

文章编号 1004-924X(2013)05-1251-07

# 测绘相机焦平面 CCD 交错拼接中重叠像元数计算

郭 疆<sup>1,2</sup>, 龚大鹏<sup>2,3\*</sup>, 朱 磊<sup>2</sup>, 孙继明<sup>2</sup>, 邵明东<sup>2</sup>

- (1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对采用焦平面 CCD 交错拼接方式的测绘相机会由于存在交会角而产生视场拼接漏缝问题, 本文在考虑交会角和相机无侧摆的前提下提出了一种焦平面 CCD 重叠像元数算法。首先, 根据测绘相机成像原理建立了前视相机成像模型, 分析了产生视场漏缝的原因。接着, 推导出在 CCD 数量为奇数和偶数两种不同拼接形式下的地面视场重叠及漏缝大小的数学表达式, 进而得到了不产生漏缝时 CCD 片间最小重叠像元数计算公式, 并对误差进行了分析。最后, 将该算法应用于工程算例, 并对比了地球曲率对计算结果的影响。通过算例得到了各 CCD 片间视场漏缝及最小重叠像元数, 其最大值分别为  $1\ 141.491\ \mu\text{m}$ , 115 个。应用本文方法可以近似计算应用交错拼接法的测绘相机焦平面前后排 CCD 的最小重叠像元数, 误差小于 1 pixel。

**关键词:**测绘相机; 焦平面; CCD; 交错拼接; 重叠像元数

**中图分类号:** V447.3; TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1251

## Calculation of overlapping pixels in interleaving assembly of CCD focal plane of mapping camera

GUO Jiang<sup>1,2</sup>, GONG Da-peng<sup>2,3\*</sup>, ZHU Lei<sup>2</sup>, SUN Ji-ming<sup>2</sup>, SHAO Ming-dong<sup>2</sup>

- (1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;
  2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
  3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
- \* Corresponding author, E-mail: gongdp1985@yahoo.com.cn

**Abstract:** Imaging gaps will appear in the field of view for a mapping camera due to the convergence angle when it uses a interleaving assembly of focal plane. In order to solve the problem above, an algorithm of minimum overlapping pixels was proposed by considering convergence angle and without camera pitch. Firstly, an imaging model for the front view camera was established according to the imaging principle of mapping camera. The reason that imaging gaps appear was analyzed. Then, the mathematical expressions of imaging gaps and overlaps of odd and even quantity CCD assemblies were derived, the formula for computing the minimum number overlapping pixels between adjacent CCDs that can avoid the imaging gaps was obtained, and the error was analyzed. Finally, the algorithm was

收稿日期: 2012-10-06; 修订日期: 2012-10-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60507003)

applied to an engineering example, and the effect of earth curvature was analyzed. The instance shows that the imaging gaps and the minimum number of overlapping pixels in the engineering instance are 1 141.491  $\mu\text{m}$  and 115 in maximum respectively. It indicates that the proposed algorithm can calculate the minimum number of overlapping pixels of the mapping camera and the theoretical error is less than 1 pixel.

**Key words:** mapping camera; focal plane; CCD; interleaving assembly; quantity of overlapping pixel

## 1 引言

航天立体测绘相机能够获取地球空间自然要素和地表人工设施的形状、大小、空间位置及其属性等信息,广泛应用于军事、国土资源测绘、自然灾害监测与评估等领域,是国防与民生不可或缺的重要手段<sup>[1-2]</sup>。随着遥感技术的发展,宽视场、高分辨率已成为测绘相机的发展趋势。由于技术和工艺的限制<sup>[3]</sup>,单片 CCD 长度有限,不能满足视场宽度的要求。因此,采用多个 CCD 拼接来增大焦平面视场已成为当前测绘相机满足大视场需求的主要手段。

