

# 一种机载多光谱相机的光学系统设计

孙鑫<sup>1,2</sup>, 白加光<sup>1</sup>, 王忠厚<sup>1</sup>, 白清兰<sup>1</sup>, 黄旻<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**采用外视场拼接的实施方案实现了机载多光谱相机宽幅覆盖和高空间分辨率的需求. 先通过探测能力估算和指标要求论证了子系统的设计参量, 然后基于光线追迹的原理给出了光学子系统的设计结果. 该子系统采用了 6 组共 9 片的双高斯复杂化结构型式, 焦距为 175 mm, 相对孔径为 1/3.6, 光谱范围 500~900 nm, 全视场角 18°. 该设计结果成像质量高, 色差、畸变及弥散斑尺寸均满足系统拼接要求. 该系统对加工装调要求适中, 可为该类多光谱相机的设计提供参考.

**关键词:**机载; 多光谱相机; 外视场拼接; 探测能力; 光学设计

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3160-5

## 0 引言

多光谱探测技术是 60 年代出现的一种遥感技术, 目前广泛地用于资源考察、农林、水文和地质勘查、环境监测、灾害调查以及测绘制图等方面<sup>[1]</sup>. 多光谱相机是在工作过程中同时用几个谱段对同一景物进行成像的相机, 因此它既可获取目标的图像信息, 又可获取目标的光谱信息.

在航空遥感应用中, 飞机是主要的搭载平台. 目前搭载多光谱相机的飞机飞行高度一般在 3 500~5 000 m 的范围之间, 分辨率较低, 幅宽覆盖窄. 随着速高比和地面覆盖等工作要求的提高, 宽幅高分辨率机载多光谱相机逐渐成为未来航空遥感的发展趋势. 本文给出了一种机载多光谱相机光学系统设计方案, 其光学子系统焦距为 175 mm, 相对孔径 1/3.6, 全视场角为 18°. 该相机采用两套子系统外视场拼接来实现, 相对内视场拼接方式更加容易达到图像配准的要求, 在实现高空间分辨率和大幅宽覆盖的同时克服了传统线阵推扫时谱段信息遗漏的缺陷.

## 1 系统方案论证

### 1.1 推扫方案比较

采用线阵 CCD 探测器的优势在于能保证在单维方向的像元数量, 容易满足幅宽要求<sup>[2]</sup>. 这类相机中的线阵探测器被分为若干连续谱段, 并采用相应数目的光学系统来分别对各谱段成像, 经过合成后得到连续图像. 这就要求针对不同谱段、谱段宽度分

别进行光学系统设计, 增加了设计和加工成本, 也不利于载荷轻量化的要求. 同时, 采用这种方式在完成一次推扫后, 不能得到地物完整的光谱信息, 需要往复推扫多次才能取得全谱段信息, 这一点是难以满足战略快速反应需要的.

如果采用大面阵 CCD 探测器, 在推扫方式、系统结构等方面均能带来便利. 在推扫方式上, 可以将谱段的排列方向与推扫方向垂直(线阵型推扫中谱段排列方向与推扫方向平行), 这样一次推扫可以获得相同地物的所有设计谱段信息, 没有遗漏. 在光学系统设计方面, 只需要设计一套光学系统, 就可以采用多个相同系统外视场拼接的方式来满足地面幅宽的要求. 图 1 为这两种推扫方式示意, 其中线阵探测器在推扫方向被划分了 3 个谱段, 面阵探测器(两片拼接)在垂直于推扫方向被划分了 4 个谱段.

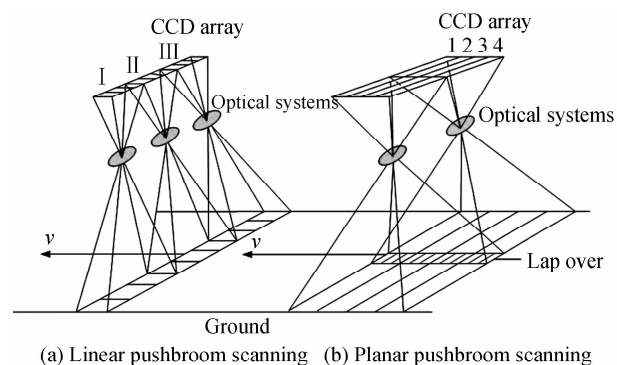


图 1 推扫方式

Fig. 1 Scheme of pushbroom modes

### 1.2 探测器选择

通过比较本文提出的方案, 决定采用面阵 CCD 探测器外视场拼接的方案. 经过调研多种产品, 决定选用国外某公司某型号探测器, 它具有线性动态范围大、灵敏度高、暗电流小、噪音低等优点, 具有可调电子快门功能. 其像元大小为  $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ .

### 1.3 谱段划分方案

采用在焦平面前端加入滤光的方式进行分光,避免了采用分光棱镜带来的体积、重量、结构和装配等问题.在预设计阶段,将 500~900 nm 范围均分为 16 个谱段,谱段宽度 25 nm,每个谱段的中心位置为该谱段中心波长处.在设计后期,将根据被探测目标的光谱特性对这 16 个谱段进行选择,在获得目标特征谱的同时减少了数据处理的压力<sup>[3]</sup>.

为了避免滤光片分光造成的谱段混叠,全谱段相机的光学系统一般要求实现像方远心光路<sup>[4]</sup>,这样会造成光学系统长度的增加结构的复杂化,不利于载荷轻量化、小型化的需求.而在本分光方案中,由于特征谱段间存在一定间隔,很大程度降低了谱段混叠的概率,也就降低了对远心度的要求,使得光学设计更好实现.

## 2 光学子系统指标的确定

### 2.1 焦距与视场

本系统为定焦系统,在保证地元分辨率的前提下,根据像元尺寸  $S_D$ 、地元尺寸  $S_G$  和工作距离  $d$ ,按式(1)得到系统的有效焦距

$$f' = (S_D/S_G)d \quad (1)$$

选取最大工作距离,计算得到系统的有效焦距为 175 mm.

根据选用的探测器尺寸计算出单台系统的视场角

$$2\omega = 2\arctan\left(\frac{0.5 \times \sqrt{33^2 + 44^2}}{175}\right) = 18^\circ \quad (2)$$

### 2.2 系统探测能力估算

相机的相对孔径是决定系统能量获取能力和分辨本领的重要参量,需要进行能量估算来确定.本系统的工作谱段在可见光和近红外区域,可以忽略热辐射的影响.通过两个步骤来可以确定系统的相对孔径.

首先,当系统  $F$  数确定后,其极限衍射斑直径就确定了.在本系统中要求衍射斑的直径要小于一个像元尺寸  $d$ ,根据公式

$$\frac{D}{f'} \geq \frac{2.44\lambda}{d} \quad (3)$$

将  $d=0.009$  mm,  $\lambda=900$  nm 代入式(3),得到系统的相对孔径要大于 1/4.

然后进行能量的复核计算.首先要考虑谱段范围和探测器响应,这里给出该探测器的量子效率,如图 2.

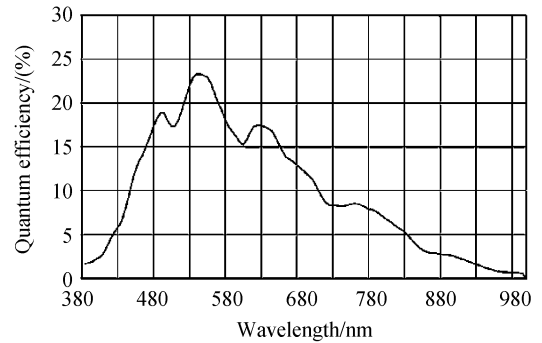


图 2 CCD 量子效率曲线  
Fig. 2 CCD quantum efficiency

从曲线可以看出,如果在 500 nm 和 900 nm 这两端探测器能够接收到足够的能量,则整个谱段的能量就可以认为是充足的.这里选择 500~525 nm 和 875~900 nm 这两个谱段进行能量计算.第一步需要估算地面目标照度.将太阳作为标准黑体,热力学温度选择在 5 900 K,根据普朗克定律可以得到太阳辐射光谱单位波长间隔、单位面积的辐出度<sup>[5]</sup>

$$W_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (4)$$

在设定的波长范围内积分得到该积分区域太阳辐射总能量

$$P_\lambda = A_{\text{sun}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda d\lambda \quad (5)$$

又由平方反比定律得到与该谱段对应的地面辐照度值

$$H_\lambda = \frac{P_\lambda}{4\pi d^2} \sin \alpha \tau_a(\lambda) \quad (6)$$

探测器像面的照度公式为<sup>[6]</sup>

$$E_i = \frac{(1-A^2)K_n(\alpha)\cos^n \alpha}{4F^2(1-M)^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [E(\lambda)\rho(\lambda)\tau_a(\lambda) + \pi L_u(\lambda)]\tau_0(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

