

文章编号 1004-924X(2012)05-1041-07

## 遥感相机焦面 CCD 机械拼接中重叠像元数的确定

吕恒毅<sup>1\*</sup>, 刘 杨<sup>2</sup>, 郭永飞<sup>1</sup>

(1 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对推扫式遥感相机前后摆成像中焦面拼接的 CCD 其像片间出现视场漏缝的问题, 提出了一种焦面 CCD 的非均匀重叠像元数机械拼接方法。首先, 构造了相机前后摆的成像原理模型; 接着, 分析了 CCD 间产生地面视场漏缝的原因, 并依据模型推导出相机前摆和后摆时各 CCD 视场间漏缝大小的数学公式, 从而得到各片间容许的最少重叠像元数量公式。在此基础上, 进一步给出了后续电子学图像拼接与配准中片间重复像元数的函数形式, 为实现图像无缝拼接提供了软件实现依据。分析表明, 该方法的理论误差  $\epsilon$  小于一个像元尺寸, 即  $|\epsilon/D| < 1$ 。最后, 给出了工程应用实例。

**关键词:** 遥感相机; 焦平面; CCD 拼接; 前后摆; 重叠像元

**中图分类号:** V443.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122005.1041

### Computation of overlapping pixels of mechanical assembly CCD focal planes in remote sensing cameras

Lü Heng-yi<sup>1\*</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, GUO Yong-fei<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China; 2. Department of Control Science and Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: lv\_hengyi@163.com

**Abstract:** According to the imaging gaps caused by scrolling imaging in the conventional assembled focal plane for a push-broom camera, a mechanical assembling method with uneven overlapping pixels was proposed. Firstly, a model was established to simulate the imaging process when the camera was scrolled. Then, the reason that the gaps appear was analyzed, and a mathematical formula for the gaps between the CCD viewing fields at a certain scrolling angle was derived. Accordingly, the allowable minimum quantity of the overlapping pixels between every two CCDs was derived as well. On these bases, a function of overlapping pixels of images was given for subsequent software programs to eliminate the superfluous pixels and to realize the gapless assembly. Analysis indicates that the error  $\epsilon$  of this assembling method is less than one pixel, which satisfies  $|\epsilon/D| < 1$ . Finally, an example was given.

**Key words:** remote sensing camera; focal plane; CCD assembly; scroll; overlapping pixel

收稿日期: 2011-09-31; 修订日期: 2011-11-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61036015)

## 1 引言

空间遥感相机<sup>[1-3]</sup>是空间对地观测的重要手段,在军事侦察、资源勘探和测绘等领域发挥着至关重要的作用。在空间遥感相机的诸多技术指标中,大视场一直是成像光学系统的一个重要发展方向,是最大限度获取地面信息的直接途径。然而,随着相机视场范围的扩大,成像焦面的长度也越来越大,已经远远超出了 CCD 光电探测器的长度。因此,当单片 CCD 的长度不满足设计需求时,需要连接多片 CCD 组合成一个大视场的 CCD 阵列,即 CCD 拼接。法国 SPOT 卫星中的 HRV 相机就是这一技术的成功应用实例。

目前,比较常用的拼接方法主要有光学拼接<sup>[4]</sup>和机械拼接<sup>[5-6]</sup>2 种。光学拼接方法虽然精度较高,但对于全反射光学系统会引入色差,影响成像质量;同时,棱镜的拼接长度也受到镜坯材料、加工精度和棱镜胶合水平的限制而难以超过 0.22 m。因此,光学拼接方法不适合在全反式大视场范围的遥感相机中使用。机械拼接是将 CCD 在焦平面上拼接成 2 行交错平行阵列的形式,这样第一行的空间间隙可由第二行 CCD 补上。机械拼接结构紧凑、不引入附加色差、焦面简单,后续图像处理可采用电子学对接的方式组合成整体图像,因此被广泛采用。

