

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.03.005

# 基于多旋翼无人机的BRDF测量系统设计

张权<sup>1</sup>, 李新<sup>1\*</sup>, 韦玮<sup>1</sup>, 刘恩超<sup>1</sup>, 张艳娜<sup>1</sup>, 黄雄豪<sup>1,2</sup>,  
陈胜利<sup>1,2</sup>, 康祝海<sup>1,2</sup>, 郑小兵<sup>1</sup>

(1 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室,  
安徽 合肥 230031;  
2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 鉴于目前场地双向反射分布函数测量的非便携性和低效率, 开展了基于多旋翼无人机的场地双向反射分布函数测量系统的研制。该系统主要由多旋翼无人机和可见-短波红外光谱仪组成, 其中光谱仪的观测镜头由高精度无人机云台控制。光谱仪采用两个波段探测单元, 整体光谱覆盖范围为400~1700 nm, 两个探测单元均以平场凹面光栅分光、线阵探测器探测信号, 两个探测单元的光谱分辨率分别优于3 nm和12 nm。为验证基于多旋翼无人机的场地双向反射分布函数测量系统的综合性能, 利用该测量系统对敦煌辐射校正场进行了地表方向特性测量。试验结果表明, 该便携式测量系统可以大大提高场地双向反射分布函数的测量效率, 为场地双向反射分布函数测量的未来发展提供了有益参考。

**关键词:** 无人机; 双向反射分布函数; 可见-短波红外; 测量系统

中图分类号: TN219; O433.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)03-235-010

## Design of BRDF measurement system based on multi-rotor UAV

ZHANG Quan<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1\*</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>, LIU Enchao<sup>1</sup>, ZHANG Yanna<sup>1</sup>, HUANG Xionghao<sup>1,2</sup>,  
CHEN Shengli<sup>1,2</sup>, KANG Zhuhai<sup>1,2</sup>, ZHENG Xiaobing<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;  
2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Considering the non-portability and low efficiency of the measurement of bidirectional reflectance distribution function at present, a measurement system of bidirectional reflectance distribution function based on multi-rotor UAV was developed. The system is mainly composed of multi-rotor UAV and visible - short wave infrared spectrometer, with the observation lens of the spectrometer controlled by a high-precision UAV cradle head. The spectrometer adopts two wave band detection units, and the overall

基金项目: 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(YZJJ2020QN4), 国家重点研发计划项目(2018YFB0504600, 2018YFB0504604)

作者简介: 张权(1989-), 博士, 助理研究员, 主要从事卫星遥感辐射定标方面的研究。E-mail: zhangq@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2020-12-28; 修改日期: 2022-03-17

\*通信作者。E-mail: xli@aiofm.ac.cn

spectral coverage is 400~1700 nm. The two detection units of the spectrometer detect signals with flat field concave grating and linear array detector, and their spectral resolution is better than 3nm and 12nm respectively. In order to verify the comprehensive performance of the measurement system of bidirectional reflectance distribution function based on multi-rotor UAV, the surface directional characteristics of Dunhuang radiation correction field were measured using the measurement system. The experimental results show that the portable measurement system can greatly improve the measurement efficiency of bidirectional reflectance distribution function and provide a useful reference for the future development of measurement of bidirectional reflectance distribution function.

**Key words:** unmanned aerial vehicle; bidirectional reflectance distribution function; visible-short wave infrared; measurement system

## 0 引言

卫星遥感在轨期间的性能持续衰变,只有通过卫星遥感在轨定标的实时校准才能有效区分地球系统的真实变化与载荷自身的衰变,实现卫星遥感的高精度定量化遥感需求<sup>[1]</sup>。经过多年的发展,形成了以“反射率基法”为核心的卫星遥感在轨定标技术流程<sup>[2]</sup>。反射率基法是指选取一块定标场地,在卫星遥感过境定标场地时刻,在场地同步进行地表反射率和大气参数的测量,通过大气辐射传输模型计算出卫星遥感入瞳处的辐亮度,从而建立卫星遥感输出计数值与模拟入瞳辐亮度值之间的关系<sup>[3]</sup>。但是反射率基法一般采用人工测量方法,其定标场地一般为偏远地区的戈壁、沙漠,对天气的要求较高,完成一次实验需要耗费大量人力、物力和时间,严重影响了定标频次和定标精度<sup>[4]</sup>。

