

## 航天光学遥感相机多谱带滤光片设计与考核方法

常君磊,李富强,王伟刚,李庆林,张楠,范俊杰,武永见,张明柱

(北京空间机电研究所 成像技术研究室,北京 100190)

**摘要:**多谱带滤光片是航天光学遥感相机上的关键器件。其兼具多个谱带滤光及探测器封装的功能,特征尺寸多,膜系复杂,其设计及考核过程相比全色或单谱带滤光片要复杂得多。介绍了多谱带滤光片的基片外形尺寸、滤光窗口尺寸、像元位置标识窗口、封装对准标识等关键特征尺寸的设计及计算方法。分析了滤光片的设计加工误差对滤光片与光敏芯片的封装对准精度、探测器在焦平面上的配准拼接以及相机的光谱响应特性等的影响。并基于现有的航天器环境考核方法提出了一套针对多谱带滤光片的环境考核流程和测试方法。最后给出了某相机多谱带滤光片的设计及考核应用实例。

**关键词:** 航天光学遥感相机; 多谱带滤光片; 特征尺寸; 环境适应性考核

**中图分类号:** TN202 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0320002

## Multi-band filter design and assessment for space optical-remote-sensing camera

Chang Junlei, Li Fuqiang, Wang Weigang, Li Qinglin, Zhang Nan, Fan Junjie,

Wu Yongjian, Zhang Mingzhu

(Imaging Technology Research Department, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Multi-band filter is the key component of the detector of space optical-remote-sensing camera. It was used for multispectral band-pass filtering and the encapsulation of detector. Because of the complicate feature sizes and films, the designing and environment adaptability assessment of multi-band filter were more complicated than the panchromatic or monochromatic filter. Physical dimension of filter substrate, filter window size, on-die pixel-location-symbol window size and on-filter alignment mark were the feature sizes of a multi-band filter, whose designing and calculating method for these feature sizes were given. Influences of designing or manufacturing error of the multi-band filter were also analysed, such as filter-and-die alignment precision, detector butting precision on focal plane assembly, and spectral response characteristic of camera system. An environmental assessment method for multi-band filter was also proposed, and the assessment method was based on the existing environment adaptability assessment standard for spacecraft. Finally an application example of multi-band filter designing and environmental assessment from some space camera was given.

**Key words:** space optical-remote-sensing camera; multi-band filter; feature size; environment adaptability assessment

收稿日期:2017-10-31; 修订日期:2017-11-30

基金项目:民用航天技术预先研究项目(D030101)

作者简介:常君磊(1984-),女,工程师,硕士,主要从事航天光学遥感相机方面的研究。Email: 2010life@163.com

## 0 引言

航天光学遥感相机能够获取地球表面自然要素和人工设施的大小、形状等信息,其广泛应用于军事、农业、资源探测、灾害评估等领域。高分辨率、大幅宽、多谱带探测是未来遥感相机的主要发展趋势<sup>[1-2]</sup>。长线阵、多谱带探测器(CCD/CMOS)是实现大幅宽、多谱带遥感探测的重要部件,而多谱带滤光片则是探测器上的关键器件。多谱带滤光片特征尺寸多且复杂。基于目前的镀膜工艺,滤光片上相邻滤光膜间存在交叠、漏缝等工艺问题,同时芯片上相邻光敏带间也会产生谱带串扰问题。因此多谱带滤光片需要黑色掩膜来隔离不同的滤光区域,以保证各滤光窗口内膜层的均匀性和单一性。黑色掩膜勾勒出了滤光窗口的范围,掩膜设计时需要考虑滤光窗口与芯片光敏带间的相对位置关系,窗口尺寸,并为后续的加工、封装过程留有调节余量<sup>[3-5]</sup>。长线阵探测器光敏芯片通常有首尾及中心像元的位置标识,作为相机焦面上探测器拼接配准用的结构基准。因此滤光片掩膜设计时还需要给像元位置标识留出观察窗口,窗口尺寸需要考虑拼接仪的相对孔径,保证在拼接仪上观察清晰且不给探测器引入杂光<sup>[6-9]</sup>。另外滤光片上还有与探测器芯片封装时用的对准标识,以保证各滤光窗口与芯片光敏带的对准精度。

