

飞船振动引起的空间相机像移模型分析

刘海秋^{1,2} 闫得杰¹ 王 栋¹ 徐抒岩^{1*}

(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 100049

摘要 为了对由飞船振动引起的空间相机像移随时间变化规律进行分析,在 NASA 对 Landsat-4 卫星平台振动在轨测试结果的基础之上,提出了连续谱及各级非严格整数倍频谐波线性相加的焦面干扰力功率谱模型,推导出了相应的焦面干扰力时域模型,依据刚体运动学原理,建立了连续谱分量和各级非严格整数倍频谐波的线性相加的空间相机焦面像移模型。实验证明了由飞船振动引起的像移模型的正确性。

关键词 测量;飞船振动;空间相机;像移模型

中图分类号 V448.15⁺1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0612001

Space Camera Image Motion Model Analysis Caused by Spacecraft Vibration

Liu Haiqiu^{1,2} Yan Dejie¹ Wang Dong¹ Xu Shuyan¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to analyze space camera image motion change regulation with time caused by the spacecraft vibration, based on the NASA Landsat-4 satellite platform vibration test results on orbit, focal plane disturbance force model which is a linear combination of continuous spectrum and harmonics of nonstrictly integral multiple of fundamental frequency is proposed. The corresponding domain model of focal plane disturbance force is deduced, based on rigid body kinematics, space camera focal plane image motion model of linear combination of continuous spectrum and harmonics of nonstrictly integral multiple of fundamental frequency is established. Experiment proved the correctness of the image motion model caused by spacecraft vibration.

Key words measurement; spacecraft vibration; space camera; image motion model

OCIS codes 120.0280; 040.1490

1 引 言

空间相机在轨拍摄期间,由于各种因素导致的目标在焦面上映射的像与焦面之间的相对运动称为像移^[1]。在目标景物相对于地球坐标系静止的情况下,从形成原理分析,像移分为两部分,一部分是由飞船轨道运动及船下点纬度变化引起的像移,对于这部分像移的研究已经相当成熟^[2-3];另一部分是由飞船姿态不稳定、调姿动量轮变速转动、指向控

制、太阳帆板调整等运动导致飞船平台振动,进而传递给相机焦面,形成焦面干扰力,引起焦面与目标景物在焦面上的像之间的相对运动。目前,对这部分的研究集中在以 MTF 为指标来衡量其对成像质量的影响层面^[4-5],对于振动导致的像移的表现形式没有进行相关研究,而这对高分辨率空间相机的高精度像移测量及补偿都具有重要意义。因此,本文对由飞船振动产生的焦面像移模型进行研究。

收稿日期: 2013-12-03; **收到修改稿日期**: 2014-01-03

基金项目: 吉林省科技发展计划项目基金(20090311)、中国科学院领域前沿创新项目基金(201204)

作者简介: 刘海秋(1987—),女,博士研究生,主要从事航天遥感器像移测量的研究和实现。

E-mail: shangyue_2008@126.com

导师简介: 徐抒岩(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光学遥感器计算机控制、图像处理等方面的研究。

E-mail: xusy@ciomp.ac.cn

2 像移的产生

空间相机在轨拍摄期间,由于各种因素导致的目标在焦面上映射的像与焦面之间的相对运动称为像移。当目标景物相对于地球坐标系静止时,这种相对运动是由船下点纬度变化、飞船姿态不稳定、调姿动量轮变速转动、指向控制、太阳帆板调整等引起的。当目标景物在地球坐标系内是非静止的,这种相对运动除了上述运动外还包括目标景物相对于地球坐标系的运动。这两种运动共同组成了目标景物在焦面上映射的像与焦面之间的相对运动,本文仅考虑目标景物相对于地球坐标系静止的情况,研究焦面相对于像的相对运动。

以上所有因素在焦面上的综合作用效果是产生目标景物在焦面上映射的像与焦面间的相对运动,这种相对运动可以分解成一对相互作用量,一个是以焦面为参考,像的运动,即像移^[1],如图 1 中的像的速度 v_i 在对应时间上产生的位移;另一方面是以像为参考,焦面的运动,如图 1 中的焦向速度 v_{fp} 随时间变化的累积位移。它们大小相等,方向相反。

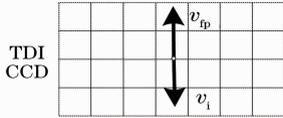


图 1 像移速度示意图

Fig. 1 Image motion velocity sketch

3 飞船振动产生的像移模型

空间相机在轨拍摄期间,由动量轮运转、指向控制、太阳帆板调整等因素造成飞船平台振动,由飞船与空间相机之间的连接传递给相机,进而传递给焦面,构成焦面的干扰力,造成焦面的不稳定。由飞船传递给焦面的各种干扰力,按作用方向可以分为

沿时间延迟积分(TDI)方向、垂直于 TDI 方向以及垂直于焦平面方向。其中垂直于焦平面方向的干扰对成像影响非常小^[6],在此不做考虑,只对焦面上其他两个方向的干扰力产生的像移进行分析。

