光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022022104

夜间遥感场地替代定标的微光光谱仪设计与试验分析

张　宇，崔皓东，张　曦，高彩霞，钱永刚，马灵玲，邱　实*

（中国科学院空天信息创新研究院 中国科学院定量遥感信息技术重点实验室，北京 100094）

摘　要： 针对目前传统的地物光谱仪对光信号强度要求较高，只能白天使用，无法在夜间使用而导致夜间遥感在轨辐射定标不确定度较高的问题，提出一种将传统光谱仪的CCD（Charge-Coupled Device）探测器与像增强器直接耦合提升光谱仪低照度条件下信息获取能力的技术方案。基于该技术方案的光谱仪可有效实现地面目标光谱信息的夜间测量。相关测试试验结果表明：在入射光源只有月光和星光的条件下，该微光光谱仪可有效实现对地面目标光谱信息的测量，且性能良好稳定，未来可应用于夜间遥感定标、夜间目标光谱信息获取等应用领域，为夜间遥感在轨定标精度的提升奠定技术基础。

关键词： 夜间遥感；微弱光光谱仪；直接耦合；像增强器

中图分类号： TP702　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1155－07

Design and Experimental Analysis of Low-level Light Spectrometer for Nighttime Remote Sensing Sites Vicarious Calibration

ZHANG Yu, CUI Haodong, ZHANG Xi, GAO Caixia, QIAN Yonggang, MA Lingling, QIU Shi

(Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Aerospace Information Research Institute, Beijing 100094, CHN)

Abstract: Traditional ground object spectrometers have high requirements for optical signal intensity and can only be used during the day but cannot be used at night, which leads to high uncertainty of on-orbit radiometric calibration of remote sensing at night. A technical solution is proposed to enhance the information acquisition capability of the spectrometer under low illumination conditions by directly coupling the traditional spectrometer's CCD (Charge-Coupled Device) detector with the image intensifier. Based on this technology scheme, the spectrometer could effectively measure ground targets' spectral information at night. The experimental results show that the low-level light spectrometer can effectively measure the spectral information of the ground target with good and stable performance under the condition of moonlight and starlight. And the spectrometer can be applied to night remote sensing calibration, night target spectral information acquisition, and other application fields, laying a technical foundation for improving the accuracy of night remote sensing calibration in orbit.

Key words: nighttime remote sensing; low level light spectrometer; direct coupling; image intensified

收稿日期：2022－02－21.

基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFB0504600，2018YFB0504604，2018YF0504800，2018YF0504805）；中科院前沿科学重点研发项目(QYZDB-SSW-JSC051).

* **通信作者：**邱　实　　**E-mail:** qiushi@aircas.ac.cn

0 引言

夜间遥感是近年来遥感领域的前沿热点，它可以弥补红外遥感夜间监测的局限性，获取具有白天分辨率的夜晚地表辐射产品[1]。但由于夜间遥感载荷的特殊性，导致其在轨定标不确定性高，辐射产品精度低，难以满足日益提高的定量化应用需求。为了提高夜间遥感在轨定标精度，国内外专家学者围绕夜间遥感在轨定标开展了一系列的研究工作，相关工作结果表明，获取低照度环境下的地表真值是夜间遥感在轨定标决定性的一环。

传统的白天遥感在轨定标可以利用便携式光谱仪等设备获取地表真值，具有代表性的便携式光谱仪主要有 SVC HR-1024i 地物光谱仪、ASD FieldSpec4 地物光谱仪、PSR+3500 高精度地物光谱仪以及 AvaField-2 高光谱地物光谱仪等[2]，但因其均适用于光照条件良好的环境中，对光信号强度要求较高，只能白天使用，无法应用于夜间月光和星光等微弱光环境下的目标光谱及反射率的测量。