多谱带滤光片除了满足多谱带滤光功能外,还要能承受元器件级别的环境考核条件。在经历了地面存储运输直至发射在轨运行,仍能保持稳定的光谱性能和膜层牢固度,对探测器及整个相机都至关重要。滤光片的环境考核也是探测器研制过程中的重要环节<sup>[10-12]</sup>。

文中针对多谱带滤光片的特点,建立了多谱带滤光片模型,介绍了其主要特征尺寸的设计计算方法,并提出了一套环境考核方法。最后给出了一个多谱带滤光片的设计及考核应用实例。

## 1 多谱带滤光片模型

图 1 为典型的多谱带滤光片模型。滤光片的掩膜将滤光片分割成多个滤光窗口,起到了谱带隔离、杂光抑制、防止谱带间串扰的作用。除了滤光窗口,掩膜还要给芯片上的像元位置标识留出观察窗口,

以便探测器在焦平面上的配准拼接。滤光片上设有对准标识,在封装过程中,通过对准滤光片与芯片上的对准标识,保证各滤光窗口与光敏带的相对位置精度。多谱带滤光片有以下几个关键特征尺寸。

- (1) 滤光片基片外形尺寸:基片长度、宽度、厚度;
- (2) 滤光窗口尺寸:滤光窗口长度、窗口宽度、滤光窗口相对芯片光敏带的位置偏移量;
- (3) 像元位置标识窗口:像元位置标识窗口形状、窗口尺寸;
- (4) 封装对准标识:标识的形状、标识与滤光窗口的相对位置精度。

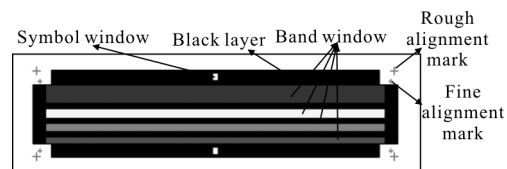


图 1 多谱带滤光片模型

Fig.1 Multi-band filter model

## 2 滤光片特征尺寸设计方法

### 2.1 滤光片基片外形尺寸

滤光片基片外形多为长方形,如图 2 所示,其长度  $L_f$ 、宽度  $W_f$  受探测器封装尺寸  $L$ 、 $W$ 、 $L_d$ 、 $W_d$  的制约。 $L_d-L_f$ 、 $W_d-W_f$  是探测器与结构件装配时的粘接量, $L_f-L$ 、 $W_f-W$  是滤光片与探测器外壳之间的粘接量。 $L_d-L_f$ 、 $W_d-W_f$  较小会导致探测器与结构件间的粘接强度不足,在探测器拼接配准、系统级测试等插拔探测器的过程中,造成探测器脱离结构支撑,拼接精度丢失,系统离焦。 $L_f-L$ 、 $W_f-W$  较小会导致滤光片与探测器外壳间粘接强度不够,产生漏缝,光敏面受污染。

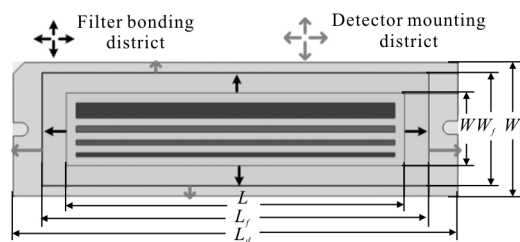


图 2 滤光片与探测器外壳之间的结构关系

Fig.2 Structural relationship between filter substrate and detector shell

滤光片厚度会影响有效视场光线在探测器上的会聚位置。如图3所示,滤光片厚度为 $T$ ,入射光线视场角 $\theta$ ,滤光片折射率 $N$ ,入射到光敏面的光线相比无滤光片时的位置偏移量为 $d$ ,偏移量系数 $\alpha$ ,则有:

$$d = T \cdot \left( \tan \theta - \tan \left( \arcsin \left( \frac{\sin \theta}{N} \right) \right) \right) = \alpha \cdot T \quad (1)$$