为避免像元损失和引入色差,测绘相机常常采用 TDICCD 交错拼接的方法<sup>[4-7]</sup>,即在相机焦平面的视场中心线两侧,分上下两行交错排列 TDICCD 器件,第二行填充第一行形成的间隙,首尾像元分别对齐,但由于两行 TDICCD 分别在沿轨的 2 个不同视场同时进行采样,会造成采样时间延迟,需要进一步的处理方可完成整幅图像的绘制。

在工程实际中,不仅卫星姿态调整误差会产生残余偏流角<sup>[8-10]</sup>,测绘相机交会角的存在<sup>[11-12]</sup>也会使前视相机焦平面上相互交错的两行 CCD 片的地面成像幅宽不同<sup>[13]</sup>。这两点原因均会产生 CCD 视场覆盖不完全,即出现视场漏缝,从而影响成像质量。因此焦平面相邻 CCD 间需要有一定的重叠像元数。在对 CCD 拼接漏缝的理论研究领域,有学者对遥感相机的成像情况进行了建模分析,得到了一定条件下相应的计算公式。但导致拼接漏缝的因素很多,公式的应用具有一定局限性,有待于进一步的研究和完善。当前工程应用多采用重叠固定像元的方法,若重叠像元数过少,在轨成像时会产生视场漏缝;而若采用很大的重叠像元数,又容易造成过设计,导致成本上升。

针对上述问题,本文尝试在相机无侧摆的前

提下考虑相机交会角的影响,建立了测绘相机前视相机成像数学模型,推导了不同拼接方式下 CCD 重叠像元数的计算方法,并给出了计算公式,分析了原理误差,在此基础上对比地球曲率对视场漏缝的影响,最后结合工程算例检验了理论方法的正确性。

## 2 模型建立与成像特性分析

从立体构图角度考虑,单线阵、两线阵及三线阵相机均能达到测绘需求,但三线阵相机比较具有代表性,本文以此为例进行分析。三线阵测绘相机由前视、正视和后视 3 台相机构成<sup>[14]</sup>,如图 1 所示。其前后视相机原理相似,取前视相机为建模对象。

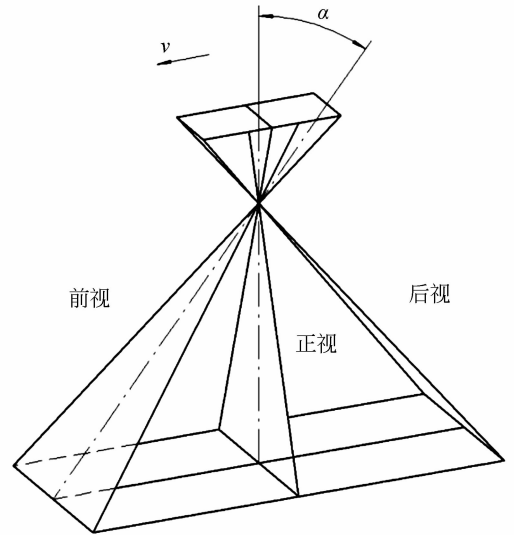


图 1 三线阵 CCD 测绘相机原理示意图

Fig. 1 Sketch of mapping camera with three-line-array CCD

首先分析垂轨方向的成像特性,成像原理如图 2 所示,相机以速度  $v$  向前推扫。目前测绘相机的最大幅宽为几十公里,与地球曲率(半径均值约为 6 371.004 km)相差 2 个数量级,在相机不发生侧摆时,地面幅宽所对的地心圆周角较小(约为 0.01),此时可以用弦长  $l'$  近似替代投影所截弧长  $\hat{l}$ 。