针对上述问题，目前国内外很多研究人员在夜间遥感定标中，尝试过采用多种方式来获取微弱光环境下的地表辐射值或反射率。如 2013 年 Liao 等[3]选择美国 RVP(Railroad Valley Playay)沙地作为夜间遥感场地替代定标场，选用 2012 年 3 月～10 月 RVP 地区在某段时间内的平均反射率数据来代替卫星过境时刻的实测值进行夜间遥感载荷的场地替代定标，但因季节性变化带来的水汽含量的变化对地表反射率带来一定的影响，其判定误差范围在 10%左右，最终的辐射定标不确定度仅为 15%。此外，也有不少学者选择冰雪为场地替代定标场，如 2013 年 Shao[4] 和 2016 年 Qiu[5] 选择南极 Dome-C 地区和北极 Greenland 地区作为研究区域，采用月球辐照度模型 MT2009[6] 和卫星观测值计算了雪地表面的发射率，并以高光谱卫星 EO-1(Earth Observing-1) Hyperion 的反射率产品作为真值进行了比对分析，但由于在计算过程中未考虑到 EO-1 Hyperion 卫星本身定标的不确定度以及不同观测几何因素，影响了其最终的辐射定标精度。2017 年国防科技大学王锋[7]选择茶卡盐湖、古里雅冰帽、普若岗日冰原三个高海拔、高反射率地区作为夜间遥感替代定标场，但由于缺乏真实的地面反射率数据，无法开展辐射定标工作，只是通过美国 VIIRS 卫星数据，评估分析了这三处区域的情况。总而言之，目前的大部分针对夜间遥感在轨辐射定标的研究工作都是利用地表对月球光的反射来进行替代定标，但由于月球模型本身的精度不高，又缺乏可以直接测量场地辐射特性的实效性工具，限制了替代定标方法的夜间遥感在轨定标精度。

综上可知，要提高夜间遥感的定量化应用水平，关键是获取低照度环境下的地表辐射值或反射率。鉴于目前没有适合于夜间目标反射率和光谱测量的光谱仪设备情况，本文在传统光谱仪的基础上进行技术改进，提出一种适用于微弱光环境下测量的 ICCD(Image-Intensified Charge-Coupled Device)光谱仪系统，并对其稳定性、线性方面的性能进行了评估。该系统采用高性能像增强器与传统光谱仪中的 CCD 直接耦合的方式集成，大幅度地提高了传统光谱仪的灵敏度，具有成本低、易于实现且性能稳定的优点，可在低照度环境下直接获取地表辐射值或反射率真值，为提高夜间遥感定标精度奠定技术基础。

1 ICCD 微光光谱仪设计方案

针对便携式光谱仪在微弱光条件下进行光谱测量时存在探测灵敏度不足的问题，本文借鉴微光夜视领域的像增强技术，提出一种将便携式光谱仪的 CCD 探测器与微光像增强器相耦合的光增强技术方案，以提升便携式光谱仪在微弱光条件下的信息获取能力。

本文以白天遥感广泛使用的 SVC HR-1024 野外便携式光谱仪为基础，采用微光直耦增强的技术方案将其改造成为高灵敏度微弱光光谱仪，以满足微弱光光谱探测的使用要求。

1.1 增强工作原理

微光像增强技术，是指将景物的极微弱的辐射光投射到成像器件的光敏面上，产生光电子，经过电子光学系统聚焦到荧光屏上，显示出被增强了的、人眼直接可视的景物图像。为了使传统的光谱仪能在微弱光环境下使用，本文采用微光像增强技术，将传统普通光栅衍射光谱仪采用的传感器(线阵 CCD)与像增强器直接耦合形成高感光度的 ICCD，ICCD 是微光光谱仪的核心部件，其增强工作原理图如图 1 所示[8]。

为实现透光效率高、灵敏度高且结构紧凑，本文在综合考虑透光效率和灵敏度兼顾的基础上，采用将像增强器直接耦合到 CCD 靶面上的新工艺(直接耦合技术)。采用直耦技术研制而成的成像器件

