

基于 PGP 型自校正成像光谱仪系统设计与研究

薛庆生*, 王楠, 杨柏

中国海洋大学信息科学与工程学部, 山东 青岛 266100

摘要 针对现有无人机(UAV)载高光谱成像仪存在的技术问题,设计一种紧凑型可见近红外成像光谱系统。首先采用成像光谱仪与面阵相机共光路一体化进行设计,然后利用高帧频面阵图像来反演相机的位置和姿态参数,最后对同步获取的推扫高光谱图像进行高精度的空间信息校正。该系统的工作范围为 400~1000 nm,幅宽方向的视场为 43.6°,飞行方向的视场为 20.0°,焦距为 13 mm,光谱分辨率优于 2.5 nm。利用 ZEMAX 软件对系统进行优化设计和分析,其中光谱仪部分采用棱镜-光栅-棱镜型(PGP)的设计,具有质量轻、成本低和资源利用率高的特点。

关键词 光学设计; 成像光谱仪; 棱镜-光栅-棱镜; 系统设计; 几何校正

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2322001

Design and Research of Self-Correcting Imaging Spectrometer System Based on PGP

Xue Qingsheng*, Wang Nan, Yang Bai

Department of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract Aiming at the technical problems of existing unmanned aerial vehicle (UAV)-borne hyperspectral imagers, a compact visible near infrared imaging spectral system is designed. First, an imaging spectrometer and a plane array camera are integrated to design the common optical path. Then, the high frame frequency plane array image is used to invert the position and attitude parameters of the camera. Finally, the high-precision spatial information correction is carried out for the synchronously obtained push and sweep hyperspectral image. The system has a working range is 400–1000 nm, a field of view is 43.6° in the width direction, a field of view is 20.0° in the flight direction, a focal length is 13 mm, and a spectral resolution is better than 2.5 nm. ZEMAX software is used to optimize the design and analysis of the system, and prism-grating prism (PGP) design is used for the spectrometer, which has the characteristics of light weight, low cost, and high resource utilization.

Key words optical design; imaging spectrometer; prism grating prism; system design; geometric rectification

OCIS codes 220.4830; 100.4145; 080.2740

1 引言

高光谱遥感技术是当今遥感领域中最重要且发展最快的研究技术之一,随着高光谱技术的发展,更小、更轻的传感器不断出现,这些传感器目前可以集成在无人机(UAV)系统中,用于科学或商业目

的^[1-4]。基于无人机的高光谱成像技术是一种相对较新的遥感技术,可以获取高光谱分辨率且图谱合一的数据,其近地光谱突破了分辨率、信噪比和传统卫星或机载平台云量的限制,可以满足广泛的民用需求,包括大气、海洋、农林、地质矿产环境保护和资源调查等诸多领域。对于这些应用及研究而言,图

收稿日期: 2021-05-07; 修回日期: 2021-05-26; 录用日期: 2021-06-16

基金项目: 中国科学院海洋大科学研究中心重点部署项目(COMS2019J04)、中央高校基本科研业务费专项(202065004)、山东省重点研发计划(2020CXGC010706)、国家自然科学基金(U2006209,41575023)、吉林省科技发展计划(20190302083GX)、国家重点研发计划(2019YFC1408300, 2019YFC1408301, 2018YFF01011003)、中国工程院咨询研究项目(2020-XZ-5)

通信作者: *xueqingsheng@ouc.edu.cn

像的精确几何校正至关重要^[5-7]。

无人机在数据采集的过程中不可避免地产生机械抖动和飞行偏差,又难以配置昂贵且高精度的 POS(Position and Orientation System)。无人机在获取数据的过程中不可避免地产生几何畸变,而高光谱成像系统通常基于推扫模式来捕获场景(通过平台沿轨运动期间探测器的多次曝光来实现场景覆盖),其几何保真度对无人机平台的姿态和位置变化极为敏感^[8-10]。无人机在成像的过程中,由于受到飞行运动和气流的影响,俯仰、横滚和偏航方向的每一个微小变化都会被记录到数据中,因此获取的高光谱数据存在较大的几何畸变,这种畸变会严重影响图像质量,有时甚至造成图像无法目视判读,严重影响影像的正常应用。高光谱成像系统具有代表性的产品包括芬兰 Specim 以及美国 Headwall Nano 等,这类设备具有波段数多和光谱信息丰富等优点。然而,无人机在工作过程中不可避免地存在几何校正问题,即基于无人机的高光谱成像系统的普遍困境^[11]。

本文开发一种基于 PGP (Prism-Grating-Prism) 的紧凑型可见近红外成像光谱系统,该系统具有自动几何校正的功能,可以将其安装在无人机上进行超宽范围的高光谱成像。采用成像光谱仪与面阵相机共光路一体化的设计,可实现高光谱图像和面阵相机图像的实时同步获取,利用高频率、大重叠率的面阵图像来反演无人机平台姿态,进而对同步获取的高光谱图像空间信息进行校正,可以提高低质量无人机导航数据下高光谱图像的几何校正效果,有效解决光谱图像的几何畸变问题,而且装调简单,结构紧凑,系统的总质量达到 1.5 kg,这是一种适用于小型无人机搭载的新型高光谱成像遥感系统。

2 基本原理

2.1 无人机载成像光谱仪设计

本文针对无人机平台的特点,开展紧凑直视型成像光谱仪与面阵相机共光路一体化的设计研究,方案如图 1 所示。在大视场、短焦距的设计约束下,采用望远像面刀口刚性分割视场的设计方案,利用高频面阵图像来反演相机的位置和姿态参数,再对同等条件下的线推扫式光谱图像进行高精度的空间信息校正。PGP 型自校正成像光谱仪的整体质量小于 2 kg,系统中采用 PGP 直视色散型光谱仪,使用的体相全息(VPH)光栅具有非常高的衍射效率

和成像质量,可以提高成像质量和系统的透射率,具有质量轻、成本低和资源利用率高的特点,信息获取能力比同类型产品优秀。

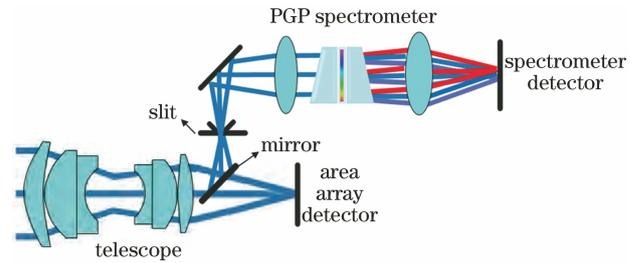


图 1 成像光谱仪与面阵相机共光路一体化设计的方案

Fig. 1 Integrated design scheme for common optical path of imaging spectrometer and array camera

