

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.04.001

分光谱型天空背景辐射计的研制

陈舜平^{1,2}, 孙凤莹¹, 徐文清^{1*}, 魏合理¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室 安徽 合肥 230031;

2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 为满足对天空背景辐射进行实时光谱测量和特征提取的需求, 基于光纤光谱仪研制了一台一体化天空背景辐射计, 可测量 340~1030 nm 波长范围内的天空背景辐射光谱, 波长分辨率优于 0.5 nm, 具有定点测量、全天空扫描测量两种工作模式。在介绍系统总体结构的基础上, 描述了光学组件、转台系统、跟踪模块、嵌入式控制系统及恒温控制模块等硬件部件的结构, 以及上位机软件的设计思路、设备工作流程和定标方式。最后分析经光谱辐射定标后的测量数据, 初步验证设备工作的可靠性, 为天空背景辐射的实时测量及光谱特性研究提供了有效手段。

关键词: 天空背景; 背景辐射; 光谱测量; 测量仪器

中图分类号: P416.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)04-0241-09

Development of Spectral Radiance Measurement System for Sky Background

CHEN Shunping^{1,2}, SUN Fengying¹, XU Wenqing^{1*}, WEI Heli¹

(1 Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: To meet the requirement of real-time spectral measurements and feature extraction of sky background radiance, a measuring instrument for spectral radiance of sky background was developed based on fiber optical spectrometer, to acquire spectrum from the wavelength of 340 nm to 1030 nm, which could both operate at fixed direction mode and whole sky scanning mode. Besides the overall structure, the details of optical component, rotating system, sun tracing module, temperature maintain system, software design, working process and calibration method were also presented. The calibrated test results were analyzed to prove the instruments' reliability, and shows that it provided a way for real-time spectral measurements of sky background radiance.

基金项目: Supported by National Natural Science Foundation of China(国家自然科学基金, 41505023)

作者简介: 陈舜平 (1992 -), 男, 海南陵水人, 研究生, 主要从事大气参数观测设备方面的研究。

E-mail: shun3568@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 魏合理 (1965 -), 男, 安徽宁国人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事红外辐射测量大气修正、通用大气辐射传输模式和卷云辐射特性方面的研究。 **E-mail:** hlwei@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2018-04-01; **修改日期:** 2018-04-16

* **通信联系人.** E-mail: wqxu@aiofm.ac.cn

Key words: sky background; background radiance; spectral measurement; measurement apparatus

1 引言

“天空背景辐射”(也称为“天空亮度”)由大气中分子、气溶胶粒子等散射元散射太阳辐射而形成^[1-3]。天空背景辐射的研究在地基空间目标探测上有重要的意义,目标与天空背景之间的光谱特征差异是检测目标的一个重要依据^[4],是以光谱滤波的方式提高目标信噪比的理论基础^[5]。例如,分析目标及背景的光谱特征,得出目标特征与背景差异最大的波段^[6],进而针对性地进行目标判选^[4],已成为重要的目标探测和识别方法。应用类似氧气吸收 A 带(758~778 nm)等特殊光谱波段的测量数据还可以对目标进行被动测距^[7],具有较高的工程应用价值。因此,研究多种天气条件下、不同时段、不同类型地点处的天空背景辐射,尤其是进行光谱测量和特征提取,在科学研究和工程应用中具有重要的意义^[8]。

天空背景辐射的测量设备可以分为成像型和非成像扫描型两类^[9-10]。成像型设备可以直接获取全天空影像,来分析如天空亮度分布、云量分布等参数^[11-12]。非成像扫描型测量设备则是通过点源光强接收装置来对天空进行扫描,从而获得天空背景辐射的光谱和方位分布。扫描型天空亮度仪根据光谱覆盖范围可以分为多波段、单波段和连续光谱三类。1) 测量部分波段通道辐亮度:目前常用的有法国的 CE318 太阳光度计、日本的 POM01 日晕计^[1,9]等;2) 测量一个波段的积分辐亮度:中国科学院安徽光机所研制的 DTL-1 天空亮度仪^[2];3) 测量一个波长范围内光谱辐亮度:国防科技大学研制的 TKFS01 天空亮度测量系统^[13]。本文介绍了新研制的连续光谱型天空背景辐射计(DSL-1)的设计原理和结构,最后分析了初步观测所得的数据。