(ICCD)，透光效率更高，均匀性更好，同时结构紧凑，灵敏度高，分辨率高。

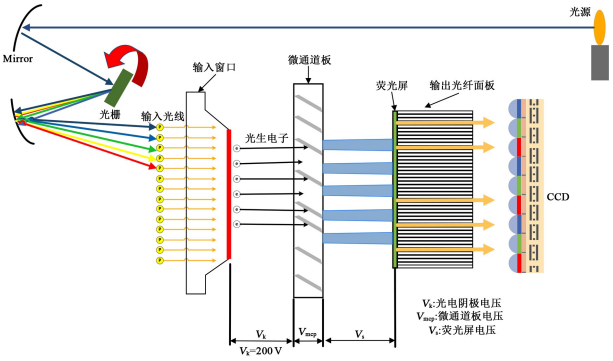


图 1　增强型微弱光光谱仪技术原理图

1.2　系统集成方案

1.2.1　光谱仪选型

本文选择 Spectra Vista 公司的 SVC HR-1024 野外便携式光谱仪作为微光光谱仪的信息接收采集设备。SVC HR-1024 能够提供目前世界较高水平的光谱分辨率，并具备坚固的设计、独立的工作模式、超轻的重量，且具有多个可选择的光学镜头和光纤光学包，适合野外使用。由于微弱夜天光光谱范围集中在 400～900 nm 附近，选择 SVC HR-1024 可见光波段进行耦合增强有利于进行对应光谱的分析比较。SVC HR-1024 的可见光探测器为线阵 CCD，形貌如图 2 所示。

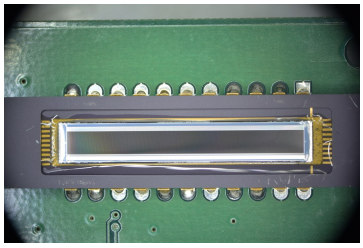


图 2　光谱仪线阵 CCD 探测器

1.2.2　像增强器选型

根据所选取的光谱仪 CCD 参数，耦合的像增强器的成像面积应覆盖光谱仪的 CCD 成像面积。SVC HR-1024 线阵 CCD 的感光区尺寸为 25.6 mm×2.5 mm，则像增强器的成像面直径要达到 25.8 mm，其中预留 0.2 mm 的加工空间；像增强器的图像分辨率要高于光谱仪 CCD 的图像分辨率，光谱仪 CCD 的像元尺寸为 50 μm×2.5 mm，因此像增强器的最小有效分辨直径要小于 50 μm，即像增强器的分辨率要大于 10 lp/mm。此外，要将 ICCD 微光光谱仪应用于 VIIRS DNB 夜间遥感定标，光谱响应范围要涵盖 400～900 nm，并且其感光灵敏度要满足微弱光环境下成像，即在 1/2 月光的照明条件下可以正常工作，因此像增强器的亮度增益需高于 5 000 倍，同时具有强光保护功能。

综合以上情况，本文选择了北方夜视公司的 1XZ25/25WS-7 像增强器，其空间分辨率可达 48 lp/mm，信噪比为 23，光谱响应曲线如图 3 所示。像增强器 1XZ25/25WS-7 与 SVC HR-1024 光谱仪的线阵 CCD 进行直接耦合，在分辨率和信噪比特性方面均具有较高的匹配值，可满足微光环境下的光谱探测。