在轨场地替代定标是监测和校正遥感在轨辐射性能变化的重要手段,国内外均采用大面积均匀稳定的地物目标作为辐射校正场,敦煌辐射校正场作为中国遥感卫星辐射校正场的陆地定标场被广泛应用<sup>[5]</sup>。场地替代定标中需测量地表反射率和大气参数,常规测量的地表反射率都是垂直反射率,但卫星过境定标场基本上都有一定的观测角度,定标场的非朗伯特性是限制场地替代定标准确性的瓶颈,为降低场地非朗伯特性的影响,需开展场地双向反射分布函数(BRDF)的测量,并进行地表反射率的非线性校正<sup>[6,7]</sup>。

中国科学院安徽光学精密机械研究所(以下简称“安光所”)在1994年研制完成了非定点的全自动BRDF测量系统,该系统主要由仪器支撑架、驱动电机、和一台VF921光谱辐射计组成,电机驱动实现辐射计在两维空间的扫描,由于受到支撑架阴影的影响,实际观测范围为:天顶角 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ,方位角 $0^{\circ}\sim 270^{\circ}$ <sup>[8]</sup>。2008年,安光所研发了一套可见-短波红外波段的双向反射自动测量系统,该系统包含一个直径为4 m的半球扫描机构,可以扫描整个半球空间的任意角度,实现了高光谱双向反射数据的现场采集<sup>[9]</sup>。2010年中国气象局国家卫星气象中心研制的野外便携式方向反射比测量系统(DREMP)相对之前的BRDF测量系统稍显轻便,可以在卫星过境前后1 h内快速完成跑场测量要求,主要用于风云系列静止气象卫星在大观测天顶角下进行场地定标<sup>[10]</sup>。

近年来,多旋翼无人机(UAV)技术飞速发展,开始广泛应用于各个领域。由于无人机具有机动灵活、成本低和便携高效等特点,在BRDF测量方面具有独特的优势。因此本文开展了基于多旋翼无人机的BRDF测量系统的研制,主要介绍了多旋翼无人机和自研可见-短波红外光谱仪的设计。测量系统在敦煌辐射校正

场进行了地表方向特性测量试验, 试验结果验证了测量系统的综合性能。

### 1 BRDF 测量原理

BRDF 测量系统主要由多旋翼无人机、云台和可见-短波红外光谱仪组成。操作者在地面通过操控系统控制无人机和云台, 依靠无人机的飞控系统与定位系统可以实现规划航线的飞行, 通过可见-短波红外光谱仪完成对目标地表的光谱数据采集。基于多旋翼无人机的测量系统在测量地表方向反射比 (BRF,  $\rho_{BRF}$ ) 的前后分别测量漫反射参考板。 $\rho_{BRF}$  的计算公式<sup>[11]</sup>为

$$\rho_{BRF}(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda) = \frac{F_{target}(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda)}{F_{panel}(\theta_i, 0, 0, \lambda)} \rho_{panel}(\theta_i, 0, 0, \lambda), \tag{1}$$

式中  $F_{target}$  为光谱仪测量地表的响应曲线,  $\theta_i$  为无人机测量时刻的太阳天顶角,  $\theta_v$  为无人机测量系统设置的观测天顶角,  $\varphi$  为测量时刻的相对方位角,  $\lambda$  为波长,  $F_{panel}$  为光谱仪测量漫反射参考板的响应曲线,  $\rho_{panel}$  为漫反射参考板对应方向的反射率因子, 由实验室通过对漫反射参考板进行定标得到<sup>[12]</sup>。

### 2 BRDF 测量系统

可见-短波红外光谱仪搭载于多旋翼无人机平台上, 光谱仪的镜头采用光纤连接, 镜头的观测方向由无人机上的高精度云台精确控制。通过对多旋翼无人机和云台的高精度控制完成 BRDF 测量过程中不同位置和角度测点的测量任务。根据 BRDF 测量需求, 设计了光谱范围 400~1700 nm 的可见-短波红外光谱仪, 其中两个探测单元的光谱分辨率分别优于 3 nm 和 12 nm。

#### 2.1 多旋翼无人机

多旋翼无人机主要由动力系统、飞控系统、支撑系统和挂载设备等组成, 如图 1 所示。其中挂载设备中的云台可高精度控制光谱仪的观测镜头转动。多旋翼无人机近景图如图 2 所示, 主要技术参数如表 1 所示。

