

文章编号:1002-2082(2019)03-0393-06

四通道可见光光谱相机的设计

冯 珊, 曾祥忠

(西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121)

摘 要:随着光谱技术的发展,多光谱相机在农业、医疗、机器视觉、遥感探测等领域都得到了广泛的应用。提出一款小型化四通道可见光波段的多光谱相机,尺寸为 $107\text{ mm}\times 110\text{ mm}\times 74\text{ mm}$,质量 $1\,043\text{ g}$,适合搭载在小型化无人机上进行遥感探测。相机系统采用棱镜分光光路设计方案,避免光程差和光轴偏移;设计开发的四通道可见光多光谱相机,采用一个FPGA控制器同时驱动4个图像传感器,实现4个通道像素级同步采集,曝光完全一致。实验结果显示:在红、绿、蓝3个特定波段及全波段相机可实时输出图像,既可输出某个特定波段图像(60 fps),也可同时输出4个波段图像(15 fps),有利于多波段图像同步采集,以及多光谱图像融合的研究。

关键词:多光谱相机;小型化;光路设计;同步采集

中图分类号:TN202;TH703

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201940.0301006

Design of four-channel visible-spectral camera

FENG Shan, ZENG Xiangzhong

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunication, Xi'an 710121, China)

Abstract: With the development of spectroscopy technology, multi-spectral cameras have been widely used in agriculture, medical, machine vision, remote sensing and other fields. This paper proposes a miniaturized four-channel visible-waveband multi-spectral camera with a size of $107\text{ mm}\times 110\text{ mm}\times 74\text{ mm}$ and a mass of $1\,043\text{ g}$, which is especially suitable for remote sensing detection on a miniaturized drone. The camera system adopts a prism beam splitting optical path design scheme to avoid optical path difference and optical axis shift. The specially designed four-channel multi-spectral camera in visible light uses an field-programmable gate array (FPGA) controller to simultaneously drive 4 image sensors to realize four-channel pixel-level synchronous acquisition, and the exposure is exactly the same. The test results show that at the 3 specific bands of red, green and blue and the full band, the camera can output images in real time, which can output a specific band image (60 fps) or 4 band images (15 fps) at the same time, which is beneficial to the synchronous acquisition of multi-band images and the research on multi-spectral images fusion.

Key words: multi-spectral camera; miniaturization; optical path design; synchronous acquisition

引言

多光谱技术是上个世纪60年代涌现出的一门

新兴的探测技术,是遥感技术的重要支撑,它主要应用于农业、军事、生物、地质湖泊的探测^[1]。获得多

收稿日期:2018-12-28; 修回日期:2019-01-10

基金项目:陕西省科技计划项目(2015KJXX-40)

作者简介:冯珊(1994—),女,硕士,主要从事图像融合与图像处理方面的研究。E-mail:740561719@qq.com

导师简介:曾祥忠(1965—),男,硕士,高级工程师,主要从事光电传感、测量与显示技术方面的研究。

E-mail: zengxz303@sina.com

光谱图像的技术相较于传统的成像技术——在特定的谱段成像,得到某一谱段的光谱信息,解决了同种颜色下不同光谱的问题,获取到更多场景的信息量,多光谱相机需要对各个谱段的进行成像,随后进行合成^[2],完成对一幅场景的全面探测。

利用光谱技术采集到的图像包含了一幅场景的空间分布、辐射强度、光谱的三重信息,是一个三维数据立方体^[3]。光谱技术和图像采集技术的结合,使得超、高、多光谱相机的应用更加广泛。超、高光谱图像包含波段数多,系统庞大复杂,波段之间相关性很强,不便于分割^[4];信息的存储量大,实际应用中有时无需如此精密的数据。因此多光谱相机的多个波段的光谱信息完全满足应用需求,相机系统操作简便。丹麦著名的相机制造商 JAI 公司研制出了 AD-130GE 多光谱相机^[5],采用棱镜分光技术得到多个谱段的图像,分辨率为 $1\,296 \times 966$ 像素,帧率为 31 fps。目前国内实验研究中用到的多光谱相机大多基于滤光片阵列分光^[6],滤光片轮式多光谱相机^[7],前者将多个波段的滤光片排列成滤光片阵列放置在成像探测器前进行采集,后者将特定波段的滤光片制作成滤光片轮,每拍一张转动滤光片轮,进行下一次拍摄。这些结构都会造成辐射性能有差异,多个波段图像无法同步采集。