由于带宽(积分区间)较小,为了方便估算,可以对公式(5)和(6)进行一些必要的简化

$$E_i = \frac{\pi}{4F^2} L(\lambda)\tau_0(\lambda) \quad (8)$$

$$H_\lambda = \frac{A_{\text{sun}} W_\lambda \Delta\lambda}{4\pi d^2} \sin \alpha \tau_a(\lambda) \quad (9)$$

$$L(\lambda) = \frac{H_\lambda}{\pi} \rho(\lambda) \quad (10)$$

式中, $\lambda$  的值选择为各谱段的中心波长, $\Delta\lambda$  为谱段宽度, $\alpha$  为太阳高角, $\rho(\lambda)$  为地面目标反射率, $\tau_a(\lambda)$  为大气透过率, $\tau_0(\lambda)$  为光学系统透过率, $L(\lambda)$  为到达光学系统入瞳处的辐亮度.

第二步需要确定探测器的曝光时间.设定相对地速和飞行高度,等效得到地面目标在探测器上每秒移动 292 个像元,即为了得到连续推扫图像,探测

器的最长曝光时间为 3.42 s. 为了将每帧的像移控制在半个像元之内, 帧曝光时间  $t$  取  $1/292 \times 0.5 = 1.72$  ms.

第三步, 根据像面照度  $E_i$ 、曝光时间  $t$ 、探测器量子效率  $Q_E$  最小信号电压  $V_{\min}$  和探测器的光电灵敏度  $R(\lambda)$ , 根据式(11)

$$V_{\min} = E_i R(\lambda) Q_E(\lambda) t \quad (11)$$

就能得到在探测器的最小探测能力时光学系统需要达到的  $F^\#$  数.

已知该探测器的光灵敏度典型值为 2 000 mV/lux. s, 最小探测信号 2 mV, 太阳高角为  $70^\circ$ , 联立式(4)~(11), 将计算得到的数据列表 1.

表 1 分波段能量估算结果

选择波段 /nm	中心波长 /nm	太阳辐照度 /( $\times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	入瞳照度 /( $\times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	像面照度 /( $\times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	量子效率 /(% )	$F^\#$ 数
500~525	512	2.776	2.652	$9.63 \times 10$	16	17
875~900	888	1.407	1.344	4.88	2.5	4.7

根据本文的计算可以看到, 探测器在短波端接收到的能量充足, 而到长波端由于量子效率的剧减而下降明显, 所以在  $F^\#$  的确定上, 要以长波端的  $F^\#$  为下限并综合考虑弥散斑的尺寸要求. 这里考虑到简化公式带来的误差, 认为选择  $F^\# = 3.6$  较为合适.

### 3 光学系统设计结果和像质分析

根据本文确定的分系统参量可知, 该光学系统属于中等视场、中等孔径的长焦透射物镜, 波段范围较宽, 在设计中需要考虑二级光谱的消除问题<sup>[7-8]</sup>. 在基本结构型式, 双高斯型物镜的对称结构可以使得彗差和畸变以及垂轴色差得到较好的校正<sup>[9]</sup>. 但同时对称结构带来的斜光束渐晕对像面照度均匀性的影响也较为突出, 需要在复杂化设计时同时考虑系统的失对称性小, 又对像方主光线出射角度进行控制, 使其接近像方准远心系统. 经过优化得到的系统结构为图 3.

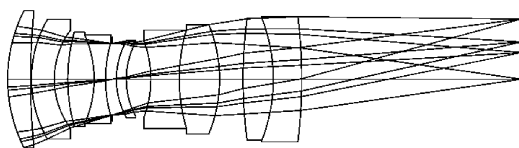


图 3 光学系统结构图  
Fig. 3 Optical system layout

从设计结果来看, 边缘视场出射主光线与光轴夹角在  $10^\circ$  以内, 相对像面中心的照度下降在  $<5\%$ , 总体照度均匀性较高. 经过全局优化后, 系统的传递函数曲线和垂轴像差曲线如图 4 和图 5, 在