2 总体结构

近年来,光纤光谱仪向着集成化、微型化的方向发展,为天空背景辐射的光谱测量提供了便捷的手段,结合微型光纤光谱仪和二维转台,即可实现对天空任意位置的光谱测量^[1],系统的结构如图 1 所示。

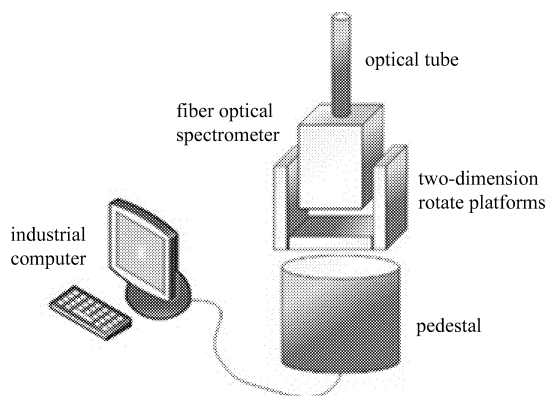


图 1 结合光纤光谱仪与二维转台的光谱测量系统结构

Fig.1 Structure of spectrum measurement system with combined fiber spectrometer and two-dimension rotate platform



图 2 DSL-1 设备实物图

Fig.2 Picture of DSL-1

图 1 中带有视场角控制器的光纤探头被固定于二维转台上,实现水平 0~360° 和俯仰 0~90° 范围内的旋转,结合二维转台的方位参数和光谱仪的测量数据,即可获得所测方位上天空背景辐射的光谱数据。为了适应野外长期工作的高可靠性要求,整合光学、机械和控制系统,优化总体结构布局,研制了 DSL-1 型天空背景辐射计,实现一体化的光谱型天空背景辐射测量设计方案,为使用天空背景辐射光谱数据进行大

气科学及目标探测提供简单有效的实验测量手段。

DSL-1 型天空背景辐射计实物如图 2 所示, 总体结构分为测量探头、U 型转动臂和底座机箱三个部分。测量探头由连接光纤光谱仪的探测镜筒和连接四象限探测器的小镜筒组成, 分别用于天空背景光谱测量和太阳精确跟踪; U 型臂实质为二维转台, 装备水平、俯仰两路绝对编码式步进电机, 用于将光学探测镜筒转向指定的位置; 底座机箱则用于容纳所需的电源、电机驱动器及下位嵌入式控制模块等部件。

DSL-1 型天空背景辐射计采用主从式控制结构, 由上位主控系统和下位执行机构两大部分组成, 如图 3 所示。虚线框内的模块属于下位机系统, 主要包括前端光学系统、光纤光谱仪、水平 / 俯仰二维旋转定位平台、太阳跟踪系统、嵌入式控制系统以及给光纤光谱仪提供恒温工作环境的恒温控制单元等几大功能模块。上位工控机分别通过 RS-422 串口和 USB 与下位设备中的嵌入式控制系统及光纤光谱仪进行通信连接和数据传输。

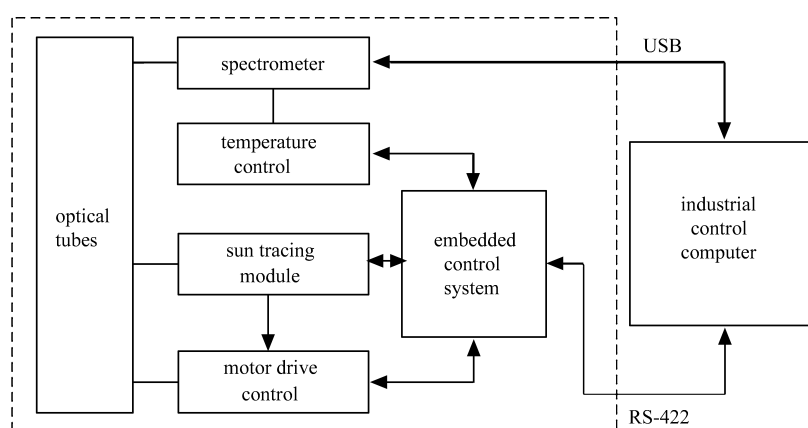


图 3 系统结构原理图

Fig.3 Schematic diagram of system structure

图 3 还给出了下位机中各个模块的组合以及受控逻辑关系: 不带箭头的连接线表示两个模块为组合关系, 机械直连而不存在控制命令发送; 带单向箭头的连接线表示被指向模块为受控模块, 控制命令沿箭头指向单向发送; 带双向箭头的连接线则表示除了控制命令外, 两个模块间还有数据的交互及控制信号的反馈。单独编写的测量控制软件运行于上位工控机中, 通过 USB 口对光谱仪进行控制; 通过 RS-422 串口线向以 ATmega128L 芯片为核心的嵌入式控制系统发送命令, 进而控制下位设备的所有动作。

