

红外高光谱成像的光谱聚焦

孟卫华^{1,2}, 倪国强¹, 高 昆¹, 向静波², 项建胜²

- (1. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;
2. 中国空空导弹研究院 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 文中将光学系统中能量聚焦的概念引申至光谱维, 提出在红外高光谱成像系统中通过信号处理获取感兴趣目标与其环境的光谱特征差异, 结合调控目标函数得到光谱聚焦调控参数, 进而控制成像系统中的可调谐部件自适应调谐到最有利于探测和识别的若干个光谱通道, 实现光谱聚焦。文中提出了一种可实现光谱聚焦的系统构型, 重点探讨了光谱聚焦的机制和实现途径, 给出了关键分系统的技术方案。利用光谱聚焦可以实现光谱自适应探测, 提高光谱成像信息利用效率, 降低信息处理的资源需求, 有助于提高系统的实时性和小型化, 对于弹载、无人机载等高实时性、无人参与的应用具有十分重要的意义。

关键词: 高光谱; 红外成像; 光谱聚焦; 可调谐滤波器

中图分类号: TP731; TH703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0774-06

Spectrally focusing in hyperspectral imaging IR system

Meng Weihua^{1,2}, Ni Guoqiang¹, Gao Kun¹, Xiang Jingbo², Xiang Jiansheng²

- (1. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Focusing in optics was extended to spectral dimension in this paper, and the method of spectrally focusing was proposed. The spectrally focusing was implemented by adaptively tuning of a F-P optical cavity tunable filter, which was controlled by the parameters from the regulation and control function driven by the differences between interesting object and its background. An hyperspectral imaging IR system with spectrally focusing was introduced, and the practical scheme of main subsystem was contrived, the mechanism and approach to spectrally focusing were investigated. With spectrally focusing, spectrally adaptive detection can be achieved, the hyperspectral images can be utilized more efficiently, and thereby the ability demand for image processing is reduced. Spectrally focusing conduces to make hyperspectral imaging IR system more rapid and compact, which suits with the utilization in missile or UAV.

Key words: hyperspectral; imaging IR; spectrally focusing; tunable filter

收稿日期: 2012-07-12; 修订日期: 2012-08-11

基金项目: 航空科学基金(2008ZC12002, 20100112002)

作者简介: 孟卫华(1969-), 男, 研究员, 主要从事光电系统、模式识别、跟踪与控制等方面的研究。Email: mengwh869@ustc.edu

0 引言

红外成像探测技术的应用提高了武器的作战性能和效能,但在复杂光电环境中,单波段红外成像探测、制导武器的作战效能被日益削弱。20 世纪 80 年代起发展起来的高光谱探测技术为红外探测技术的革新提供了技术基础。在更多谱段上获取目标信息,就可在能量信息、空间信息、时间信息基础上引入光谱信息进行探测和识别,从而大大提高制导武器在复杂环境与强对抗条件下的目标识别能力、抗干扰能力、反隐身能力以及精确制导能力^[1-2]。

近年来,高光谱技术获得了很大发展,在卫星和机载遥感领域获得了成功应用。然而,这些应用中,探测(遥感)和识别是有人参与的、独立非连续的两个过程。首先是用载于卫星或飞机上的成像光谱仪将感兴趣区域的光谱、强度等信息数据实时采集并存储下来,然后通过数据链路下载,最后由人利用计算机技术判读获取的信息并进行离线地分类和识别。对于某些特殊应用环境,比如需要实时处理或机器自动识别的系统中,这种处理模式无法满足需求。这种情况下,应该尽早剔除冗余和杂乱光谱信息,提高光谱信息利用效率,便于目标检测和识别,同时减轻系统信息处理的资源需求。

文中将光学系统中能量维聚焦引申至光谱维,在红外高光谱成像系统中通过信号处理获取感兴趣目标与其环境的光谱特征差异,从中得到调控参数控制成像系统中的可调谐部件,自适应调谐到最有利于探测和识别的若干个光谱通道,从而实现光谱聚焦,达到光谱自适应探测的目的。利用光谱聚焦技术可以在图像获取阶段即进行信息分选,将图像信息获取的重点集中在对目标探测和识别最有利的光谱通道上,从而减少后续对信息处理的资源需求,降低系统复杂度,有助于提高系统实时性和小型化,非常适合弹载环境应用。

