缺。

本文提出一种通过二维转台的转动带动光纤光谱仪对天空背景的绝对辐射亮度进行分光谱探测与扫描成像的方法,相应的实验系统具有定点凝视和全天空扫描两种工作模式:在定点凝视模式下,可得到天空中给定方位上的背景光谱辐射亮度在所测波段范围内的分布情况;在扫描模式下,可得到背景光谱辐射亮度在扫描半空域范围内的分布情况。另外,根据这些分立光谱的信息还可以获得相应波段范围内的积分辐亮度。介绍了实验测量系统的结构原理及光谱仪的绝对辐射定标方法;给出了实测的光谱辐射测量数据,并利用该数据生成成分波段的全天空背景光谱辐亮度分布图像;并对该方法及相应技术的应用前景作简要分析。

## 2 测量原理与系统组成

### 2.1 测量原理

近年来,随着集成光电技术的发展,光谱仪向着光纤化、微型化和高精度的方向发展。体积越来越小巧、精致,应用范围也越来越广泛。使用光纤光谱仪来测量天空背景辐射不仅方便、快捷,还很精确<sup>[10]</sup>。光纤光谱仪通过光纤将光谱仪与环境隔离,在使用过程中精密光学元件不受环境污染,因而不易损坏,适合在野外工作。此外,还可以根据研究或工程需要,配置不同波段范围、不同光谱分辨率或不同测量精度的光纤光谱仪。

通过转台带动光谱仪的光纤探头进行转动,可以获得天空不同方位上的背景辐射亮度测量值,其系统结构如图1所示。入射光信号进入光纤探头,经过导光光纤进入光谱仪,再经过光谱仪的内部处理,由USB接口实时传输到计算机中,由数据采集程序对其进行处理和存储。表1给出了本次实验测量中采用的一款Maya2000Pro型光纤光谱仪及其附件的主要技术指标。

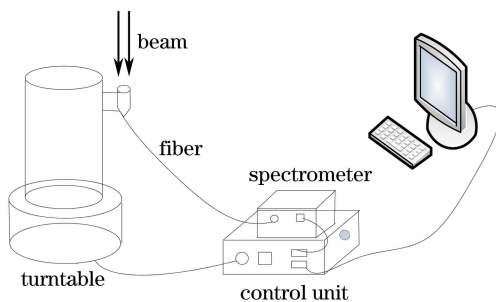


图1 全天空背景光谱辐射测量系统

Fig. 1 Sketch of whole sky background radiance measurement system

用LabVIEW语言编写数据采集与控制程序,按照相应的时序向转台发送转动、停止指令以及向光谱仪发送数据采集指令,并将每次测量时光纤探头所处方位角、高度角与光谱辐射数据同步存储。温控单元用于将光谱仪的工作环境温度控制在设定值,以保障光谱辐射测量数据的稳定性,避免由于温度的漂移导致光谱探测器响应度产生误差。为了获得全天空的光谱辐射分布信息,要求转台能够实现俯仰 $0\sim 90^\circ$ 以及水平 $0\sim 360^\circ$ 的半空域扫描。

表 1 主要技术指标  
Table 1 Main technical specifications

| Specification        | Requirement |
|----------------------|-------------|
| Spectralrange        | 200~1100 nm |
| Spectralresolution   | 0.5 nm      |
| Operatingtemperature | 0~50 °C     |
| Fieldangle           | 1°          |
| Optic fiber diameter | 600 nm      |

## 2.2 定标方法

光纤光谱仪采用线阵 CCD 作为光谱响应器件,和其他光电探测器件一样,要想实现绝对辐射亮度的准确测量,在实验前必须对光谱仪进行辐射定标<sup>[11-14]</sup>。所谓的辐射定标是指建立探测器输出的  $R_{DN}$  值与该探测器对应的实际地物辐射亮度之间的定量关系<sup>[11-12]</sup>:

$$R_{DN}(\lambda) = A_0(\lambda) + A_1(\lambda)L(\lambda) + A_2(\lambda)L^2(\lambda) + \dots + A_n(\lambda)L^n(\lambda), \quad (1)$$