3 硬件组成与软件设计

3.1 光学测量组件

光学测量组件是 DSL-1 型天空背景辐射计的探测部件, 由前端光学系统和光纤光谱仪构成, 和恒温控制单元共同装配于探头内, 由水平 / 俯仰二维旋转定位平台进行转动跟踪和定位测量, 结构如图 4 所示, 波长测量范围为 340~1030 nm, 光谱点波长间隔小于 0.5 nm。光纤光谱仪通过 USB 线与上位机直接连接, 控制逻辑平行于下位其他设备模块, 原因是光谱数据量较大, 若采用 ATmega128L 单片机的串口进行传输, 耗时过长。

光路是将圆孔光阑组和透镜进行组合设计而成的, 光信号接收视场角为 1° 。入射的天空背景光经过光阑与透镜, 汇聚到镜筒后部的光信号接收面, 由连接于此的光纤探头准直镜接收, 从而进入光纤光谱仪。在准直镜前端装有旋转电磁铁作为光学快门, 用于在绝对辐射测量前的暗光谱采集, 和在探头转动过程中

遇到太阳时进光路切断, 避免太阳光直射对光谱仪造成的损伤。

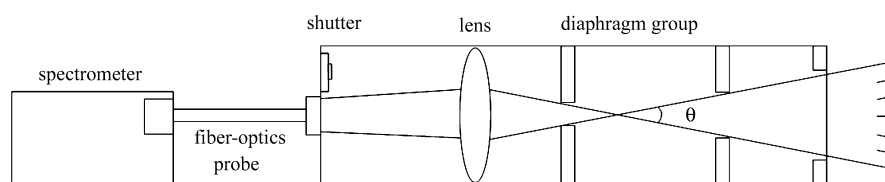


图4 光学组件原理图

Fig.4 Schematic diagram of optical component

3.2 二维旋转定位平台

旋转定位平台工作于野外, 冰霜、雨雪、风沙以及正负几十度的温差变化, 都会给转台的长期稳定性和可靠性带来挑战。转动轴承存在制造误差、灰尘侵入、长期使用导致的器件磨损和老化等因素, 都可能造成机械卡死或定位误差。因此, 可靠的二维旋转定位平台是设备长期稳定工作的重要保证。

伺服驱动单元采用基于步进电机的绝对闭环控制型中空旋转平台减速机, 其具有高扭矩、高可靠性的优点, 即使在断电时也可保存位置信息, 较好的保证了设备的稳定运行。绝对定位指向精度可达 $\pm 30''$, 水平、俯仰轴向跳动 $< 18 \mu\text{m}$, 径向跳动 $< 14 \mu\text{m}$, 可满足野外长期免维护运行的要求。

3.3 太阳跟踪系统

在 DSL-1 中设计的太阳跟踪系统有两个功能: 1) 避免太阳直射, 以防损坏光谱仪中高灵敏的 CCD 传感器, 在执行测量任务时仪器需要精确地获取太阳所在的实时方位并利用快门切断光路; 2) 确定太阳位置, 仪器在全天空扫描工作模式下需要以太阳为参考点对天空各预设的偏移方位进行测量。

太阳跟踪系统采用自动寻星定位技术, 利用内置天文星图和四象限精跟踪结合的方式跟踪太阳恒星, 跟踪精度优于 $1'$, 保证测量方位的偏移精度。太阳精确跟踪模块的核心是四象限传感器, 在粗跟踪模块(视日轨迹法)将镜筒转向太阳大致方位后, ATmega128L 芯片读取四象限传感器读数, 判断太阳偏移方向, 再驱动电机微调镜筒指向, 直到满足预设精确跟踪条件, 即四象限传感器读数差距小于阈值。