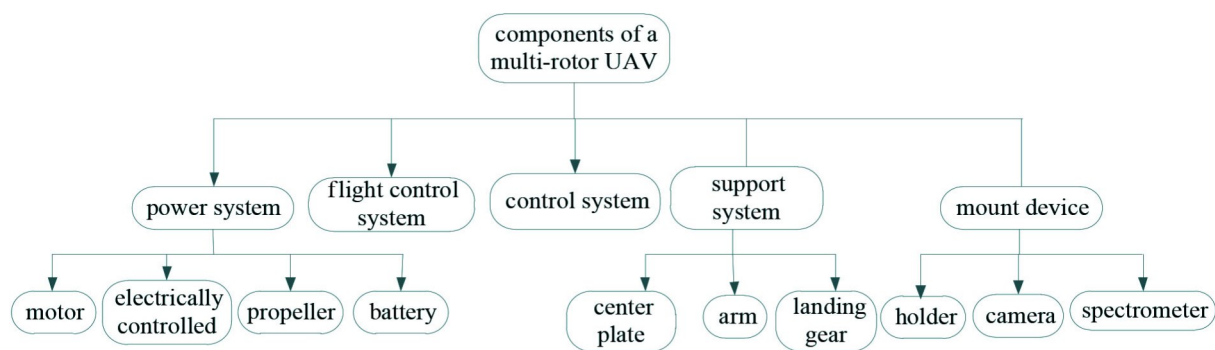


图 1 多旋翼无人机主要组成

Fig. 1 Compositions of multi-rotor UAV

无人机云台用于控制光谱仪镜头的观测方向, 技术参数如表 2 所示, 其中角度抖动量优于  $\pm 0.02^\circ$ , 可以更好地保证无人机悬停测量时的精度。

#### 2.2 可见-短波红外光谱仪

探测单元是可见-短波红外光谱仪的核心部分。为满足 400~1700 nm 连续光谱观测, 光谱仪采用平场凹

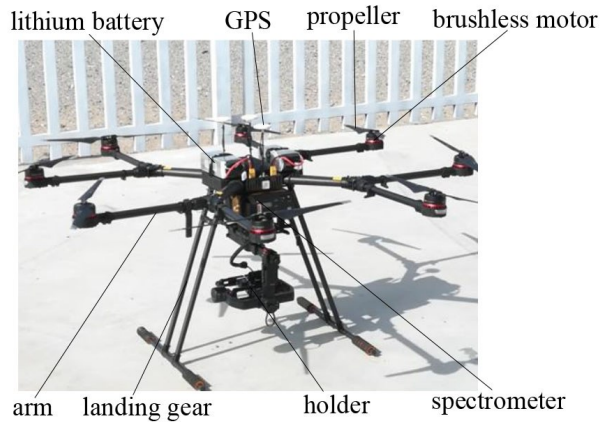


图2 多旋翼无人机实物图

Fig. 2 Photo of multi-rotor UAV

表1 多旋翼无人机技术参数

Table 1 Technical parameters of multi-rotor UAV

Type	Parameter
Load weight/kg	10
Hover precision/m	Vertical: $\pm 0.5$ , horizontal: $\pm 1.5$
Maximum Angle/ $^{\circ}$	25
Maximum wind speed/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	8
Maximum level flying speed/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	12 (Windless environment)
Operating environment temperature/ $^{\circ}\text{C}$	$-10 \sim 40$

表2 云台技术参数

Table 2 Technical parameters of cradle head

Type	Parameter
Weight/kg	2.77
Load weight/kg	4.5
Operating environment temperature/ $^{\circ}\text{C}$	$-15 \sim 50$
Angle jitter/ $^{\circ}$	$\pm 0.02$

面光栅分光 and 光电二极管阵列探测的方式。结合光栅和探测器的光谱特性,可见-短波红外光谱仪采用了可见近红外波段 (VNIR)、短波红外波段 (SWIR) 两个探测单元,分别覆盖  $400 \sim 900 \text{ nm}$  和  $900 \sim 1700 \text{ nm}$ ,有效扩展了探测光谱范围,保证了观测的精度,提高了系统的利用率。两个探测单元分别采用 512 通道硅光电二极管阵列和 256 通道 InGaAs 阵列探测器。

为保证光谱仪整体结构的稳定性和便携性,探测单元采用全框体密封设计,并对框体进行了轻量化设计。两个探测单元采用单独封闭设计,有利于保证各自的光学性能。两个探测单元均以平场凹面光栅进行色散,同时实现光谱分光和成像,有利于光机系统的小型化和稳定性<sup>[13]</sup>。平场凹面光栅分光原理图如图 3 所示,仪器的三维建模和实物图如图 4 所示。