式中  $L(\lambda)$  为波长  $\lambda$  处的单色辐亮度值,  $R_{DN}(\lambda)$  为测量系统对  $L(\lambda)$  的响应值,  $A_0(\lambda), A_1(\lambda), \dots, A_n(\lambda)$  为待定系数,其中的高阶系数  $A_2(\lambda), \dots, A_n(\lambda)$  较小,可以忽略不计,所以通常将上式简化为线性关系:

$$R_{DN}(\lambda) = A_0(\lambda) + A_1(\lambda)L(\lambda), \quad (2)$$

式中  $A_0(\lambda)$  与  $A_1(\lambda)$  为定标过程中需要确定的系数。这里  $A_0(\lambda)$  指暗电流或暗光子,即在系统输入信号为 0 时,对应系统的输出值  $R_{DN}(\lambda)$ ,  $A_1(\lambda)$  为线性响应系数。

使用标准辐射源漫反射板系统对光纤光谱仪进行定标,其原理如图 2 所示。该定标系统由标准灯光源、光阑、漫反射板和光学导轨组成,而且标准灯光源的辐亮度是已知的。定标过程中,光谱仪的光纤探头选用的是视场角为 1° 的视场光阑。受定标灯波长覆盖范围所限,这里仅给出了从 350~1100 nm 波段范围内的绝对辐射定标系数。

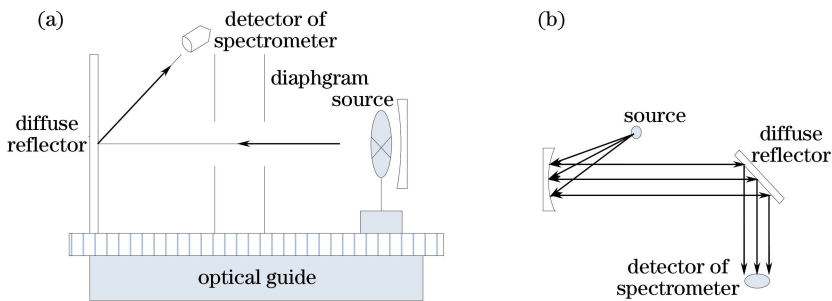


图 2 定标示意图。(a) 系统示意图; (b) 系统光路图

Fig. 2 Calibration principle diagram. (a) System diagram; (b) beam path diagram

测得  $A_0(\lambda), A_1(\lambda)$  之后,根据(2)式即可得到波长为  $\lambda$  的绝对辐亮度为

$$L(\lambda) = \frac{R_{DN}(\lambda) - A_0(\lambda)}{A_1(\lambda)}. \quad (3)$$

## 2.3 天空背景光谱积分辐亮度

对  $[\lambda_1, \lambda_2]$  波段范围内的分立光谱辐亮度数据进行积分,可得到该波段范围内总的积分辐亮度  $L_{\lambda_1, \lambda_2}$ , 有如下关系:

$$L_{\lambda_1, \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

式中  $350 \text{ nm} \leq \lambda_1 < \lambda_2 \leq 1100 \text{ nm}$ ,  $L(\lambda)$  是指波长  $\lambda$  处的天空背景辐亮度,  $d\lambda$  指的是波长间隔。