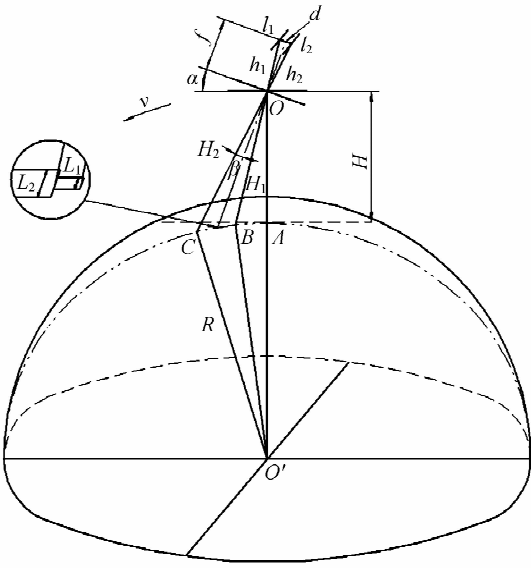


图 2 前视相机成像原理图

Fig. 2 Schematic diagram of imaging for front view camera

再考虑推扫方向的情形。以焦平面上的 2 条线段  $l_1$  和  $l_2$  表示交错排列的两行 TDICCD, 为便于推导公式, 令其长度均为  $l$ , 以光轴为对称轴平行放置, 间距为  $d$ , 线段中点落在焦平面视场中心

轴上。相机交会角为  $\alpha$ , 焦距为  $f$ , 以速度  $v$  向前推扫成像。卫星轨道高度  $H$ , 地球半径为  $R$ , 经过推导得到:

$$\beta = \arctan \frac{d}{2f}, \tag{1}$$

$$h_1 = h_2 = h = \sqrt{d^2/4 + f^2}. \tag{2}$$

对  $\triangle OBO'$  及  $\triangle OCO'$  应用余弦定理, 并根据图 2 中几何关系整理, 得到:

$$H_1 = (H + R) \cos(\alpha - \beta) - \sqrt{R^2 - (H + R)^2 \sin^2(\alpha - \beta)}, \tag{3}$$

$$H_2 = (H + R) \cos(\alpha + \beta) - \sqrt{R^2 - (H + R)^2 \sin^2(\alpha + \beta)}. \tag{4}$$

若不考虑地球曲率(将大地视为平面, 如图 2 虚线所示), 则有<sup>[15]</sup>:

$$H'_1 = \frac{H}{\cos(\alpha - \beta)}, \tag{5}$$

$$H'_2 = \frac{H}{\cos(\alpha + \beta)}. \tag{6}$$

由基本成像原理知:

$$\frac{l}{L_1(\alpha)} = \frac{h}{H_1}, \tag{7}$$

$$\frac{l}{L_2(\alpha)} = \frac{h}{H_2}. \tag{8}$$

故前后两排 CCD 在地面成像宽度分别为:

$$L_1(\alpha) = \frac{l[(H + R) \cos(\alpha - \beta) - \sqrt{R^2 - (H + R)^2 \sin^2(\alpha - \beta)}]}{\sqrt{d^2/4 + f^2}}, \tag{9}$$

$$L_2(\alpha) = \frac{l[(H + R) \cos(\alpha + \beta) - \sqrt{R^2 - (H + R)^2 \sin^2(\alpha + \beta)}]}{\sqrt{d^2/4 + f^2}}, \tag{10}$$

在图 2 中, 由几何关系及基本成像原理可知  $H_2 > H_1$ , 故  $L_2 > L_1$ , 且随着交会角的增大,  $L_1$ 、 $L_2$  均增大, 但  $L_2$  增大速度大于  $L_1$ 。结合测绘相机成像原理可知, 上述现象是焦面 CCD 交错拼接产生视场漏缝的一个原因。

### 3 重叠像元数推导与误差分析

根据用户对视场宽度的不同需求, 用于拼接的 CCD 数目也不同。初步设计计算表明, 当所需 CCD 数目为偶数时, 采用的拼接方式与成像情况可用图 3 来近似表示(不失一般性)。图中下方矩形框为焦平面 CCD 排列方案, 上方矩形阴影条纹

为后排 CCD 对应地面成像幅宽推扫轨迹, 白框条纹为前排 CCD 对应地面成像幅宽推扫轨迹, 相机沿  $v$  方向推扫成像。后文简图中各元素的定义与图 3 相同。调整前, 令两行 CCD 在推扫方向重叠像元数恰好为零, 并按图 3 所示编号以示区分。