在 VNIR 波段选用光栅的具体参数见表 3。根据光栅参数计算,确认该光栅光谱覆盖范围及仪器所能达

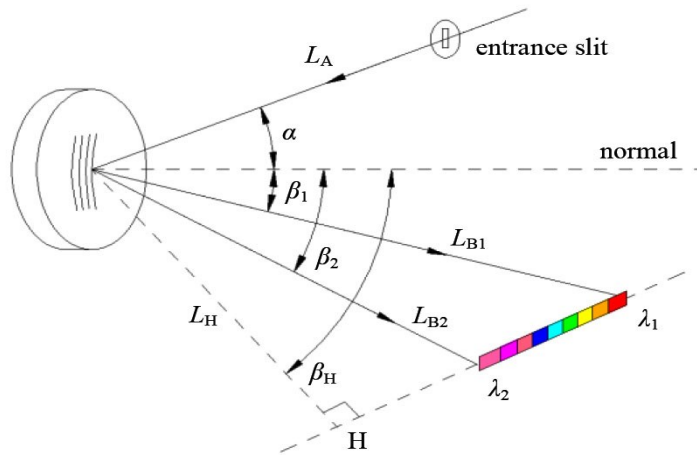


图 3 平场凹面光栅分光原理图

Fig. 3 Spectroscopic principle diagram of flat-field concave grating

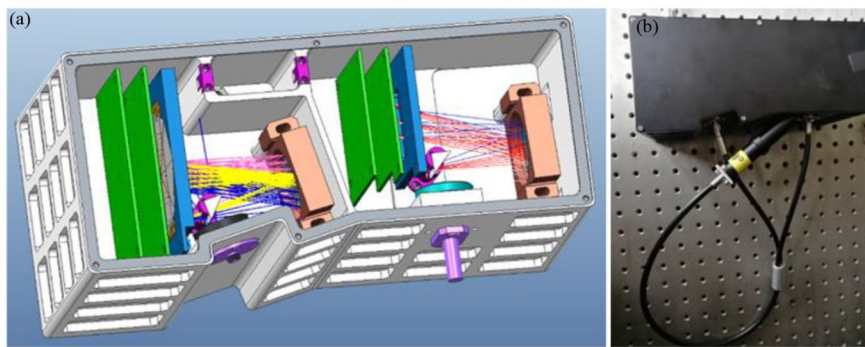


图 4 可见-短波红外光谱仪。(a) 三维建模; (b) 实物

Fig. 4 Visible-short-wave infrared spectrometer. (a) 3D modeling; (b) physical photo

到的分辨率均可以满足仪器设计要求。与光栅参数相适应, VNIR 波段选择硅光电二极管阵列。对于光谱仪器来说, 狭缝的宽度直接影响仪器的光谱分辨率。VNIR 单元的 F 数 (F#) 为 2.2。根据光栅的平均线色散参数和探测器像元宽度, 设计狭缝宽为  $50\ \mu\text{m}$ , 采用不锈钢材料加工并镀黑镍处理, VNIR 单元的光谱分辨率优于  $3\ \text{nm}$ 。探测单元的消杂光主要包括空间杂散光和光谱杂散光, 其中空间杂散光的消除措施为结构件黑色氧化处理和消杂光光阑设计。光谱杂散光的消除措施为在探测器前置消二级光谱滤光片, 消杂光光阑及消二级光谱滤光片位置如图 5 所示。

SWIR 探测单元光谱覆盖范围为  $900\sim 1700\ \text{nm}$ , 选用的光栅参数如表 4 所示。根据光栅的线色散参数和 InGaAs 阵列探测器参数, 设计狭缝宽度为  $150\ \mu\text{m}$ , 其光谱分辨率优于  $12\ \text{nm}$ 。该探测单元空间杂散光的消除措施同 VNIR 探测单元。由于该探测单元所使用的探测器响应的最低波长达到  $750\ \text{nm}$  左右,  $750\sim 900\ \text{nm}$  之间的光束进入光谱模块后最终也会形成杂散光由探测器探测, 因此  $900\ \text{nm}$  以下的光束需要尽量滤除。SWIR 探测单元光谱杂散光的消除措施为在入射狭缝前放置带通光谱滤光片, 用来过滤  $900\ \text{nm}$  之前的光辐射, 如图 6 所示。