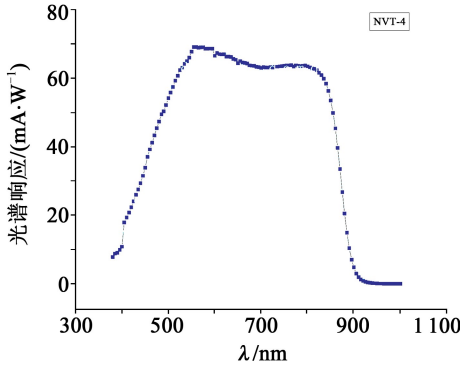


图 3　1XZ25/25WS-7 像增强器光谱响应曲线

1.2.3　直耦增强 ICCD 结构设计

直耦 ICCD 成像器件需要将像增强器和 CCD 图像传感器两大部分的结构耦合构成一个整体，ICCD 成像器件结构设计图如图 4 所示。

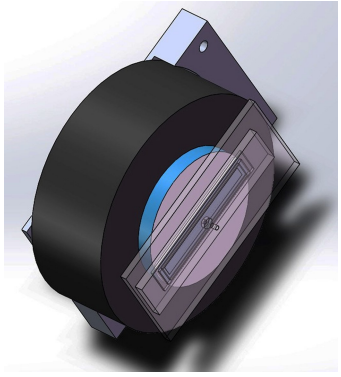


图 4　线阵直耦 ICCD 结构示意图

为实现最大光效率和最好图像质量的传递，在像增强器荧光屏与 CCD 图像传感器耦合过程中，必须确保两个器件耦合光轴的一致且与光敏元相对应，以及整体结构的牢固。为确保高精度、高效率、高可靠性，像增强器的输出面需要加工成 SVC HR-1024 光谱仪线阵 CCD 感光区尺寸的 25.6 mm×2.5 mm 长条形状[9]，如图 5 所示。



图 5 像增强器的输出面加工形状

为了能够成功地将像增强器耦合到 CCD 上，像增强器输出光纤面板和 CCD 必须精密贴紧，防止光线在光纤的输出端输出时产生很大的角度扩散，导致分辨力的损失。在耦合过程中，像增强器输出光纤面板和 CCD 的间隙要尽量地减小到最小，同时又不能引起应力，以免损坏 CCD 或 CCD 的性能。耦合过程中使用了光学匹配油，用以防止空气间隙引起的空间分辨力和耦合效率损失。在探测器的温度反复变化时，耦合面要保持水平稳定，以避免产生应力或引起破裂。

1.2.4 直耦 ICCD 耦合工艺实现

本文的直耦 ICCD 耦合工艺包括三种工艺技术和十个工艺环节。三种工艺技术如图 6 所示，分别如下：

(1)高可靠耦合固化工艺。该技术可实现微米级像增强器的光轴和 CCD 的光轴精准重合，通过 ICCD 耦合装调系统在耦合时控制像增强的下落速度和下落方向，ICCD 耦合装调系统结构如图 7 所示。该系统由精密机械部件组成，可以手动调节像增强器下落速度和准确定位位置；

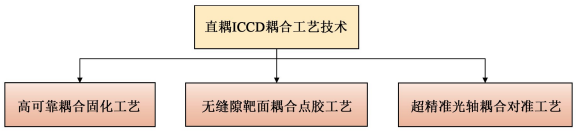


图 6 直耦 ICCD 耦合工艺技术

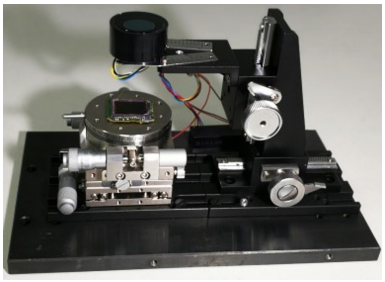


图 7 直耦 ICCD/ICMOS 耦合装调系统

(2)无缝隙靶面耦合点胶工艺。该技术可使得像增强器和 CCD 在耦合时间隙控制到最小，在保证图像分辨率和对比度的同时又不引起应力而导致损坏 CCD 的性能。主要操作是对 CCD 感光面使用光学胶或光学匹配油并使其均匀地平铺在 CCD 靶面；

(3)超精准光轴耦合对准工艺。该技术可提升 ICCD 在耦合之后的连接强度、稳定可靠性和良品率。主要操作是通过控制风干的温度和固化的时间，来保证器件使用可靠性。

以上工艺技术通过以下十个工艺环节来实现，工艺流程如图 8 所示。

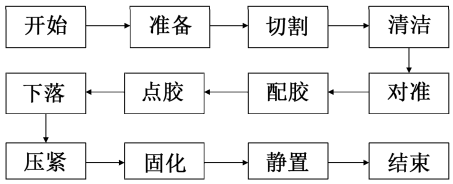


图 8 直耦 CCD 耦合工艺环节

1.3 ICCD 微光光谱仪整体装调

直耦增强线阵 ICCD 组件完成后，需要将 ICCD 组件装入光谱仪完成整机研制，装配后 ICCD 组件的成像平面要与 CCD 原始成像平面位置完全重合，以保证光谱测量的正确性。

