

文章编号 1004-924X(2013)01-0137-07

# 长焦距离轴三反测绘相机的外场立体成像

龚大鹏<sup>1,2</sup>, 郭疆<sup>1\*</sup>, 王国良<sup>1</sup>, 刘金国<sup>1</sup>, 孙继明<sup>1</sup>, 邵明东<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. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:**在地面模拟了长焦距、宽视场离轴三反光学系统的在轨立体成像,通过对图像的数据处理和分析,验证了离轴三反测绘相机在轨立体成像的可行性。提出了长焦距离轴三反测绘相机外场立体成像的单点成像方法。在该方法中,单台离轴三反相机通过旋转转台对靶标成像,根据规划的相机交会角旋转靶标,并精确测量出靶标的旋转角度,通过靶标的旋转来模拟两线阵相机的相机夹角。在外场立体成像中,根据轨道高度、外场立体成像的物距及理论设计需达到的高程精度和平面精度设计地面靶标。最后,对成像方式进行处理,验证了离轴三反测绘相机立体成像的可行性;对提出的外方位元素、两相机最佳夹角的测量方法进行了精度分析。该单点成像方法具有实用价值,可用于长焦距离轴三反测绘相机在轨立体成像的可行性验证。

**关键词:**测绘相机;长焦距系统;离轴三反系统;外场立体成像

**中图分类号:**V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132101.0137

## Outdoor stereoscopic imaging of mapping camera with long focus off-axis three-mirror

GONG Da-peng<sup>1,2</sup>, GUO Jiang<sup>1\*</sup>, WANG Guo-liang<sup>1</sup>, LIU Jin-guo<sup>1</sup>, SUN Ji-ming<sup>1</sup>, SHAO Ming-dong<sup>1</sup>

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

\* Corresponding author, E-mail: guojiang001@yahoo.com.cn

**Abstract:** The stereo imaging of a long focus off-axis three-mirror optical system on orbit was simulated in a laboratory, and the imaging possibility of the system on orbit was verified by image processing and image analysis. A single point imaging method was proposed for the outdoor stereoscopic imaging of the long focus off-axis three-mirror mapping camera. In this method, the single cameras was used to image the target through rotating an experiment table. The target was rotated according to a planned camera rendezvous angle and the angle was measured exactly. Then, the intersection angle of the two line array cameras was simulated by rotating the target. In the outdoor stereoscopic imaging, the target was designed based on the orbital altitude, object distance, elevation accuracy and planned precision. Finally, the image methods were verified and the measuring accuracy for exterior orientation elements and the angle between two cameras were analyzed. Obtained results demonstrate that the single point imaging method has practical values and can be used in the feasibility verification of stereoscopic imaging of long focus off-axis three-mirror cameras.

**Key words:** mapping camera; long focus system; off-axis three-mirror system; outdoor stereoscopic imaging

收稿日期:2012-08-16;修订日期:2012-10-10.

基金项目:中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项基金”资助项目

## 1 引言

航天测绘技术的发展要求航天测绘相机的焦距越来越长,而长焦距透射光学系统的色差、畸变较难校正,且对温度敏感,单个高精度光学元件的口径难以做得太大<sup>[1-2]</sup>,所以 2 m 以上焦距的透射系统在航天相机上很少应用,国内外长焦距(2 m 以上)的相机大都采用反射式光学系统。作为测绘用途的相机希望得到宽幅的图像以方便图像整合和数据处理,这就需要焦距长,视场大的光学系统,离轴三反光学系统恰恰能够很好地满足这个要求<sup>[3-6]</sup>。然而,由于经典的测绘理论模型是建立在同轴光学系统上的,而离轴三反光学系统由于视场偏置,像面不在轴上(相当于同轴系统的轴外部分<sup>[7]</sup>),因此需要对相机的内方位元素的定义、理论模型做相应的改动。

目前,国内高分辨率空间相机覆盖宽度较小,工程应用得不多,长焦距离轴三反<sup>[8-11]</sup>高分辨率相机的航天遥感测绘应用在国内还是空白。

本文通过离轴三反测绘相机外场立体成像研究测绘需求与离轴三反相机几何特性的关系,对离轴三反测绘相机内方位元素重新定义后,再通过离轴三反相机的外场立体成像对长焦距离轴三反测绘相机在轨立体成像进行了可行性验证。