本文设计出的四波段可见光多光谱相机,小型化设计满足无人机搭载条件,使用波段少,光谱信息损失最少,各个波段都易于分离。同时具有空间相机空间几何性好的性质,获取目标物空间二维信息,同时获取该目标物的光谱信息。使得光谱分辨率与空间分辨率结合,可得到目标物的完整信息。

1 多光谱相机光学系统与结构设计

30 多年来,成像光谱技术^[8]一直是研究的热点,在全球范围内都开发出了各具特色的成像系统,目前多光谱相机分为以下两类结构。

多镜头多相机组合型^[9]。采用多个镜头、多个相机捆绑组成,镜头前方放置滤光片或滤光片轮,相应波谱段的光束通过,同一瞬间,几个镜头拍摄同一待测目标景物,获取不同谱段的图像信息,随后进行图像处理,获得完整的光谱信息。各通道之间的视轴准直,图像的配准比较困难。

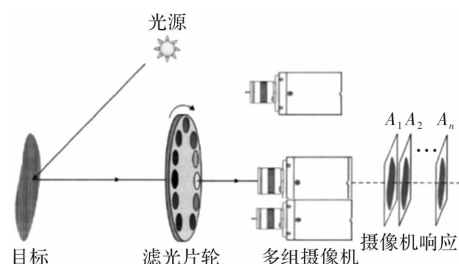


图1 多镜头多相机组合型

Fig. 1 Multi-lens multi-camera combination

单镜头棱镜分光型^[10]。采用一个镜头成像,光学分光光路,用多个三棱镜分光器将来自景物的光线分离为若干波段的光束,在出射面处放置感光面分别记录各个波段的光谱信息。美国生产的 MS4100 高分辨率 3CCD 照相机系统。光谱范围为 $300\text{ nm} \sim 1\,100\text{ nm}$,分辨率为 $1\,920(\text{H}) \times 1\,080(\text{V})$ 像素,它是基于 RGB 和 CIR 结构,每个通道都能独立进行触发拍照。分光系统由 3 块棱镜组成,如图 2 所示。每个出射面处都放有一块滤光片,让对应波段的光通过。一束宽波段的光束经过棱镜分光系统,在第一块棱镜单元,绿光被反射,其他光束通过,在第二块棱镜单元,红光被反射,剩余光束通过。这束宽波段的光被分成了红光、绿光和近红外光。

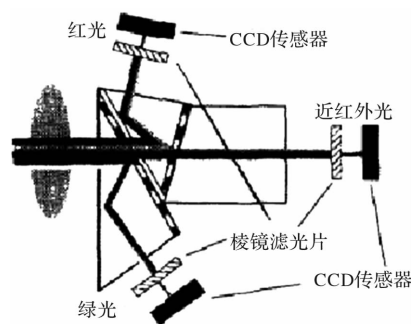


图2 MS4100 分光式相机结构图

Fig. 2 MS4100 split-type camera structure

两类结构中,多镜头和多 CCD 光谱相机由于自身结构,镜头(相机)处于同一水平位置,成像不具备一致性,重叠精度和成像质量差,重叠的处理时间也较长。本文采取单镜头棱镜分光型结构的光谱相机,其优点是:结构简单,图像重叠精度高;瞬时获取 4 幅图像,便于观测动态图像,不受时间偏差影响;各波段的光谱独立成像,有利于提取感兴趣波段的图像。

2 四通道可见光多光谱相机设计

本文设计的四通道可见光光谱相机是一款集

光学、机械、电子、机器视觉融为一体的多光谱相机。它的设计包含了光路设计,结构设计,图像采集系统设计。相机的分光方式决定相机系统的分光性能及硬件结构设计^[11]。

2.1 光路设计

采用立方体棱镜分光光路设计。多光谱相机最早采用的分光方式是棱镜分光技术和光栅分光技术^[12],这两种方式也是最为可靠的分光方式。相对于色散性较大,设计较为复杂的光栅分光方式,本文设计的相机系统采用立方体棱镜分光,如图3所示。其优点是:无论是时间上还是空间上,易于实现像素级的对准,不会造成光程差,形成干涉级,谱线亮度很好,能量比较集中。