3.4 嵌入式控制系统

下位机箱内, 内嵌一个以 ATmega128L 芯片为核心的嵌入式控制系统, 负责控制下位设备的各项动作逻辑。下位嵌入式控制系统的所有功能部件均集成于一块自制的下位嵌入式主板上, 包括 ATmega128L 控制芯片、JTAG 调试接口、RS-422 串行通信接口、信号采集模块、快门遮挡触发模块、零位校正模块、电机脉冲发生模块、四象限太阳跟踪模块以及环境温湿度测量模块等。下位机负责接收由上位机下发的各项指令、完成整个测量过程中的所有控制工作、监控各功能部件的运行状态、反馈各项指令的执行状况以及上传辐射测量的原始数据结果以供上位机系统处理。ATmega128L 单片机向上通过 RS-422 串口通信模块接收上位机指令, 向下则通过内部连接线驱动各个模块。设备上电后, 控制逻辑首先进行自检, 读取恒温控制等工况监测数据, 并驱动电机正确复位, 确保设备正常初始化于预定的状态。之后每次接收命令时, 都会重新读取工况监测数据, 一旦发现不在正常工作环境内, 则向上位机发送告警信息, 并拒绝执行动作指令。

3.5 恒温控制模块

恒温控制模块用于在探头中给光纤光谱仪提供恒温工作环境, 以保证设备工作在 $-20 \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内时, 光纤光谱仪始终处于 $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境中, 以消除设备在野外长期运行中剧烈的环境温度变化对测量结果所造成的温漂和对光谱仪造成的性能损伤。恒温控制模块主要包括恒温盒、半导体帕尔贴片及温控电路, 外设大面积散热槽及工业风扇, 将光谱仪等信号采集关键元件置于恒温盒中, 将恒温盒的内部温度控

制在 25 ± 1 °C 的水平。

3.5 上位机软件

DSL-1 型天空背景辐射计的上位机控制软件作为人际交互接口, 提供可视化窗口界面, 用于用户操作命令的输入和测量结果的显示, 同时提供对测量数据进行处理的功能, 如图 5 所示。控制软件开发环境为 Microsoft Visual Studio 2015, 基于 .NET(C#) framework 进行开发, 运行于安装 Windows 操作系统的工控机中。软件设计依据面向对象的开发思路, 并遵循经典的三层软件开发架构, 隔离出界面显示层、业务逻辑层、命令下发 / 数据读取层。

界面显示层, 包含实现窗口界面的切换控制、工作模式选择、测量参数的输入和结果显示等交互功能的类; 命令下发 / 数据读取层, 以对光纤光谱仪的控制和对下位嵌入式系统的串口通信控制为核心, 兼顾数据的处理、存储功能实现, 为软件功能提供基础支撑类; 业务逻辑层, 是上位机软件的核心层, 接收界