在 CCD 的机械拼接中,考虑到卫星偏流角<sup>[7-8]</sup>会带来 CCD 片间视场出现漏缝,因此通常使相邻 CCD 间存在一定的重叠区域,即要有一定的重叠像元数,这样相机对偏流角的影响便具备了一定的承受能力。与此同时,在相机的功能需求中,通常会要求其具备一定角度内的前(仰)视和后(俯)视能力<sup>[9-10]</sup>。但目前的机械拼接方法均采用传统的固定重叠像元数的方法,该方法由于没有明确的重叠像元数量指导公式,可能出现 2 种弊端:(1)极端情况下,在给定的相机地面视场宽度要求下,由于存在冗余的重叠像元,会造成 CCD 数量的增加,造成成本的提高;(2)当拼接的 CCD 片数较多时,前后摆成像中,两侧 CCD 的重叠像元数可能不足以构成无缝视场。

针对这一问题,本文分析了前后摆成像时出现的漏缝现象,并构建了其数学模型,分析了俯仰角对各片 CCD 间视场漏缝大小的影响,并以此为依据给出了科学的非均匀拼接方法,最后给出实际应用示例并和其它常用方法作了比较。

## 2 模型构建及重叠像元数计算

空间相机前摆或后摆时对地成像视场宽度会发生一定的变化。基于对称关系,仅以前摆为例,空间相机成像模型可由图 1 表示。

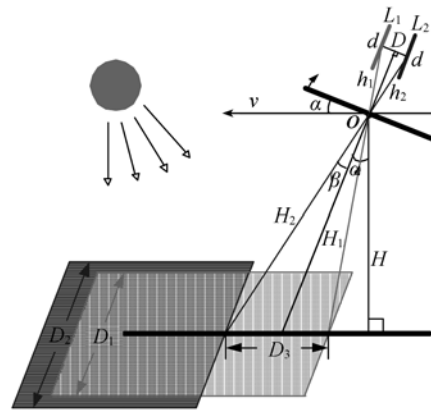


图 1 相机前摆时的成像原理模型

Fig. 1 Imaging model for camera in front scroll

图 1 中,令相机焦平面上 2 条线段  $L_1$  和  $L_2$  的长度均为  $d$ ,并以俯仰轴对称平行摆放,间距为  $D$ ,二者中点均处于焦面视场中心轴上;相机以仰角  $\alpha$ 、沿速度  $v$  方向向前推扫;卫星轨道高度为  $H$ ,相机焦距为  $f$ 。则有:

$$\beta = \arctan[(D/2)/f], \quad (1)$$

$$h_1 = h_2 = \|(D/2, f)\|_2, \quad (2)$$

$$\begin{cases} H_1(\alpha) = H/\cos(\alpha - \beta) \\ H_2(\alpha) = H/\cos(\alpha + \beta) \end{cases}, \quad (3)$$

由成像系统几何比例关系:

$$\begin{cases} h_1/H_1(\alpha) = d/D_1(\alpha) \\ h_2/H_2(\alpha) = d/D_2(\alpha) \end{cases}, \quad (4)$$

则  $L_1$  和  $L_2$  对应的地面覆盖宽度分别为:

$$D_1(\alpha) = \frac{d \cdot H}{\|(D/2, f)\|_2} \cdot \frac{1}{\cos(\alpha - \beta)}, \quad (5)$$

$$D_2(\alpha) = \frac{d \cdot H}{\|(D/2, f)\|_2} \cdot \frac{1}{\cos(\alpha + \beta)}, \quad (6)$$

$L_1$  和  $L_2$  在地面沿推扫方向的前后间距为:

$$D_3(\alpha) = H \cdot [\tan(\alpha + \beta) - \tan(\alpha - \beta)]$$

$$= 2 \cdot \tan\beta \cdot H \cdot \frac{1 + \tan^2\alpha}{1 - \tan^2\beta \cdot \tan^2\alpha}, \quad (7)$$

显然,  $D_1(\alpha)$ ,  $D_2(\alpha)$  和  $D_3(\alpha)$  均为以  $\alpha$  为自变量的单调递增函数; 且有  $L_1$  和  $L_2$  在地面对应的幅宽比例为:

$$D_2(\alpha) / D_1(\alpha) = \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos(\alpha + \beta)} = \frac{1 + \tan\alpha \cdot \tan\beta}{1 - \tan\alpha \cdot \tan\beta}, \quad (8)$$

