文章编号:1001-5078(2019)07-0876-05

·光电技术与系统 ·

面阵摆扫型无人机载大视场高光谱成像技术研究

王义坤1,韩贵丞1,姚 波1,亓洪兴1,蔡能斌2

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室,上海 200083;

2. 上海市现场物证重点实验室,上海 200083)

摘 要:提出了一种面阵摆扫型无人机载大视场高光谱成像技术,控制基于马赛克型滤光片分 光的画幅式高光谱相机在翼展方向进行扫描实现大视场、高光谱分辨率成像。进行外场飞行 试验,获取了像质清晰的大视场、高光谱分辨率对地观测图像,飞行作业效率为 8.64 km²/h, 较单相机成像,作业效率提高约 3.4 倍。系统光机结构简单,体积、重量优势明显,在无人机高 光谱遥感方面应用前景广阔。研究成果对推动无人机载光谱成像技术向大视场、高光谱分辨 率方向发展具有一定的参考价值。

关键词:无人机;高光谱遥感;大视场高光谱分辨率;画幅式高光谱相机;翼展扫描 中图分类号:TN21 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2019.07.016

The research on wide-field hyperspectral imaging technology with UAV

WANG Yi-kun¹, HAN Gui-cheng¹, YAO Bo¹, QI Hong-xing¹, CAI Neng-bin²

 (1. Key Laboratory of Space Active Optical- Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
 2. Shanghai Key Lab. of Scene Evidence, Shanghai 200083, China)

Abstract: A technology of wide-field hyperspectral with unmanned aerial vehicle (UAV) was introduced, a frame hyperspectral camera, whose spectrophotometer was based on the mosaic filter, was used to scan in the direction of the wingspan to achieve wide-field and high spectral resolution image. An outfield flight test has done, which obtained wide-field and high spectral resolution observation image over the ground with high quality. The flight operation efficiency is 8. 64 km²/h, which is about 3. 4 times higher than the single camera imaging without scanning. With simple structure, obvious advantages in size and weight, the camera has a broad prospect in unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing. The results of research in this paper have a certain reference value in promoting unmanned aerial vehicle load imaging spectrometry to develop in the direction of wide field and high spectral resolution.

Key words: unmanned aerial vehicle; hyperspectral remote sensing; wide-field and high spectral resolution; frame hyperspectral cameras; scanning in the direction of the wingspan

基金项目:高分辨率对地观测系统重大专项青年创新基金项目(No. GFZX04061502);上海市现场物证重点实验室开放课题基金项目(No. 2014XCWZK06;No. 2015XCWZK06;No. 2016XCWZK22)资助。

作者简介:王义坤(1989 –),男,助研,博士,主要研究方向为航空遥感面阵摆扫宽幅成像。E-mail:wyk159@126.com 通信作者: 亓洪兴(1977 –),男,研究员,博导,博士,主要研究方向为航空遥感成像系统。E-mail:qhx@mail.sitp.ac.cn 收稿日期:2018-11-07

1 引 言

近年来,随着无人机应用的普及,大视场、高光 谱分辨率的无人机载高光谱成像技术在精细农业、 林业资源调查、矿物勘探以及地质分析与识别等领 域有着迫切的应用需求[1-3]。传统高光谱成像系统 一般采用面阵探测器在飞行方向进行推扫成像,进 而通过分光获取地物目标的高光谱分辨率遥感图 像。面阵探测器的空间维对应于翼展方向的一行地 物,将该行地物待探测波段的光谱信息通过棱镜或 光栅等分光器件分光到面阵探测器飞行方向光谱维 上实现高光谱成像^[4]。推扫型高光谱相机在积分 时间内只能获取一维空间数据和一维光谱数据,实 际飞行作业时需要配置惯性稳定平台进行主动姿态 修正,才能实现稳定的推扫成像^[4-5]。一方面,传统 推扫型高光谱相机受面阵器件规模的限制,成像视 场通常较小,无法满足无人机大视场的高作业效率 应用需求。另一方面,无人机的载重限制决定系统 不能使用稳定平台,并且无人机在空中的姿态又极 不稳定,导致推扫型成像数据后期很难拼接^[6]。

针对传统推扫型高光谱成像系统在无人机大视 场、高光谱遥感上应用受限的问题,本文提出了一种 面阵摆扫型无人机载大视场高光谱成像技术,利用 基于马赛克型滤光片分光的画幅式高光谱相机实现 高光谱分辨率成像,进而控制横滚环架带动画幅式 高光谱相机在翼展方向进行扫描实现大视场成像。 这种大视场高光谱相机的马赛克型分光器件直接制 作在面阵探测器上,不仅相机非常轻小,而且单次凝 视曝光成像即可同时获取二维空间的高光谱信息, 非常适用于姿态扰动较大的无人机高光谱遥感。