## 2 外场立体成像技术

为了验证长焦距离轴三反测绘相机在轨立体成像的可行性,本文对长焦距离轴三反相机外场立体成像的方法进行了研究。

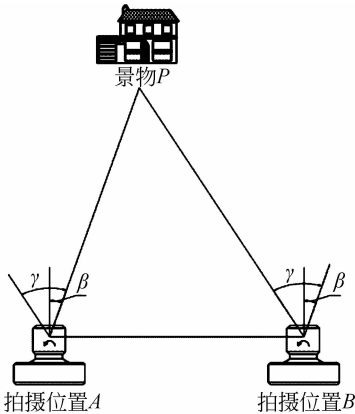


图 1 两点成像方案

Fig. 1 Two point imaging

长焦距离轴三反相机外场立体成像的方法可采用两点成像、直线运动成像以及单点成像 3 种方案。

两点成像方案如图 1 所示,相机通过转台的旋转在 A、B 两点分别通过正视和斜视相机对同一物目标 P 成像。该方案若想确定相机最佳夹角,就必须多次改变 A、B 点的成像位置,这不仅会受到外场场地的限制,而且每次都需将相机推扫轨迹面调整与面 ABP 共面,这样就会引入较多的误差。

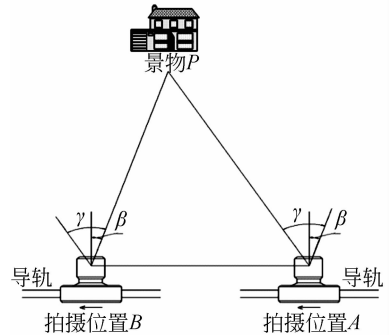


图 2 直线运动成像方案

Fig. 2 Line sport imaging

直线运动成像方案如图 2 所示,直线运动成像时,相机在 A、B 2 点沿 AB 连线作直线运动并分别通过正视和斜视相机对同一物目标 P 推扫成像。这种成像方式与在轨成像方式非常接近,但较难在保证相机沿 AB 两点连线作直线运动的前提下使相机运动速度达到 127.17 km/h,且抑制运动过程的振动较为困难。



图 3 单点成像方案

Fig. 3 Single point imaging

单点成像方案如图 3 所示,单台相机通过转台的旋转对靶标 P 成像,将靶标 P 旋转到所要求的相机夹角,并精确测量出靶标 P 的旋转角度,

用靶标  $P$  的旋转来模拟两线阵相机的夹角。

运用单台相机对靶标成像可以避免挪动相机后引出的系统测试误差,由于不移动相机,很多外方位元素的测量误差变成了系统误差,通过 2 次成像数据比较就可以将其消除。该方案可简化试验过程,易精确获得测量数据,同时避免引入额外误差,从而提高了测试精度,所以外景成像方案采用单点成像方式进行。

### 3 外场立体成像坐标系与外方位元素的定义

#### 3.1 外场立体成像坐标系的定义

以靶标左下角 2 直角边作为物方坐标系的  $X$ 、 $Y$  轴,顶点为物方原点,靶标黑底面为  $Z$  轴零点,坐标系为右手坐标系,见图 4。

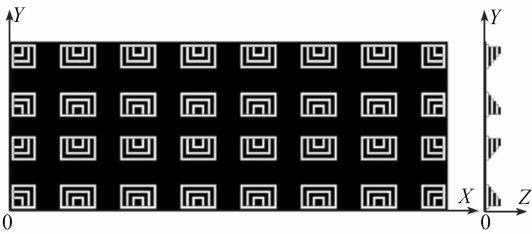


图 4 外场立体成像地面靶标

Fig. 4 Ground target of field stereoscopic imaging

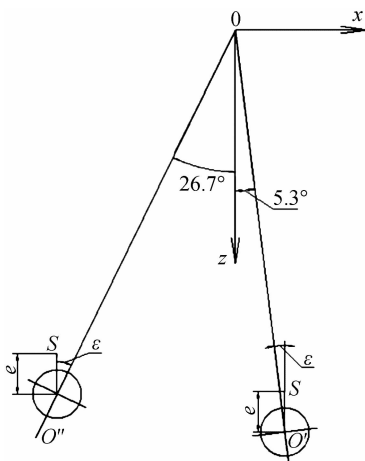


图 5 相机与转台的关系

Fig. 5 Arrangement of camera and experiment table

外景试验将靶标  $Y$  轴调到与大地水平面铅垂,相机转台也调到与大地水平面铅垂,在正视相机摄影时将相机靶面  $Z$  轴与靶标原点和相机转

台轴线的连线夹角调成离轴角  $5.3^\circ$ ,在斜视相机摄影时将相机靶面  $Z$  轴与靶标原点和相机转台轴线的连线夹角调整为一  $26.7^\circ$ 。