1 国内外研究现状

20 世纪末,国外进行了高光谱成像技术在导弹上的应用概念研究。然而,由于弹载应用特殊的高实时性、智能化要求以及体积、成本、环境等方

面的限制,未见高光谱成像技术已用于装备的明确报道。

20 世纪 90 年代,怀特实验室(Wright Labs)资助 OKSI(Opto-Knowledge Systems Inc)公司进行了智能导引头(Intelligent Missile Seeker:IMS)的研究^[3-4],在可见光(500~1 000 nm)和中波红外(2.5~5.0 μm)两个波段,采用两个光栅作为分光元件,配置可调宽度狭缝确定光谱分辨率,接收元件采用 256×256 元可见光 CCD 和 160×120 元 InSb 制冷焦平面探测器制作了成像光谱仪^[3],见图 1 所示。

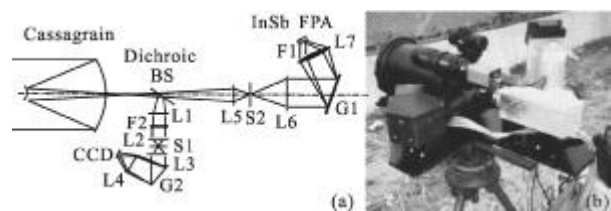


图 1 IMS 光谱仪光路以及原理装置

Fig.1 Optical layout of IMS sensor, and photograph of the assembly

在实验研究的基础上,OKSI 的研究人员还探讨了空空导弹导引头采用高光谱探测技术的方案以及面临的高速信息处理难题^[5]。

John Nella 等人也对高光谱探测技术应用进行了研究,并申请了专利^[6],在专利中给出了一种典型的光分光谱仪示意图,如图 2 所示。

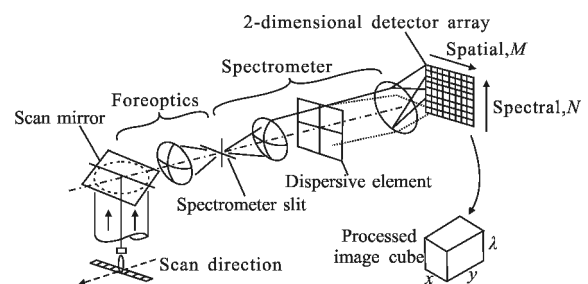


图 2 分光光谱仪示意图

Fig.2 Pictorial illustration of dispersive spectrometer

David.O.Light 等人也对高光谱成像技术在导弹上的应用进行了研究,其专利^[7]采用电压调谐滤波器或声光调谐滤波器构想了一种用于导弹制导的高光谱成像系统,如图 3 所示。具有体积小、可靠性高、易于控制、易于集成等优点。

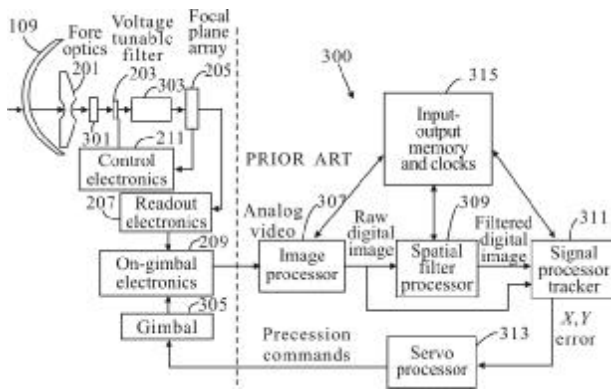


图 3 高光谱成像系统功能框图

Fig.3 Block diagram of hyperspectral sensor functions

Rockwell 科学公司的研究人员^[8]用基于 MEMS 技术制作的可调谐滤波器实现了 $8.0\sim 10.7\ \mu\text{m}$ 长波红外波段的高光谱成像,光谱分辨率约 $100\ \text{nm}$ 。

以上研究报告和专利文献都将重点放在了分光器或是系统构成上,没有针对多通道、实时高光谱图像处理进行研究和表述,没有发现利用图像信息处理的结果调控可调谐滤波器实现光谱聚焦的进一步阐述。

2008 年以来,在航空科学基金资助下,作者进行了弹用红外高光谱成像探测技术的相关研究^[9-10],采用基于法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉原理的腔型可调谐窄带滤波器进行分光,提出了适合弹载应用的高光谱红外成像探测系统方案,设计并制作了 F-P 可调谐滤波器阵列,进行了光学系统设计,对调谐控制器进行了试验研究,探讨了利用高光谱图像信息处理的结果调控可调谐滤波器的光谱聚焦技术。

