

大视场空间相机侧摆成像时几何参数分析

程少园, 张 丽, 高卫军, 王劲强

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘 要: 为了提高大视场空间相机物距、投射角、地面像元分辨率、幅宽等几何参数的计算精度, 研究了星下点成像与侧摆成像时上述几何参数的精确计算方法。在全面考虑地球曲率和投射角的基础上, 建立了相应的几何模型, 改进了大视场空间相机几何参数计算方法。根据仿真分析, 对于轨道高度 650 km、半视场 40° 的空间相机, 当侧摆 20° 时, 垂直线阵方向像元分辨率的最大值是最小值的 2.31 倍, 是传统计算方法的 1.78 倍; 平行线阵方向像元分辨率的最大值是最小值的 7.16 倍, 是传统计算方法的 4.29 倍; 幅宽是传统计算方法的 1.33 倍。因此, 传统计算方法存在较大的误差, 提出的精确计算方法对于提高大视场空间相机成像质量具有重要意义。

关键词: 空间相机; 几何参数; 大视场; 侧摆

中图分类号: V443.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1872-06

Geometric parameters analysis of large FOV space camera when rolling

Cheng Shaoyuan, Zhang Li, Gao Weijun, Wang Jinqiang

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: To precisely calculate geometric parameters of large field view space camera, such as object distance, projection angle, ground sampling distance, swath width, the precise calculation method of above-mentioned geometric parameters was studied, including nadir imaging and rolling imaging. Considering earth curvature and projection angle, geometric model was constructed, the calculation method was improved to heighten precision. The analysis shows that, for a large field of view space camera on 650 km orbit altitude, with 20° half field of view and 20° roll, the maximum GSD_x is 2.31 times of the minimum GSD_x , is 1.78 times of the approximate GSD_x . The maximum GSD_y will become 7.16 times the minimum GSD_x , is 4.29 times of the approximate GSD_y . The swath width is 1.33 times of the approximate swath width. Therefore, the traditional calculation method is inaccurate, the precise calculation method of geometric parameters in this paper is useful for the imaging quality.

Key words: space camera; geometric parameters; large field of view; roll

收稿日期: 2014-10-11; 修订日期: 2014-11-20

基金项目: 高分重大专项

作者简介: 程少园(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事空间相机总体设计、自适应光学等方面的研究。Email: csycf@163.com

0 引言

航天遥感具有观测范围大、重访周期短、不受领土限制等优点,在军事侦察、资源勘查、国土普查、环境监测、农业调查等方面得到了广泛应用。近年来,航天遥感得到了较快发展,空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率、辐射分辨率等不断提高,观测性能大幅提升^[1]。其中提高时间分辨率是提高航天遥感观测性能的一个非常重要的方面。目前提高时间分辨率的方法主要包括增加相机的视场(幅宽)和提高相机的机动能力^[2-3]。因此,同时具有较大的视场(幅宽)和良好机动能力的空间相机在普查和监视等领域具有重要应用前景^[4-5]。然而,对于大视场相机,由于其地面幅宽较大,地球曲率、投射角(某方向地面投影与主光线夹角)等因素对地面像元分辨率(GSD)、幅宽(SW)等都会带来较大的影响,尤其是侧摆时,上述因素的影响变得更复杂,目前尚无系统研究报告^[6-8]。通常将地面看作平面,用侧摆角替代投射角,并且认为各视场的物距和投射角是近似一致的。对于大视场空间相机,上述传统几何参数计算方法会存在较大的误差,会导致几何参数计算误差和积分同步误差等,进而影响成像质量和地面应用效果^[9-10]。

文中全面分析了地球曲率和投射角等对大视场相机几何参数的影响,并给出物距、投射角、地面像元分辨率、幅宽等几何参数的精确计算方法和仿真分析结果。

1 空间相机几何参数传统计算方法

当小视场空间相机对星下点成像时,地球曲率对相机几何参数的影响可以忽略不计,可以将地面看成平面,如图1所示。此时,相机的物像几何关系非常简单,如图2,轨道高度 H 即为物距 L ;由于轨道高度远远大于焦距 f ,因此 L 近似等于 f 。根据图2所示的物像关系几何关系,可以得到星下点GSD计算公式(1)。对于小视场空间相机,当侧摆小角度 θ 时,也可以近似将地面看作平面,如图3所示,此时可以用公式(2)和(3)近似地计算垂直线阵方向(沿轨方向)的 GSD_x 和平行线阵方向(穿轨方向)的 GSD_y 。此时,线阵方向投射角 η (即线阵的地面投影