安装好 ICCD 组件的光谱仪，像增强器电源需要 3.3 V 直流电压供电，工作电流 12 mA，直流电源线及电源地线接入点如图 9 所示。光谱仪面板设有像增强器电源控制开关，只有在进行测量时才打开像增强器，而在回放、设置等其他操作时关闭像增强器，以保护像增强器不受强光损害。

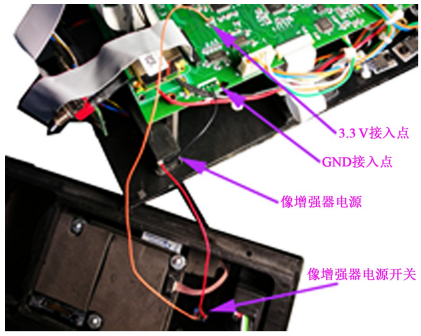


图 9 像增强器安装及电源接入点

2 ICCD 微光光谱仪实验室定标

2.1 ICCD 微光光谱仪辐亮度响应度定标

由于像增强器的光谱响应曲线不是均衡的水平直线，故像增强器与光谱仪 CCD 耦合后改变了原有光谱仪的光谱响应特性，需要对研制的微光光谱仪进行重新标定。该仪器的实验室标定委托中国科学

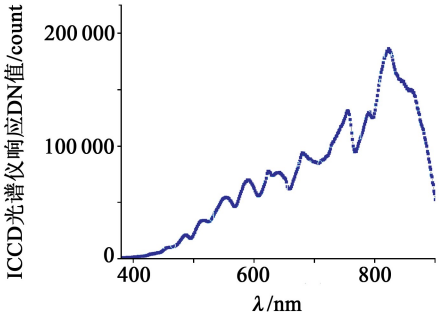
院计量院进行，基于标准辐射源的实验室辐射标定方案，获取了 ICCD 微光光谱仪辐亮度响应度系数。通过实验室定标，可确定 ICCD 微光光谱仪的标定系数 $R_L(\lambda)$：

$$R_L(\lambda)=L(\lambda)/V_L(\lambda) \tag{1}$$

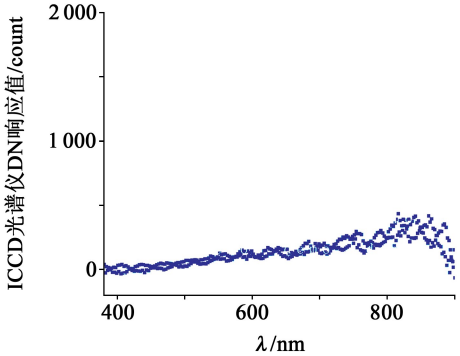
式中，$L(\lambda)$为 ICCD 微光光谱仪入瞳处的光谱辐亮度，$V_L(\lambda)$为参考标准器测量的光谱辐亮度，参考标准器为计量院经过标定且各方面性能稳定的标准辐射计。

2.2　ICCD 微光光谱仪定标结果分析

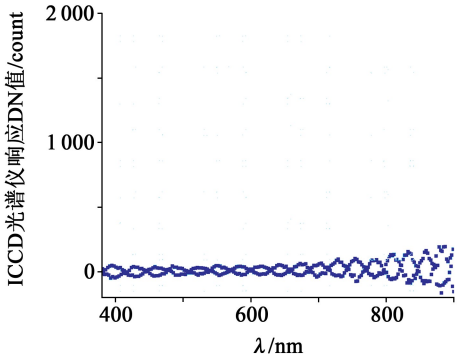
为确保 ICCD 微光光谱仪能够在夜间正常工作，本次标定需要在不同的低照度下进行，分别选择了 1×10^{-3} lx，1×10^{-2} lx 和 1×10^{-1} lx 三个低照度量级。标定过程通过将不同量级的光源照射在漫射板上，使用微弱照度计测量漫射板处的照度。设定某量级后，保持光源不变，用 ICCD 微光光谱仪与标准辐射计分别测量漫射板上的辐射亮度值。测试结果如图 10 所示。测量结果表明，在 1×10^{-3} lx 量级下，仪器基本无响应；在 1×10^{-2} lx 量级下，仪器信噪比比较低；在 1×10^{-1} lx 量级下，仪器信号明显增强，信噪比较高。由此可确定在环境照度大于等于 1×10^{-1} lx 量级时，ICCD 微光光谱仪可以正常投入使用。夜间遥感场地替代定标在 1/2 月到满月情况下定标精度更高。在晴朗的夜空下，1/2月到满月