2 系统构成

如图 4 所示,实现光谱聚焦的红外高光谱成像系统包含光学系统(含前置光学系统和成像光学系统)、

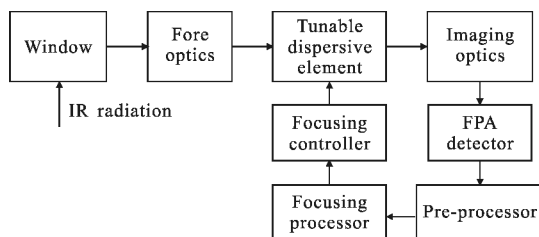


图 4 光谱聚焦功能框图

Fig.4 Block diagram of spectrally focusing

光谱调谐分光器、红外焦平面探测器、光谱聚焦处理器、聚焦控制器等几部分,其中的关键是光谱调谐分光器和光谱聚焦处理器。

目标和背景的红外辐射通过窗口进入系统,首先经过前置光学系统进行光束压缩,以减小入射角,然后经过光谱调谐分光器进行光谱分离,接着由成像光学系统汇聚到探测器的焦平面上。探测器完成光电转换,通过预处理单元形成高光谱数字图像,聚焦处理器根据应用需求通过对不同光谱图像的分析得到聚焦调控参数,由聚焦控制器驱动光谱调谐分光器完成光谱聚焦。

根据典型目标的光谱特性,分光器工作在中波 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段,峰值波长取 $4\ \mu\text{m}$ 。

对于高光谱成像系统,光谱通道越多,光谱的分辨率就越高,但光谱细分太多会增加后面的信息处理量,对于弹载应用十分不利。综合考虑,在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段范围内选择 $10\sim 20$ 个通道,每个通道的光谱宽度为 $100\sim 200\ \text{nm}$ 。在实际工作中可以根据典型目标的辐射窗口合理对光谱范围进行选择,也可以将某几个通道合并从而选择该目标的典型辐射窗口。

系统采用的探测器为中波制冷型凝视探测器,像元为边长 $30\ \mu\text{m}$ 的方形结构。光学系统的工作波段为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,有效焦距 f 为 $55\ \text{mm}$,F 数 1.5 ,全视场 2° ,全视场内弥散斑直径小于 $30\ \mu\text{m}$ 。为抑制杂散光系统采用 100% 冷光阑。

该系统主要指标情况如表 1 所示。

表 1 红外高光谱成像系统主要指标

Tab.1 Main parameters of hyperspectral imaging IR system

Parameter	Value
Waveband/ μm	3-5
Bands	10
Bandwidth/nm	130
Tuned time/ms	<5
FOV/ $^\circ$	2
Transmittance, peak/%	70

3 关键技术

3.1 光谱调谐分光器

调谐分光器是实现光谱聚焦的关键元件,系统

采用基于法布里-珀罗干涉原理的腔型可调谐滤波器进行光谱调谐。当光入射到距离很近、平行放置、满足干涉条件的两个平面镜时,只有很窄波段的光能够通过,这就构成了 F-P 滤波器。随着 F-P 滤波器设计和制作技术的发展,国外对其在红外光谱仪和红外高光谱成像探测方面的应用进行了大量研究。D.Rossberg^[11]等制作了 20 mm×20 mm×0.8 mm 的 F-P 可调谐滤波器,调谐范围 1.5~7.5 μm,分辨率 25 nm。William J.Marinelli^[12]等将 F-P 可调谐滤波器与红外探测器集成,采用压电驱动实现了调谐范围 7.8~13.5 μm、分辨率 50 nm 的长波红外光谱仪。William J. Gunning^[13]等用 MEMS 技术制作了可调谐滤波器,在中波红外宽波段成像的同时,实现了 8.0~10.7 μm 波段、分辨率 100 nm 的高光谱成像。P.Mitra^[14]等将 F-P 滤波器直接集成在 HgCdTe 探测器上,制作出一种 1.6~2.5 μm 波段自适应焦平面探测器 (AFPA),中心波长 1.95 μm 处带宽约 100 nm,峰值响应约为 8×10⁴ V/W。