$X$  轴  $Y$  轴交点作为坐标原点  $O$ , $Y$  轴垂直于大地水平面, $Z$  轴在相机转台轴线和靶标转台轴线构成的平面,坐标系为右手坐标系。由于相机投影中心无法与相机转台轴线重合,相机投影中心  $S$  到相机转台轴线的距离为  $e$ , $e$  与  $Z$  轴夹角为  $\epsilon$ ,相机离轴角为  $\alpha$ ,相机与转台关系如图 5 所示:

#### 3.2 外场立体成像外方位元素的定义

航天遥感测绘相机进行在轨立体成像时需要通过星相机和 GPS 联合来确定相机的外方位元素包括摄站坐标  $(X_s, Y_s, Z_s)$  和角元素  $(\varphi, \omega, \kappa)$ ,简称 EO (exterior orientation)<sup>[12-13]</sup>,地面模拟在轨飞行进行立体成像时,也需要精确测量外方位元素,通过分析模拟在轨飞行与在轨飞行外方位元素的差异和精度,来计算和评价在轨立体成像的精度。

根据转台带动相机的运动规律,由靶面确定的坐标系下相机 2 次成像时在该坐标系下的坐标关系即为外方位元素,相机 2 次成像时的外方位元素为:

正视时,相机外方位元素为:

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-\alpha) & 0 & -\sin(-\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(-\alpha) & 0 & \cos(-\alpha) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \omega \\ \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta t - \alpha \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

斜视时,相机外方位元素为:

$$\begin{bmatrix} X'_s \\ Y'_s \\ Z'_s \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha') & 0 & -\sin(\alpha') \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha') & 0 & \cos(\alpha') \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi' \\ \omega' \\ \kappa' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi + \alpha' \\ \omega \\ \kappa \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$$\text{式中,} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -e \times \sin(\epsilon - \theta t) \\ 0 \\ oo' - e \times \cos(\epsilon - \theta t) \end{bmatrix}; \theta \text{ 为相机}$$

转台角速度; $\epsilon$  为  $e$  与  $Z$  轴夹角; $t$  为转台运动时间; $e$  为相机投影中心与相机转台中心偏差; $\alpha$ 、 $\alpha'$

为相机交会角。

## 4 外场立体成像设备技术指标与靶标设计

### 4.1 外场立体成像设备主要技术指标

外场立体成像相机主要技术指标如表 1 所示:

表 1 外场立体成像相机主要技术指标

Tab. 1 Main specifications of camera

项目名称	参 数
波段范围	0.51~0.69 $\mu\text{m}$ 离轴三反光学系统
光学系统	焦距 2 187.5 mm
参数	相对孔径 1/9 视场角 $\geq 6.88^\circ \times 0.6^\circ$
调焦	调焦精度优于 2 $\mu\text{m}$ , 调焦范围 $\pm 2$ mm
相对畸变	0.015%, 标定精度: $\pm 6$ $\mu\text{m}$
内方位元素	主点标定精度: $\pm 1$ $\mu\text{m}$
	主矩标定精度: $\pm 3$ $\mu\text{m}$

相机转台主要技术指标如下: 相机转台晃动误差  $\xi$  为  $0.5''$ ; 相机转台转动精度为  $0.005^\circ$ 。

### 4.2 靶标设计

从制图的角度出发摄影测量要求<sup>[14-16]</sup>如表 2 所示:

表 2 地图比例尺、地面像元分辨力与相对高程精度的关系

Tab. 2 Relation among map scale, GSD and relative elevation error

MS	GSD/m	GI/m	$\sigma_h$ /m	$\sigma_p$ /m
5 万	5	20	6	15
2.5 万	2.5	10	3	7.5

MS 为地图比例尺; GSD 为地面像元分辨力; GI 为等高线间距 (为  $3.3\sigma_h$ );  $\sigma_h$  为高程误差;  $\sigma_p$  为平面误差 (其值为地图比例尺的 0.3 倍)。

根据轨道高度和外景试验的物距, 及理论设计需达到的高程精度和平面精度, 设计了如图 4

所示的地面靶标。

靶标为黑底, 面积大小为  $1\ 820\ \text{mm} \times 700\ \text{mm}$ , 靶面上按一定距离排列了 32 个靶点, 每个靶点由黑白相间的小板叠成塔状, 自上而下看形成黑白相间的条纹, 从侧面看也形成黑白相间的条纹。在  $XO'Y$  面, 白条宽 10 mm, 黑条宽 15 mm,  $YO'Z$  面, 黑条和白条等距均为 10 mm, 相邻靶点距离为 100 mm。

## 5 测试方案

### 5.1 外场立体成像过程

将长焦距离轴三反相机就位, 并设立好靶标, 各系统准备就绪后, 相机对靶标精确成像, 找到最佳焦面位置, 外场立体成像装置如图 6 所示。



图 6 外场立体成像装置

Fig. 6 Stereoscopic imaging device of field

外场立体成像步骤如下:

- (a) 标定成像距离和靶标初始角;
- (b) 对靶标进行正视成像 (记录视频中的相关数据及转台转速);
- (c) 使靶标转动一个角度;
- (d) 对靶标进行斜视成像 (记录视频中的相关数据及转台转速);
- (e) 根据设计的角度重复 (a)、(b)、(c)、(d) 步骤;
- (f) 初步评价成像数据的有效性, 否则重新调焦后, 重复 (b)、(c)、(d)、(e) 步骤;
- (g) 撤场后, 精确测量靶标上靶点坐标。

外场立体成像后, 对数据进行处理, 得到的靶标立体图如图 7 所示:

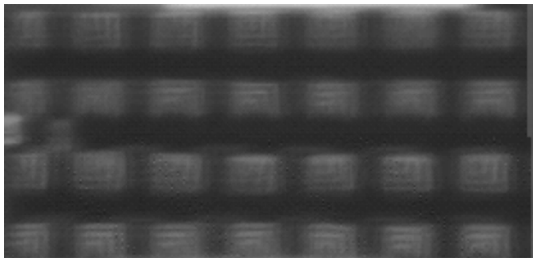


图7 靶标立体图

Fig. 7 Stereogram of experiment table

## 5.2 外场立体成像方法的误差分析

### 5.2.1 成像方式的误差分析

通过相机在转台上旋转成像来模拟在轨成像方式,这将会导致在对平面靶标进行测绘成像时,不同成像角度对应的物距发生变化,相当于相机外方位元素中的  $Z_s, \omega$  变化,这样会带来附加的高程误差,其高程误差和靶面长度有关,在 2 500 m 的摄影距离下不同靶面长度对应的高程误差关系见下表。

表3 不同靶面长度对应的高程误差关系

Tab. 3 Relationship between target length and elevation accuracy

摄影距离 /m	分辨率 /m	靶面宽度 /m	靶面像元数	转台旋转造成的高程误差/m	折合 500 km 轨道的高程误差/m
2 500	0.01	40	4 000	0.08	16
		30	3 000	0.045	9
		20	2 000	0.02	4
		10	1 000	0.005	1
		5	500	0.001 5	0.3
		3.6	360	0.001	0.2

从表3可以看出,在靶面宽度为 3.6 m 时,相机在转台旋转模拟在轨飞行成像造成的高程误差,折合到 500 km 轨道的高程误差小于 0.2 m,相对于 1:25 000 比例尺测绘相机的高程精度 3 m 来讲,是可以忽略的。并且 3.6 m 的靶标无论是制作还是精确测量靶标上确定靶点的几何关系都较易实现。

### 5.2.2 外方位元素的测量方法与精度分析

外方位元素包括摄站坐标( $X_s, Y_s, Z_s$ )和角元

素( $\varphi, \omega, \kappa$ ),测量方法与精度分析如下:

#### (a) $X_s$ 的测量方法与精度分析

根据公式(1)、(3),参数  $e$  可以通过卡尺测量,测量精度为 0.1 mm,  $\theta t$  可根据相机转台编码器直接读出,其精度为 0.005°,  $\epsilon$  可利用经纬仪直接读出,其精度为 0.5", 相机交会角的测量方法与精度分析见下一节。

#### (b) $Y_s$ 的测量方法与精度分析

通过对相机与相机转台精确调平,靶标和靶标转台精确调平,同时保证 2 个转台的旋转轴平行,平行度可以保证在 1"以内,且靶面  $Y$  方向较短,可以不考虑  $Y$  对外景测绘成像精度的影响,所以  $Y=0$ ,  $Y$  误差是由于转台轴系晃动误差和焦点偏心引起的,其值为  $e \times \tan \xi$ 。

#### (c) $Z_s$ 的测量方法与精度分析

$Z_s$  中的参数  $e, \theta t, \epsilon$  与  $X_s$  的测量方式相同,测量精度也一样。

#### (d) $\varphi$ 测量方法与精度分析

根据公式(2)、(4),  $\varphi$  是转台角度,可以通过转台编码器直接读出,其误差为转台转动控制精度,大小为 18"。

#### (e) $\omega$ 测量方法与精度分析

$\omega$  值为 0,其误差主要由于转台轴系晃动产生,且晃动误差对于小角度转动是个随机误差不便于测量,但可以根据图像判断每次成像过程中是否带有粗大的晃动误差,无粗大晃动误差的图像,  $\omega=0$ ,其误差为  $(\xi/648 000) \cdot s^{-1}$ 。

#### (f) $\kappa$ 测量方法与精度分析

$\kappa$  值为 0,其误差也是由于转台轴系晃动产生,其误差为  $(\xi/648 000) \cdot s^{-1}$ 。

### 5.2.3 两相机最佳夹角的测量方法与精度分析

在单点成像方案中,相机的夹角就是靶标的旋转角度,通过外场立体成像还可以方便地测得相机不同夹角下测量精度的大小,通过数据分析,可以比较出最佳的两相机夹角。

两相机夹角可以通过 0.5" 莱卡经纬仪精确测量靶面旋转的角度获得,其精度通过多次测量可以保证在 1"以内。

## 5 结 论

本文提出了一种长焦距离轴三反测绘相机

外场立体成像的单个成像方法,并研究了测绘需求与离轴三反相机几何特性的关系。在外场立体成像中,通过设计地面靶标,分析成像方式的误差,提出了外方位元素、两相机夹角的测量方法并进行了精度分析,经多次测量,

可知其精度可以保证在  $1''$  以内。根据影像所对应的物像关系,与经典的测绘理论相对照,对离轴三反测绘相机内方位元素重新定义后,证明该单个成像方法能够对长焦距离轴三反相机在轨立体成像进行可行性验证。