表 3 VNIR 单元光栅参数

Table 3 Grating parameters of VNIR unit

Type	Parameter
Spectral range/nm	400~1000
F#	2.2
Scribed line density/(gr·mm <sup>-1</sup> )	310.5
Spectral width/(k·mm <sup>-1</sup> )	12.7
Average dispersion(nm·mm <sup>-1</sup> )	47.2

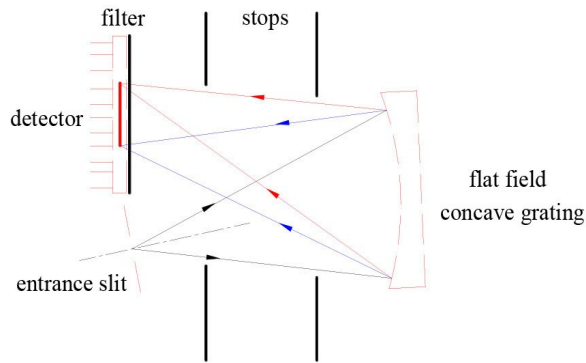


图 5 VNIR 单元消杂光光路图

Fig. 5 Stray light path of VNIR unit

表 4 SWIR 单元光栅参数

Table 4 Grating parameters of SWIR unit

Type	Parameter
Spectral range/nm	850~1700
F#	2.2
Scribed line density/(gr·mm <sup>-1</sup> )	221
Spectral width(k·mm <sup>-1</sup> )	12.7
Average dispersion(nm·mm <sup>-1</sup> )	67

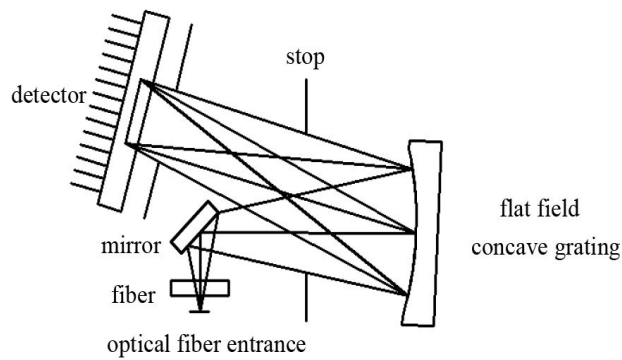


图 6 SWIR 单元消杂光光路图

Fig. 6 Stray light path of SWIR unit

### 3 基于无人机的BRDF测量

#### 3.1 BRDF测量试验

敦煌辐射校正场位于我国甘肃省敦煌市西侧,向南70~80 km为阿尔金山脉,为党河发源地。其地理坐标为40.04° N~40.28° N和94.17° E~94.5° E,东西长约60 km,南北长约40 km<sup>[1]</sup>。安光所于2019年8月利用无人机测量系统对敦煌辐射校正场进行了地表方向特性测量试验。

多旋翼无人机搭载可见-短波红外光谱仪进行BRDF测量的示意图如图7和图8所示。试验所使用的漫反射参考板由安光所提供,其方向半球反射比和反射比因子数据通过实验室定标获得。测试的具体步骤为:1)无人机起飞前,光谱仪测量地面的漫反射参考板;2)无人机搭载光谱仪从地面原点P起飞至最高点O( $h=40$  m),云台控制10°视场镜头使其测量天顶角 $\theta=0^\circ$ ;3)降低无人机高度,改变云台角度和飞行半径,完成方位角 $\varphi=0^\circ$ 、天顶角 $\theta=10^\circ$ 处的悬停测量;4)保持该飞行半径和测量天顶角 $\theta=10^\circ$ ,依次完成方位角 $0^\circ\sim 330^\circ$ 的测量,间隔为 $30^\circ$ ;5)重复步骤4),依次完成天顶角 $0^\circ\sim 40^\circ$ 的测量,间隔为 $10^\circ$ ;6)无人机返回地面起飞原点,再次测量地面的漫反射参考板。无人机在一轮BRDF测量过程中,其飞行航线结构共有4层,每一层采用多边形飞行航线,包含12个方位角测量悬停点,每一层均从方位角为 $0^\circ$ 处顺时针飞行。