腔型光谱调谐分光器是由两个布拉格反射镜 (DBR) 和一个空气层组成 F-P 腔,如图 5 所示。入射光在腔内发生干涉,理论上若波长满足公式(1)则可以透过。加上驱动电压后,上面反射镜产生位移,引起空气层厚度变化,进而导致腔长发生变化,透过峰值波长也随之改变。

$$\lambda = 2nh/m \tag{1}$$

式中:n、h 分别是谐振腔折射率和腔长;m 为干涉级次。

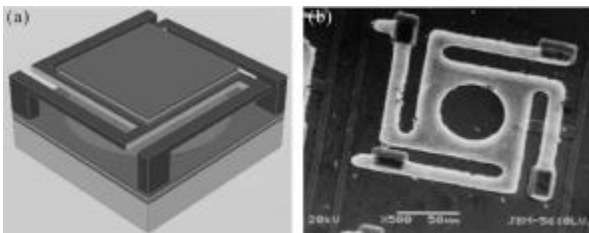


图 5 微型 F-P 谐振腔
Fig.5 Structure of F-P optical cavity

分光器与红外探测器的一种理想耦合方式是将两者集成在杜瓦内部,如图 6 所示。这种集成方式将 F-P 可调谐滤波器阵列单元与红外焦平面阵列像元一一对准,并通过微透镜阵列进行视场适配。通过串行寻址模式可单独控制每个 F-P 滤波器单元,既可以实现单个像元的波长调谐又能实现整个阵列的同时调谐。

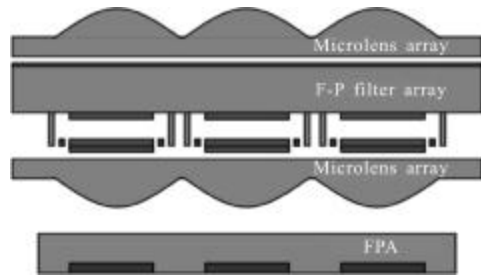


图 6 分光器与探测器的集成
Fig.6 Integration of F-P filter and detector

由于目前国内制作工艺限制,分光器件滤光单元与探测器像元在大小与数量上无法很好匹配,F-P 可调谐滤波器单元与红外焦平面阵列像元很难一一对准。而且,将分光器件与探测器集成后,由于探测器焦平面工作温度为 77 K 的液氮温度,采用一般工艺制作的分光器件也不易正常工作。因此,分光器与探测器可各自独立工作,分光器件放置在光学系统中。光学系统前端的光束压缩单元将入射光束口径压缩使之与分光器件大小相当,并且将入射光线角度调理在分光器件的工作范围内,如图 7 所示。

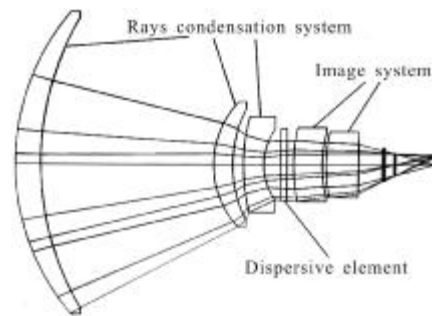


图 7 光学系统光路图
Fig.7 Layout of optical system

分光器反射镜表面采用三层膜系设计,峰值透过率约 70%,光谱分辨率约 130 nm,典型波长的透过性能见图 8。随着空气腔长增减,峰值波长分别向长

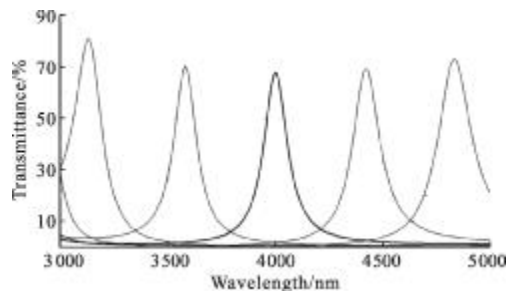


图 8 分光器的透过性能
Fig.8 Transmittance of F-P filter

波、短波方向移动,带宽也略有不同。另外,光线入射角度增大会引起峰值波长向短波漂移,需将入射角控制在 10° 以内,这也是光学系统前端配置光束压缩单元的原因。

3.2 光谱聚焦处理器

光谱聚焦处理器通过对光谱图像的处理调控光谱调谐分光器,实现光谱聚焦。光谱聚焦处理器首先进行图像特征分析,获取感兴趣目标与其环境光谱特征的差异,然后根据应用需求,选择光谱聚焦策略,根据调控函数生成调控参数送给聚焦控制器实施光谱聚焦。

典型目标与背景图像的光谱特征分析是研究的基础,利用获取的图像信息,通过数字图像处理手段,对感兴趣典型目标及其背景在不同光谱通道图像中的特征差异进行分析,结合具体应用需求,形成聚焦调控函数进行波段选择^[15-17]。