面阵相机与成像光谱仪共用前置望远镜,减小了系统的体积和质量,增加了系统的结构刚度,提高了光谱仪和面阵相机的光轴稳定性,可以获得更高的几何校正精度。

2.2 PGP 分光元件

PGP 元件是基于 PGP 的光谱成像系统的核心部件,其结合了普通棱镜和体相全息布拉格衍射光栅的色散特性,在中心波长处可以实现光谱的直进直出。PGP 元件由棱镜、光栅基片、光栅、光栅保护玻璃和棱镜组成,其中光栅主要起到色散作用,衬底材料与棱镜相同。PGP 元件中使用的 VPH 光栅具有较高的光效率,这对于成像光谱仪的研制非常重要,其表面光洁,便于与棱镜粘合。体相全息布拉格衍射光栅如图 2 所示。

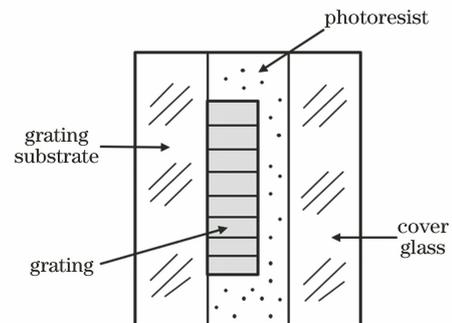


图 2 体相全息布拉格衍射光栅

Fig. 2 Volume phase holographic Bragg diffraction grating

棱镜和光栅的衍射光相对于入射光的偏转方向相反,但色散方向一致,因此将它们组合成折射衍射混合型元件可使某一波长的入射光和出射光的偏向角等于 0,从而构成直进直出、结构紧凑的分光器件。PGP 结构中成像光谱仪的工作原理如图 3 所示,从左到右依次为狭缝、准直透镜、PGP 分光元件、聚焦透镜和光谱面。成像镜头将目标成像于狭

缝上,进入光谱仪的光束首先经过准直物镜准直为平行光,再入射到 PGP 结构的第一块棱镜上,其中 λ_s 、 λ_c 和 λ_l 分别为最短波长、中心波长和最长波长。不同波长的光以不同的角度入射到体相全息光栅上,经过光栅分光后通过第二块棱镜,一级衍射的中心波长的光被偏折回光轴,从而实现光路共轴,最后经过成像物镜成像在探测器的焦平面上。这种管状直视(同轴)结构使得系统在空间和光谱方向上均具有较低的几何像差,进一步保证了光学性能^[12-14]。

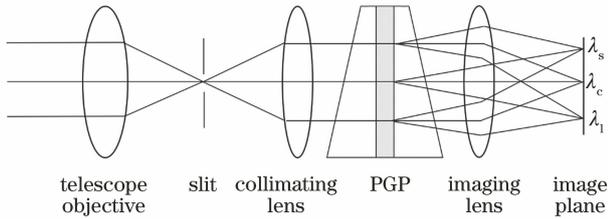


图 3 PGP 结构成像光谱仪的工作原理

Fig. 3 Working principle of PGP structure imaging spectrometer

2.3 设计指标

系统的光谱范围为 400~1000 nm,探测器选用 BASLER 公司生产的 CMOS-acA2040-25gmNIR, 像元大小为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$,分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,量子效率(典型)为 61.9%。可用区域大小为 $11.2 \text{ mm} \times 11.2 \text{ mm}$,光栅选用 Wasatch 透射型体相全息光栅,每 1 mm 的宽度有 360 条刻线,衍射级次为 +1 级,PGP 光谱仪实现 1:1 成像,狭缝长度为 11 mm,望远物镜的焦距为 13 mm, F 数为 2.5,主要的技术指标如表 1 所示,其中 NA 为数值孔径。

表 1 设计系统的技术指标

Table 1 Technical specifications of designed system

Specification	Value
Focal length /mm	13
F -number	2.5
Field of view /[(°)×(°)]	43.6×20.0
Focal length of imaging objective /mm	40
NA of imaging objective	0.2
Spectral range /nm	400—1000
Spectral resolution /nm	2.5
Image plane size of detector /(mm×mm)	11.2×11.2
Slit size /mm	11
System size /(mm×mm×mm)	$290 \times 100 \times 65$
Weight /kg	1.5

3 望远系统的优化设计

3.1 望远系统的设计方案

望远物镜采用折射式的设计方式,由于 PGP 分光系统采用对称结构,因此像差不是很大,成像质量在很大程度上取决于前置物镜的性能。采用刀口反射镜可将望远系统的总视场分为相互垂直的一个面视场和线视场,面视场由面阵相机接收,线视场作为光谱仪的入射狭缝,将望远系统作为共轴使用的前置望远系统。为了保证几何校正的精确性,实现望远系统与分光系统的光瞳匹配,采用像方远心设计可消除畸变和像面照度的均匀性等问题。以双高斯系统作为初始结构,可以留出足够的装调空间,能够优化控制后的截距。成像光谱仪与面阵相机的图像几何关系如图 4 所示。

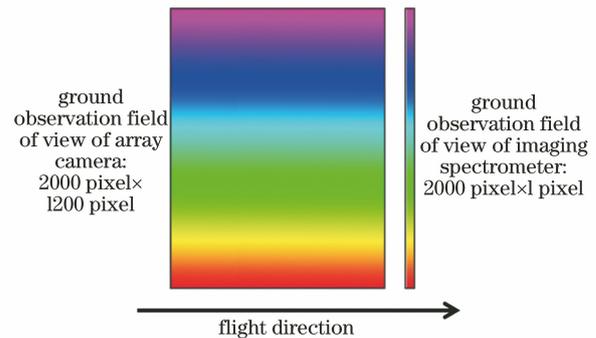


图 4 成像光谱仪与面阵相机的图像的几何关系

Fig. 4 Image geometry relationship between imaging spectrometer and array camera

3.2 设计结果及评价

折射式成像光谱仪的前置物镜与可见光物镜相比,其特殊之处在于透光波段较宽,存在很大的色差,这是设计的难点;通过角放大率选择、光焦度分配和相对孔径计算设计了共光路望远系统,设计结果如图 5 所示。