从成像情况可以看到, 由于后排 CCD 地面幅宽大于前排, 导致视场漏缝及重叠的程度不同, 且随着向视场边缘移动, 漏缝及重叠的区域逐渐变大。由于 CCD 的排布在视场中心轴左右不对称, 需要分别进行整理, 首先分析焦平面左侧情况。从图 3 可以看到, 第  $2k$  个 CCD 与第  $2k+1$  个 CCD 之间存在漏缝, 而第  $2k-1$  个与第  $2k$  个 CCD 间存在视场重叠, 根据数学归纳法可以得到左侧视场漏

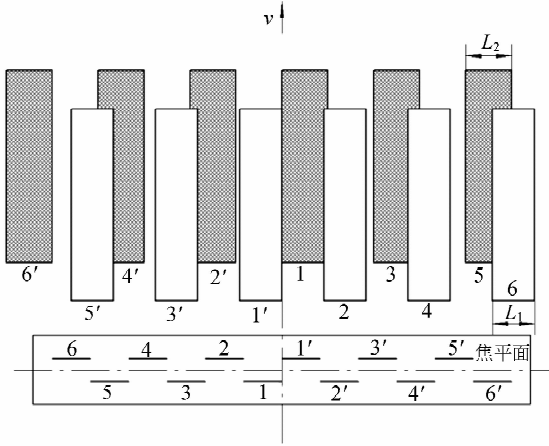


图 3 偶数 CCD 拼接及成像示意图

Fig. 3 Diagram of splices and imaging for even number CCD

缝与重叠情况,表述为:

$$\Phi_{2k,2k+1} = 2k[L_2(\alpha) - L_1(\alpha)], \quad (11)$$

$$\psi_{2k-1,2k} = (2k-1)[L_2(\alpha) - L_1(\alpha)]. \quad (12)$$

式中,  $k=1,2,3,\dots$ ,  $\Phi$  表示视场漏缝,  $\psi$  表示视场重叠,  $\alpha$  为相机交会角。

同理,焦平面右侧 CCD 成像时,第  $2k-1$  个 CCD 与第  $2k$  个 CCD 之间存在漏缝,而第  $2k$  个与第  $2k+1$  个 CCD 间存在视场重叠,则右侧视场漏缝与重叠情况可以表述为:

$$\Phi'_{2k-1,2k} = (2k-1)[L_2(\alpha) - L_1(\alpha)], \quad (13)$$

$$\psi'_{2k,2k+1} = 2k[L_2(\alpha) - L_1(\alpha)], k = 1,2,3,\dots \quad (14)$$

由成像几何关系可以得到:

$$\Phi_{2k,2k+1} = \Psi'_{2k,2k+1}, \quad (15)$$

$$\Psi_{2k-1,2k} = \Phi'_{2k-1,2k}. \quad (16)$$

即左侧 CCD 视场漏缝恰好等于右侧 CCD 的视场重叠,反之亦然。

通过以上分析可知,为使成像不出现漏缝,左侧第  $2k+1$  个 CCD 需向第  $2k$  个 CCD 移动  $\Phi_{2k,2k+1}$  的地面距离,右侧第  $2k$  个 CCD 需向第  $2k-1$  个 CCD 移动  $\Phi'_{2k-1,2k}$  的地面距离。由于相机没有侧摆,根据式(11)可以得到左侧 CCD 的移动量为:

$$\phi_{2k,2k+1} = \frac{\Phi_{2k,2k+1}h}{H_2} = 2kl\left(1 - \frac{H_1}{H_2}\right). \quad (17)$$