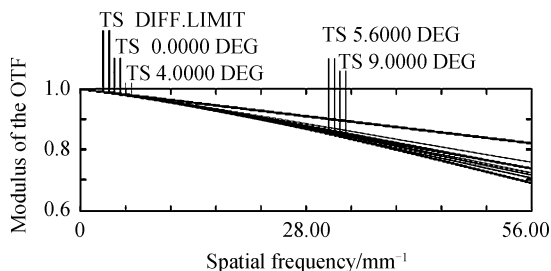


图 4 系统 MTF 曲线  
Fig. 4 MTF curve

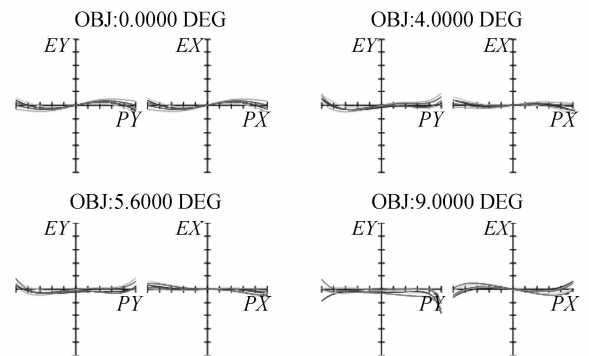


图 5 垂轴像差曲线  
Fig. 5 Ray aberration curve

奈奎斯特频率 (56 lp/mm) 处的平均传函达到 0.7.

在部分元件上使用了特种火石玻璃, 并选择了三个特征波长进行光学系统的色差优化设计, 得到结果如图 6, 红光和蓝光在 0.7 视场相交, 与中心波长 (绿光) 的距离为 0.014 6 mm, 即为系统的二级光谱大小.

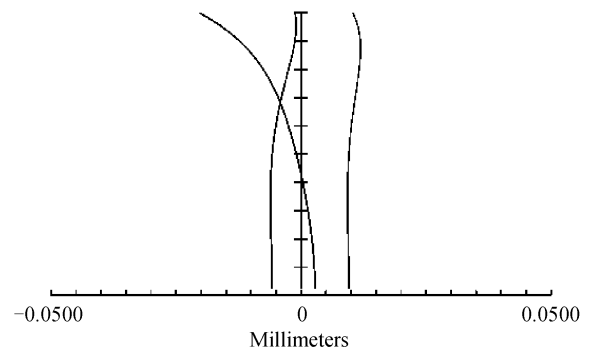


图 6 横向色差曲线  
Fig. 6 Longitudinal aberration curve

系统点列图、场曲和畸变曲线如图 7 和图 8. 可以看到各个视场的 RMS 半径都小于半个像元尺寸, 即满足了 85% 的光能量会聚在一个像元内的要求<sup>[6]</sup>.

由于系统采用外视场拼接方式, 在配准要求方面对色畸变 (倍率色差) 不做特殊要求. 在本系统中, 拼接得到的图像中心区域为分系统的边缘视场区域, 即就是要求分系统成像时各种色光的几何失真在 0.7 视场以外要达到 0.5 个像元尺寸以内. 从图 8

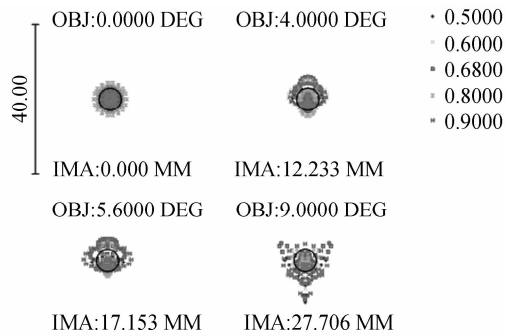


图7 系统点列图

Fig.7 Spot diagram

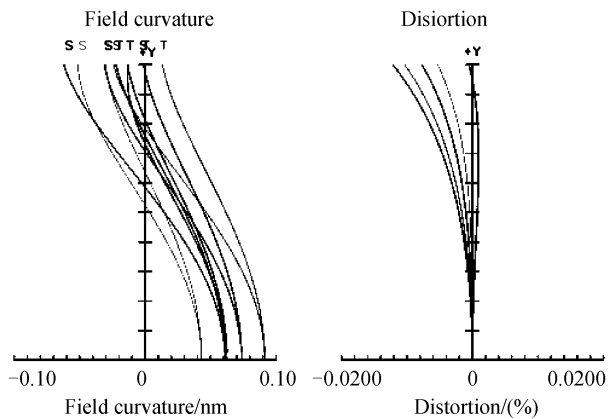


图8 场曲和畸变曲线

Fig.8 Field curvature and distortion

看出,各谱段在边缘视场的几何失真在 0.02% 以内,以失真最高的 900 nm 谱线为例,计算得到绝对畸变的值为  $4.3 \mu\text{m}$ ,在 1/2 像元内,说明畸变校正结果达到拼接要求。