2 工作原理

2.1 基于集成滤光片分光技术的画幅式高光谱 相机

画幅式高光谱相机将滤光片轮、AOTF 或者集 成滤光片等分光器件直接放置在面阵探测器前端或 者表面,进而通过凝视曝光成像获取二维空间的高 光谱信息。画幅式高光谱相机与推扫型高光谱相机 的技术特点比较如表1所示。

在无人机姿态变化较大的前提下,画幅式高光 谱相机利用空间重叠率即可保证相邻帧的成像数据 能够顺利拼接,对姿态修正的要求不高,因此更适于 无人机应用。 表1 不同类型高光谱相机技术特点对比

Tab. 1 Technical feature comparison of

different type hyperspectral cameras

相机类型	推扫型 高光谱相机		画幅式 高光谱相机		
分光器件	色散 分光	傅里叶 变换	滤光 片轮	AOTF	集成 滤光片
光谱分辨率	高	高	低	高	中
积分时间	短	长	长	长	短
运动部件	无	有	有	无	无
后处理难度	中	大	中	中	小
体积重量	大	大	中	大	小
结构抗扰性	高	低	高	中	高
姿态敏感度	高	高	中	中	低

相比于滤光片轮分光和 AOTF 分光,基于集成 滤光片分光技术^[7]的画幅式高光谱相机具有积分 时间短、成像效率高、结构紧凑可靠、体积小、重量轻 等优点,是未来无人机载高光谱面阵相机的一个主 流发展方向。

如图1所示,基于集成滤光片分光技术的画幅 式高光谱相机利用放置在面阵探测器表面的楔形多 层膜介质干涉滤光片实现高光谱成像。面阵探测器 光谱维的每一行探测像元接收与滤光片透过波长相 对应的光谱带能量,所以单个干涉型滤光片即可覆 盖较宽的光谱范围。这种高光谱相机单次凝视成像 可以获取不同空间行对应的不同光谱信息,进而将 不同时刻探测器光谱维不同行的输出信号组合即可 得到每一个空间行的光谱信息。这种时空关系可以 应用于推扫型成像光谱仪或摆扫型成像光谱仪。





随着镀膜技术的提高,集成滤光片分光技术又 有了进一步发展,出现了马赛克型滤光片。如图 2 所示,滤光片以薄膜的形式镀在探测器的像元上,每 个马赛克型滤光片单元包含 N×M 个像元,单元内 部不同像元上镀中心波长各异的带通薄膜。采用该 种分光技术的画幅式高光谱相机不仅具有结构紧 凑,体积小,重量轻等优势,而且解决了二维空间信 息和目标波段所有光谱信息无法同时获取的难题。



图 2 马赛克型集成滤光片分光原理 Fig. 2 The spectral theory of mosaic integrated filter

比利时 IMEC 公司基于马赛克型滤光片分光技 术开发了一款画幅式面阵高光谱相机 - MOSAIC SNAPSHOT^[8],如图 3 所示。该相机的探测器采用 面阵规模为 2048 × 1088 的 CMOS 器件,其马赛克型 滤光片分为4 × 4(16 谱段)可见光滤光单元和5 × 5 (25 波段)近红外滤光片单元两种类型。可见光谱 段范围为 470 ~ 630 nm,近红外谱段范围为 600 ~ 1000 nm。可见光高光谱相机单波段面阵规模为 512 × 272 像素,近红外高光谱相机单波段面阵规模 为 409 × 216 像素。



图 3 Mosaic Snapshot 高光谱相机 Fig. 3 The mosaic snapshot hyperspectral camera

近红外画幅式高光谱相机成像效果如图4所示 (图中仅给出6波段的光谱图像),单次凝视曝光成 像即可同时获取指定二维空间25个波段的高光谱 信息。

2.2 大视场扫描成像原理

受面阵探测器器件规模和马赛克型滤光片分光 两个因素的制约,画幅式高光谱相机单波段的像元 数非常有限,成像视场较小,无法满足大视场的高飞 行作业效率应用需求。

控制画幅式高光谱相机沿翼展方向进行扫描能 够实现大视场、高光谱分辨率成像。大视场扫描成 像原理示意如图 5 所示,扫描一行时,画幅式高光谱 相机进行多次曝光成像实现翼展方向的大视场覆 盖,而飞行方向的大视场覆盖则由相机跟随载机的 前向飞行完成。



图4 不同波段的近红外高光谱相机成像效果

Fig. 4 NIR hyperspectral images in different bands



图 5 大视场成像原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of wide-field imaging principle

3 系统实现

本文提出的新型大视场高光谱相机的光机结构 示意如图6所示,画幅式高光谱相机垂直安装于横滚 环架上,实现高光谱分辨率对地成像;横滚环架可以 绕横滚轴转动,带动画幅式高光谱相机沿翼展方向扫 描实现大视场成像。系统技术指标如表2所示。

系统实现框图如图 7 所示,光机头部为本文提 出的新型大视场高光谱相机,通过翼展方向的扫描 实现大视场、高光谱分辨率成像;电控部分实现整机 的电子学控制,其中控制驱动模块控制横滚环架的 翼展扫描运动以及画幅式高光谱相机的外触发曝光 成像,单板计算机作为上位机负责存储画幅式高光 谱相机获取的地物数据,电池则负责为系统供电。