同理,右侧 CCD 的移动量为:

$$\phi'_{2k-1,2k} = \frac{\Phi'_{2k-1,2k}h}{H_2} = (2k-1)l\left(1 - \frac{H_1}{H_2}\right), \quad (18)$$

$$k = 1,2,3,\dots$$

式中,  $l$  为 CCD 有效感光区域的长度,若 CCD 像元

尺寸为  $\mu \times \mu$ , 则 CCD 间的最小重叠像元数可以表示为:

$$\begin{cases} n = \left[ \frac{\Phi_{2k,2k+1}}{\mu} \right] + 1 = \left[ \frac{2kl\left(1 - \frac{H_1}{H_2}\right)}{\mu} \right] + 1 & \text{左侧} \\ n = \left[ \frac{\Phi'_{2k-1,2k}}{\mu} \right] + 1 = \left[ \frac{(2k-1)l\left(1 - \frac{H_1}{H_2}\right)}{\mu} \right] + 1 & \text{右侧} \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $k=1,2,3,\dots$ ,  $y = [x]$  为取整函数,表示不大于  $x$  的最大整数。其小数部分可表示为  $\delta = \left\{ \frac{\Phi_{2k-1,2k}}{\mu} \right\}$ , 由此可知,  $\delta \in [0,1)$ 。由于计算结果往往不是整数,为避免视场漏缝,则最小像元数需要做取整处理,由此带来的误差即为  $\epsilon = 1 - \delta$ , 易知  $\epsilon \in [0,1)$ , 误差小于一个像元。注意,当计算结果是整数时,则不需要取整处理。

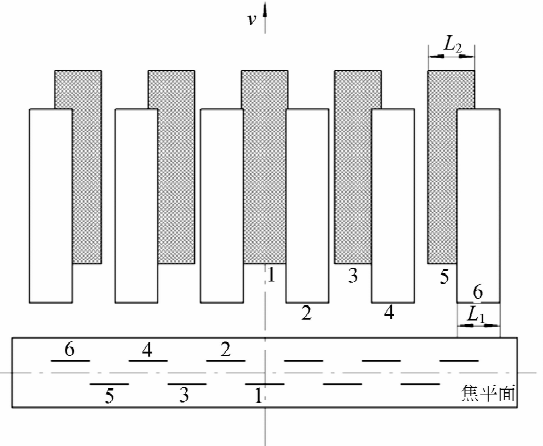


图 4 奇数 CCD 拼接及成像示意图

Fig. 4 Diagram of splices and imaging for odd number CCD

考虑 CCD 数量为奇数的拼接情况,采用的拼接方式与成像情况可用图 4 所示来表示(不失一般性)。由于奇数 CCD 拼接为对称形式,只需分析一侧成像情况即可,原理同偶数拼接情况一样,这里直接给出计算结果。则第  $2k$  个 CCD 与第  $2k+1$  个 CCD 之间存在漏缝,而第  $2k-1$  个与第  $2k$  个 CCD 间存在视场重叠,视场漏缝与重叠情况可以表述为:

$$\Phi_{2k,2k+1} = \frac{4k-1}{2}[L_2(\alpha) - L_1(\alpha)], \quad (20)$$

$$\Psi_{2k-1,2k} = \frac{(4k-3)}{2}[L_2(\alpha) - L_1(\alpha)], \quad (21)$$

式中,  $k=1,2,3,\dots$ ,  $\Phi$  表示视场漏缝,  $\Psi$  表示视场

重叠,  $\alpha$  为相机交会角。为使成像不出现漏缝, 第  $2k+1$  个 CCD 需向第  $2k$  个 CCD 移动  $\Phi_{2k,2k+1}$  的地面距离, CCD 的移动量为:

$$\varphi_{2k,2k+1} = \frac{\Phi_{2k,2k+1} h}{H_2} = \frac{4k-1}{2} l \left( 1 - \frac{H_1}{H_2} \right). \quad (22)$$

则 CCD 间的最小重叠像元数可以表示为式 (23), 误差小于一个像元。

$$n = \left[ \frac{\varphi_{2k,2k+1}}{\mu} \right] + 1 = \left[ \frac{(4k-1)l \left( 1 - \frac{H_1}{H_2} \right)}{2\mu} \right] + 1. \quad (23)$$