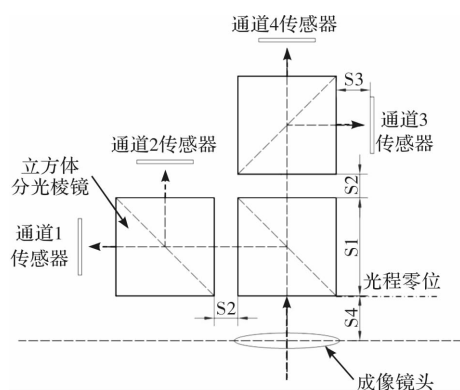


图3 棱镜分光系统

Fig. 3 Prism splitting system

图3中,立方体分光棱镜尺寸为 $S_1=25\text{ mm}$,相邻立方体棱镜之间距离 $S_2=6\text{ mm}$,传感器与立方体分光棱镜距离 $S_3=6\text{ mm}$,成像镜头与第一块立方体分光棱镜之间距离为 $S_4=12\text{ mm}$ 。

2.1.1 光程

光程差即为两束光光程之差,是将光传播的几何距离与光波的振动性质整合在一起的重要物理量,光程是光传播的几何路径 S 与所在截止折射率 n 的乘积,表示为

$$l=nS=c\times\frac{S}{v} \quad (1)$$

光程差即为两束光光程的差值,其表达式为

$$\Delta l=n_1S_1-n_2S_2=c\left(\frac{S_1}{v_1}-\frac{S_2}{v_2}\right) \quad (2)$$

四通道相机光学系统中,4个传感器采集到的光信息,几何路径 S 以及截止折射率 n 一致,四通道相机中空气截止折射率 n_0 ,立方体棱镜采用 K_9 光学玻璃制成,其截止折射率为 n_1 ,相机单通道光程 L 可表示为: $L=2n_0S_1+n_0S_2+n_0S_3$ 。理论上,

4个通道光程一致,不存在光程差,由于相机安装时存在一定误差,因此, $S_4\approx 0.2\text{ mm}$, $S_5\approx 0.2\text{ mm}$,光程差 $\Delta L\approx 0.6\text{ mm}$ 。

2.1.2 镜头机械后截距(BFL)

镜头机械后截距相当于相机后焦距,选择合适的后截距,相机系统即可清晰成像,四通道相机后截距 $L=2S_1+S_4+S_2+S_3=74\text{ mm}$;根据设计,选取合适的V接口镜头。

采用3块分光比为1:1的棱镜分光器,将待测物的总光束分隔为4束光束,棱镜的出射面放置带有特定波段滤光片的感光面接收信号,记录各个波段光谱信息。相较于一般的分光镜都会引起5%左右的分光偏差,采用胶合面镀有1:1分光膜的立方体分光棱镜,立方体分光不会引起光程差和光轴偏移。光束进入镜头后,在第一块棱镜单元处进行1:1分光,一半折射一半透射,这两束光光强为初始光束的1/2,在透射面及折射面处各放置一块1:1分光棱镜再次进行分光,4束光的光强均为原始光束的1/4,光束成分完全相同,在4个出射面都固定有感光面接收光信号。

2.2 相机结构设计

本文设计的四通道多光谱相机内部结构如图4所示。相机外部尺寸为 $117\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 74\text{ mm}$,相机的质量为 $1\,043\text{ g}$ 。根据相机的分光系统设计硬件结构框架,尺寸足够放置总支架,电路板,接插件等,小型化设计满足无人机搭载条件,相机内部结构采用框架支撑。

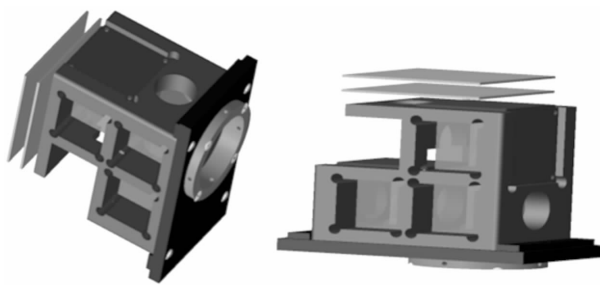


图4 相机结构设计

Fig. 4 Camera structure design

3块立方体棱镜尺寸为 $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 25\text{ mm}$,放置在定制好的框架内,用光学专用胶固定,稳定性、抗震性好。安装在无人机上对地面进行观测时,可防止震动产生的成像误差。框架结构通过相机前后面板进行固定。