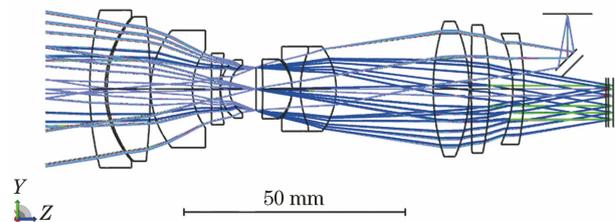


图 5 望远镜的光学结构示意图

Fig. 5 Schematic of optical structure of telescope

望远系统的性能如图 6 所示。通过 ZEMAX 光学设计软件对成像效果进行优化,从设计结果可以看出系统的色球差得到了较好的校正,畸变和像

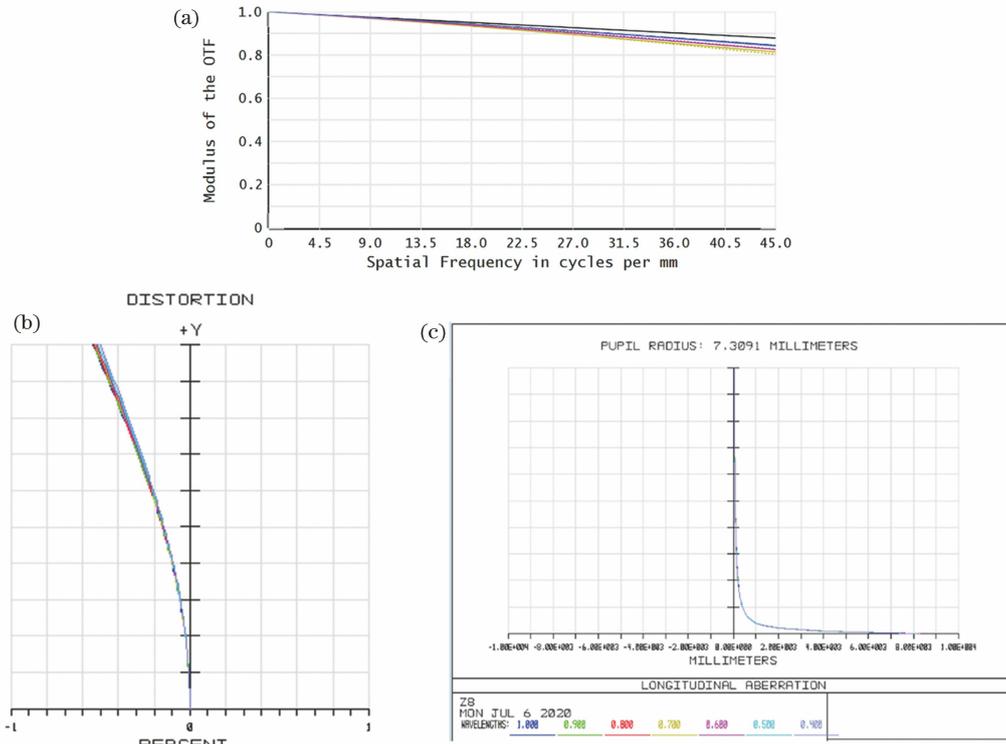


图 6 望远光学系统的设计结果。(a)望远光学系统的 MTF 曲线;(b)望远光学系统的畸变曲线;(c)望远光学系统的色差曲线
Fig. 6 Design results of telescopic optical system. (a) MTF curves of telescopic optical system; (b) distortion curves of telescopic optical system; (c) chromatic aberration curves of telescopic optical system

散得到了有效的控制。从图 6 可以看到,工作像素尺寸为 $11 \mu\text{m}$,由像素尺寸可得空间截止频率为 45 lp/mm 。曲线的调制传递函数(MTF)值在特征频率 45 lp/mm 处大于 0.75 ,满足前置望远镜成像质量的要求。

4 PGP 光谱仪设计

4.1 PGP 分光元件参数选择

通过光栅方程、棱镜折射定律以及光栅布拉格约束条件设计了光谱系统的初始结构;由工作光谱波长上下限的出射角与探测器光谱维宽度的关系确定了成像物镜的焦距;通过出射光角度明确了出射光谱的非线性。PGP 分光系统的核心是 PGP 分光元件,结构如图 7 所示。本文基于棱镜的折射原理和光栅的分光原理,建立一种基于 PGP 初始结构参数的设计方法,主要考虑的参数包括棱镜的材料、倾斜角、光栅的周期以及两块棱镜的顶角 β_1 和 β_2 ,上述参数是满足元件直射要求的重要参量^[15]。

为了使光线仍沿光轴出射,棱镜的倾斜角与光线出射角之间需满足 $\theta_5 = \beta_2$ 的条件。根据折射定律可知,棱镜倾斜表面上的入射角和出射角满足

$$\sin \beta_1 = n \sin \theta_1, \quad (1)$$

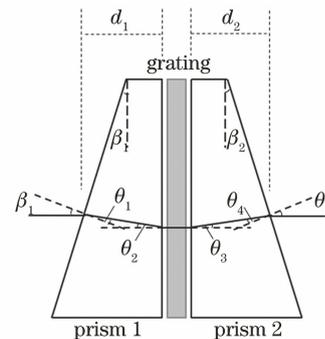


图 7 PGP 分光元件的结构

Fig. 7 PGP splitter structure

$$n \sin \theta_4 = \sin \theta_5, \quad (2)$$

式中: n 为折射率。根据三角几何关系,可得

$$\sin \beta_1 = n_\lambda \sin(\beta_1 - \theta_2), \quad (3)$$

式中: n_λ 为不同波长 λ 下棱镜玻璃的折射率。体全息相位光栅为非倾斜式透射光栅,光栅的传播矢量与胶面平行,且存在一个布拉格衍射角。当入射角与衍射角相等时,衍射效率达到最大,即满足布拉格衍射条件,表达式为

$$\theta_2 = \theta_3 = \arcsin(\lambda_c/2nd), \quad (4)$$

式中: d 为光栅常数。此时可以得到棱镜的倾斜角 β_1 为

$$\beta_1 = \arcsin\{n \sin[\beta_1 - \arcsin(\lambda_c/2nd)]\}. \quad (5)$$

非中心波长 λ 对应的出射角 β_λ 为

$$\beta_\lambda = \arctan\left(\frac{n_\lambda \sin \varphi}{n_\lambda \cos \varphi - 1}\right), \quad (6)$$

式中: φ 为相位。根据光谱范围、探测器光谱采样率、成像镜焦距等参量,以及系统的总体指标要求确

表 2 PGP 元件的参数

Table 2 PGP component parameters

Number of grating lines per 1 mm	Thickness of sinking bottom /mm	Prism material	Prism thickness / mm	Prism angle / (°)	Half height /mm
360	3	K9	5	13.95	15