### 3 数据处理及展示

#### 3.1 定点测量

##### 3.1.1 定点测量数据展示

将带有视场角控制器的光纤探头对准天空中某给定方位的区域进行探测,可得到该方向的背景光谱绝对辐射数据。图 3 是一组全天为晴天的测量案例,测量时间为 2015 年 7 月 28 日,测量地点为合肥市西郊科学岛。其中,图 3(a)给出了场景及天空状态的照片,肉眼可见天空晴朗无云,图中方框标志的区域为所观测区域,即  $1^\circ$  视场角光纤探头的指向区域,在西南方向,方位角约为  $202^\circ$ (令正北方向为  $0^\circ$ ),天顶角约为  $45^\circ$ ;图 3(b)给出了三个不同时间点在该区域内测得的背景亮度的光谱特征,其中上午九点所测数据放大了两倍。图 4 展示的是全天为阴天的测量案例(2015 年 7 月 3 日,于合肥市科学岛)。从图 4(a)可见天空被阴云覆盖,背景比较均匀,且无直射太阳光,图中方框标志的区域为  $1^\circ$  视场角光纤探头的指向区域,在东南方向,方位角约为  $165^\circ$ ,天顶角约为  $45^\circ$ 。图 4(b)给出了该区域内的背景光谱辐射亮度分布曲线。图中 ZA 表示太阳的天顶角,DA 表示太阳的方向角。

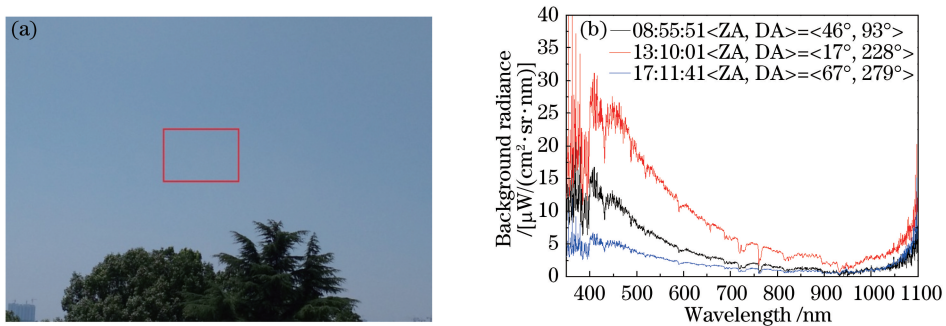


图 3 定点观测于 2015 年 7 月 28 日。(a) 观测区域;(b) 背景光谱辐射分布

Fig. 3 Fixed area detecting on July 28th, 2015. (a) Detecting area; (b) background spectra distribution

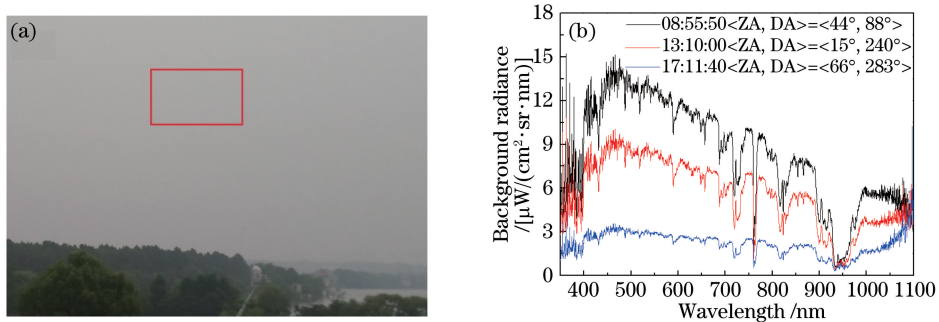


图 4 定点观测于 2015 年 7 月 3 日。(a) 观测区域;(b) 背景光谱辐射分布

Fig. 4 Fixed area detecting on July 3rd, 2015. (a) Detecting area; (b) background spectra distribution

背景辐射亮度的分布曲线清晰的展现出不同时段天空背景辐射亮度在各波段的大小和分布特征,其中晴天与阴天的分布特征存在着显著的差异。从曲线中还可以显著地观察到在  $940\text{ nm}$  附近的水汽吸收带和在  $760\text{ nm}$  附近的氧气吸收带等。通过对晴天无云、雾霾、薄云等典型天气条件的背景辐射亮度分布进行统计分析,可得到相应天气条件下的背景光谱分布特征。