亦为单调递增函数。即是说, 当相机前摆角度增大时, 焦面上  $L_1$  和  $L_2$  对应的地面覆盖宽度均增大, 但增大的幅度有所差异, 且该差异随  $\alpha$  增大逐渐扩大。

从而可推论出, 在采用交错式机械拼接的相机焦平面上, 假设任意 2 片相邻的 CCD 重叠像元数恰好为零, 当相机前后摆成像时, 由于前后 2 行 CCD 在地面上的对应幅宽存在差异, 则各 CCD 间的地面视场会出现漏缝现象, 前摆时相机对地成像的俯视图如图 2 所示。

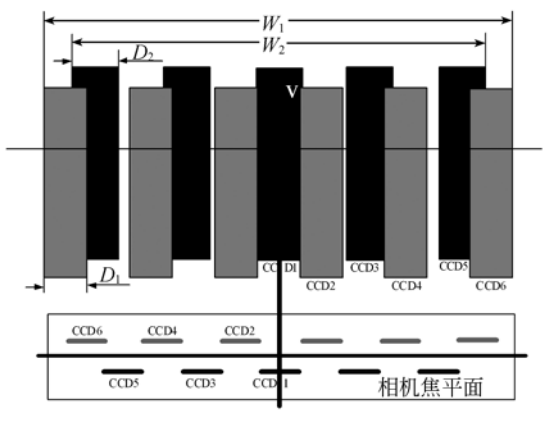


图 2 相机前摆时的对地成像漏缝示意图

Fig. 2 Diagram of gaps for camera in front scroll

从图 2 可以看到, 相机前摆时, 由于后排 CCD 的单片对地覆盖宽度大于前排, 导致其与前排 CCD 视场交界处或者出现重叠, 或者出现漏

$$\Phi_{2k, 2k+1} = \left[ (2k+1) - 2 + \frac{1}{2} \right] \cdot D_2 - \left[ 2k - 1 + \frac{1}{2} \right] \cdot D_1 = \left( 2k - \frac{1}{2} \right) \cdot (D_2 - D_1), \quad (9)$$

其中,  $k=1, 2, \dots$ ;  $D_2, D_1$  分别为前摆  $\alpha$  角时前排和后排的单片 CCD 对应的地面幅宽。而第  $2k$  个

$$\Psi_{2k-1, 2k} = \left[ (2k-1) - 1 + \frac{1}{2} \right] \cdot D_2 - \left[ 2k - 2 + \frac{1}{2} \right] \cdot D_1 = \left( 2k - \frac{3}{2} \right) \cdot (D_2 - D_1), \quad (10)$$

缝, 且随着向两侧的延伸, 重叠区域和漏缝间距均有增大的趋势。而对于后摆成像时, 相应地也存在这一问题, 只是 CCD 间的视场重叠与漏缝关系发生了转变(即前摆中视场重叠的 2 片 CCD, 在后摆中变为视场漏缝; 前摆中视场漏缝的 2 片 CCD, 在后摆中变为视场重叠), 后摆时对地成像的俯视图如图 3 所示。

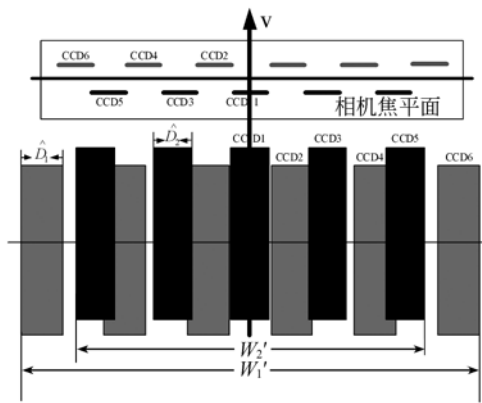


图 3 相机后摆时的对地成像漏缝示意图

Fig. 3 Diagram of gaps for camera in afterward scroll

从图 3 中可以看出, CCD5 和 CCD6 的视场覆盖区域由前摆中的重叠变为现在的漏缝, 其他组 CCD 之间亦同。

通过上述分析, 定性地给出了视场漏缝的原因。下面只需定量地推导出俯仰角  $\alpha$  与各片 CCD 间漏缝大小的数学关系, 便可以在实际工程中根据前后摆的幅度指标计算出合理的 CCD 片间重叠像元数, 从而保证相机在一定范围内前后摆时视场无漏缝。