方向与主光线的夹角)近似等于主光线与星下点方向夹角的余角(星下点成像时,中心视场 η_o 为 90°)。但当相机视场角较大或侧摆角较大时,公式(1)~(3)会存在较大的误差,需要进行修正。

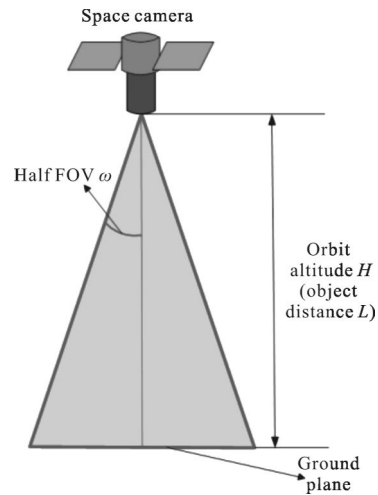


图1 将地面看作平面时星下点成像示意图

Fig.1 Diagram of nadir imaging considering the ground as plane

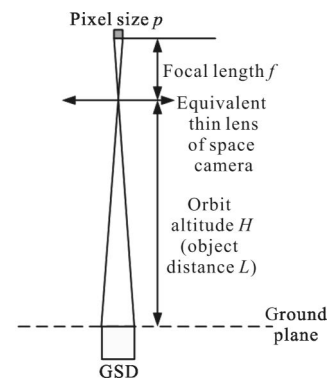


图2 空间相机物像几何关系

Fig.2 Geometry relation of object and image of space camera

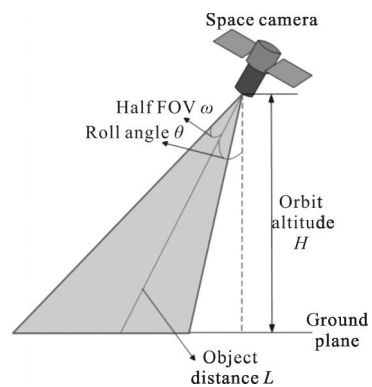


图3 将地面看作平面时侧摆成像示意图

Fig.3 Diagram of rolling imaging considering the ground as plane

$$GSD = \frac{p \cdot H}{f} \quad (1)$$

$$GSD_x = \frac{p \cdot H}{f \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

$$GSD_y = \frac{p \cdot H}{f \cdot \cos^2 \theta} \quad (3)$$

式中: GSD 为地面像元分辨率; X 方向表示垂直线阵方向; Y 方向表示沿着线阵方向; p 为像元尺寸; f 为相机焦距; H 为轨道高度; θ 为侧摆角。

对于星下点成像, 小视场相机的幅宽可以用公式(4)来近似计算; 当小角度侧摆 θ 度时, 小视场相机的幅宽可以用公式(5)近似计算。

$$SW = 2 \cdot \tan \omega \cdot H \quad (4)$$

$$SW = \frac{2 \cdot \tan \omega \cdot H}{\cos^2 \theta} \quad (5)$$

式中: SW 为地面幅宽; ω 为半视场角; H 为轨道高度; θ 为侧摆角。

2 大视场相机星下点成像时的几何参数计算

对于大视场空间相机, 地球曲率对相机几何参数的影响不可忽略, 如果将地面看作平面来处理会有较大的误差。图 4 是大视场空间相机星下点成像的示意图。此时, 中心视场的物距 L_0 等于 H , 但其他视场的 L 随着 ω 的增大而增大。线阵方向 η 不再等于主光线与星下点方向夹角的余角。根据图 4 所示几何关系, 利用正弦定理和余弦定理, 可以得到不同视场角 L 、 η 的计算公式(6)、(7)。当不考虑畸变(或畸变很小), 可以利用公式(8)~(10)来精确计算各视场的 GSD_x 、 GSD_y 和 SW 。