### 参考文献:

- [1] 李旭阳,李英才,马臻,等. 大 F 数长焦距空间相机光学系统设计 [J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2093-2097.
- LI X Y, LI Y C, MA ZH. Optical system design of space camera with large F number and long focal length [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2093-2097. (in Chinese)
- [2] 姜会林. 关于二级光谱问题的探讨 [J]. 光学学报, 1982, (3): 225-232.
- JIANG H L. On the secondary spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 1982, (3): 225-232. (in Chinese)
- [3] 伍和云,王培纲. 离轴反射式光学系统设计 [J]. 光电工程, 2006, 33(1): 34-37.
- WU H Y, WANG P G. Designs of reflective off-axis system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(1): 34-37. (in Chinese)
- [4] JURANEK H J, SAND R, SCHWEIZER J, et al.. Off-axis telescope; the future generation of earth observation telescopes [J]. *SPIE*, 1998, 3439: 104-115.
- [5] KORSCH D C. Reflective optics [J]. *SPIE*, 1987, 751:230-235.
- [6] 潘君骅. 具有三个二次曲面反射镜的光学系统研究 [J]. 光学学报, 1988, (8):717-721.
- PAN J Y. A study of the optical system with three mirrors of second order surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, (8):717-721. (in Chinese)
- [7] 常军,姜会林,翁志成,等. 大视场、长焦距空间光学系统的设计 [J]. 兵工学报, 2003, 24(1): 42-44.
- CHANG J, JIANG H L, WENG ZH CH, et al.. Design of wide angle space optical systems of long focal length [J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24(1): 42-44. (in Chinese)
- [8] 薛栋林,郑立功,张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2813-2820.
- XUE D L, ZHENG L G, ZHANG F. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror [J]. *Opt. precision Eng.*, 2011, 19(12): 2813-2820. (in Chinese)
- [9] 李晓平,沙晟春,胡亭亮. 长焦距离轴三反光学系统杂散光的抑制 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2603-2608.
- LI X P, SHA SH CH, HU T L. Suppression of stray light for long focal length off-axis three-mirror optical system [J]. *Opt. precision Eng.*, 2011, 19(11): 2603-2608. (in Chinese)
- [10] 颜昌翔,许杰,彭岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 289-293.
- YAN CH X, XU J, PENG Y. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope [J]. *Opt. precision Eng.*, 2010, 18(2): 289-293. (in Chinese)
- [11] 任建伟,刘则洵,万志,等. 离轴三反宽视场空间相机的辐射定标 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1491-1497.
- REN J W, LIU Z X, WAN ZH, et al.. Radiometric calibration of off-axis three-mirror-anastigmat space camera with wide viewing field [J]. *Opt. precision Eng.*, 2010, 18(7): 1491-1497. (in Chinese)
- [12] 钱曾波,刘静宇,肖国超. 航天摄影测量 [M]. 北京:解放军出版社, 1992.
- QIAN C B, LIU J Y, XIAO G CH. *Space Photogrammetry* [M]. Beijing: Publishing House of the Chinese People's Liberation Army, 1992 (in Chinese)
- [13] 王家骥. 光学仪器总体设计 [M]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所, 2008.
- WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2008. (in Chinese)
- [14] 王任享,胡莘. 无地面控制点卫星摄影测量的技术难点 [J]. 测绘科学, 2004, 29(3): 3-5.

WANG R X, HU X. The difficult problem about satellite photogrammetry without control points [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2004, 29(3): 3-5. (in Chinese)

- [15] TAKANORI I. Precision attitude and position determination for advanced land observing satellite (ALOS) [J]. *Enabling sensor and platform technologies for space borne remote sensing, proceedings of SPIE (S0277-786X)*, 2005, 5659: 34-50.

- [16] LIGHT D L. Characteristics of remote sensors for mapping and earth science applications [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (S0099-1112)*, 1990, 56 (12): 1613-1623.

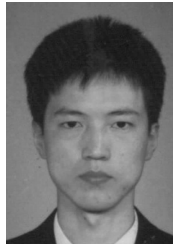
#### 作者简介:



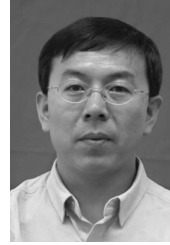
**龚大鹏**(1985—),男,黑龙江大庆人,博士研究生,研究实习员,2008年、2011年于吉林大学获得学士、硕士学位。主要从事空间遥感成像技术的研究。E-mail: gongdp1985@yahoo.com.cn



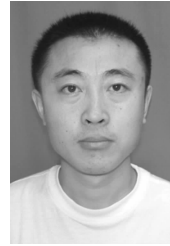
**郭疆**(1976—),男,新疆石河子人,副研究员,2000年于吉林大学(原吉林工业大学)机械制造及自动化专业获得学士学位,主要从事空间遥感成像技术的研究。E-mail: guojiang001@yahoo.com.cn



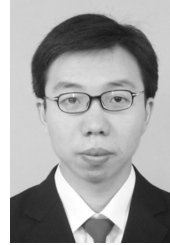
**王国良**(1972—),男,辽宁瓦房店人,副研究员,2004年于南京理工大学获得硕士学位,2008年于大连海事大学获得博士学位,主要从事图像处理与空间遥感成像技术的研究。E-mail: wglmj@yahoo.com.cn



**刘金国**(1968—),男,吉林蛟河人,研究员,主要从事空间遥感与图像处理方面的研究。E-mail: liujg@ciomp.ac.cn



**孙继明**(1982—),男,吉林省吉林市人,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



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

(版权所有 未经许可 不得转载)