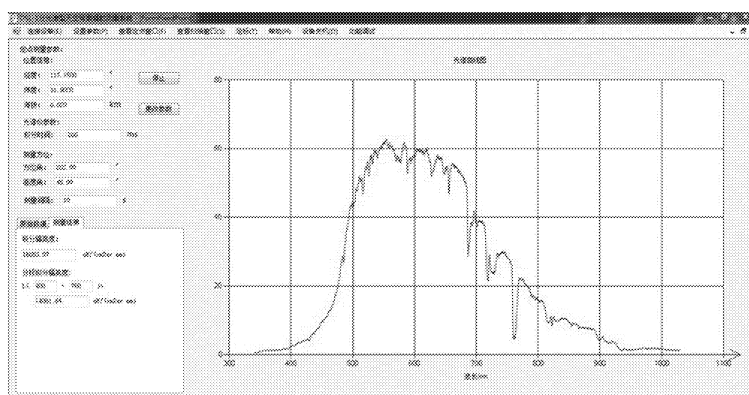


图 5 控制软件界面

Fig.5 Graphic user interface of control software

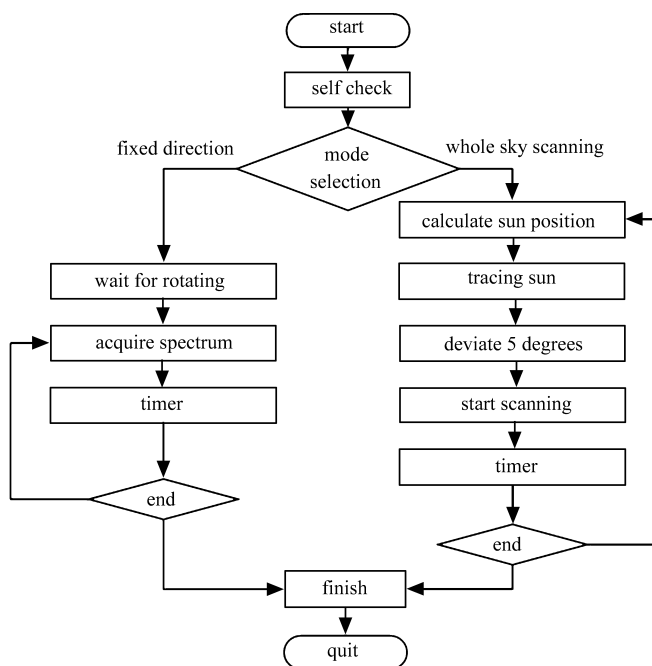


图 6 工作流程图

Fig.6 Flow charts of measuring operation

面显示层的命令 / 参数输入, 依照所需的工作逻辑, 具体控制下位设备的动作, 获取测量数据并进行存储和处理, 以便界面显示层向用户输出。

3.6 测量模式及流程

DSL-1 型天空背景辐射计可以在定点观测模式和全天空扫描模式两种模式下工作, 工作流程如图 6 所示。天空背景辐射计面向正南方向放置, 上电开机并在工控机中打开控制软件, 软件将自动进行设备自检操作。

在定点测量模式下, 由用户在控制软件中输入待测的方位参数 (方位角正北为 0° , 正东为 90° , 范围 $0\sim 360^\circ$; 高度角水平为 0° , 向上为正, 范围 $0\sim 90^\circ$), 待探测镜筒转动到位后, 自动依据用户输入的测量时间间隔 (默认 10 s), 定时测量该方位上的天空背景光谱。

若用户选择全天空扫描测量模式, 软件将首先根据用户输入的地理位置信息 (经纬度、海拔高度) 计算当前的太阳方位 (视日轨迹法), 并将探测镜筒转向该方位, 然后由四象限探测器精确跟踪太阳的位置。完成对太阳的精确定位后, 偏离太阳当前方位 5° 开始测量, 以 10° 为高度角、方位角的间隔, 沿天球平纬圈“逐行”扫描, 共计获得约 360 个点处的天空背景光谱, 然后计算和显示任意波长处背景辐射的全天空分布图。和定点测量模式一样, 设备也自动依据用户输入的时间间隔 (默认 15 min 间隔, 一次扫描耗时约 8 min), 定时获取全天空扫描光谱数据。

4 定标与测量结果

4.1 定标原理和方法

光纤光谱仪以线阵 CCD 为响应器件来测量光谱, 需要对其进行光谱辐射绝对定标, 即建立输出值与对应辐射入射值之间的关系, 进而直接测量天空背景辐射在各个波长上的绝对光谱辐亮度值。在忽略高阶系数的情况下, CCD 线阵的辐射响应模型可以用表达式 (1) 描述^[14]

$$D_N(\lambda) = A_0(\lambda) + A_1L(\lambda) \quad (1)$$

式中 $D_N(\lambda)$ 为 CCD 单元的响应值, $L(\lambda)$ 为波长 λ 处的单色辐亮度值, $A_0(\lambda)$ 为以暗电流为主导的 CCD 噪声, $A_1(\lambda)$ 等为待定系数。其中 $A_0(\lambda)$ 可认为是光纤光谱仪的暗背景光谱值, 通过直接测量光谱仪的暗光谱获得。

使用标准灯 - 漫反射板系统进行绝对辐射定标, 标准灯 - 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光源、光阑、标准漫反射白板、光谱辐射计和光学导轨组成, 定标联合不确定度小于 4%。

标准光源在距离 D 处不同波长 λ 的光谱辐照度 $E_{\lambda d}$ 是确定的, 在实验中为了使定标过程尽量不引入新的误差, 设定标准灯与漫反射板之间保持 650 mm 的距离不变, 即定标系统的光谱辐照度 $E_{\lambda d}$ 不可变, 根据辐亮度与辐照度之间的换算关系可得出由漫反射板上反射出来的光谱辐亮度为

$$L_\lambda = \frac{\rho_\lambda E_{\lambda d}}{\pi} \quad (2)$$

式中 ρ_λ 为漫反射板在波长 λ 处的半球反射比, $E_{\lambda d}$ 为标准光源在距离 d 处的漫反射板上的光谱辐照度值, 标准光源漫反射板系统输出的光谱辐亮度由计量院鉴定校准。通过灯 - 板系统的光谱辐亮度值, 再结合式 (1)、式 (2) 和光谱仪自身的暗光谱, 即可得出 DSL-1 在不同波长上的暗背景 $A_0(\lambda)$ 和标定系数 $A_1(\lambda)$ 。