##### 3.1.2 数据验证

虽然实验设备可以测量的波长范围是  $350\sim 1100\text{ nm}$ ,但当波长  $\lambda < 400\text{ nm}$  或  $\lambda > 1000\text{ nm}$  时,光谱仪的光谱响应度小于  $10\%$ ,产生的测量误差较大。因此,将实验数据与理论数据做对比时,选取的波长范围是  $400\text{ nm} < \lambda < 1000\text{ nm}$ 。选取 2015 年 7 月 28 日 13 时 10 分 1 秒的实测数据与理论计算结果进行对比,如图 5 所示。理论计算的数据是根据 Modtran5 软件模拟得到的,输入的条件有气溶胶类型,相对湿度,能见度,观测天顶角以及太阳天顶角等。因测量时间及地点为 7 月份的合肥西郊科学岛,故选择的大气模式为中纬

度夏季,气溶胶类型为乡村型气溶胶,对比方位角(观测方位角与太阳方位角之差)为  $202^\circ$ ,天顶角为  $45^\circ$ ,其余条件均为测量以及查询当时气象条件所得。图 5 给出了实测数据与 Modtran5 计算结果的对比图,Modtran5 的分辨率最大只能达到 50 个波数,由于二者的分辨率不同,图中二者的谱线不能完全吻合。从图中可以看出,实测数据与理论计算结果处于同一量级范围,且二者吻合较好。其中误差产生的原因主要是理论计算所选取的大气模式、气溶胶类型与实际的大气模式及气溶胶类型不可能完全一致,仍有一定的差距。

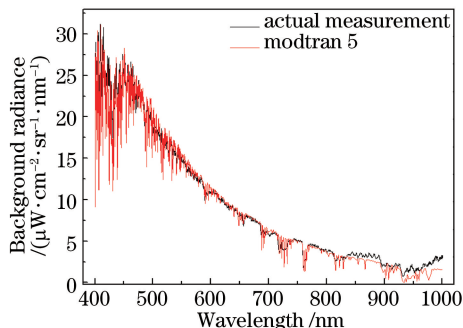


图 5 实测数据与 Modtran5 对比结果

Fig. 5 Comparison of data between actual measurement and Modtran5

### 3.2 全天空扫描

由二维转台带动光纤探头转动可以实现水平  $0^\circ \sim 360^\circ$ ,俯仰  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内的全天空扫描。图 6 给出了实验中设定的角度扫描与数据采样流程,按照该流程,以高度角每  $5^\circ$ 、方位角每  $10^\circ$  为一个网格,将天空半球分割成 649 个网格,并在每个网格内完成一次采样。因此,从高度角和方位角均为  $0^\circ$  开始,完成一次全天空的扫描,可获得 649 个光谱辐射亮度采样样本。其中,每个样本的光谱分辨率均为  $0.5 \text{ nm}$ ,波段范围为  $350 \sim 1100 \text{ nm}$ 。将每个样本的测量位置作为图像的一个像素点,抽取各样本中同一波段的光谱辐射亮度值作为该像素点的灰度值,即可得到该波段的全天空背景光谱辐射亮度图。其中,天顶角沿半径方向从内到外依次增长,圆心处表示天顶方向,方向角沿逆时针方向依次增大,水平向右表示正北方向,沿逆时针依次表示北、东、西、南。