(a)　1×10^{-1} lx 照度下



(b)　1×10^{-2} lx 照度下



(c)　1×10^{-3} lx 照度下

图 10　不同照度下的 ICCD 微光光谱仪响应值

时地面照度范围在 1.01×10^{-1}～2.67×10^{-1} lx，因此，本文设计的 ICCD 微光光谱仪满足低照度场地替代定标所需的工作照度条件。

图 11 为 1×10^{-1} lx 照度下参考标准器测量的辐亮度曲线，由于参考标准器只针对可见光波段，因此定标波段为 380～780 nm。通过对 ICCD 光谱响应值进行适当的数据处理，可根据式(1)可求出定标系数曲线(辐亮度值)，如图 12 所示。

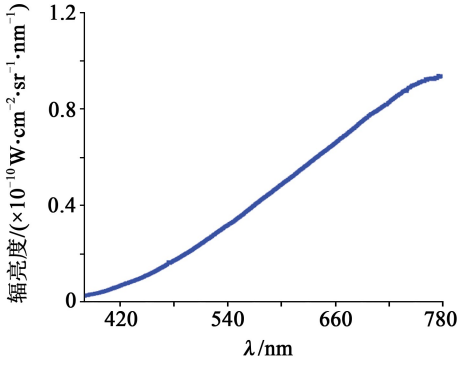


图 11　1×10^{-1} lx 下参考标准器测量的辐亮度曲线

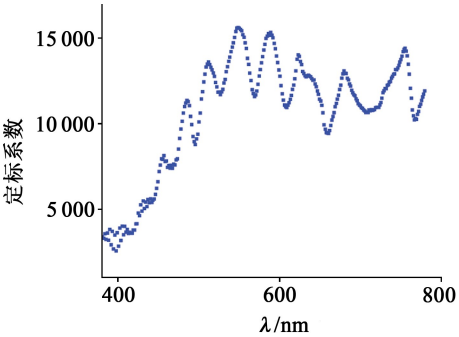


图 12　1×10^{-1} lx 下的定标系数曲线

3　ICCD 微光光谱仪外场应用示范

为检验本文研制的 ICCD 微光光谱仪的实际工作情况，本文利用该 ICCD 微光光谱仪进行了外场

微光测试研究试验。

3.1 外场区域情况

夜间遥感场地替代定标均基于场地目标对月光反射的物理原理进行，因此，在通过外场验证 ICCD 微光光谱仪系统时，需选择光源只有月光的站点进行验证分析。本文选择的试验地点为位于海拔 3 200 多米的青海格尔木大柴旦地区(37.74°N，95.34°E)，地处柴达木盆地边缘，地质构造形成了自然荒漠，远离城市灯光污染，可确保场地目标只反射月光，无其他杂散光，其一年中大多数时间夜晚天空晴朗无云，水汽含量、气溶胶含量、风速低，大气确定性高，满足 ICCD 微光光谱仪验证分析工作的相关要求，图 13 为站点的具体地理位置。