4.2 测量结果

使用新研制的 DSL-1 型天空背景辐射计在合肥科学岛进行了实地观测实验, 选取 2018 年 3 月 9 日的测量结果来进行说明, 天气为晴天, 有少量薄云。图 7 为对 180° 方位角 (正南方)/ 45° 高度角的天空方位

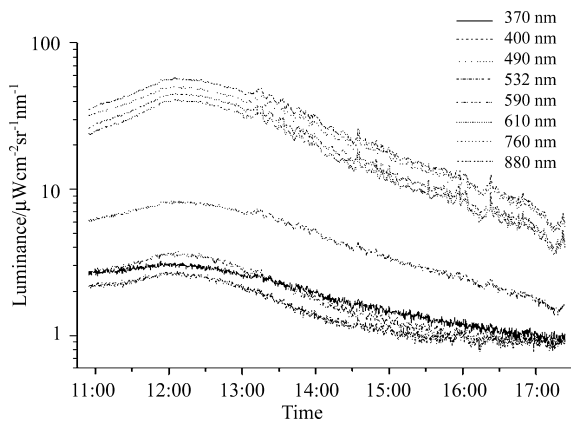


图 7 不同波长处光谱辐亮度在 11:00~17:30 内的变化趋势

Fig.7 Change trend of monochromatic radiance at different wavelength between 11:00~17:30

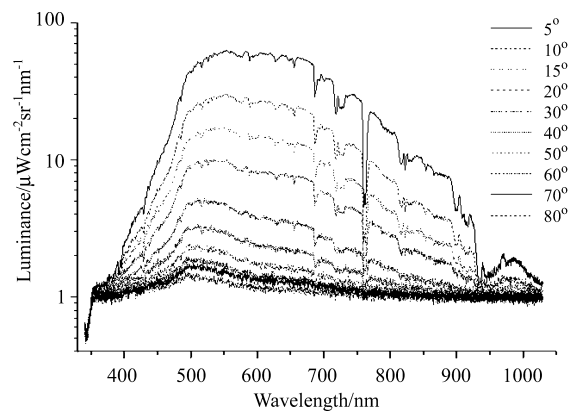


图 8 18:00 时偏离太阳不同高度角天空背景光谱辐亮度测量结果

Fig.8 Spectral radiance of different direction deviated from sun by different altitude angle at 18:00