考虑到系统的工程实施性,对其进行了公差容限的计算.各元件的半径通过套取某光学零件模板的途径得到,面形误差为 1 个光圈.各元件的中心厚度及空气间隔公差要求均为  $\pm 0.015 \text{ mm}$ ,系统光轴的偏心要求为 0.015 mm,加工装调难度要求适中,便于工程实现。

## 4 结论

宽幅高分辨率机载多光谱相机在航空遥感领域的作用越来越受到重视.本文设计了一种多光谱相机的光学系统,并对推扫方案以及系统探测能力进行了详细的论证和估算.该套系统的特点是空间分辨率高,结构简单,采用大面阵 CCD 探测器外视场

拼接的方式达到了宽地幅覆盖,可以为未来机载多光谱相机的设计提供一定的理论依据。

### 参考文献

- [1] XU Hong, WANG Xiang-jun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military[J]. *Infrared And Laser Engineering*, 2007, **36**(1):13-17.  
许洪,王向军.多光谱、超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.
- [2] JIAO Bin-liang, WANG Zhao-hui, LIN Ke-xiang, et al. A multispectral CCD camera for satellite use[J]. *Chinese Journal Of Scientific Instrument*, 2004, **25**(2):146-151.  
焦斌亮,王朝晖,林可祥,等.星载多光谱 CCD 相机研究[J]. *仪器仪表学报*, 2004, **25**(2):146-151.
- [3] ZHANG Wei, LI Ke-xin, WU Chun-feng, et al. Wavelength bands selection method of multispectral target detection[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(6):893-897.  
张伟,李克新,武春风,等.多光谱目标探测的波段选择[J]. *光学技术*, 2005, **31**(6):893-897.
- [4] LAN Li-yan, HUANG Ying. Optical system design of wide-field, multi-speed and high-resolution CCD camera [J]. *Spacecraft Recovery&Remote Sensing*, 2002, **23**(4):34-37.  
兰丽艳,黄颖.星载大视场多光谱高分辨率 CCD 相机光学系统的设计[J]. *航天返回与遥感*, 2002, **23**(4):34-37.
- [5] SMITH W J. Modern optical engineering[M]. The McGraw-Hill Companies, Inc. 2000:231-234.
- [6] CHEN Shi-ping. Design and experimentation of space camera [M]. Beijing: China Astronautic Publishing house, 2003:256-259.  
陈世平.空间相机设计与试验[M].北京:宇航出版社, 2003:256-259.
- [7] CHEN Li-wu, YANG Jian-feng, HONG Xin-hua, et al. Wide bands long focal refracting lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9):1123-1126.  
陈立武,杨建峰,洪新华,等.宽谱段折射式长焦光学镜头[J]. *光子学报*, 2004, **33**(9):1123-1126.
- [8] YANG Qing-hua, ZHAO Bao-chang, ZHOU Ren-kui. Correction of secondary spectrum based on normal dispersion glasses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4):772-775.  
杨庆华,赵宝常,周仁魁.基于正常色散玻璃二级光谱的校正[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4):772-775.
- [9] YUAN Xu-cang. Optical system design[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1983:271-274.  
袁旭沧.光学设计[M]. 2版.北京:科学出版社, 1983:271-274.

## Optical System Design of an Airborne Multispectral Camera

SUN Xin<sup>1,2</sup>, BAI Jia-guang<sup>1</sup>, WANG Zhong-hou<sup>1</sup>, BAI Qing-lan<sup>1</sup>, HUANG Min<sup>1</sup>

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

**Abstract:** The scheme of dual-camera combination is given to obtain high spatial resolution and wide pushbroom scanning width for airborne multispectral camera. The parameters of the optical subsystem are determined by system detecting capability estimation and user's requirement. Subsequently, the subsystem design is presented based on ray-tracing technique. The subsystem adopts the double-gauss configuration, which has an effective focal length of 175 mm, a field of view of  $18^\circ$ , an  $F$ -number of  $F/3.6$  and the spectral range of 500 ~ 900 nm. The result is highly optimized to meet the requirement of combination. The moderate tolerance calculation results show that the system is easy to be fabricated and assembled.

**Key words:** Airborne; Multispectral camera; FOV combination; Detecting capability; Optical design



**SUN Xin** was born in 1980. After graduated from Northwest University with B. S. degree in 2001, he has been working at Xi'an Institute of Optical and Precision Mechanics, CAS, and received the M. S. degree in 2006. Now he is a Ph. D. degree candidate, and his research interests focus on optical design.