鉴于对称关系, 下面只对视场中心轴左侧 CCD 进行分析。参照图 2, 当相机前摆成像时(仰角为  $\alpha$ ), 只有第偶数个 ( $2k$ ) CCD 与第  $2k+1$  个 CCD 之间的地面视场存在漏缝, 且大小可归纳表示为:

CCD 与第  $2k-1$  个 CCD 之间的地面视场不存在漏缝, 而存在重叠区域, 且大小可归纳表示为:

另一方面,对于相机后摆情况,当相机后摆角为  $\alpha$ (即仰角为  $-\alpha$ )时,参照图 3。第  $2k-1$  个

$$\Phi_{2k-1,2k} = \left[2k-2+\frac{1}{2}\right] \cdot \hat{D}_1 - \left[(2k-1)-1+\frac{1}{2}\right] \cdot \hat{D}_2 = \left(2k-\frac{3}{2}\right) \cdot (\hat{D}_1 - \hat{D}_2), \quad (11)$$

其中,  $k=1,2,\dots$ ;  $\hat{D}_1, \hat{D}_2$  分别为后摆  $\alpha$  角时前排和后排的单片 CCD 对应的地面幅宽。而第  $2k+$

$$\Psi_{2k,2k+1} = \left[2k-1+\frac{1}{2}\right] \cdot \hat{D}_1 - \left[(2k+1)-2+\frac{1}{2}\right] \cdot \hat{D}_2 = \left(2k-\frac{1}{2}\right) \cdot (\hat{D}_1 - \hat{D}_2), \quad (12)$$

依据前后摆成像的几何对称关系有:

$$\begin{cases} \hat{D}_1 = D_2 \\ \hat{D}_2 = D_1 \end{cases}, \quad (13)$$

因此可得:

$$\begin{aligned} \Psi_{2k-1,2k} &= \Phi_{2k-1,2k} \\ \Psi_{2k,2k+1} &= \Phi_{2k,2k+1}, \end{aligned} \quad (14)$$

即相机前摆和后摆角度相同时,同一组相邻 2 片 CCD 的视场重叠和漏缝宽度相等。

而考虑前摆和后摆 2 种情况(在同样的摆幅下),便可以兼顾所有可能出现的视场漏缝情况。因此可将式(9)和式(11)合并得到任意 2 片相邻 CCD 在前后摆角为  $\alpha$  时可能出现的地面漏缝宽度大小公式,即第  $i$  片与第  $i+1$  片 CCD 的地面视场漏缝如式(15)所示:

$$\Phi_{i,i+1} = \left[\frac{2i-1}{2}\right] \cdot (D_2 - D_1), \quad (15)$$

其中,  $i=1,2,3,\dots$ , 代表 CCD 序号。则可知若要满足相机前后摆  $\alpha$  角时均不产生视场漏缝现象,则第  $i+1$  片 CCD 对应的地面视场须至少向第  $i$  片移动  $\Phi_{i,i+1}$  的地面距离。

基于此,由图 1 中的几何比例关系便可以推导出各 CCD 在焦平面上对应的片间相对移动量,从而计算得到各 CCD 间的重叠像元数。在相机焦平面上,第  $i+1$  片 CCD 须向第  $i$  片移动的对距离可由式(16)表示:

$$\phi_{i,i+1} = \phi_{2k-1,2k} = \phi_{2k,2k+1} = \left[i-\frac{1}{2}\right] \cdot d \cdot \left[1-\frac{D_1(\omega)}{D_2(\omega)}\right], \quad (16)$$

其中,  $k=1,2,\dots$ ;  $i=1,2,\dots$ ;  $d$  为各 CCD 的像元阵列长度。令 CCD 像元尺寸为  $\lambda \times \lambda$ , 每片 CCD 像元数为  $N$ , 并将式(5)和式(6)带入式(16)则有:

$$d = N \cdot \lambda, \quad (17)$$

CCD 与第  $2k$  个 CCD 之间的地面视场存在漏缝,且大小可归纳表示为:

1 个与第  $2k$  个 CCD 之间的地面视场不存在漏缝,而存在重叠区域,且大小可归纳表示为:

则式(16)可化为:

$$\phi_{i,i+1} = \lambda \cdot N \cdot \left[i-\frac{1}{2}\right] \cdot \left[1-\frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos(\alpha-\beta)}\right], \quad (18)$$

因此第  $i$  片与第  $i+1$  片之间的重叠像元数应至少为:

$$\begin{aligned} \gamma_{i,i+1} &= \left[\frac{\phi_{i,i+1}}{\lambda}\right] + 1 = \\ &= \left[N \cdot \left[i-\frac{1}{2}\right] \cdot \left[1-\frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos(\alpha-\beta)}\right]\right] + 1 = \\ &= \left[\frac{2 \cdot N}{1+\cot(\arctan(D/2f)) \cdot \cot\alpha} \cdot \left[i-\frac{1}{2}\right]\right] + 1 \end{aligned} \quad (19)$$

其中,  $[\cdot]$  是取整函数。由于式(19)中  $\frac{\phi_{i,i+1}}{\lambda}$  是小数(令其小数部分为  $\chi$ ), 而拼接中重叠像元数须是整数,故需对其进行取整处理。舍掉的小数部分  $\chi = \frac{\phi_{i,i+1}}{\lambda} - \left[\frac{\phi_{i,i+1}}{\lambda}\right]$ , 从而有  $\chi \in (0,1)$ 。因此,此时会有  $\chi$  个像元尺寸的像漏缝,所以最少的重叠像元数应在此基础上加一个像元,即  $\gamma_{i,i+1} = \left[\frac{\phi_{i,i+1}}{\lambda}\right] + 1 = \frac{\phi_{i,i+1}}{\lambda} + 1 - \chi$ 。所以,该方法的理论误差  $|\varepsilon| = \left|\gamma_{i,i+1} - \frac{\phi_{i,i+1}}{\lambda}\right| \cdot \lambda = |1-\chi| \cdot \lambda < \lambda$ 。

令相机前后摆幅度均不超过  $\alpha_{\max}$ , 则将  $\alpha = \alpha_{\max}$  代入式(19), 并按照式(19)得到的重叠像元数进行 CCD 拼接, 拼接后的相机焦面及地面视场示意图如图 4 所示。

经本文方法拼接后,在  $\alpha_{\max}$  摆动范围内不会出现视场漏缝,且各片 CCD 间均会有一些的视场重叠区域,该区域大小随  $\alpha$  而变化。而对于后续电子学图像拼接,需要剔除图像上的重复部分达到无缝。

考虑极限位置,当前摆至  $\alpha_{\max}$  角度时,只有

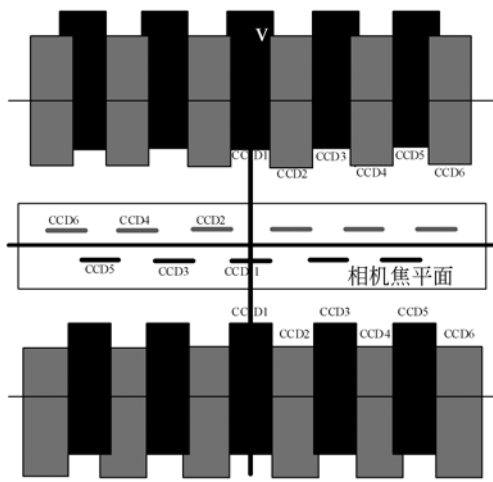


图 4 本文方法拼接后焦面与地面视场示意图

Fig. 4 Focal plane and viewing field schematic by using the proposed assembling method

第  $2k$  与  $2k-1$  片 CCD 视场间存在重叠区域,记为  $\Psi'_{2k-1,2k}$ ; 当后摆至  $\alpha_{\max}$  角度时,只有第  $2k$  与  $2k+1$  片视场间存在重叠区域,记为  $\Psi'_{2k,2k+1}$ 。则有:

$$\begin{cases} \Psi'_{2k-1,2k} = 2 \cdot \Psi_{2k-1,2k} = (4k-3) \cdot (D_2 - D_1) \\ \Psi'_{2k,2k+1} = 2 \cdot \Psi_{2k,2k+1} = (4k-1) \cdot (D_2 - D_1) \end{cases} \quad (20)$$