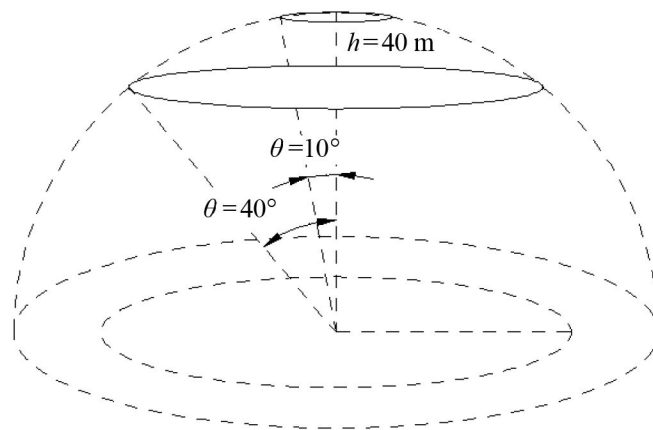


图7 无人机BRDF测量航线层次结构

Fig. 7 UAV BRDF measurement route hierarchy

#### 3.2 数据处理

选取2019年8月30日(天空晴朗无云)的测量数据,对无人机飞行1个架次所采集的49个点的反射率数据进行处理,如图9所示。对测量数据进行BRF计算后,选取554、857、1242 nm三个波长点和 $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $45^\circ$ 附近三个太阳天顶角的数据,计算出相应波长点和相应太阳天顶角处的方向反射比三维分布曲面,如图10所示。图10(a)、(b)、(c)分别为波长554、857、1242 nm在 $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $45^\circ$ 太阳天顶角下方向反射比三维分布曲面图, $x$ 和 $y$ 轴表示观测天顶角, $z$ 轴表示方向反射比(BRF)的大小。结合图10中554、857、1242 nm三个波长点处的反射率分布可以发现,在不同波长点和不同太阳天顶角(SZA)条件下,敦煌辐射校正场的BRF关于太阳方位面是近似对称分布的,对称平面两侧起伏较小,该数据结果表明了敦煌辐射校正场地表平坦均一的特性。