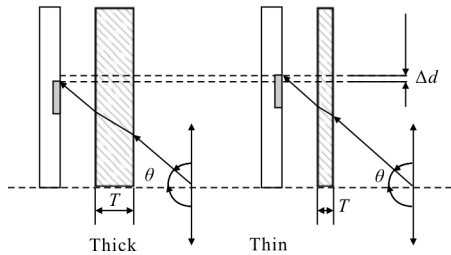


图3 滤光片厚度对有效视场光线偏移量的影响

Fig.3 Effect of filter thickness on the position offset of effective field light

图4中,当成像视场角 $\theta$ 较大时,偏移系数 $\alpha$ 急剧增大,这种情况下滤光片厚度 $T$ 对光线会聚位置偏移量 $d$ 的影响不可忽略。

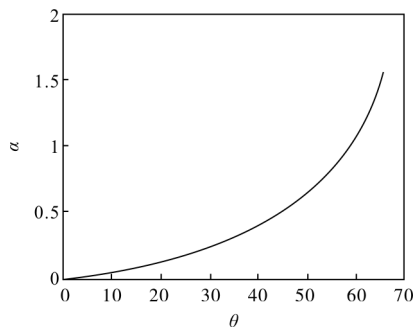


图4 滤光片为蓝宝石( $N=1.6$ )时,视场角 $\theta$ 与偏移量系数 $\alpha$ 的关系

Fig.4 Offset coefficient  $\alpha$  vs. field light angle  $\theta$  (sapphire, common filter material, refractive index  $N$  is 1.6)

### 2.2 滤光窗口尺寸

图5为滤光片与探测器的截面图, $T$ 为滤光片厚度, $D$ 为滤光片镀膜面与探测器光敏面间距, $\theta$ 为

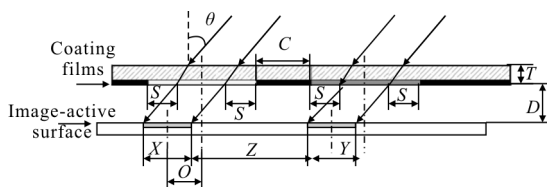


图5 滤光窗口尺寸与探测器光敏带尺寸的关系

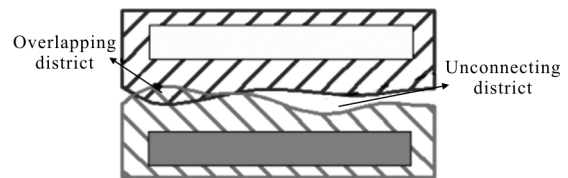
Fig.5 Feature size relationship between filter window and image-active stripe

到达探测器光线的最大入射角, $X$ 、 $Y$ 为光敏带宽度, $Z$ 为谱带间距, $S$ 为滤光窗口相对光敏带宽度的余量, $O$ 为滤光窗口相对光敏带的位置偏移量, $C$ 为相邻滤光窗口之间的掩膜宽度。

$$O = D \cdot \tan \theta \quad (2)$$

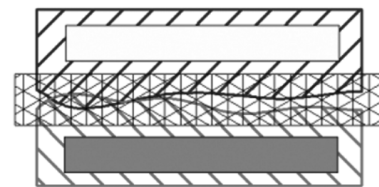
$$S = (Z - C) / 2 \quad (3)$$

掩膜为滤光片的最后一道加工工序,相邻两个滤光窗口间的掩膜要覆盖两种相邻滤光膜的交叠区,保证滤光窗口内膜层单一且无漏缝。图6(a)为两个相邻滤光膜之间的位置关系,由于镀膜工艺限制,两种滤光膜之间存在交叠或漏缝现象。图6(b)为镀掩膜后效果,掩膜覆盖了相邻滤光膜间的交叠或缝隙,保证了滤光窗口内膜层的单一性。