其中,  $k=1, 2, \dots$ ; 对应的 CCD 重叠像元数为:

$$\begin{cases} \gamma'_{2k-1,2k} = (N \cdot \Psi'_{2k-1,2k}) / D_1 \\ \gamma'_{2k,2k+1} = (N \cdot \Psi'_{2k,2k+1}) / D_1 \end{cases} \quad (21)$$

### 3 应用举例与比较

已知:某空间遥感相机的轨道高度为 500 km,光学系统焦距为 9 m;用 13 片 TDICCD 实现机械式视场拼接,每片 TDICCD 每级 4 096 个像元,像元尺寸为  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ ;焦面上前后 2 行 TDICCD 的间距  $D=4 \text{ cm}$ ;相机前后最大摆幅  $\alpha_{\max}=45^\circ$ 。则由式(19)可知,若焦面上 TDICCD 与图 2 中的 CCD 标号定义顺序相同,则各 TDICCD 之间的重叠像元数应均不小于如表 1 所示相应数值。另一侧采用对称的拼接方式。

而在前后最大摆幅下,各 TDICCD 之间的地面视场重叠宽度所对应的像元数(式(21)所示)如表 2 所示。

表 1 机械拼接重叠像元数计算表

Tab. 1 Calculation of minimum overlapping pixels in assembly

搭接位置	重叠像元数
TDICCD1~TDICCD2	11
TDICCD2~TDICCD3	29
TDICCD3~TDICCD4	47
TDICCD4~TDICCD5	65
TDICCD5~TDICCD6	83
TDICCD6~TDICCD7	101

表 2 最大摆幅下等效重叠像元数表

Tab. 2 Number of equivalent overlapping pixels at maximum scrolling angle

搭接位置	重叠像元数	
	前摆 $45^\circ$	后摆 $45^\circ$
TDICCD1~TDICCD2	22	0
TDICCD2~TDICCD3	0	58
TDICCD3~TDICCD4	94	0
TDICCD4~TDICCD5	0	130
TDICCD5~TDICCD6	166	0
TDICCD6~TDICCD7	0	202

为做比较,令星下点成像时地面覆盖宽度的指标要求为 29 km,则传统的固定重叠像元数机械拼接方法和本文方法的比较如表 3 所示。

表 3 本文方法与传统方法比较表

Tab. 3 Comparison between conventional method and proposed method

拼接方法	所用 CCD 片数	最大视场漏缝
固定 80 重叠像元	13	19 个像元
固定 150 重叠像元	14	0
本文方法	13	0

由表 3 可知,传统方法中由于没有考虑前后摆成像时的漏缝问题,所以所选择的重叠像元数是固定的且带有盲目性。若选择不当将导致 CCD 数量增加或者产生视场漏缝。

## 4 结 论

机械式交错拼接的遥感相机焦面中,由于前后摆时前后 2 排 CCD 的物距差异,导致片间出现视场漏缝。某一摆角下,两侧 CCD 间漏缝宽度大于中间处,因此,采用固定的重叠像元数进行 CCD 拼接是不合理的。前摆中各 CCD 只有一侧与其相邻

CCD 出现视场漏缝,另一侧表现为视场重叠。而同角度后摆时,呈反对称关系。本文提出的非均匀重叠像元数拼接方法能有效保证一定范围内前后摆时相机整体视场无漏缝,但对于单纯地前摆或后摆,会带来一定的重叠像元数量增加。对于只有前摆或后摆功能的相机而言,可分别按照公式(9)和(11)处理,以减少像元浪费。本文方法的理论误差  $\epsilon$  小于一个像元尺寸,即满足  $|\epsilon/D| < 1$ 。