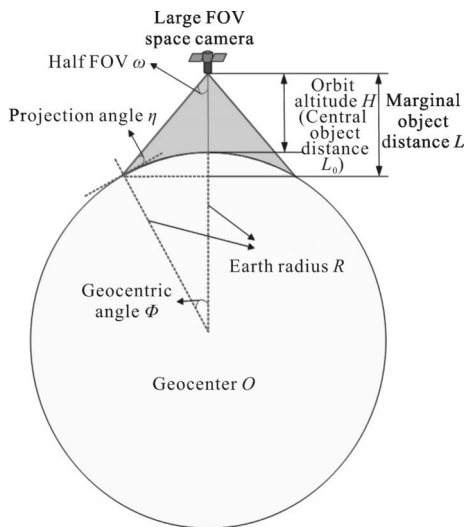


图 4 将地面看作球面时空间相机星下点成像示意图

Fig.4 Diagram of nadir imaging considering the ground as spherical

$$L = [(H+R) \cdot \cos \omega - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \cdot \sin^2 \omega}] \cdot \cos \omega \quad (6)$$

$$\eta = 90 - \arcsin \left[\left(\frac{H+R}{R} \right) \cdot \sin \omega \right] \quad (7)$$

$$GSD_x = \frac{p \cdot [(H+R) \cdot \cos \omega - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \cdot \sin^2 \omega}] \cdot \cos \omega}{f} \quad (8)$$

$$GSD_y = \frac{p \cdot [(H+R) \cdot \cos \omega - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \cdot \sin^2 \omega}] \cdot \cos \omega \cdot \sin(90 - \omega)}{f \cdot \sin \left[90 - \arcsin \left[\left(\frac{H+R}{R} \right) \cdot \sin \omega \right] \right]} \quad (9)$$

$$SW = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{180} \cdot (\arcsin(\sin \omega \cdot \frac{H+R}{R}) - \omega) \quad (10)$$

式中: η 为线阵方向投射角 (即线阵的地面投影方向与主光线的夹角); R 为地球半径。

下面以 H 为 650 km、 p 为 $7 \mu\text{m}$ 、 f 为 455 mm、 ω 为 40° 为例, 分析大视场相机星下点成像时 GSD 和 SW 随 ω 变化关系, 如图 5、图 6 所示。图中近似曲线是按照小视场相机传统计算公式(1)、(4)的计算结果, 精确曲线是按照文中提出的考虑地球曲率及投射角影响的大视场相机精确计算公式(8)~(10)的计算结果。可见, 当 ω 较大时, 传统的计算方法存在较大误差。对于边缘视场($\omega=40^\circ$), GSD_x 是传统计算方

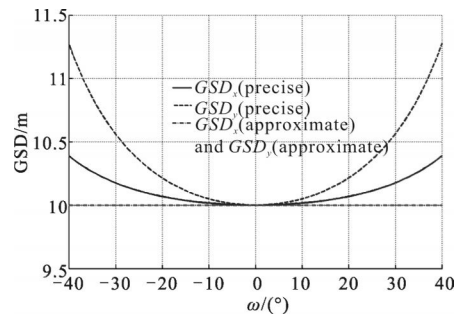


图 5 星下点成像时地面像元分辨率随视场角变化曲线
Fig.5 Curve of GSD changes with field of angle for nadir imaging

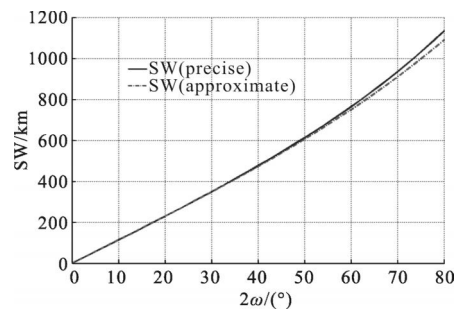


图 6 星下点成像时幅宽随全视场角变化曲线

Fig.6 Curve of SW changes with full field of angle for nadir imaging

法的1.039倍; GSD_y 是传统计算方法的1.127倍; SW 是传统计算方法的1.04倍。

3 大视场相机侧摆成像时的几何参数计算

当大视场空间相机进行侧摆成像时,地球曲率对几何参数的影响会更加明显,且随着 θ 增大而增大。图7是大视场空间相机侧摆成像时的示意图。此时,不同 ω 具有不同的 L ,且两侧视场的 L 不对称。根据图7所示几何关系,利用正弦定理和余弦定理,可以得到不同视场角的 L (中心视场 L_o)、 η 的计算公式(12)、(13)。当不考虑畸变(或畸变很小),可以分别利用公式(14)~(16)来精确计算各视场的 GSD_x 、 GSD_y 和 SW 。