2.3 技术支撑

1) EUREKA系列ELS-80/4.0V接口镜头

选取浩蓝 V 系列接口镜头,如图 5 和图 6 所示。一般用于工业相机靶面较大或特殊用途的镜头大多使用专业的 Schneider(施耐德)镜头,本文设计使用的是采用 V 接口的镜头,靶面尺寸为 78 mm,以保证靶面尺寸大于感光片尺寸,即可获取到完整的图像信息,后截距为 69.2 mm~89.04 mm,满足结构设计要求。



图 5 ELS-8/4.0V 镜头
Fig. 5 ELS-8/4.0V lens

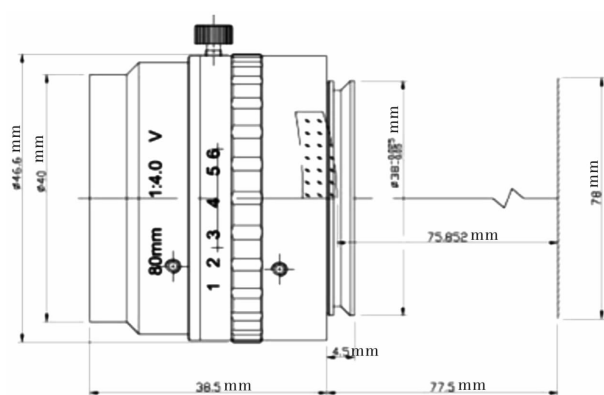


图 6 镜头尺寸
Fig. 6 Lens dimension

镜头响应波段(400 nm~1000 nm),在此波段上光谱相机接收到的太阳辐射能量强,图像信噪比高^[13],更易去除图像中的噪点。

2) 多光谱相机滤光片光谱段选择

四通道多光谱相机的研究是在可见光的基础上采集特定波段的光谱信息。物体组成成分与结构是不同的,它们的光谱特性^[14]也不尽相同。可能在某一个特定的波段是相似的,在别的波段又是不同的。选用 3 个适合于观测农业、植被、环境的波段^[15]。选取最优的谱段组^[16]可以获得最大的目标信息量,本文设计的四通道多光谱相机,采集 4 幅图像,红,绿,蓝和全光谱。波段之间的关联性小,可更好地辨认目标物体。

3 块滤光片均为窄带滤光片,中心波长分别为 460 nm、530 nm、650 nm。带宽约为 50 nm,滤光

片各波段通过率如图 7 所示。

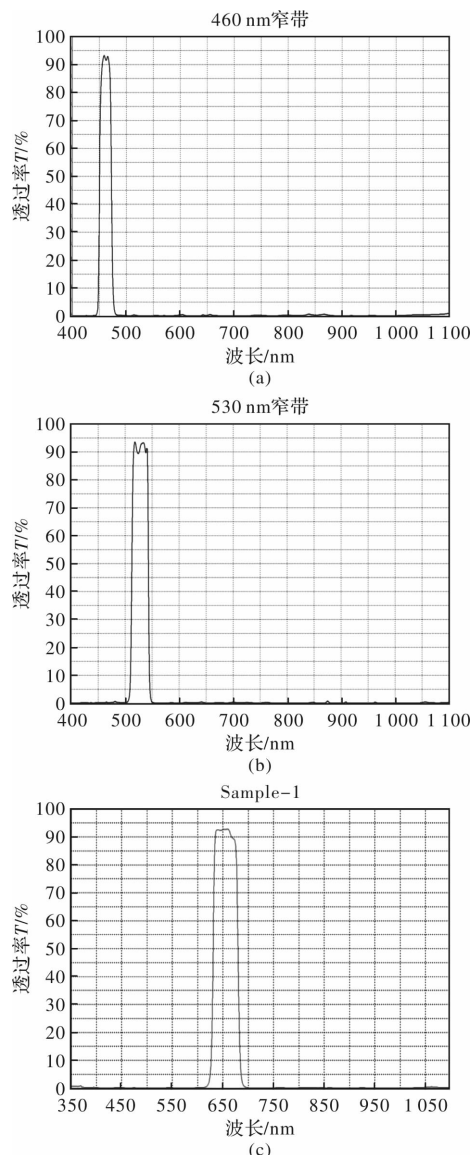


图 7 蓝、绿、红波段滤光片通过率(从左至右为蓝、绿、红)
Fig. 7 Pass rate of blue, green, and red band filters
(blue, green, red from left to right)