图 6 系统光机结构示意图 Fig. 6 Schematic diagram of the system optical-mechanical structure

表2 系统技术指标

Tab. 2 The system technical specifications

相机类型	画幅式面阵高光谱相机		
谱段范围/nm	600 ~ 1000		
波段数	25		
光谱分辨率/nm	< 15		
单波段像元数	409 × 216		
角分辨率/mrad	1.1		
空间分辨率	16.5 cm@150 m		
	25.8		
总视场/(°)	90		
重叠率	20 %		
适应速高比	不大于 0.063		
尺寸/mm	$300 \times 200 \times 250$		
重量/kg	3		



4 试验及分析

2017年6月,在太仓市进行了旋翼无人机载外 场飞行试验,无人机飞行速度为8 m/s,飞行高度 150 m,试验现场照片如图8所示。





外场飞行试验获取了像质清晰的大视场、高光 谱分辨率对地观测图像,飞行数据的大视场拼接处 理效果如图9(a)所示。根据飞行参数以及总视场可 以算出,翼展方向的幅宽覆盖为300 m,可以实现 8.64 km²/h的大面积探测,相比于单相机成像 1.98 km²/h的探测面积,飞行作业效率提高约3.4 倍。

图 9(b) 是图 9(a) 中方框区域对应的单帧高光 谱图像,该图像像质清晰,地物细节丰富,甚至可以 分辨出高压电线。图像既包含二维空间信息,又包 含目标波段的所有光谱信息。

根据马赛克型滤光片的几何分布关系,对图9(b)所示的单帧高光谱图像进行解算,获取了同时 包含二维空间数据和一维高光谱数据的三维数据立 方体,如图9(c)所示。





5 结束语

针对传统推扫型高光谱成像系统不适用于无 人机大视场、高光谱遥感应用的问题,本文提出了 一种新型的大视场高光谱相机,描述了系统实现 方法,并进行外场飞行试验,获取了像质清晰的大 视场、高光谱分辨率对地观测图像,飞行作业效率 为8.64 km²/h,相比于单相机成像每小时1.98 km²/h 的探测面积,飞行作业效率提高约3.4 倍。由于马赛 克型分光器件直接制作在面阵探测器上,上述新型 大视场高光谱相机具有光机结构简单、重量轻和体 积小等优点,并且可以单次凝视曝光同时获取二维 空间的三维数据立方体(二维空间数据和一维高光 谱数据),在无人机高光谱遥感领域具有一定的推 广应用价值。

参考文献:

- [1] Sheng Hu, Chao Haiyang, Coopmans C., et al. Low-cost UAV-based thermal infrared remote sensing: Platform, calibration and applications [J]. IEEE Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA), 2010:38 - 43.
- [2] LI Xiangdi, HUANG Ying, ZHANG Peiqing, et al. Infrared imaging system and applications [J]. Laser & Infrared, 2014,44(3):229-230. (in Chinese)

李相迪,黄英,张培晴,等. 红外成像系统及其应用 [J]. 激光与红外,2014,44(3):229-230.

- [3] Derick M Cochrane, Paul A Manning, Tim A Wyllie. Uncooled thermal imaging sensor for UAV applications [C]. Infrared Technology and Applications XXVII. Proc. SPIE, 2001,4369:168 – 177.
- [4] SHAO Hui, WANG Jianyu, XUE Yongqi. Key technology of pushbroom hyperspectral imager(PHI)[J]. Journal of remote sensing, 1998, 2(4):251-254. (in Chinese) 邵晖, 王建宇, 薛永祺. 推帚式超光谱成像仪(PHI)关键技术[J]. 遥感学报, 1998, 2(4):251-254.
- [5] WANG Jianyu, SHU Rong, et al. Introduction to imaging spectrum techniques [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
 王建宇,舒嵘,等.成像光谱技术导论[M].北京:科学出版社,2011.
- [6] GE Mingfeng, QI Hongxing, WANG Yikun, et al. Hyperspectral imaging remote sensing technology based on lightweight unmanned helicopter platform[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (11): 3402 – 3407. (in Chinese)

葛明锋, 亓洪兴, 王义坤, 等. 基于轻小型无人直升机 平台的高光谱遥感成像系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3402 - 3407.

- [7] DUAN Weibo, LI Daqi, YU Deming, et al. Design and fabrication of an integrated order blocking filter for hyperspectral imaging system[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(4): 430 - 434. (in Chinese) 段微波,李大琪,余德明,等. 一种用于超光谱成像系 统中消高级次光谱集成滤光片的设计与研制[J]. 红 外与毫米波学报, 2016, 35(4): 430 - 434.
- [8] Imec. Hyperspectral snapshot mosaic impader[R]. Shanghai:Isuzu Optics Corp,2015.