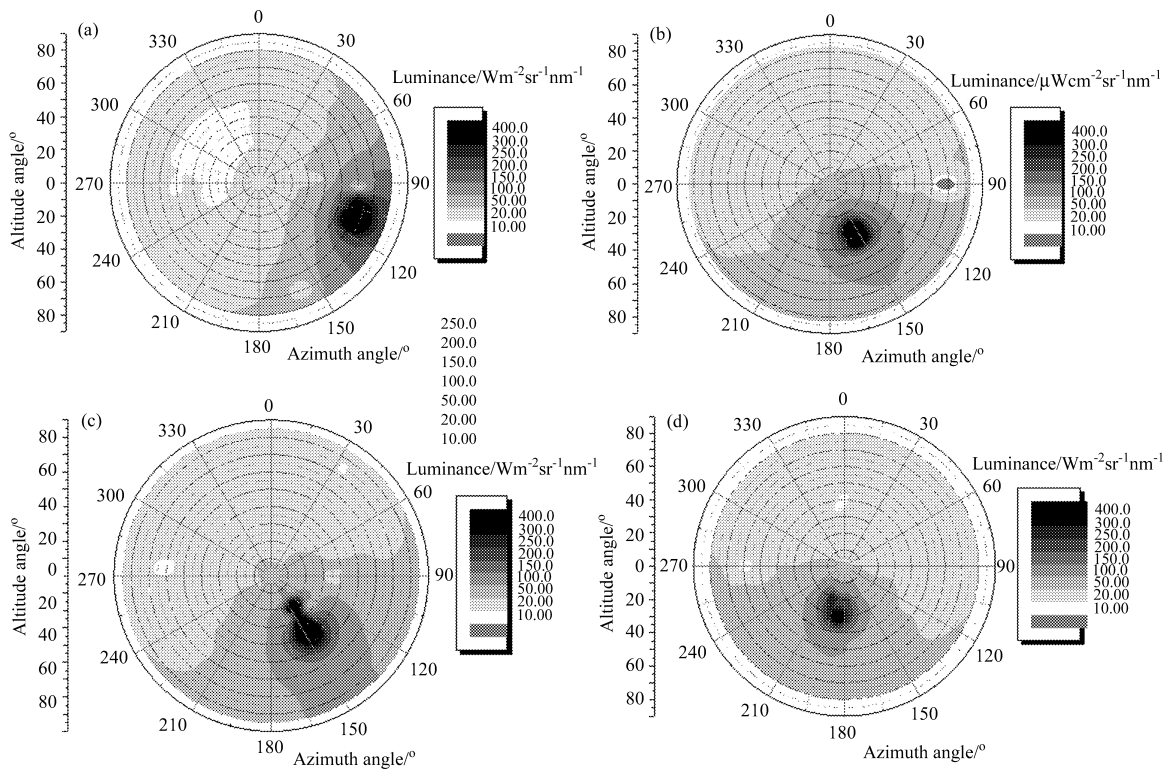


图 9 不同时间天空背景辐射积分辐亮度全天空分布测量结果。 a) 8:00; b) 10:00; c) 10:30; d) 12:10

Fig.9 Distribution of integral radiance in whole sky at different time. a) 8:00; b) 10:00; c) 10:30; d) 12:10

从 11:00 到 17:30 进行连续定点观测的结果, 每组数据测量间隔为 10 s, 并选取若干波长进行对比分析。由图 7 可见, 观测方位上的天空背景辐射幅值在午前逐步上升, 太阳到达最高位置后开始逐步下降, 各个波长处幅值大小有明显差别, 但趋势一致。不同波长处的辐亮度值差别较大, 在进行目标探测时, 应当考虑使用背景辐射值较小的波段。

图 8 为下午 18:00 时沿太阳经圈、相对太阳偏移不同高度角的方位上的天空背景辐射的光谱分布图,

各条光谱曲线自上而下依次对应图例中的高度角偏离度数。可以看出偏离太阳越远,天空背景辐射的幅值衰减越明显,并且天空背景辐射基本集中在 400~800 nm 波长范围内,从 400 nm 开始背景辐射急剧增强,到 560 nm 附近达到最大值,之后逐渐下降。图 8 的光谱中间还有若干特征吸收峰,其背景辐射最强处和最弱处相差可达十数倍。此外,图 8 还表明了偏离太阳不同角度时天空背景辐射光谱的变化,相对太阳越近,背景光谱 400~800 nm 波长范围内的幅值越大,若此时在这个范围内进行目标探测,则信号可能被淹没,可以考虑选取特征吸收峰处背景幅值较小的波段来进行目标判选。

图 9 给出了 3 月 10 日对全天空扫描测量结果进行波长积分后天空背景总辐亮度的全天空分布图,天气情况为上午晴,基本无云,下午开始出现多云状况。分别选取上午 8:00、10:00、10:30 和中午 12:10 的全天空分布进行对比。全天空背景辐射分布与太阳实时方位有较大关系,从 8:00 至 12:10,太阳逐渐从东方升起,背景辐射的最强处不断向天球上方移动。此外,晴天天气下天空背景辐射呈太阳左右大体对称分布,辐亮度较小处基本位于背对太阳一侧,说明地基观测空间目标时,在顺光观测方向上背景辐射的干扰最小。结合图 8,可以看到偏离太阳超过 30° 后,在背景辐射能量集中的 400~800 nm 波长范围内幅值较低,对目标判选的干扰较小。

5 结 论

介绍了 DSL-1 型天空背景辐射计的结构和工作方式,其具有对天空背景辐射光谱进行定点测量、全天空扫描测量两种工作模式,测量方位覆盖高度角 0°~90°、方位角 0°~360°(正北为 0°,正东为 90°)。在定点测量模式下连续工作,可以获得所测方位上天空背景辐射光谱的时间变化规律。在全天空扫描模式下连续工作,则可获得天空背景辐射在光谱测量范围内不同波长处的时间变化规律和空间分布规律。将光谱数据进行积分,还可以获取积分辐亮度测量值。

参考文献:

- [1] Sun Fengying, Mei Haiping, Wu Pengfei, et al. Research on Whole Sky Spectra Imaging Based on Fiber Spectrometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(07): 73-79(in Chinese).
孙凤莹,梅海平,武鹏飞,等.基于光纤光谱仪的全天空光谱成像研究[J].*激光与光电子学进展*, 2016, **53**(07): 73-79.
- [2] Xu Wenqing, Zhan Jie, Xu Qingshan. Development of measuring instrument for sky background brightness [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(01): 46-52(in Chinese).
徐文清,詹杰,徐青山.天空背景亮度测量系统的研制[J].*光学精密工程*, 2013, **21**(01): 46-52.
- [3] Fan Xinkun, Zhang Lei, Tong Shoufeng, et al. Influence of Sky Background Light on Space Laser Communication System [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, **54**(07): 102-110(in Chinese).
范新坤,张磊,佟首峰,等.天空背景光对空间激光通信系统的影响[J].*激光与光电子学进展*, 2017, **54**(07): 102-110.
- [4] Qi Ming, Liu Delian, Zhang Erlei. Band Selection for Aircraft Targets Detection [J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(08): 435-439(in Chinese).
祁鸣,刘德连,张二磊.面向飞机目标探测的波段选择方法[J].*红外技术*, 2011, **33**(08): 435-439.
- [5] Wang Weiguo. *Research Of Space Object Detecting Under Bright Background* [D]. Changchun: Doctorial Dissertation of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, China, 2005(in Chinese).
王伟国.空间目标白天光电探测技术研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士论文, 2005.

- [6] Li Yanan, Sun Xiaobing, Qiao Yanli. Waveband Selection for Space Target Detection and Identification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(01): 67-71(in Chinese).
李雅男, 孙晓兵, 乔延利. 空间目标探测与识别的波段选择 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(01): 67-71.
- [7] Zhang Yu, Liu Bingqi, Chen Yudan, et al. Measurement and analysis of sky background near-infrared oxygen A-band spectra [J]. *Laser & Infrared*, 2015, **45**(09):1080-1083(in Chinese).
张瑜, 刘秉琦, 陈玉丹, 等. 天空背景近红外氧气 A 带光谱测量与分析 [J]. *激光与红外*, 2015, **45**(09): 1080-1083.
- [8] Wang Dong, Zhao Wei, Chen Yong, et al. Measurement of Sky Background Infrared Radiant Intensity and Analysis of it's Effect on Target Detection [J], *Infrared Technology*, 2015, **37**(09): 774-777(in Chinese).
王东, 赵威, 陈勇, 等. 天空背景红外辐射亮度测量及其对目标探测的影响分析 [J]. *红外技术*, 2015, **37**(09): 774-777.
- [9] Sun Fengying, Mei Haiping, Wu Pengfei, et al. Current Situation and Prospect of Ground-Based Background Sky Radiance Measurement Technique and Its Applications [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2017, **12**(02):81-92(in Chinese).
孙凤莹, 梅海平, 武鹏飞, 等. 地基天空背景辐射测量技术及其应用研究现状与展望 [J]. *大气与环境光学学报*, 2017, **12**(02): 81-92.
- [10] Zhan Jie, He Qiaomiao, Xu Wenqing. Development of full sky background brightness meter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(12): 3379-3383(in Chinese).
詹杰, 贺巧妙, 徐文清. 全天空背景亮度测量仪的研制 [J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(12): 3379-3383.
- [11] Huo Juan, Lü Daren. Cloud Amount Analysis at Yangbajing of Tibet in 2009-2010 Using All-Sky Images [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2012, **17**(04): 393-399(in Chinese).
霍娟, 吕达仁. 全天空图像分析西藏羊八井 2009~2010 年云量特征 [J]. *气候与环境研究*, 2012, **17**(04): 393-399.
- [12] Zhang Yonghong, Hao Peipei, Zhang Qidong, et al. Research of Ground-based All Sky Automatic Imager [J]. *Control Engineering of China*, 2013, **20**(02): 320-323(in Chinese).
张永宏, 郝培培, 张齐东, 等. 新型地基全天空自动成像仪的研制 [J]. *控制工程*, 2013, **20**(02): 320-323.
- [13] Liu Weifeng, Xie Yongjie, Zhao Lezhi. Measurement and research on sky background radiance luminance [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(2): 351-354 (in Chinese).
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.
- [14] Liu Weifeng. *Sky-background Radiation Parameter Measurement System Design and Researches for Experiments* [D]. Changsha: Doctorial Dissertation of National University of Defense Technology, 2010(in Chinese).
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: 国防科学技术大学博士论文, 2010.