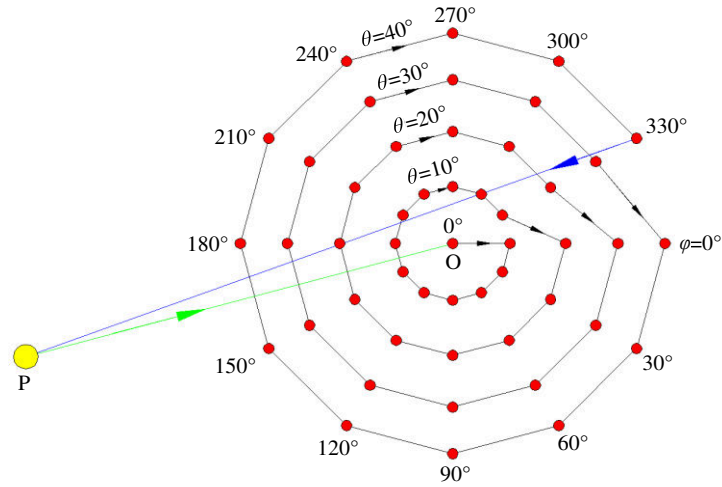


图8 无人机BRDF测量多边形航线

Fig. 8 Measurement of polygonal route by UAV BRDF

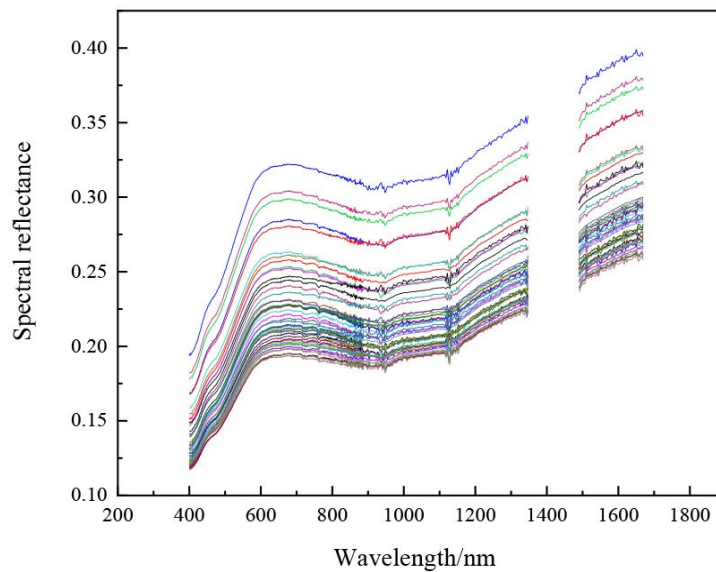


图9 敦煌辐射校正场BRDF反射率数据

Fig. 9 BRDF reflectivity data of Dunhuang test site

## 4 结论

为提高BRDF测量系统的便携性和高效性,安光所研制了基于多旋翼无人机的BRDF测量系统的研制,其光谱范围覆盖可见-短波红外波段(400~1700 nm)。测量系统主要由多旋翼无人机和可见-短波红外光谱仪组成。BRDF测量系统的测量精度主要受高精度无人机云台转动精度和可见-短波红外光谱仪的测量精度影响。为验证基于多旋翼无人机的BRDF测量系统的综合性能,利用该测量系统对敦煌辐射校正场进行了地表方向特性测量。试验结果表明,该便携式测量系统可以大大提高BRDF的测量效率,为BRDF测量的未来发展提供了有益参考。由于基于多旋翼无人机的BRDF测量精度不仅与光谱仪自身、无人机和云台的控



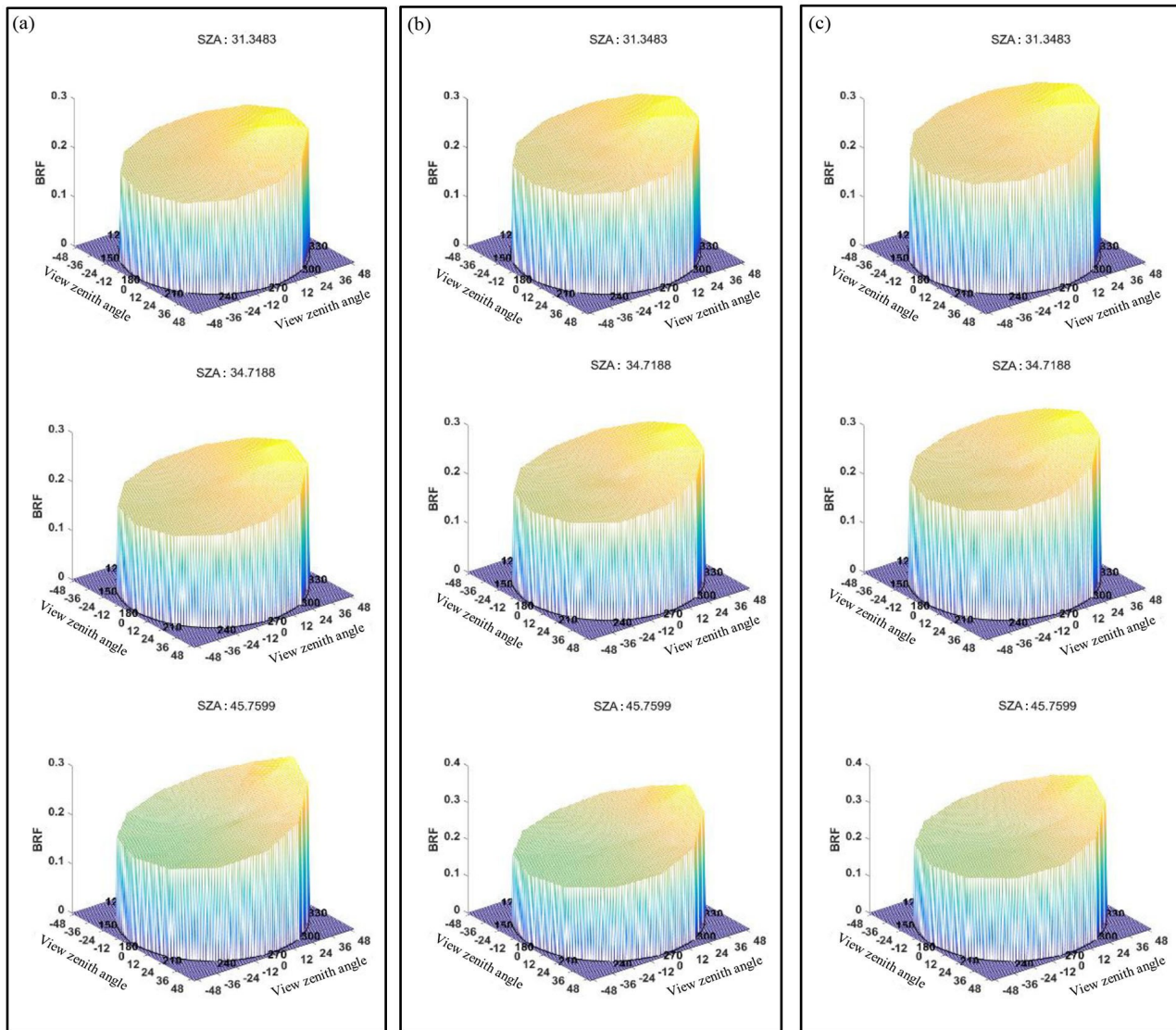


图 10 2019年敦煌辐射校正场 BRF 分布。(a)  $\lambda = 554 \text{ nm}$ ; (b)  $\lambda = 857 \text{ nm}$ ; (c)  $\lambda = 1242 \text{ nm}$