(a) 两个相邻滤光膜

(a) Two adjacent filter coatings



(b) 两相邻滤光膜之间的黑色掩膜

(b) Black layer between two adjacent filter coatings

图6 滤光膜与黑色掩膜的位置关系

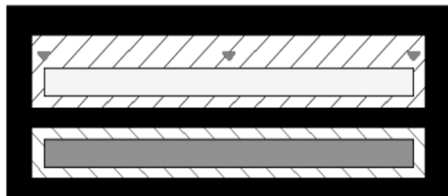
Fig.6 Positional relationship between filter coatings and black layer

and black layer

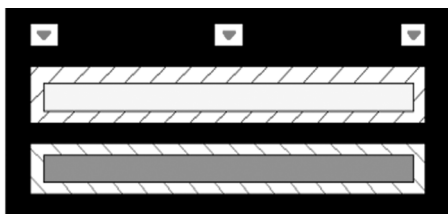
### 2.3 像元位置标识窗口

掩膜除了勾勒出滤光窗口外,还要露出探测器像元的特定位置标识,比如首、尾、中心像元等。中心像元标识主要用于焦面拼接,根据中心像元标识定位每片探测器的位置,通过拼接仪,完成多片探测器在相机焦平面上的高精度配准拼接。首尾像元则用于测量探测器光敏带的实际长度。通常探测器芯片和滤光片同步设计,像元位置标识的数量及位置设计均需考虑到后续滤光片粘接及探测器配准拼接的需求。

图7为典型的像元位置标识窗口形式。当靠近标识的谱带为肉眼可见时,采用图7(a)开窗形式,这种形式的掩膜易加工,缺点是开窗过大,易引入杂光。当靠近标识的谱带为肉眼不可见时,须采用图7(b)形式,在标识开窗区域镀人眼敏感的增透膜,这种形式的掩膜不易加工,有遮挡标识的风险,优点是能有效遮拦杂光。



(a) 谱带为肉眼可见时的窗口形式  
(a) Window form for eye-visible band



(b) 谱带为肉眼不可见时的窗口形式  
(b) Window form for eye-invisible band

图7 滤光片上的像元位置标识窗口

Fig.7 Pixel-location-symbol windows on filter

受拼接仪镜头相对孔径的限制,像元位置标识的开窗不能太小,否则会出现渐晕遮光,影响拼接效果。如图8所示,滤光片至芯片光敏面距离 $D$ ,掩膜为像元位置标识留的窗口宽度为 $A$ ,假设拼接仪镜头相对孔径为 $1/F$ ,则有

$$A = D/F \quad (4)$$

通常窗口尺寸 $A$ 要大于 $D/F$ ,并留有一定的对准粘接余量。

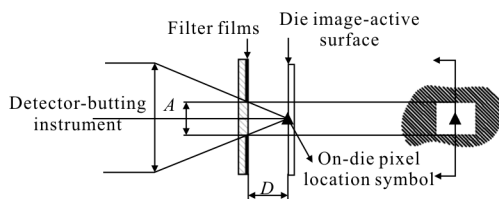


图8 像元位置标识窗口尺寸设计(基于拼接仪)

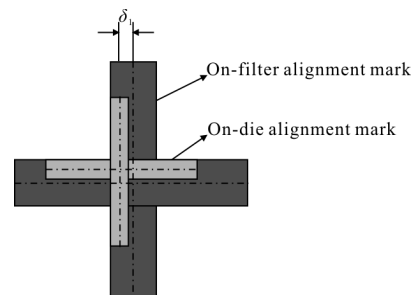
Fig.8 Size designing for pixel-location-symbol window based on butting instrument

## 2.4 封装对准标识

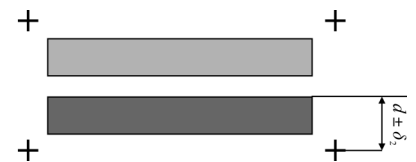
滤光片与探测器芯片上的对准标识是滤光片粘接时的结构基准。对于一些肉眼不敏感的多谱带滤光片,对准标识是确保滤光窗口与光敏带间相对位置精度的唯一特征。对准标识通常采用十字线形状,由粗对准和精对准两组组成,标识应避免掩膜区,分布于滤光片的四角位置。滤光窗口与芯片光敏带间对准精度 $\delta$ 主要由两个因素决定:

(1) 滤光片及芯片上精对准十字标识的长度、宽度:滤光片标识通常采用影印工艺,其精度低于芯片光刻精度。故滤光片上标识的长度、宽度大于芯片上标识的长度、宽度。在封装时,滤光片标识完全覆盖芯片标识,以确保对准精度。如图9(a)所示,其最大定位偏差为两种标识宽度差的一半 $\delta_1$ 。通常探测器芯片十字线宽约 $30\ \mu\text{m}$ ,滤光片十字线宽约 $60\ \mu\text{m}$ ,故 $\delta_1$ 为 $15\ \mu\text{m}$ 左右。

(2) 滤光片上精对准十字标识与滤光窗口间的相对定位精度:滤光片标识采用影印工艺,滤光窗口(掩膜)采用丝网印刷工艺,二者工序不同步,工艺精度不同,导致相对定位偏差。如图9(b)所示,定位偏差为 $\delta_2$ 。通常滤光片标识影印精度可达 $10\ \mu\text{m}$ ,掩膜



(a) 滤光片与芯片上对准标识的重合误差  
(a) Alignment deviation between on-die and on-filter cross marks



(b) 滤光片精对准十字标识与滤光窗口的相对定位精度  
(b) Relative position accuracy between the fine cross mark and band window on filter

图9 滤光片对准标识对封装精度的影响

Fig.9 Influences of on-filter alignment mark on the encapsulation accuracy

丝网印刷精度 50 μm, 故 δ<sub>2</sub> 为 50 μm 左右。

因此滤光窗口与芯片光敏带间对准精度 δ 为:

$$\delta = \sqrt{\sum \delta_i^2} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} \approx 52 \mu\text{m} \quad (5)$$

### 3 环境考核方法

目前国内有对航天器组件、电子器件、星载 CCD 相机、光学膜层等的环境考核依据, 国外也有类似的对发射类光学设备、航天器等环境考核的相关标准。目前国内外还没有针对航天光学遥感相机多谱带滤光片环境考核方面的标准或依据。文中提出的滤光片考核方法是在国内外已有标准的基础上选定的考核项目, 同时参考了欧空局、DALSA 公司对可见光探测器滤光片执行的考核条件。该考核方法已在发射和在研型号滤光片产品上实施并得到试验验证。

滤光片的环境考核项目包括高低温热循环、热存储、热真空、湿度、辐照试验, 环境考核后的测试包括光谱特性测试, 膜层牢固度测试<sup>[13-15]</sup>。图 10 是滤

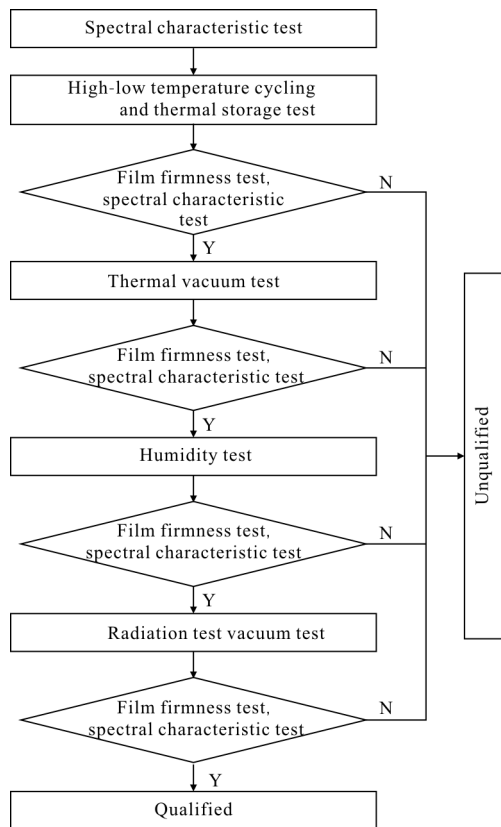


图 10 滤光片环境考核流程

Fig.10 Environmental assessment process for multi-band filter

光片的环境考核流程, 考核项目和测试项目按优先级依次进行, 流程有中止预案。在具体实施时, 可根据滤光片的生产厂家、批次、工艺成熟度等因素, 在保证考核充分的前提下, 对考核项目做删减和调整。

注意: 膜层牢固度测试、光谱特性测试不能在滤光片的同一区域实施, 以免影响光谱特性测试的准确性。流程中首先是滤光片的初次光谱特性测试, 数据留存, 作为后续光谱测试的数据对比参考。每项环境试验后, 滤光片需在实验室静置 24 h 之后进行膜层牢固度测试和光谱特性测试。