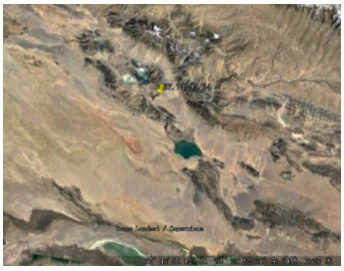


图 13 大柴旦站点

3.2 均一地物光谱测量分析

试验选取在 2021 年 9 月 21 日～9 月 25 日时间段内进行，该时间段处于农历八月十五前后，满足满月～1/2 月的照度条件，且天气晴朗无云，大气状况良好，无其他杂散光源的干扰。图 14 是不同月相角下的地面光谱曲线：2021 年 9 月 21 日的月相角为 5.7°；9 月 22 日的月相角为 10.2°；9 月 23 日的月相角为 20.6°；9 月 24 日的月相角为 32.5°；9 月 25 日的月相角为 43.6°。由图 14 可看出，试验测得的多组光谱曲线整体趋势一致，说明本文设计的 ICCD 微光光谱仪具有较好的重复性和稳定性。并且 ICCD 微光光谱仪测得地表反射的能量与月光的

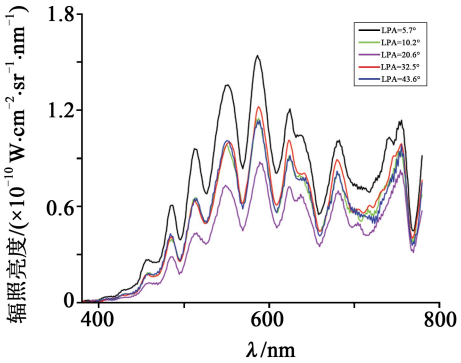
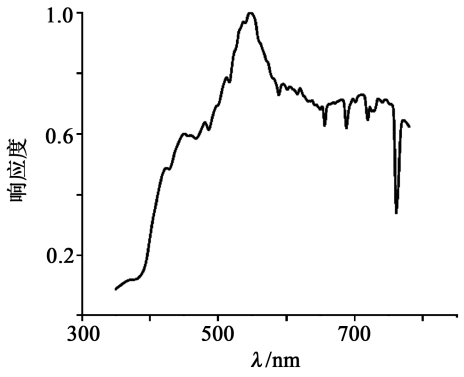


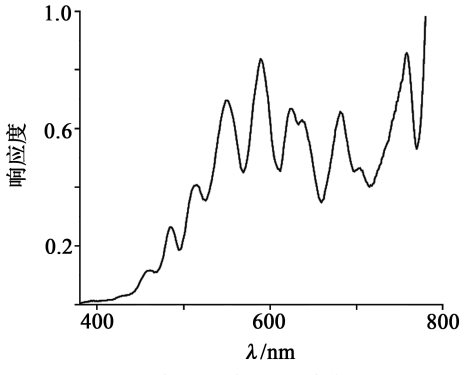
图 14 不同月相角下的地物光谱曲线

强弱变化保持一致，说明本文研制的 ICCD 微光光谱仪具有一定的实用性和可靠性。

图 15(a)为站点白天测得的荒漠的光谱响应曲线，图 15(b)为站点夜间利用本文研制 ICCD 微光光谱仪测得的荒漠的光谱响应曲线。比较图 15 的曲线可知，同一场地下白天的光谱分布与夜间的光谱分布存在较大差异，特别是在 400～500 nm 范围，光线及强度明显减少，理论上，白天和夜间的光谱响应会存在差异，但不会很大，针对目前外场的测试结果，可能存在以下几点原因：1. 在实际测量时，受大气和地表反射率的影响，到达 ICCD 微光光谱仪入瞳处的照度可能略小于 1×10^{-1} lx，光谱仪的信噪比会受到影响，结果中可能包含一些噪声的影响，所以导致光谱曲线与白天测得的光谱曲线有差异；2. ICCD 微光光谱仪的定标存在问题。根据实验室定标结果，在环境照度为 1×10^{-1} lx 量级的情况下，系统具有较高的信噪比，定标系数适用于 1×10^{-1} lx 量级的情况，在外场试验的环境照度略小于 1×10^{-1} lx 的情况下，实验室的定标系数不适用于该照度条件，所以导致测得的光谱曲线与白天的光谱曲线有较大的差异。针对以上分析，本文后期还需要对ICCD微光光谱仪再进行进一步的改进，提