### 4 应用实例与对比分析

现假设一台测绘相机轨道高度为 500 km, 光学系统焦距为 3 m, 应用 10 片 TDICCD 实现交错拼接, CCD 积分级数为 96 级, 像元数为 4 096 元, 像元尺寸为  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ , 焦平面上两行 CCD 间距为 20 mm, 相机交会角为  $25^\circ$ , 地球半径为 6 371.00 4 km。应用本文方法计算反映到焦面的视场漏缝以及最小重叠像元数, 结果列入表 1。可见最大漏缝达到  $1\,141.491 \mu\text{m}$  最小重叠像元数最多为 115 个。

表 1 重叠像元数计算

Tab. 1 Calculation of overlapping pixels

CCD 位置	焦面视场漏缝 ( $\mu\text{m}$ )		最小重叠像元数	
	左侧	右侧	左侧	右侧
1~2	0	285.728	0	29
2~3	570.746	0	58	0
3~4	0	856.118	0	86
4~5	1 141.491	0	115	0

分别应用传统的固定 100 像元方法、不考虑地球曲率的方法、以及本文方法进行计算漏缝及像元数, 结果列入表 2。可见采用 100 像元重叠的拼接产生了最大 15 个像元的漏缝; 将大地视为平面考虑时, 最大焦面视场漏缝为  $101.7 \mu\text{m}$ , 产生了 10 个像元的漏缝。据此可知, 地球曲率对拼接结果的影响是较大的, 在工程计算中必须加以考虑。

表 2 不同拼接方法对比

Tab. 2 Comparison of different splicing methods

拼接方法	最大焦面视场漏缝	最大漏缝像元数
	( $\mu\text{m}$ )	
固定 100 重叠像元	141.491	15
不考虑地球曲率	101.7	10
本文方法	无	0

计算后的拼接效果如图 5 所示, 可见应用本文的拼接方法在无侧摆的前提下不会产生视场漏缝, 满足后续电子学图像拼接的要求。

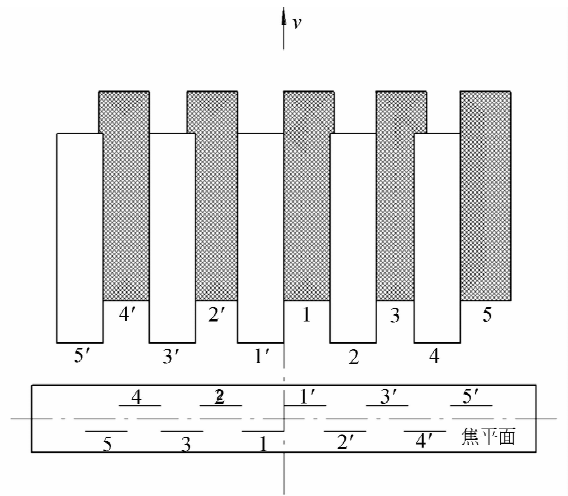


图 5 调整后成像示意图

Fig. 5 Schematic diagram of adjusted imaging

### 5 结 论

测绘相机的前、后视相机与正视相机存在交会角, 这会使采用交错拼接焦面方式的前视相机中前后两排 CCD 的地面幅宽有差异, 从而导致 CCD 间出现漏缝或出现重叠, 且重叠或漏缝的大小从视场中心轴向两侧逐渐增大, 因此计算重叠或漏缝大小对拼接工作具有实际意义。应用本文讨论的方法能够得到 CCD 片间重叠或漏缝区域的大小以及不产生视场漏缝时所需的最小重叠像元数, 可以在不考虑残余偏流角的情况下实现无缝视场, 并最大限度地发挥 TDICCD 的视场宽度, 得到的理论误差小于一个像元尺寸。

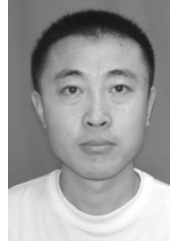
## 参考文献:

- [1] 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.  
YANG B X. The development survey of foreign space reconnaissance camera and mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1998, 19(2): 16-24. (in Chinese)
- [2] CHENG H Y. A high-resolution airborne four-camera imaging system for agricultural remote sensing [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 88: 13-24.
- [3] ANTONI R. Progress in focal plane array technologies [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2012, 36 (2-3): 342-473.
- [4] CAZAUX Y, SUBIELA D, BOUCHARLAT G. 12000 pixel monolithic linear sensor for high resolution push-broom earth observation satellites [C]. *Advanced and Next-Generation Satellites Hiroyuki Fujisada, Paris, France*, 1995, 2583: 430-439.
- [5] 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)
- [6] 杨桦, 郭悦, 伏瑞敏. TDICCD 的视场拼接 [J]. 光学技术, 2003, 29(2): 226-228.  
YANG H, GUO Y, FU R M. Study on field butting of TDICCD [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(2): 226-228. (in Chinese)
- [7] 张星祥, 任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接 [J]. 光学学报, 2006, 26(5): 740-745.  
ZHANG X X, REN J Y. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane [J]. *Acta Optical Sinica*, 2006, 26(5): 740-745. (in Chinese)
- [8] 杨居奎. 偏流对三线阵 TDICCD 测绘相机的影响分析 [J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(4): 27-32.  
YANG J K. The effect of the drift on three-line TDICCD mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(4): 27-32. (in Chinese)
- [9] 袁孝康. 星载 TDI-CCD 推扫相机的偏流角计算与补偿 [J]. 上海航天, 2006, (6): 10-13.  
YUAN X K. Calculation and compensation for the deviant angle of satellite borne TDI-CCD push scan camera [J]. *Areospace Shanghai*, 2006, (6): 10-13. (in Chinese)
- [10] 李伟雄, 徐抒岩, 闫得杰. 影响空间相机偏流角估值误差的参数 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1530-1536.  
LI W X, XU SH Y, YAN D J. Influencing parameters of estimate errors of space camera's drift angle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1530-1536. (in Chinese)
- [11] 王智, 张立平, 姚惠. 三线阵立体测绘相机光学镜头的设计 [J]. 光子学报, 2010, 39(2): 227-232.  
WANG ZH, ZHANG L P, YAO H. Design on optical lens of three-linear tridimensional mapping camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(2): 227-232. (in Chinese)
- [12] 田铁印, 王红, 谷凤安, 等. 三线阵立体测绘相机光学系统设计 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2692-2698.  
TIAN T Y, WANG H, GU F A, et al.. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2692-2698. (in Chinese)
- [13] 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 S, 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)
- [14] WANG X Y. Research on technologies of stability and calibration precision of mapping camera [J]. *Physics Procedia*, 2011, 22: 512-516.
- [15] 吕恒毅, 刘扬, 郭永飞. 遥感相机焦面 CCD 机械拼接中重叠像元数的确定 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 1041-1047.  
LV H Y, LIU Y, GUO Y F. Computation of overlapping pixels of mechanical assembly CCD focal planes in remote sensing cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1041-1047. (in Chinese)

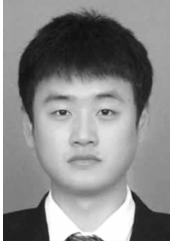
## 作者简介:



郭 疆(1976—),男,新疆石河子人,博士研究生,副研究员,2000年、2011年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间遥感成像技术的研究。E-mail: guojiang001@yahoo.com.cn



孙继明(1982—),男,吉林省吉林市人,硕士,助理研究员,2005年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光机结构设计。E-mail: mingjisun@163.com



龚大鹏(1985—),男,黑龙江大庆人,博士研究生,研究实习员,2008年、2011年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间遥感成像技术的研究。E-mail: gongdp1985@yahoo.com.cn



邵明东(1983—),男,山东曹县人,硕士,助理研究员,2004年、2007年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间遥感成像技术的研究。E-mail: shaomingd@tom.com



朱 磊(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,助理研究员,2005年、2011年于哈尔滨工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事空间遥感器光机结构的设计。E-mail: rayjew@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)