4.2 成像物镜参数的设计

PGP 分光元件中的准直物镜和成像物镜均采用对称式设计,准直物镜为成像物镜的倒置形式。完全相同的结构参数简化了设计难度,降低了加工成本。整个光谱系统的像方和物方均为远心光路,像方远心光路能够有效消除边缘视场的渐晕现象,在像面上可以得到均匀的能量分布,物方远心光路可使 PGP 分光系统较为容易地与前置望远系统相连接。当谱面宽度一定时,可以根据光谱波长上、下限的出射角来推导出成像物镜焦距的大小,表达式为

$$f = h / [\tan(\beta_2 - \beta_s) + \tan(\beta_1 - \beta_2)], \quad (7)$$

式中:出射角 β_s 对应光谱的波长下限 λ_s ;出射角 β_1 对应光谱的波长上限 λ_1 ; h 为探测器的光谱维宽度。已知 CCD(Charge Coupled Device)的光谱维宽度为 11.2 mm,波长下限 1000 nm 对应的出射角 β_s 为 6.515°,波长上限 400 nm 对应的出射角 β_1 为 6.859°。由此可以计算出成像物镜的焦距为 40 mm,在实际设计过程中还要考虑到 VPH 光栅的有效通光孔径。

4.3 设计结果及评价

在 ZEMAX 软件中输入 PGP 元件的参数和成像镜的初始结构参数,按照设计要求对其进行设计优化。经过优化后的 PGP 成像光谱仪如图 8 所示,采用 2×2 像元合并的方式在满足系统空间分辨率的前提下可以提高系统的灵敏度。工作像素尺寸为 11 μm ,可得空间截止频率为 45 lp/mm。图 9 给出了全视场和全谱段对应的 MTF 曲线,MTF 值在 Nyquist 空间频率处达到 0.65 以上,设计结果满足技术指标的要求。

5 样机研制及性能测试

5.1 一体化设计及样机研制

完成望远物镜和光谱成像仪的优化设计后,将前置望远系统与光谱仪系统连接进行参数固化以组

定了光栅和棱镜的设计参数,PGP 的主要技术指标如表 2 所示。当采用对称设计时,两个棱镜的材料和参数相同,棱镜的宽度 d_1 和 d_2 与光线的直视性没有直接的关系,考虑到达到减轻质量和容易加工的目的,取适当值即可^[16-17]。

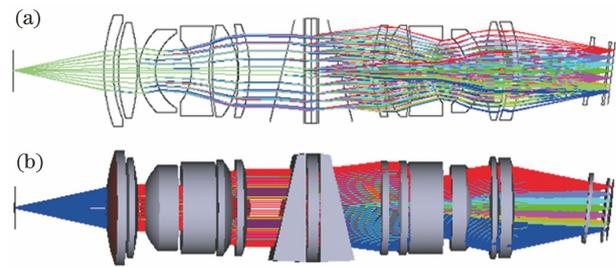


图 8 光谱成像系统光学结构示意图。(a) 2D 光学结构示意图;(b) 3D 光学结构示意图

Fig. 8 Schematic of optical structure of spectral imaging system. (a) 2D optical structure diagram; (b) 3D optical structure diagram

成 PGP 成像光谱仪全系统,光学结构如图 10 所示。图 11 为 PGP 成像光谱仪全系统的 MTF 曲线,可以看到在 45 lp/mm 频率处 MTF 值能够达到 0.5 以上。图 12 为系统均方根(RMS)波前差随波长的变化关系。装调过程中以中间 PGP 分光器件作为装调基准,这样可保证在光谱范围内中间波长的光束能够平行于光轴入射和出射。利用像面的倾斜参数和对焦参数作为补偿参数,最后完成装调。根据前述设计结果和工程实现方法研发了样机,研制的仪器实物照片如图 13 所示。

面阵相机与光谱仪需进行几何检校(当同视场入射时感光像元的配准)以获得更高的空间信息校正精度,为最终的几何校正提供基准标定数据链。自校正高光谱成像仪可以同时完成光谱成像探测器和全色面阵探测器的几何检校,极大程度简化了几何标定的基准传递链路,对成像光谱仪采用全谱段扫描法进行扫描。实验室中的光谱定标系统如图 14 所示。以氙灯作为单色仪的光源,光源经过单色仪分光之后进入成像光谱仪中,在探测器靶面上显示某个波段的空间分布。为了排除环境光线的干扰,整个定标实验在暗室中进行。在 PGP 元件中,两个棱镜主要起到光束偏折的作用,光栅主要起到

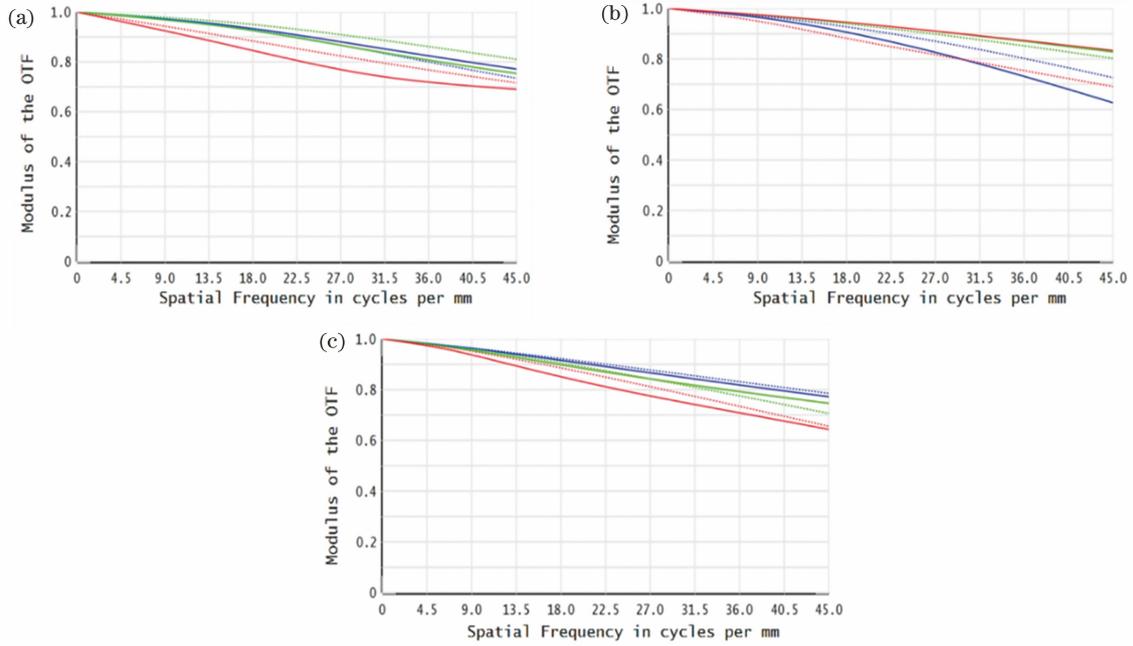


图 9 光谱成像系统在不同波段下的 MTF 曲线。(a) 400 nm; (b) 700 nm; (c) 1000 nm

Fig. 9 MTF curves of spectral imaging system in different bands. (a) 400 nm; (b) 700 nm; (c) 1000 nm