(a) 白天站点的光谱曲线



(b) 夜间站点的光谱曲线

图 15 白天和夜间的光谱曲线对比

高其增益和信噪比，以实现在更低照度下目标光谱信息的测量。

4　结论

本文针对目前夜间遥感场地替代定标大多采用白天某段时间内的平均反射率或卫星产品或利用月球模型计算，没有适合于夜间目标反射率和光谱测量的光谱仪设备问题，提出一种将便携式光谱仪的 CCD 探测器与高性能像增强器进行直接耦合增强的技术方案，并研制了便携式 ICCD 微光光谱仪。该光谱仪结合了光谱探测领域和微光夜视领域的先进技术成果，大幅提高了便携式光谱仪的灵敏度。实验室标定结果表明，在环境照度大于等于 1×10^{-1} lx 量级时，该 ICCD 微光光谱仪可以正常工作，满足夜间遥感场地替代定标在 1/2 月到满月环境要求。本文通过夜间野外地物实际光谱信息的测量应用，验证了本文研制的 ICCD 微光光谱仪可有效实现地面目标光谱信息的夜间测量，且性能良好稳定，填补了相关的设备空白。

本文初步地验证了 ICCD 微光光谱仪可适用于夜间月光照明条件下的地物目标光谱测量，但测试结果还存在一定的误差，根据误差来源分析，后期还需对设备进行进一步的性能提升。性能提升后，可尝试将该 ICCD 微光光谱仪实际应用于夜间遥感场地替代定标方面，后续将选取合适的定标站点，如南极 Dome-C、北极 Greenland、茶卡盐湖、古里雅冰帽、普若岗日冰原等适合夜间遥感场地定标的站点，在卫星过境时，应用本设备开展地表同步测量并进行进一步的研究与讨论，充分发挥和发掘该 ICCD 微光光谱仪在夜间遥感场地替代定标以及微弱光光谱测量领域的潜在应用价值。

参考文献：

[1] Lee T E, Miller S D, Turk F J, et al. The NPOESS VIIRS day/night visible sensor [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 87(2): 191-200.

[2] 张　权. 场地反射率直接法观测系统的研制与测试[D]. 合肥：中国科学技术大学，2019.
Zhang Quan. Development and test of site reflectivity observation system based on direct method [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.

[3] Liao L B, Weiss S, Mills S, et al. Suomi NPP VIIRS day-night band on-orbit performance[J]. J. of Geophys. Res. Atmos., 2013, 118(22): 12705-12718.

[4] Shao X, Cao C, Uprety S. Vicarious calibration of S-NPP/VIIRS day-night band[J]. Proc. SPIE, 2013: 88661S. 1-88661S. 9.

[5] Qiu S, Shao X, Cao C. Feasibility demonstration for calibrating suomi-national polar-orbiting partnership visible infrared imaging radiometer suite day/night band using dome C and greenland under moon light[J]. J. of Appl. Remote Sensing, 2016, 10(1): 016024.

[6] Miller S D, Turner R E. A dynamic lunar spectral irradiance data set for NPOESS/VIIRS day/night band nighttime environmental applications[J]. IEEE Trans. on Geoscience & Remote Sensing, 2009, 47(7): 2316-2329.

[7] 王　锋. 基于微光数据的夜间亮目标表观反射率特性和城市光学厚度反演研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2017.
Wang Feng. Research on apparent reflectance characteristics over bright objects and urban optical thickness retrieval based on low light data [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.

[8] 白廷柱. 光电成像技术与系统[M]. 北京：电子工业出版社，2016.
Bai Tingzhu. Photoelectric Imaging Technology and System [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.

[9] 高天阳，曹峰梅，王　霞，等. 微光像增强器与大尺寸 CMOS 的直接耦合[J]. 红外技术，2021, 43(6): 537-542.
Gao Tianyang, Cao Fengmei, Wang Xia, et al. Direct coupling of low light image intensifier with large size CMOS[J]. Infrared Technology, 2021, 43(6): 537-542.

作者简介：

张　宇(1994—)，女，硕士，助理研究员，研究方向为微光夜视、夜间遥感辐射定标与应用；

邱　实(1985—)，女，博士，研究员，研究方向为夜间遥感在轨定标及应用、月球定标等。