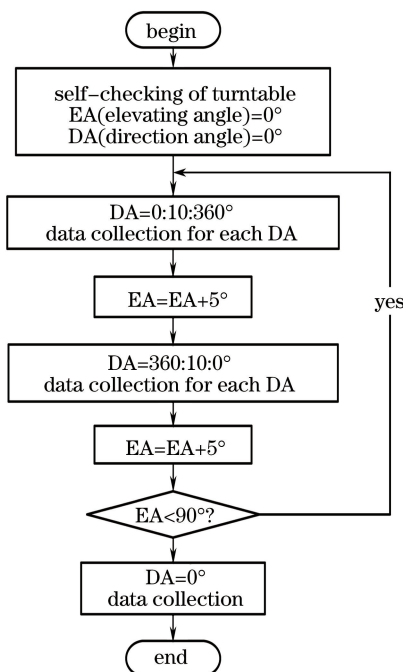


图 6 数据采集流程

Fig. 6 Flow of data collection

图7给出了在合肥科学岛上进行的一次全天空背景光谱辐射成像实验的结果,实验时间是2015年9月18日10时22分,此时太阳天顶角为 $37.7^\circ$ 、方位角为 $136.1^\circ$ ,天空状态为晴空有云。如图7所示,分别从近紫外385.05 nm、可见光665.29 nm、近红外1012.2 nm及水汽吸收带940.15 nm等4个波长展示了全天空背景辐亮度分布,图中所示辐亮度数据是以e为底取自然对数的结果,且数据原始单位为 $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ 。天空亮度的分布与太阳天顶角、方位角及天空中的云分布等有很大关系。从图中可以看出,各个波长上的天空亮度分布都不均匀,在太阳附近天空亮度值最大,且全天空的亮度分布关于太阳呈对称分布。不同波长的辐亮度分布规律也不同,这主要是因为各个波长对太阳辐射的散射强度不同。

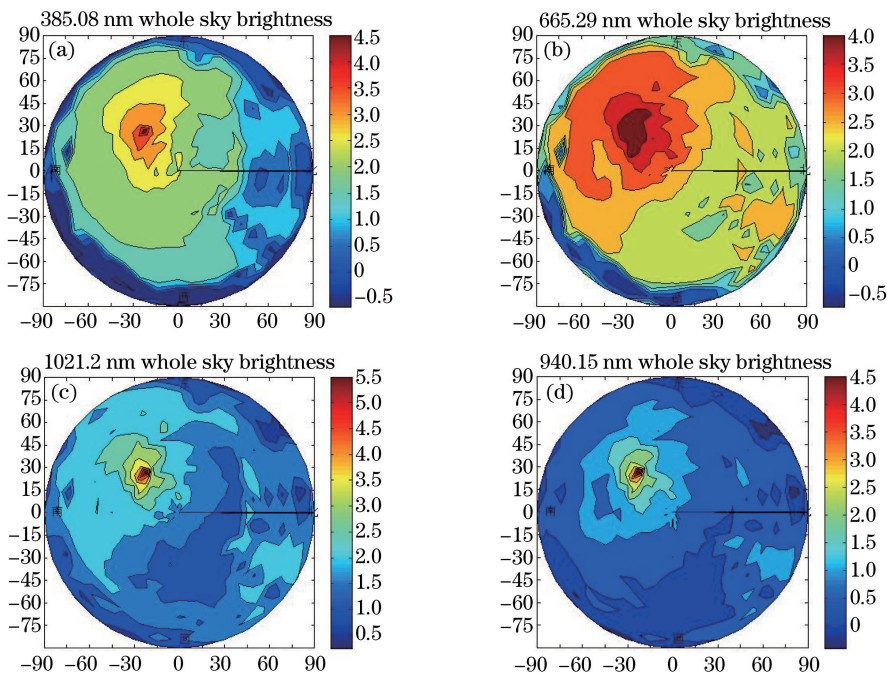


图7 全天空背景光谱辐射分布图。(a) 385.08 nm; (b) 665.29 nm; (c) 1012.2 nm; (d) 940.15 nm

Fig. 7 Distribution pattern of whole sky background spectra radiation. (a) 385.08 nm; (b) 665.29 nm; (c) 1012.2 nm; (d) 940.15 nm