### 参考文献:

- [1] 姚呈康,李庆辉,胡琳. 星载遥感相机像移分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5):901-904.  
YAO CH K, LI Q H, HU L. Analysis of image motion of satellite remote sensing camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5):901-904. (in Chinese)
- [2] 王雪晶,张健,魏仲慧,等. 基于遥感相机模型的遥感图像彩色校正[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(6):443-446.  
WANG X J, ZHANG J, WEI ZH H, *et al.*. Color correction for remote sensing images based on remote sensing camera model [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2002, 21(6):443-446. (in Chinese)
- [3] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11):2164-2172.  
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2164-2172. (in Chinese)
- [4] 李朝辉,王肇勋,武克用. 空间相机 CCD 焦平面的光学拼接[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 213-216.  
LI ZH H, WANG ZH X, WU K Y. Optical assembly of CCD focal plane for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 213-216. (in Chinese)
- [5] 张星祥,任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接[J]. 光学学报, 2001, 26(5):740-745.  
ZHANG X X, REN J Y. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 26(5): 740-745. (in Chinese)
- [6] 任建岳,孙斌,张星祥,等. TDICCD 交错拼接的精度检测[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10):1853-1857.  
REN J Y, SUN B, ZHANG X X, *et al.*. Precision measurement of TDICCD interleaving assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1853-1857. (in Chinese)
- [7] 樊超,梁义涛,李伟,等. 偏流角对空间相机影响研究[J]. 电光与控制, 2008, 15(11):76-79.  
FAN CH, LIANG Y T, LI W, *et al.*. Study on influence of drift angle on the space camera [J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(11):76-79. (in Chinese)
- [8] 樊超,李英才,易红伟. 偏流角对 TDICCD 相机像质的影响分析[J]. 光电工程, 2007, 34(9):70-73.  
FAN CH, LI Y C, YI H W. Influence analysis of drift angle on image quality of TDICCD camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(9):70-73. (in Chinese)
- [9] 闫得杰,徐抒岩,韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11):2199-2203.  
YAN D J, XU SH Y, HAN CH SH. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2199-2203. (in Chinese)
- [10] 闫得杰,韩诚山,李伟雄. 飞行器侧摆和前后摆及控制误差的优化设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9):2224-2229.  
YAN D J, HAN CH SH, LI W X. Optimization design of scroll and pitch and their control errors on aircraft [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2224-2229. (in Chinese)

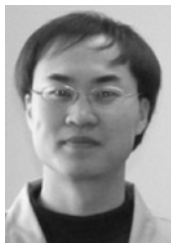
## 作者简介:



吕恒毅(1984—),男,辽宁大连人,研究实习员,2007年于大连理工大学获得学士学位,2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事航天相机成像系统视频处理方面的研究。E-mail: lv\_hengyi@163.com



郭永飞(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1990年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电技术应用,CCD成像电子学,嵌入式系统开发等方面的研究。E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn



刘杨(1979—),男,天津人,博士研究生,2004年、2006年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光通信跟瞄系统、信号处理和故障诊断方面的研究。E-mail: light520@yahoo.com.cn

## ● 下期预告

## 空间光谱成像仪热设计参数的灵敏度分析

郭亮<sup>1,2</sup>,吴清文<sup>1</sup>,颜昌翔<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130033;

2. 中国科学院研究生院,北京 100039)

空间光学遥感器在轨运行期间,在所处恶劣环境以及装配工艺等因素的作用下,其热物理属性的实际参数与热设计参数之间存在一定的偏差,在热设计过程中难以精确确定,从而影响整机热设计方案。基于系统灵敏度理论,对空间光学遥感器热设计问题进行了分析,建立了在轨条件下的热平衡方程组,通过对热平衡方程组的设计变量分析,总结出影响整机温度分布的热设计参数。以某空间光谱成像仪热设计为例,分析了上述影响整机温度分布的设计参数的灵敏度,为空间光学遥感器热设计中结构及热物理参数的确定提供了依据,为空间光学遥感器热设计的可靠性验证和在轨运行可靠性提供了分析方法。灵敏度分析结果表明:整机平均温度对太阳吸收系数的灵敏度几乎为零;对红外半球发射率的灵敏度为 $2.2\sim 14.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;对内部热源的灵敏度为 $1.8\sim 2\text{ k/W}$ ;对导热率的灵敏度为 $2.25\times 10^{-3}\sim 4.39\times 10^{-2}\text{ (m}\cdot\text{k}^2)/\text{W}$ ;对接触传热系数的灵敏度为 $0\sim 1.1\times 10^{-3}\text{ (m}^2\cdot\text{k}^2)/\text{W}$ 。经试验验证,基于灵敏度分析结果的热控设计方案有效、可行。