Fig. 10 BRF distribution of Dunhuang test site in 2019. (a)  $\lambda = 554 \text{ nm}$ ; (b)  $\lambda = 857 \text{ nm}$ ; (c)  $\lambda = 1242 \text{ nm}$

制精度有关, 而且受环境因素 (如风力大小) 影响也较大。本研究探讨的主要是基于多旋翼无人机的 BRDF 测量系统的便携性和高效性, 其测量精度分析有待开展进一步研究。

参考文献:

[1] Liang S L. *Quantitative Remote sensing of Land Surfaces* [M]. Fan J W, Transl, Beijing: Science Press, 2009: 130-141.  
 (美) 梁顺林. 定量遥感 [M]. 范闻捷, 译. 北京: 科学出版社, 2009: 130-141.

[2] Biggar S F. *In-Flight Methods for Satellite Sensor Absolute Radiometric Calibration* [D]. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona, 1990.

- [3] Zhang Q, Li X, Zhang Y N, *et al.* Opto-mechanical design and thermodynamic finite element analysis of automatic multi-band solar radiometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(4): 177-187.  
张权, 李新, 张艳娜, 等. 自动多波段太阳辐射计光机设计及热力学有限元分析 [J]. 光子学报, 2019, 48(4): 177-187.
- [4] Li X, Zheng X B, Yin Y P. Progress in automated site vicarious calibration technologies [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(1): 17-21.  
李新, 郑小兵, 尹亚鹏. 场地自动化定标技术进展 [J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(1): 17-21.
- [5] Han Q J, Liu L, Fu Q Y, *et al.* Vicarious calibration of multiple sensors based on reanalysis data of pseudo-invariant site [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 323-329.  
韩启金, 刘李, 傅俏燕, 等. 基于稳定场地再分析资料的多源遥感器替代定标 [J]. 光学学报, 2014, 34(11): 323-329.
- [6] Li Y, Rong Z G, Zheng Z J, *et al.* Post launch site calibration of visible and near-infrared channels of FY-3A visible and infrared radiometers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(12): 2966-2974.  
李元, 戎志国, 郑照军, 等. FY-3A 扫描辐射计的可见近红外通道在轨场地定标 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2966-2974.
- [7] Li X Y, Gu X F, Yu T, *et al.* Enhanced radiometric calibration coefficients for CCD camera by considering BRDF of calibration sites [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 636-643.  
李小英, 顾行发, 余涛, 等. 考虑地物 BRDF 特性改进后的 CBERS-02 卫星 CCD 相机的辐射定标系数 [J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 636-643.
- [8] He J T, Lu Y H. The measurement and evaluation of bidirectional reflectance characteristics of Dunhuang radiative calibration site [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(4): 246-251.  
何积泰, 陆亦怀. 敦煌辐射校正场方向反射特性测量与评价 [J]. 遥感学报, 1997, 1(4): 246-251.
- [9] Li X. *Development and Application of VNIR-SWIR Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) Measurement System* [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2008.  
李新. 可见-短波红外双向反射分布函数测量系统的研制与应用 [D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2008.
- [10] Li Y, Wu H Y, Rong Z G, *et al.* Field portable directional reflectance measurement system and its application [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(10): 2345-2351.  
李元, 吴浩宇, 戎志国, 等. 野外便携式方向反射比测量系统及其应用 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2345-2351.
- [11] Gu X F, Tian G L, Yu T. *Principle and Method of Radiation Calibration for Space Optical Remote Sensor* [M]. Beijing: Science Press, 2013: 74-75.  
顾行发, 田国良, 余涛. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 74-75.
- [12] Yu T Q, Wei W, Zhang Y N, *et al.* Analysis of the BRDF characteristics of Dunhuang radiometric calibration site in the spring [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6): 197-206.  
余谭其, 韦玮, 张艳娜, 等. 敦煌辐射校正场春季 BRDF 特性分析 [J]. 光子学报, 2018, 47(6): 197-206.
- [13] Zhang Q. *Development and Test of Site Reflectivity Observation System Based on Direct Method* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 33-34.  
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: 33-34.