### 4 实验结果与分析

图 11 为某遥感相机滤光片及探测器的封装模型。图 12 为探测器光敏芯片上像元位置标识及对准标识的图片。该滤光片依据文中的方法进行了关键特征尺寸的设计。通过对准标识完成了滤光片与探测器芯片的对准封装; 以像元位置标识为基准, 完成

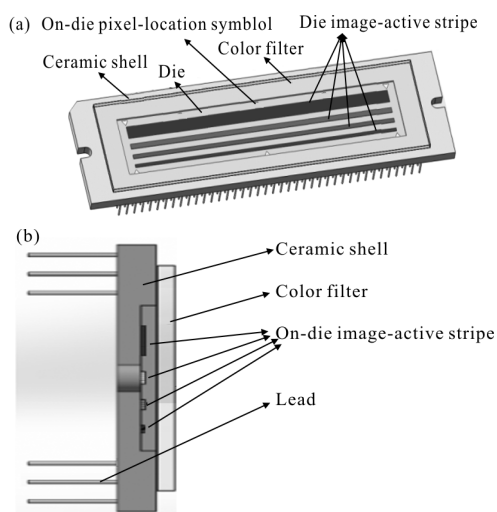


图 11 滤光片与探测器的封装模型

Fig.11 Packaging mode of color filter and detector

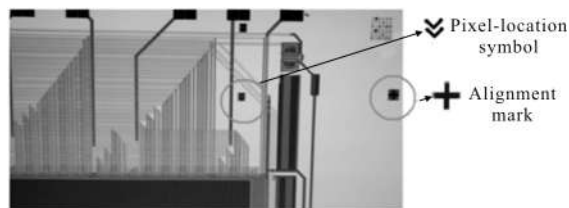


图 12 探测器芯片上的像元位置标识及对准标识

Fig.12 Detector on-die pixel-location symbol and alignment mark

了四片探测器在相机焦面的拼接配准；封装后的探测器与结构支撑粘接牢固，在相机总装测试过程中未出现松动离焦现象。图 13 为相机系统四片探测器的同一谱带在不同入瞳辐亮度下的响应曲线。四片探测器的非搭接区像元在同级入瞳辐亮度下响应基本一致，无杂光，无渐晕，响应不一致性基本在 5% 以内。图 14 为滤光片某一谱带经历各环境试验项目之后的透过率曲线叠加图，经过各项考核后，光谱特性曲线基本一致。该遥感相机滤光片设计成功，满足使用要求。

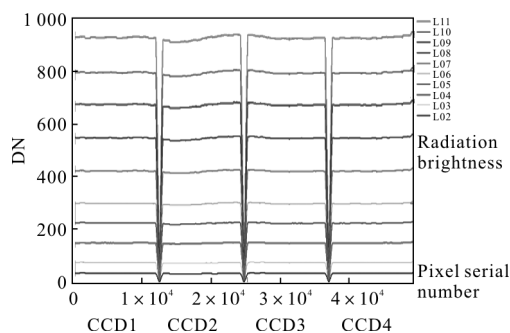


图 13 相机四片 CCD 的同一谱带在不同入瞳辐亮度下的响应曲线

Fig.13 Response curves of the same band in four CCDs under different radiation brightness from some camera

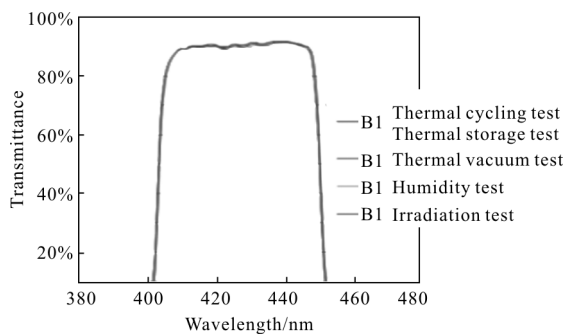


图 14 滤光片某谱带 B1 各项环境试验后的透过率曲线叠加图

Fig.14 B1-band transmittance curves of a multi-band filter after different environmental assessment tests from some space camera