## 4 结 论

采用分光谱的方法对天空亮度分布进行测量能够获得更精细的光谱信息。现有实验平台可实现的光谱测量范围是350~1100 nm,可在水平 $0^\circ\sim 360^\circ$ ,俯仰 $0^\circ\sim 90^\circ$ 的半空域范围内进行定点观测及全天空扫描两种工作方式,得到天空中任意方向上的光谱辐亮度分布及各波长的全天空亮度分布。将全天空扫描中进行样本采集的坐标点作为图像的像素点,某一波长在该坐标处测量的辐亮度值作为灰度值,即可拼出该波长的全天空的辐亮度分布图像。根据分光谱实测数据还可以计算出一定波段范围的积分辐亮度,得到积分辐亮度的全天空分布。对定标之后的实测数据与Modtran5软件模拟计算的结果进行了对比分析,结果表明该系统的测量数据可信,可以满足实际的科研需求。

分光谱的天空背景辐射测量研究具有广阔的应用前景。在航空航天方面,对天空背景辐射的分光谱测量已经应用在飞机隐身等研究中,根据光谱辐射分布来选择飞机隐身材料。测量典型天气条件(如晴天、多云、雾霾)的全天空辐亮度,分析同一波段辐亮度分布的时空变化规律及同一时间方位上不同波段之间的分布差异,研究典型天气条件判据。

## 参 考 文 献

- 1 Rao Ruizhong. Modern atmospheric optical[M]. Beijing: Science Press, 2012: 326-334.  
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 326-334.

- 2 Nakajima T, Tonna G, Rao R, *et al.*. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(15): 2672-2686.
- 3 Dubovik O, King M. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(16): 20673-20696.
- 4 Li Wei, Zhan Jie, Shao Shiyong, *et al.*. Development of hemispherical instrument for sky brightness[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1844-1848.  
李威, 詹杰, 邵士勇, 等. 一种半球形天空亮度测量仪器的研制[J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1844-1848.
- 5 Fan Wei. The wavelength band selection method for target detection based on atmospheric background radiance characteristics[D]. Hefei: Anhui Institute of Optical and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 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: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2005: 10-11.
- 6 Mitchell R M. Aerosol measurement in the Australian outback: Intercomparison of sun photometers[J]. *Journal of Atmosphere and Oceanic Technology*, 2003, 20(1): 54-66.
- 7 Liu Weifeng, Xie Yongjie, Zhao Lezhi. Measurement and research on sky background radiance luminance[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 351-354.  
刘伟峰, 谢永杰, 赵乐至. 天空背景辐射亮度测量与研究[J]. *应用光学*, 2012, 33(2): 351-354.
- 8 Xu Wenqing, Zhan Jie, Xu Qingshan. Measurement and analysis of wide-wave band sky background radiance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0801001.  
徐文清, 詹杰, 徐青山. 宽波段天空背景辐射亮度测量与分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0801001.
- 9 Cinzano P, Falichi F. A portable wide-field instruments for mapping night sky brightness automatically[J]. *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 2003, 74: 458-459.
- 10 Ju Hui, Wu Yihui. The state of the art of micro spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(4): 372-375.  
鞠挥, 吴一辉. 微型光谱仪的发展现状[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(4): 372-375.
- 11 Xu Rui. Calibration of AOTF imaging spectrometer in deep-space exploration application [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 12-13.  
徐睿. 深空探测 AOTF 红外成像光谱仪系统定标技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 12-13.
- 12 Liu Weifeng. Sky-background radiation parameter measurement system design and researches for experiments [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010: 34-41.  
刘伟峰. 天空背景辐射参数测量系统设计与实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010: 34-41.
- 13 Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0712006.  
孙志远, 常松涛, 朱玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0712006.
- 14 Liu Junchi, Li Hongwen, Wang Jianli, *et al.*. Fast radiance calibration for ground-based large-aperture infrared optoelectric equipment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0301003.  
刘俊池, 李洪文, 王建立, 等. 地基大口径红外光电设备快速辐射定标[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0301003.