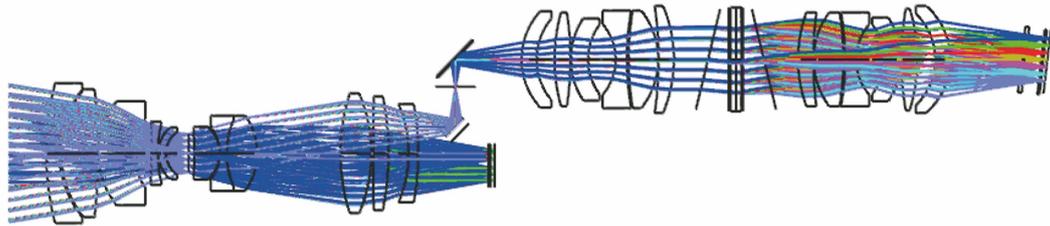


图 10 一体化光学结构示意图

Fig. 10 Schematic of integrated optical structure

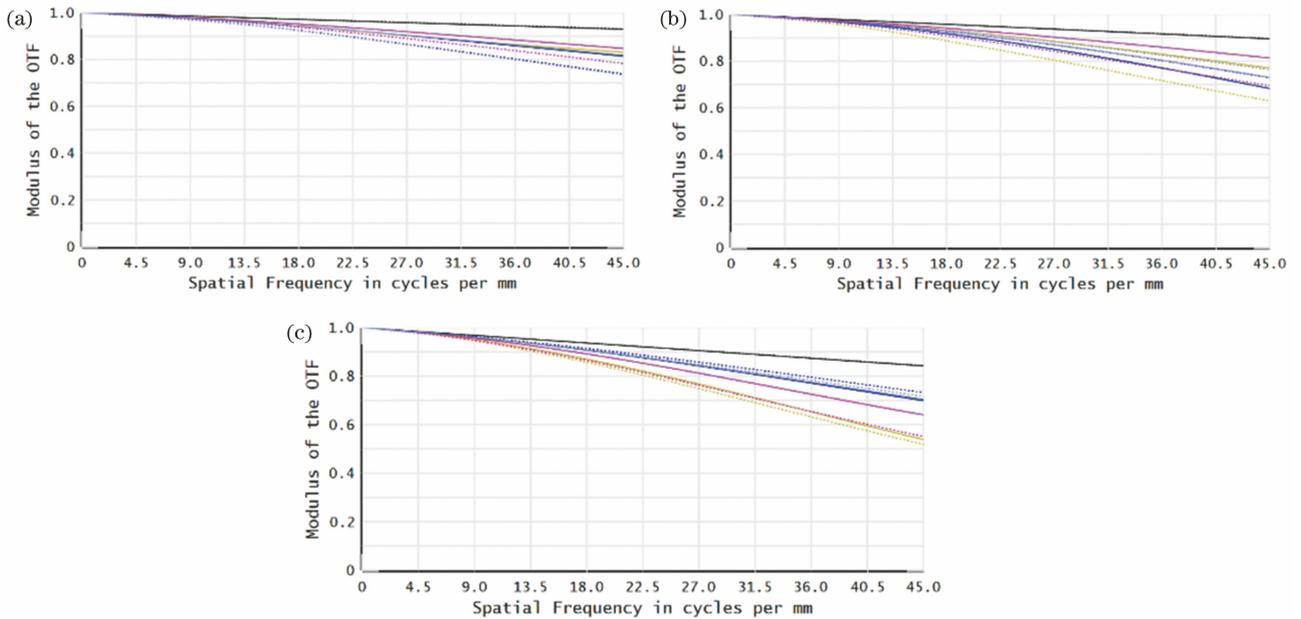


图 11 PGP 成像光谱仪全系统在不同波段下的 MTF 曲线。(a) 400 nm; (b) 700 nm; (c) 1000 nm

Fig. 11 MTF curves of PGP imaging spectrometer in different bands. (a) 400 nm; (b) 700 nm; (c) 1000 nm