3 电路设计

相机系统的电路设计满足 4 个通道图像数据同步采集。FPGA 控制器同时驱动 4 个图像传感器,实现 4 个通道像素级同步,曝光完全一致。

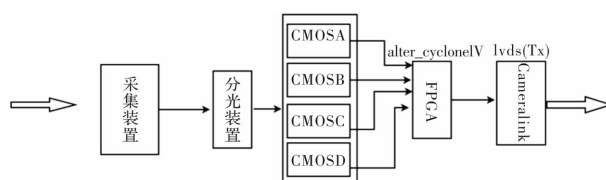


图 8 相机系统电路设计
Fig. 8 Circuit design of camera system

多光谱相机系统中,通过外部触发实现 4 个 CMOS 同步采集。光线通过镜头进入四通道可见光光谱相机系统时,经过分光系统将光束分为 4 份,通过安装在感光片前的滤光片来滤除其他波段的光束,采集特定波段的图像。成像元件 CMOS 根据光线的不同将光信号转化为数字信号,再通过 FPGA 芯片进行处理。将获得的目标图像经 cameralink 芯片差分输出。

四通道可见光光谱相机的硬件设计主要包括功能芯片的选型,FPGA 模块与感光面 CMOS 的接口设计,同步触发电路设计。电路板主要由 3 部分组成,FPGA 图像处理板,转接板,插口板,各个板独立作用,降低干扰性。四通道可见光光谱相机是将全色图像采集技术与光谱图像采集技术相结合的一款相机系统,最终设计的相机实物如图 9 所示。



图 9 四通道可见光光谱相机

Fig. 9 Four-channel visible-spectrum camera

4 测试与验证

选择相机的 3 个光路通道,在其 CMOS 前放置红、绿、蓝 3 个波段的窄带滤光片。相机安装完成后,固定在支架上,借助直流电源为相机系统供电,相机与计算机通过 cameralink 数据线连接,计算机内带有 siliconsoftwareIV 系列采集卡,随后开始进行实验。

检验每个通道图像的成像情况时,设定分辨率后进行单幅图、2 幅图、3 幅图、4 幅图的成像。均可成像后,验证了相机系统的各个通道完好。

实验阶段主要在地面进行,白炽灯作为光源,将相机安装在支架上对远处的植物进行成像。实

验初期,并未出现期望图像,随后调整后截距,用硬质钢型材进行固定后,光圈调至最大,能观测到物体。并且各个波段通过软件能够成像,采集到 4 个波段的图像,单帧的图像分辨率为 $1\,280 \times 720$ pixel,如图 10 所示。

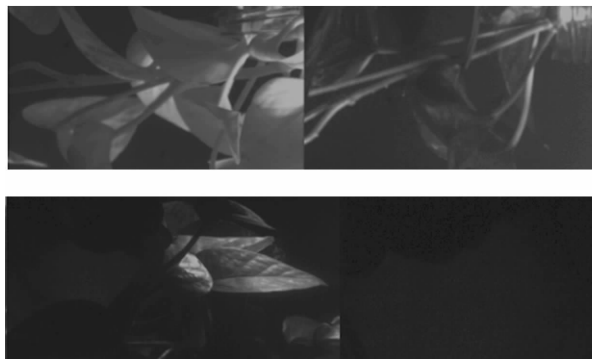


图 10 采集的图像

Fig. 10 Acquired image

5 结论

四通道可见光光谱相机小型化设计的目的是,使其满足无人机搭载条件,更方便进行遥感探测。相机镜头的成像范围为 $400\text{ nm} \sim 1\,000\text{ nm}$,相机系统灵活,可任意更换该波段范围内的滤光片进行系统的定制。相机系统的光路设计采用立体棱镜分光设计,避免引起 5% 左右的分光偏差,无论是时间上还是空间上,都更易于实现像素级的对准,便于进行后续的图像处理。同时相机满足 4 个通道同步采集,FPGA 控制器同时驱动 4 个图像传感器进行同步采集,避免时延造成的成像误差。

随着机载系统从研究阶段走上实用化、商业化。本文设计的四通道可见光光谱相机将适用于植被的遥感探测,用于观测植物的生长状态,健康状况及成长条件等。

参考文献:

- [1] ZHANG Danfeng, FU Yuegang, BO Gongxin. The optical design of space-borne multi-spectral camera [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 35 (2): 33-35.
张丹枫,付跃刚,柏公欣. 星载多光谱相机光学系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2012, 35 (2): 33-35+39.