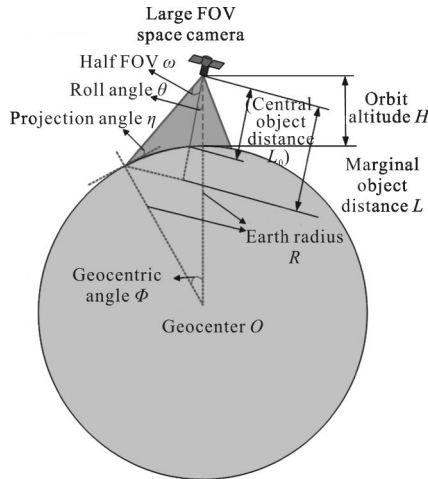


图7 将地面看作球面时空间相机侧摆成像示意图

Fig.7 Diagram of rolling imaging considering the ground as spherical

$$L_o = [(H+R) \cdot \cos \theta - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \cdot \sin^2 \theta}] \quad (11)$$

$$L = [(H+R) \cdot \cos(\theta + \omega) - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \cdot \sin^2(\theta + \omega)}] \cdot \cos \omega \quad (12)$$

$$\eta = 90 - \arcsin \left[\left(\frac{H+R}{R} \right) \cdot \sin(\theta + \omega) \right] \quad (13)$$

$$GSD_x = \frac{p \cdot [(H+R) \cdot \cos(\theta + \omega) - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \cdot \sin^2(\theta + \omega)}] \cdot \cos \omega}{f} \quad (14)$$

$$GSD_y = \frac{p \cdot [(H+R) \cdot \cos(\theta + \omega) - \sqrt{R^2 - (H+R)^2 \cdot \sin^2(\theta + \omega)}] \cdot \cos \omega \cdot \sin(90 - \omega)}{f \cdot \sin \left[90 - \arcsin \left[\left(\frac{H+R}{R} \right) \cdot \sin(\theta + \omega) \right] \right]} \quad (15)$$

$$SW = \frac{R \cdot \pi}{180} \times (\arcsin(\frac{\sin(\omega + \theta) \cdot (H+R)}{R}) + \arcsin(\frac{\sin(\omega - \theta) \cdot (H+R)}{R}) - 2 \cdot \omega) \quad (16)$$

下面以 H 为650km, p 为 $7 \mu\text{m}$, f 为455mm, ω 为 40° , θ 分别为 5° 、 10° 、 15° 、 20° 为例,分析大视场相机侧摆成像时 GSD 和 SW 随 ω 的变化关系,如图8~15。图中近似曲线是按照小视场相机传统计算公式(2)、(3)、(5)的计算结果,精确曲线是按照文中考虑地球曲率及投射角影响的大视场相机计算公式(14)~(16)的计算结果。可见,当视场角和侧摆角都较大时,传统的计算方法会存在很大误差。当侧摆 20° 时, GSD_x 的最大值是最小值的2.31倍,最大值是传