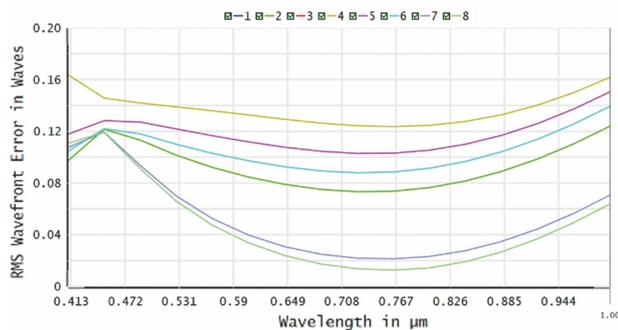


图 12 系统的 RMS 波前差随波长的变化关系

Fig. 12 RMS wavefront difference of system varies with wavelength

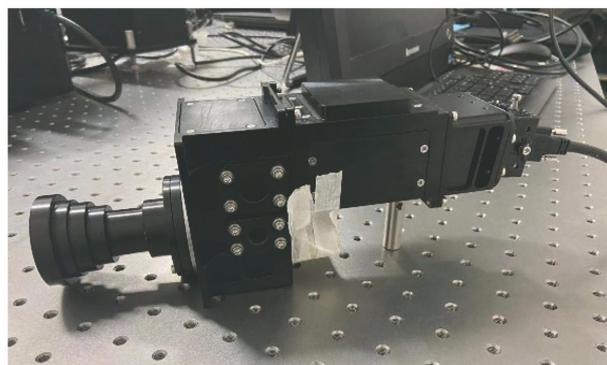


图 13 PGP 成像光谱仪的样机实物图

Fig. 13 Prototype of PGP imaging spectrometer

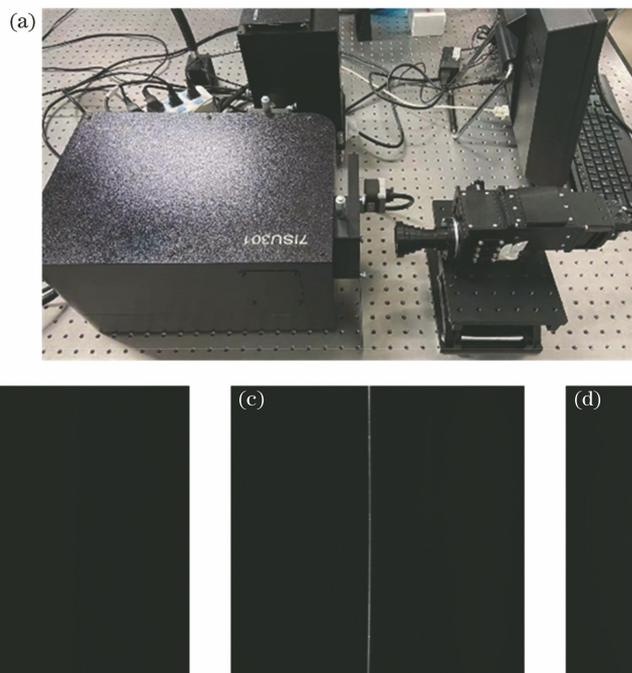


图 14 实验室的光谱定标。(a)实验室光谱定标；(b) 420 nm 谱线；(c) 680 nm 谱线；(d) 980 nm 谱线

Fig. 14 Spectral calibration in laboratory. (a) Laboratory spectral calibration; (b) 420 nm spectral line; (c) 680 nm spectral line; (d) 980 nm spectral line

色散的作用,这不可避免地存在二级光谱的影响,因此针对光栅所产生的光谱级次重叠问题提出了抑制方法。本文设计的光谱成像系统的光谱范围为 400~1000 nm,主要针对带内 400~500 nm 工作波段的二级光谱影响,将 400~500 nm 工作波段的二级光谱叠加在 800~1000 nm 工作波段处。通过在探测器或探测器窗口上镀膜前截止滤光片来消除二级和高级次光谱的影响,图 15 中的阴影部分为镀膜区域,400~1000 nm 波段的透射率大于 97%,截止滤光片的空间位置和覆盖范围如图 15 所示。在仿真软件中对滤光片的空间位置、覆盖面积和尺寸进行合理设置以满足实际的使用需求,并符合光学加工工艺的标准。

5.2 地面实验

对自校正高光谱成像仪的性能和定速飞行条件下的图像质量进行评价。实验地点是中国海洋大学信息科学与工程学院,试验环境为无风场干扰,光照均匀稳定。将仪器安装在电动旋转平台上以实现对外场场景大范围的扫描观测,用来模拟无人机在理想飞行状态下的光谱图像采集情况。测试现场范围约为 100 m(南北方向)至 250 m(东西方向)。图 16 为从光谱图像立方体中选择的 4 幅单色图,波长分别为 400,600,800,1000 nm。对采集的高光谱图像进行拼接,拼接后的图像效果如图 17 所示。因该仪器在定速模式下,所以成像稳定清晰,可以获得高质量的光谱图像,拼接图像质量理想。

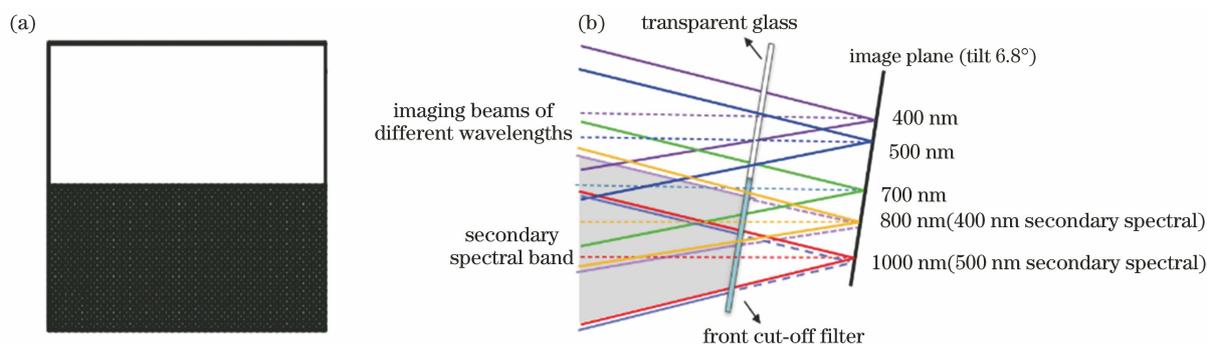


图 15 前截止滤光片。(a)示意图;(b)空间位置

Fig. 15 Front cut-off filter. (a) Schematic diagram; (b) spatial position

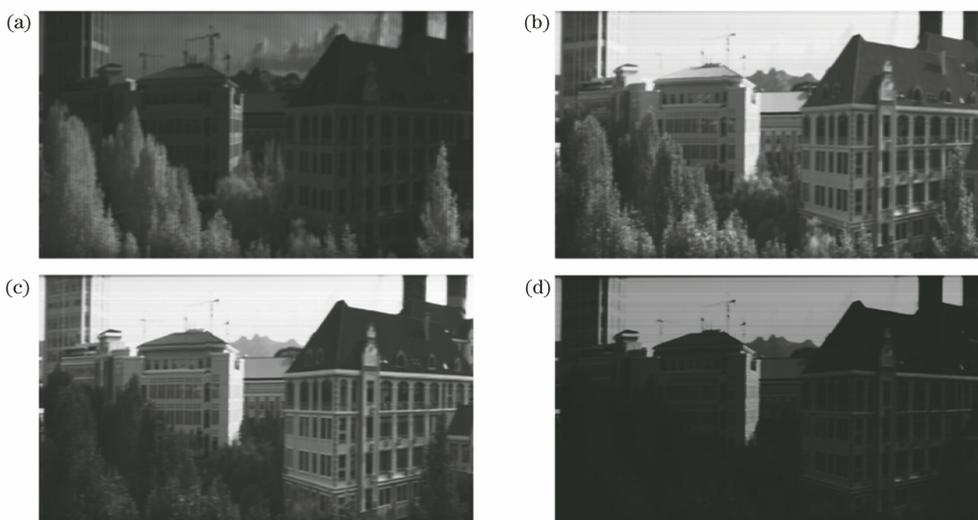


图 16 不同波段下的光谱图像。(a) 400 nm;(b) 600 nm;(c) 800 nm;(d) 1000 nm

Fig. 16 Spectral images of different bands. (a) 400 nm; (b) 600 nm; (c) 800 nm; (d) 1000 nm