- [2] CHENG Gang, FANG Fan, NING Fei, et al. Study on performance of multi spectral reconnaissance of unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(5): 685-688.
成刚, 方帆, 宁飞, 等. 无人机载多光谱侦察效能研究[J]. 应用光学, 2017, 38(5): 685-688.
- [2] ZHANG Ailing, ZHANG Boheng, ZHANG Jian, et al. Design of digital image acquisition system for multispectral CCD cameras[J]. Microcomputer Information, 2011, 27(12): 15-16.
李爱玲, 张伯珩, 张健, 等. 多光谱 CCD 相机图像采集系统的设计[J]. 微计算机信息, 2011, 27(12): 15-16.
- [4] LI Jiangnan. Design and implementation of multi-spectral camera[J]. Ship Electronic Engineering, 2013(6): 153-155.
李江南. 双光谱相机设计与实现[J]. 舰船电子工程, 2013(6): 153-155.
- [5] CAO Congfeng. Research of UAV-borne multispectral camera system based on narrow bandwidth filter array[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Science, 2017.
曹丛峰. 基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- [6] CAO Congfeng, FANG Junyong, ZHAO Dong. Development of UAV-borne multispectral camera based on narrow bandwidth filter array[J]. Optical Technique, 2018, 44(1): 51-55.
曹丛峰, 方俊永, 赵冬. 基于滤光片阵列分光的无人机载多光谱相机研制[J]. 光学技术, 2018, 44(1): 51-55.
- [7] HUA Houqiang. Calibration and image correction of single CCD four-band spectral imager[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
华厚强. 单 CCD 四波段光谱成像仪的定标与图像校正[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [8] DONG Jun, Gao Wei, Han Qingyan, et al. Plasmon-enhanced upconversion photoluminescence: mechanism and application[J]. Reviews in Physics, 2019(4): 100026.
- [9] LIU Tuanjie. Techniques and application research on airborne multispectral digital camera system[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Science, 2002.
刘团结. 航空多光谱数字相机系统关键技术及应用研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2002.
- [10] HOU Jianling. Aeronautical multi-spectral CCD camera[J]. Radio Communications Technology, 1992(1): 57-63.
侯建玲. 一种航空型多光谱 CCD 相机[J]. 无线电通信技术, 1992(1): 57-63.
- [11] WU Chuanqing, TONG Qingxi, ZHENG Lanfang. Pretreatment of ground and image spectral data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005(5): 50-55.
吴传庆, 童庆禧, 郑兰芬. 地面、图像光谱数据的预处理[J]. 遥感技术与应用, 2005(5): 50-55.
- [12] YU Xueqin. Comparative analysis of prism dispersion and grating dispersion[J]. Journal of Sanmenxia Polytechnic, 2011(2): 116-117.
于雪芹. 棱镜色散与光栅色散的对比分析[J]. 三门峡职业技术学院学报, 2011(2): 116-117.
- [13] LIU Bing. Research on miniature visible/near-infrared wide range real-time imaging spectrum technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, China Academy of Science, 2015.
刘兵. 小型化可见/近红外宽波段实时成像光谱技术研究[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
- [14] DING Lei, YUAN Yinlin, ZHENG Xiaobing, et al. Verification method of spectral calibration accuracy for hyperspectral remote sensors[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(3): 463-468.
丁蕾, 袁银麟, 郑小兵, 等. 高光谱遥感器现场光谱定标精度验证方法研究[J]. 应用光学, 2017, 38(3): 463-468.
- [14] LI Shihua, WANG Jinliang, CHEN Yao, et al. Experimental study on optimal band selection method for multispectral remote sensing data[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2005(6): 31-35.
李石华, 王金亮, 陈姚, 等. 多光谱遥感数据最佳波段选择方法试验研究[J]. 云南地理环境研究, 2005(6): 31-35.
- [15] MAO Zhihui, DENG Lei, ZHANG Jie, et al. Research on the application of UAV multispectral remote sensing in the maize chlorophyll prediction[J]. Spectroscopy And Spectral Analysis, 2018, 38(9): 2923-2931.
毛智慧, 邓磊, 孙杰, 等. 无人机多光谱遥感在玉米冠层叶绿素预测中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(9): 2923-2931.