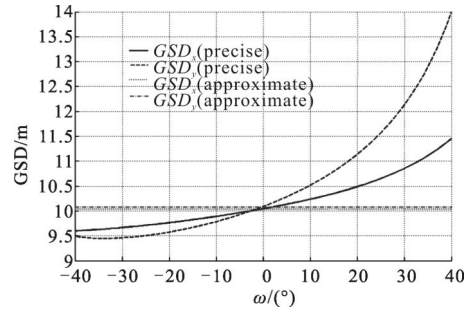


图8 侧摆 5° 时地面像元分辨率随视场角变化曲线

Fig.8 Curve of GSD change with field of angle when rolling 5°

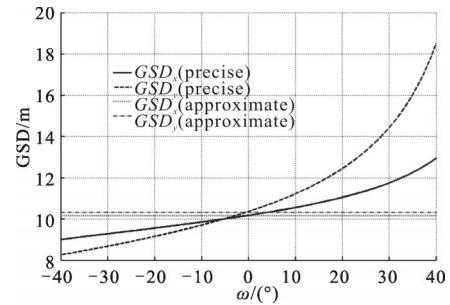


图9 侧摆 10° 时地面像元分辨率随视场角变化曲线

Fig.9 Curve of GSD change with field of angle when rolling 10°

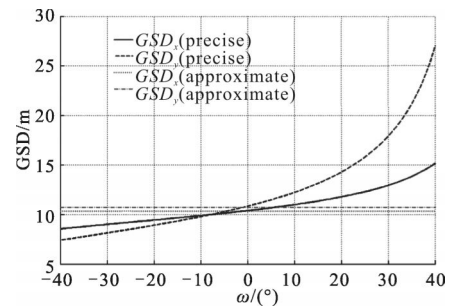


图10 侧摆 15° 时地面像元分辨率随视场角变化曲线

Fig.10 Curve of GSD change with field of angle when rolling 15°

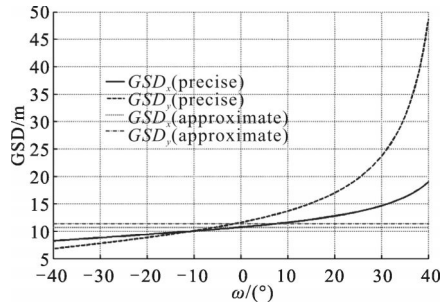


图 11 侧摆 20°时地面像元分辨率随视场角变化曲线

Fig.11 Curve of GSD change with field of angle when rolling 20°

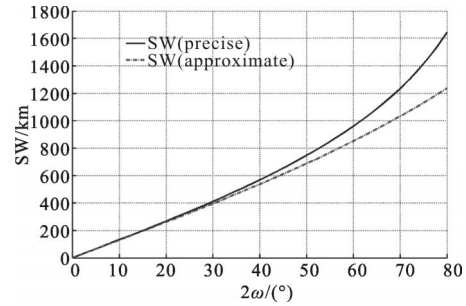


图 15 侧摆 20°成像时幅宽随全视场角变化曲线

Fig.15 Curve of SW change with full field of angle when rolling 20°

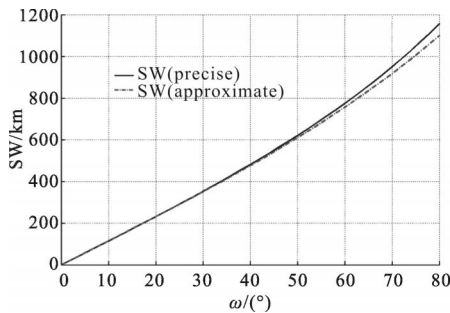


图 12 侧摆 5°成像时幅宽随全视场角变化曲线

Fig.12 Curve of SW change with full field of angle when rolling 5°

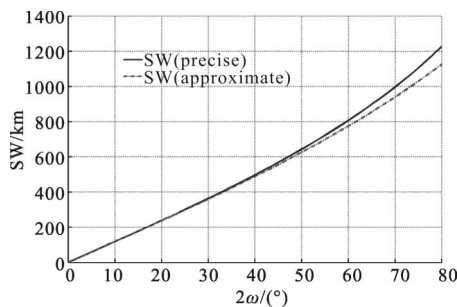


图 13 侧摆 10°成像时幅宽随全视场角变化曲线

Fig.13 Curve of SW change with full field of angle when rolling 10°

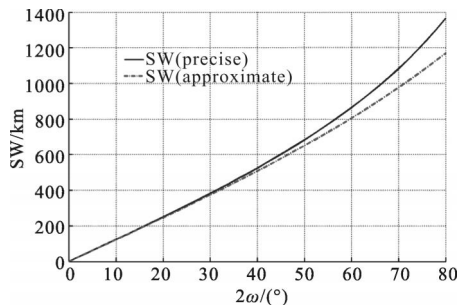


图 14 侧摆 15°成像时幅宽随全视场角变化曲线

Fig.14 Curve of SW change with full field of angle when rolling 15°

4 结论

大视场空间相机的 L 、 η 、 GSD 、 SW 等几何参数受地球曲率的影响较大,尤其是侧摆成像时。文中在全面考虑地球曲率和投射角影响的基础上,改进大视场空间相机几何参数计算方法以提高计算精度。根据仿真分析,对于 H 为 650 km, ω 为 40°的空间相机,当侧摆 20°成像时, GSD_x 的最大值是最小值的 2.31 倍,是传统计算方法的 1.78 倍; GSD_y 的最大值是最小值的 7.16 倍,是传统计算方法的 4.29 倍; SW 是传统计算方法的 1.329 5 倍。所以,采用传统的几何参数计算方法会存在较大的误差。文中提出的计算方法可以显著提高大视场相机的几何参数计算精度,对于提高大视场相机的成像质量具有重要意义。

参考文献:

- [1] Ruan Ningjuan, Zhuang Xuxia, Li Tuotuo, et al. End to end simulation and analysis of space optical remote sensing system[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34 (6): 36-43. (in Chinese)
阮宁娟, 庄绪霞, 李妥妥, 等. 空间光学遥感系统全链路仿真与分析[J]. *航天返回与遥感*, 2013, 34(6): 36-43.
- [2] Yao Gang, Tang Tianjin, Huang Ying. Optical system design used for the near infrared remote sensing with large field of view and small F number [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 107-110. (in Chinese)
姚罡, 汤天瑾, 黄颖. 大视场大相对孔径近红外观测相机光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 107-110.