图 17 拼接后的光谱图像

Fig. 17 Spectral image after stitching

图 18 为实验场景下高光谱图像的数据立方体和感兴趣区域的反射光谱曲线,在图像中选择窗、屋顶、墙壁和树叶区域处的光谱曲线。其中树叶在 550 nm 波段附近有一个较强的叶绿素反射峰,在 680 nm 波段附近有波谷,其为叶绿素吸收带,特征准确稳定,且与屋顶和墙壁的反射光谱差异显著。

6 高光谱图像的几何自校正

6.1 几何自校正流程

遥感信息的定量化研究是当前遥感发展的前

沿,对高光谱数据进行几何精校正处理可以实现对高光谱数据的精确地理编码,这是高光谱数据定量化应用的基础^[18]。在硬件设计方面,系统采用成像光谱仪与面阵探测器共光路一体化载荷的设计。在现有推扫型成像光谱仪的基础上集成一个高频、小型的面阵相机,实现光谱图像和面阵图像的同频率、同视场获取,而且保证了光谱图像和面阵图像在时间和空间上的严格配准。使用小型、低价的 POS 与面阵相机的组合来代替昂贵的高精度 POS,在数据处理和软件开发方面可以利用高频率、大重叠率的

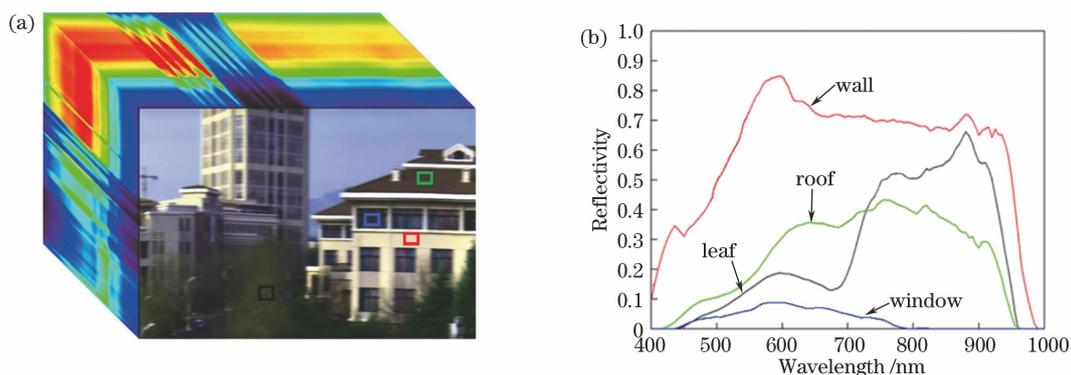


图 18 高光谱数据立方体和感兴趣区域的反射光谱曲线。(a)高光谱数据立方体;(b)感兴趣区域的反射光谱曲线

Fig. 18 Reflectance spectra of hyperspectral data cubes and regions of interest. (a) Hyperspectral data cube; (b) reflectance spectra of region of interest

面阵图像来反演无人机平台姿态,进而对同光路、同步获取的推扫高光谱图像进行几何校正,可以有效解决光谱图像的几何变形问题,最终集成一套软硬件一体化的新型自校正无人机高光谱遥感系统。图 19 为提出的高光谱图像几何自校正流程。

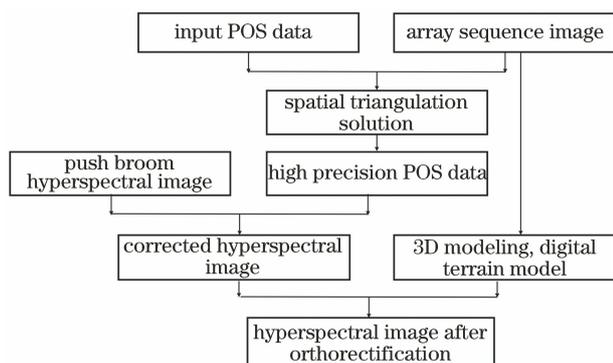


图 19 自动化几何校正的处理流程

Fig. 19 Automatic geometric correction process

面阵辅助光谱图像几何校正技术的主要流程如下。

- 1) 利用高频面阵图像来恢复相机的位置和姿态。
- 2) 利用恢复的高精度位置及姿态数据对推扫影像进行几何纠正。
- 3) 利用面阵图像来构建数字地面模型。
- 4) 对推扫影像进行正射纠正,从而实现不同条带影像区域的拼接。

6.2 几何自校正的实验与结果

利用图 19 的高光谱图像自校正处理流程对无人机现有的高光谱数据和 POS 数据进行几何校正。数据集由六旋翼无人机(DJI M600)搭载研制的高光谱系统来推扫获得,实验地点选在中国海洋大学信息科学与工程学院前的樱花大道。无人机的飞行

速度约为 2.5 m/s,飞行高度约为 50 m。图 20(a)为拼接后未校正的高光谱图像,可以看到图像中的道路和汽车几何变形严重,给判读带来困难。图 20(b)

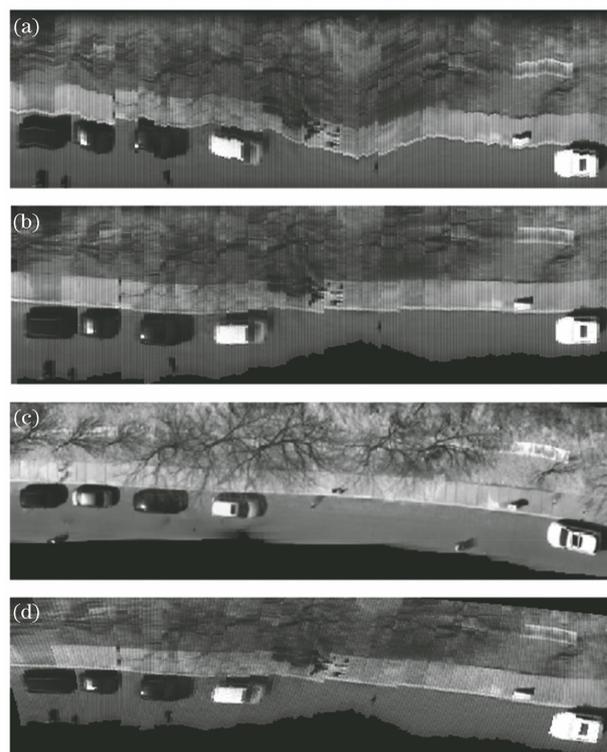


图 20 无人机高光谱图像及几何校正结果。(a)原始线阵高光谱图像;(b)利用低精度 POS 初步校正后的高光谱图像;(c)面阵图像;(d)自校正后的高光谱图像

Fig. 20 UAV hyperspectral images and geometric correction results. (a) Original line-array hyperspectral image; (b) hyperspectral image after initial correction using low-precision POS; (c) area array image; (d) self-corrected hyperspectral image