光谱聚焦技术可以用于不同应用目的,如图像对比度增强、背景抑制、目标识别、场景理解、异常检测、变化检测等,针对不同应用,光谱聚焦的目的和途径不尽相同,调控函数也具有不同的形式。对于对比度增强应用^[18],其聚焦目标函数一般为图像的对比度,调控目标是使其最大化。但是调控过程中,还受实际应用时其他因素的制约,调控目标一般不仅仅是单一的参数,而是一组参数集合,这样不但使对比度得以增强、而且使其它不良影响减至尽可能小。

如图 9 所示,光谱聚焦处理的基本流程是原始的高光谱数据经过定标、去噪等预处理后,进行光谱异常检测以划定可能包含目标信息的疑似区域。针对疑似区域,由光谱数据统计结果或类间可分性数据驱动光谱聚焦函数获得聚焦调控参数,实现波

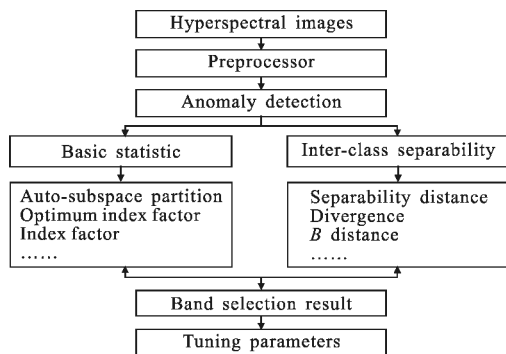


图 9 光谱聚焦处理的一般流程

Fig.9 General flow of spectrally focusing processor

段自适应选择,达到光谱聚焦的目的。获取光谱聚焦调控参数的关键在于光谱聚焦目标函数的设计,它反映了系统对关键图像信息特征的需求。不同的系统应用对图像信息的关注点不同,光谱聚焦函数也有所差异,即使对同样图像波段选择结果也会不尽相同。

图 10 所示是针对 ATR 应用的光谱聚焦处理,分别从基于信息量、基于类间可分性和基于光谱相似度三方面进行组合设计,得到两种聚焦调控函数进行最佳波段选择。第一种将基于信息量的自动子空间划分选出的波段与基于类间可分性的离散度或 B 距离 (Bhattach-aryya 距离) 选出的波段相结合,所选波段相关性小、所含信息量大且针对特定目标可分性好。第二种将基于光谱维的波段最大筛选法选出的波段和基于类间可分性的离散度或 B 距离选出的波段相结合,所选波段信息量既大又有区别并且特定目标可分性大。对结果进一步筛选可得到适用于光谱聚焦的波段子集。

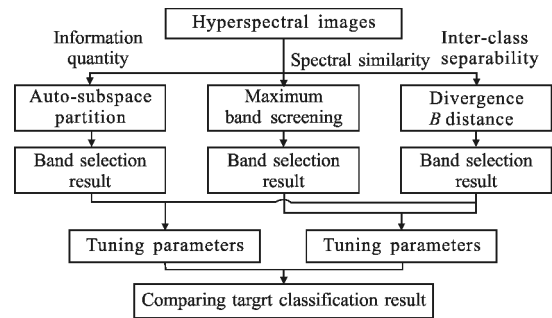


图 10 面向应用的光谱聚焦处理

Fig.10 Spectrally focusing for ATR

光谱聚焦处理器应满足系统实时性的要求。系统聚焦调谐可以在每个波段图像的帧逆程实施,光谱聚焦处理器对图像的处理则随着图像生成实时进行。当所有通道图像获取后,即可得到单通道图像预处理结果,然后进行高光谱图像不同波段图像的相关处理,得到聚焦调控参数。由于系统光谱通道不是很多,当采用多通道并行处理时,一般可以满足系统实时聚焦的需求^[19]。

4 结论

文中提出了一种基于腔型可调谐滤光器、具有光谱聚焦功能的红外高光谱成像系统,介绍了系统构成及关键技术。设计了 10 通道中波红外可调谐分

光器,带宽约 130 nm,波长调谐时间小于 5 ms。研究了利用高光谱成像信息驱动聚焦调控函数获得调谐控制参数,进而控制分光器调谐至最佳波段的光谱聚焦方法,给出了光谱聚焦的处理流程。利用光谱聚焦可以实现光谱自适应探测和处理,对弹载高光谱成像应用具有重要意义。后续工作一方面着重于进一步提高可调谐分光器的性能,另一方面继续对聚焦调控函数的优化设计及其验证进行深入研究。

参考文献:

- [1] Huang Shike, Zhang Tianxu, Li Lijuan, et al. IR guiding technology based on multispectral imaging for air to air missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 16-20, 93. (in Chinese)
黄士科, 张天序, 李丽娟, 等. 空空导弹多光谱红外成像制导技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(1): 16-20, 93.
- [2] Xu Hong, Wang Xiangjun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 13-17. (in Chinese)
许洪, 王向军. 多光谱、高光谱成像技术在军事上的应用[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 13-17.
- [3] Nahum Gat, Suresh Subramanian. Spectral imaging: technology & applications[R]. USA: Opto-Knowledge Systems Inc, 1997.
- [4] Nahum Gat, Jacob Barhen, Sandeep Gulati, et al. Hyperspectral air-to-air seeker[C]//SPIE, 1994, 2231: 127-135.
- [5] Suresh Subramanian, Nahum Gat, Jacob Barhen. Hyperspectral data preprocessing to improve performance of classification algorithms[C]//SPIE, 1997, 3118: 232-240.
- [6] John Nella, Austin Joseph W, Livingston Peter M. Hyperspectral air-to-air missile seeker [P]. United States Patent: 6079665, 2000-06-27.
- [7] Light David O, Tommy Lum, Pittman William C. Hyperspectral sensor using tunable filter [P]. United States Patent: US 2007/0045545 A1, 2007-03-01.
- [8] Gunning William J, Jeff Denatale, Phil Stupar, et al. Adaptive focal plane array-an example of MOEMS, Photonics, and Electronics Integration[C]//SPIE, 2005, 5783: 366-375.
- [9] Xiang Jiansheng, Meng Weihua, Pan Guoqing. A multi-spectral infrared optical system [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(12): 683-686. (in Chinese)
项建胜, 孟卫华, 潘国庆. 一种红外多光谱成像光学系统设计[J]. *红外技术*, 2009, 31(12): 683-686.
- [10] Zhou Yifan, Chen Sihai, Bao Shiwei. Optical design on tunable filter for multispectral imaging micro-Fabry-Perot cavity [C]//Tianjin: The Chinese Optical Society, 2010. (in Chinese)
周一帆, 陈四海, 鲍士伟. 用于多光谱成像的微 Fabry-Perot 腔可调谐滤波器光学设计研究 [C]//天津: 中国光学学会, 2010.
- [11] Rossberg D. Silicon micromachined infrared sensor with tunable wavelength selectivity for application in infrared spectroscopy [J]. *Sensors and Actuators A*, 1995, 46-47: 413-416.
- [12] Marinelli William J, Gittins Christopher M, Gelb Alan H, et al. Tunable Fabry-Perot ealon based long-wavelength infrared imaging spectrometer[J]. *Applied Optics*, 1999, 38: 2594-2604.
- [13] Gunning William J, Jeff Johnson, Jeff DeNatale. LWIR/SWIR adaptive focal plane array[C]//SPIE, 2004, 5612: 78-84.
- [14] Mitra P, Beck J D, Skokan M R, et al. Adaptive focal plane array (AFPA) technologies for integrated infrared Microsystems[C]//SPIE, 2006, 6232: 62320G-1-62320G-11.
- [15] Bajcsy P, Groves P. Methodology for hyperspectral band selection [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Journal*, 2004, 70(7): 793-802.
- [16] Zhao Chunhui, Liu Chunhong. Research and analysis of hyperspectral remote sensing image dimensional reduction[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2004, 24(5): 28-36. (in Chinese)
赵春晖, 刘春红. 超谱遥感图像降维方法研究现状与分析 [J]. *中国空间科学技术*, 2004, 24(5): 28-36.
- [17] Su Hongjun, Du Peijun, Sheng Yehua. Study on band selection algorithms of hyperspectral image data [J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(4): 1093-1096. (in Chinese)
苏红军, 杜培军, 盛业华. 高光谱影像波段选择算法研究 [J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(4): 1093-1096.
- [18] Shnitser P I, Agurok I P, Sandomirsky S, et al. Spectrally adaptive imaging camera for automatic target contrast enhancement[C]//SPIE, 1999, 3717: 185-195
- [19] Gao Kun, Liu Yinghui, Ni Guoqiang, et al. Study on on-board real-time processing technology of optical remote sensing [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(1): 50-54. (in Chinese)
高昆, 刘迎辉, 倪国强, 等. 光学遥感图像星上实时处理技术的研究[J]. *航天返回与遥感*, 2008, 29(1): 50-54.