- [3] Qi Junkai, Zhou Feng, Yao Gang, et al. A new super-large field of view and small distortion optical system [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34 (2): 30-35. (in Chinese)

统计算方法的 1.78 倍; GSD_y 的最大值是最小值的 7.16 倍,最大值是传统计算方法的 4.29 倍; SW 是传统计算方法的 1.33 倍。

- 戚均恺,周峰,姚罡,等.一种新型超大视场小畸变光学系统[J].航天返回与遥感,2013,34(2):30-35.
- [4] Zhang Liang, An Yuan, Jin Guang. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 24-29. (in Chinese)
张亮,安源,金光.大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J].红外与激光工程,2007,36(1):24-29.
- [5] Jing Quan. Research on computation model of bias angle for agile satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2012, 21(4): 16-20. (in Chinese)
景泉.敏捷卫星偏流角计算模型研究[J].航天器工程,2012,21(4):16-20.
- [6] He Hongyan, Wu Chongde, Wang Xiaoyong. Study of influence of swinging on the systemic parameters of the satellite and CCD camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(4): 14-18. (in Chinese)
何红艳,乌崇德,王小勇.侧摆对卫星及CCD相机系统参数的影响和分析[J].航天返回与遥感,2003,24(4):14-18.
- [7] Xie Shaobo, Qin Ranran. Analysis on residue of image shift compensation and its effects on imagine for agile satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2013, 22(4): 12-16. (in Chinese)
谢少波,秦冉冉.敏捷卫星像移补偿残差计算及对成像影响分析[J].航天器工程,2013,22(4):12-16.
- [8] Yuan Xiaokang. Calculation and compensation for the deviant angle of satellite borne TDI-CCD push scan camera [J]. *Aerospace Shanghai*, 2006, 23(6): 10-13. (in Chinese)
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,2006,23(6):10-13.
- [9] Wang Yueming, Wang Jianyu. Imaging motion model and compensation methods of spaceborne opto-mechanical scanner [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 952-956. (in Chinese)
王跃明,王建宇.星载光机扫描仪像移模型及补偿方法[J].红外与激光工程,2012,41(4):952-957.
- [10] Li Weixiong, Yan Dejie, Wang Dong. Image motion compensation method of high resolution space camer's imaging with pitch angle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2442-2448. (in Chinese)
李伟雄 闫得杰,王栋.高分辨率空间相机俯仰成像的像移补偿方法[J].红外与激光工程,2013,42(9):2442-2448.