为直接使用无人机上低精度 POS 初步几何校正后的高光谱图像。图 20(c)为同步采集的面阵图像,图 20(d)为使用几何校正方法校正后的高光谱图像。对比图 20(c)面阵图像中的场景与目标,可以看出利用本文所述的几何校正方法校正后的高光谱图像与实际场景更为贴近,包括目标的轮廓以及略有弯曲的道路。

7 结 论

高光谱推扫成像的方式对无人机的姿态和位置变化极为敏感,成像过程中由于飞机运动和气流的影响,获取的高光谱数据存在较大的几何畸变,这种畸变会严重影响图像的质量,有时甚至造成图像无法目视判读,严重影响影像的正常应用。

本文设计了一种基于 PGP 的紧凑型自校正高光谱成像仪,该系统采用成像光谱仪与面阵探测器共光路一体化的设计,可以同步获取高光谱图像和高帧频面阵图像,利用面阵图像来反演无人机的平台姿态,能够实现对高光谱图像的空间几何校正。其中 PGP 分光元件是一种直视色散型光谱仪,具有结构紧凑和轻量化的优点,而且装调简单,便于小型无人机搭载,其工作范围为 400~1000 nm,光谱分辨率优于 2.5 nm,幅宽方向的视场为 43.6°,飞行方向的视场为 20.0°,焦距为 13 mm。最后分析 PGP 元件的工作原理以及光谱成像系统的主要技术指标,设计结果满足图像质量的要求以及突破无人机有限载荷的限制,能够对自校正高光谱成像仪进行标定和几何校验。

本文介绍基于高光谱成像系统实现几何畸变自动化校正的思路和流程,利用高频率、大重叠率的面阵图像来反演无人机平台姿态,进而对同步获取的高光谱图像进行几何校正,有效解决了光谱图像的几何变形问题。使用低精度的 POS 和密集的面阵影像可以很好地恢复影像成像时相机的姿态,能够解决无人机上 POS 精度及采样频率不足的问题。这种软硬件一体化的研究思路和技术方案是解决现有推扫型无人机高光谱遥感图像几何校正的有效方法,在很大程度上降低用户数据获取和预处理的难度,具有较高的技术创新性和迫切的现实意义,为下一步实现无人机高光谱遥感探测奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Wang X H, Xue Q S. Optical system design of an atmospheric detector with nadir view and omnidirectional limb view[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(26): 7454-7461.
- [2] Adão T, Hruška J, Pádua L, et al. Hyperspectral imaging: a review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(11): 1110.
- [3] Liu Y K, Li C R, Ma L L, et al. Land surface reflectance retrieval from optical hyperspectral data collected with an unmanned aerial vehicle platform [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7174-7195.
- [4] Banerjee B P, Raval S, Cullen P J. UAV-hyperspectral imaging of spectrally complex environments [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(11): 4136-4159.
- [5] Lawrence K C, Park B, Windham W R, et al. Calibration of a pushbroom hyperspectral imaging system for agricultural inspection[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(2): 513-522.
- [6] Inoue Y, Sakaiya E, Zhu Y, et al. Diagnostic mapping of canopy nitrogen content in rice based on hyperspectral measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 126: 210-221.
- [7] Mitchell J J, Glenn N F, Sankey T T, et al. Remote sensing of sagebrush canopy nitrogen [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 217-223.
- [8] Berni J A J, Zarco-Tejada P J, Suarez L, et al. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(3): 722-738.
- [9] Habib A F, Morgan M, Lee Y R. Bundle adjustment with self-calibration using straight lines [J]. *The Photogrammetric Record*, 2002, 17(100): 635-650.
- [10] Remondino F, Barazzetti L, Nex F C, et al. UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling-current status and future perspectives [EB/OL]. (2011-01-01) [2021-05-06]. https://is.muni.cz/el/1431/podzim2012/Z8114/um/35399132/35460312/uav_mapping_and_3D_modeling.pdf.
- [11] Turner D, Lucieer A, McCabe M, et al. Pushbroom hyperspectral imaging from an unmanned aircraft system (UAS)-geometric processing workflow and accuracy assessment [EB/OL]. (2017-08-24) [2021-05-06]. <https://repository.kaust.edu.sa/handle/10754/625872>.
- [12] Zhu S B, Ji Y Q, Gong G B, et al. Optical design of prism-grating-prism imaging spectrometers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2270-2273. 朱善兵, 季轶群, 宫广彪, 等. 棱镜-光栅-棱镜光谱成像系统的光学设计 [J]. *光子学报*, 2009, 38(9): 2270-2273.

- [13] Wu C J, Yan C X. Imaging spectrometer optical design based on prism-grating-prism dispersing device [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(1): 37-43. 吴从均, 颜昌翔. 棱镜-光栅-棱镜型光谱成像系统光学设计[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 37-43.
- [14] Luo G Y, Wang B D, Chen Y Q, et al. Design of visible near infrared imaging spectrometer on unmanned aerial vehicle[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(9): 65-74. 罗刚银, 王弼陡, 陈玉琦, 等. 可见近红外波段无人机载成像光谱仪设计[J]. 光子学报, 2017, 46(9): 65-74.
- [15] He S L, Chen X, Li S, et al. Small hyperspectral imagers and lidars and their marine applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49 (2): 0203001. 何赛灵, 陈祥, 李硕, 等. 小型高光谱图谱仪与激光雷达及其海洋应用[J]. 红外与激光工程, 2020, 49 (2): 0203001.
- [16] Xiao G H, Shu R, Xue Y Q. Design of microscopic hyperspectral imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(4): 367-372. 肖功海, 舒嵘, 薛永祺. 显微高光谱成像系统的设计[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 367-372.
- [17] Zeng C B, Liu B, Xia Z D, et al. Optimal design of spectroscopic structure based on prism-grating combination[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2105001. 曾朝斌, 刘宾, 夏正德, 等. 棱镜-光栅组合分光结构参数的优化方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2105001.
- [18] Habib A, Han Y, Xiong W F, et al. Automated ortho-rectification of UAV-based hyperspectral data over an agricultural field using frame RGB imagery [J]. Remote Sensing, 2016, 8(10): 796.