## 5 结束语

文中建立了多谱带滤光片模型，介绍了其主要特征尺寸如基片外形尺寸、滤光窗口余量、像元位置标识窗口、封装对准标识等，给出了特征尺寸的设计计算方法，分析了滤光片的设计加工误差对滤光片与光敏芯片的封装对准精度、探测器在焦平面上的配准拼接以及相机的光谱响应特性等的

影响。基于国内外航天器环境考核标准，提出了一套针对多谱带滤光片的环境考核方法。最后给出了某相机多谱带滤光片的设计及考核实例，验证了方法的合理性。文中成果可用于航天光学遥感相机多谱带滤光片的设计及考核，具有较强的实用价值。

## 参考文献：

- [1] Xiong Shengqing. The application status and development trend of remote sensing technology in national land and resources [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2002, 51(1): 1-5. (in Chinese)  
熊盛青. 国土资源遥感技术应用现状与发展趋势[J]. 国土资源遥感, 2002, 51(1): 1-5.
- [2] Yang Bingxin. The development survey of foreign space reconnaissance camera and mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1998, 19 (2): 16-24. (in Chinese)  
杨秉新. 国外航天侦察相机和测绘相机发展概况[J]. 航天返回与遥感, 1998, 19(2): 16-24.
- [3] Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, et al. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)  
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [4] Wang Duoshu, Xiong Yuqing, Chen Tao, et al. Applications of optical thin film technology in China's aerospace industry [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, 32(8): 710-716. (in Chinese)  
王多书, 熊玉卿, 陈焘, 等. 空间光学薄膜技术[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(8): 710-716.
- [5] Douglas B L, Zlatan T, Robert A W, et al. Design and specification of optical bandpass filter for Hubble Space Telescope (HST) Advanced Camera for Surveys (ACS) [C]// SPIE, 1998, 3356: 308-320.
- [6] Antoni R. Progress in focal plane array technologies [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2012, 36(2-3): 342-473.
- [7] Zhang Da, Li Wei. Highly integrated multi-spectral TDI CCD focal plane system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1018006. (in Chinese)  
张达, 李巍. 高集成度多光谱 TDI CCD 焦平面系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1018006.
- [8] Xu Pengmei, Yang Hua, Fu Ruimin, et al. Optical butting,

- registration and focus-fixing of CCD camera for CBERS-1 satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2001, 22(3): 12-15. (in Chinese)
- 徐彭梅, 杨桦, 伏瑞敏, 等. CBERS-1 卫星 CCD 相机的光学拼接、配准和定焦 [J]. 航天返回与遥感, 2001, 22(3): 12-15.
- [9] Guo Jiang, Gong Dapeng, Zhu Lei. Calculation of overlapping pixels in interleaving assembly of CCD focal plane of mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1251-1257. (in Chinese)
- 郭疆, 龚大鹏, 朱磊. 测绘相机焦平面 CCD 交错拼接中重叠像元数计算[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1251-1257.
- [10] 光学膜层通用规范. GJB 2485-1995[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1995.
- [11] 航天器组件空间环境试验方法 热真空试验. QJ 2630.1-1994[S]. 北京: 中国航天工业总公司, 1994.
- [12] Li Yudong, Wang Bo, Guo Qi, et al. Testing system for radiation effects for CCD and CMOS image sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2778-2784. (in Chinese)
- 李豫东, 汪波, 郭旗, 等. CCD 与 CMOS 图像传感器辐射效应测试系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2778-2784.
- [13] 滤光玻璃测试方法光谱特性. GB/T 15489.1-1995 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [14] Wang Bing. Research and discussion on fineness and firmness for optical film-coating [J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, 24(2): 37-38. (in Chinese)
- 王冰. 光学零件镀膜后光洁度与牢固度的探讨[J]. 应用光学, 2003, 24(2): 37-38.
- [15] Li Kaipeng, Wang Duoshu, Li Chen, et al. Study on optical thin film parameters measurement method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1048-1052. (in Chinese)
- 李凯朋, 王多书, 李晨, 等. 光学薄膜参数测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1048-1052.