3.1 空间相机焦面干扰力模型

NASA 对 Landsat-4 平台振动在轨测量结果为连续谱和谐振峰相叠加的单边功率谱模型^[7],由于飞船平台振动与焦面之间干扰力的传递关系,假设垂直于 TDI 方向的焦面干扰力功率谱模型为连续谱与谐振峰的叠加;由于飞船在轨拍摄期间,影响焦面稳定性的干扰因素很多,各个干扰因素之间未必完全不相关,可能存在耦合谐波,因此,垂直于 TDI 方向的焦面干扰力功率谱为连续谱及各级非严格整数倍频谐波的线性组合,如(1)式所示, $B^x(f)$ 为连续谱分量, A_i^x 为 i 次谐振波幅值,其中 $h_i^x \in Q$ (Q 为有理数集),当焦面是个质量均匀分布的刚体时,同一时刻干扰力对焦面上各点作用效果相同,式中 M 为焦面上干扰力矩作用范围的质量,(2)式给出了此功率谱对应的干扰力模型, $b^x(t)$ 为连续谱分量 $B^x(f)$ 对应的干扰力, $A_i^x \sin(2\pi h_i^x f_0^x t + \phi_i^x)$ 为第 i 个谐振峰 A_i^x 对应正弦干扰力。

$$F_{\text{dis}}^x(f) = M^2 \left[B^x(f) + \sum_{i=1}^n A_i^{x2} \delta(f - h_i^x f_0^x) \right], \quad (1)$$

$$F_{\text{dis}}^x(t) = M \left[b^x(t) + \sum_{i=1}^n A_i^x \sin(2\pi h_i^x f_0^x t + \phi_i^x) \right], \quad (2)$$

3.2 焦面干扰力产生的像移模型

根据刚体运动学原理,由垂直于 TDI 积分方向的干扰力得到焦面在该方向的加速度、速度、位移模型,如(3)~(5)式所示,以空间相机开拍时刻为零时刻,此时的焦面位置为初始位置, $s^x(t)$ 表示 t 时刻焦面相对于初始位置在垂直于 TDI 积分方向的位移。

$$a^x(t) = \frac{F_{\text{dis}}^x(t)}{M} = b^x(t) + \sum_{i=1}^n A_i^x \sin(2\pi h_i^x f_0^x t + \phi_i^x), \quad (3)$$

$$v^x(t) = \int_0^t a^x(\tau) d\tau = \int_0^t b^x(\tau) d\tau + \sum_{i=1}^n A_i^x \int_0^t \sin(2\pi h_i^x f_0^x \tau + \phi_i^x) d\tau = \sum_{i=1}^n -\frac{A_i^x}{2\pi h_i^x f_0^x} \cos(2\pi h_i^x f_0^x t + \phi_i^x) + \int_0^t b^x(\tau) d\tau, \quad (4)$$

$$s^x(t) = \int_0^t v^x(\tau) d\tau = \int_0^t \left[\sum_{i=1}^n -\frac{A_i^x}{2\pi h_i^x f_0^x} \cos(2\pi h_i^x f_0^x \tau + \phi_i^x) + \int_0^\tau b^x(\xi) d\xi \right] d\tau = \sum_{i=1}^n \left[-\frac{A_i^x}{(2\pi h_i^x f_0^x)^2} \sin(2\pi h_i^x f_0^x t + \phi_i^x) \right] + \int_0^t \left[\int_0^\tau b^x(\xi) d\xi \right] d\tau, \quad (5)$$

对由飞船振动引起的焦面像移与该振动导致的焦面相对于初始位置的位移 $s^x(t)$ 之间的关系进行分析。在目标景物相对于地球坐标系静止,且去除由飞船轨道运动及地球自转引起的焦面像移的情况下,若飞船振动为零,则任意时刻目标景物在焦面上映射的像的位置均与初始时刻像的位置相同,若飞船振动不为零,则 t 时刻目标景物在焦面上映射的

像的位置均与像的初始位置之差(即飞船振动引起的像移)与该时刻焦面相对于初始位置的位移为一对相互作用量,满足大小相等,方向相反。因此,飞船振动产生的像移 $I_{\text{vib}}^x(t)$ 为该振动产生的焦面位移 $s^x(t)$ 的相反数,如(6)式所示。

$$I_{\text{vib}}^x(t) = -s^x(t) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i^x}{(2\pi h_i f_0^x)^2} \sin(2\pi h_i f_0^x t + \phi_i^x) - \int_0^t \left[\int_0^\tau b^x(\xi) d\xi \right] d\tau, \quad (6)$$

设 $K_i^x = \frac{A_i^x}{(2\pi h_i f_0^x)^2}$, (6) 式中 $I_{\text{syn}}^x(t) = \sum_{i=1}^n K_i^x \sin(2\pi h_i f_0^x t + \phi_i^x)$ 为干扰力中谐振分量产生的像移,

$I_{\text{con}}^x(t) = -\int_0^t \left[\int_0^\tau b^x(\xi) d\xi \right] d\tau = \delta^x(t)$ 为干扰力中连续分量产生的像移。由此可见,由飞船振动引起的像移模型也为连续谱分量与各级非严格整数倍频谐波的线性相加,飞船振动功率谱中连续谱分量产生的像移功率谱也为连续谱,谐振谱分量产生的像移功率谱同样为谐振谱。

$$I_{\text{vib}}^x(t) = I_{\text{syn}}^x(t) + I_{\text{con}}^x(t) = \sum_{i=1}^n K_i^x \sin(2\pi h_i f_0^x t + \phi_i^x) + \delta^x(t), \quad (7)$$

由飞船振动引起的焦面上沿 TDI 方向像移和垂直于 TDI 积分方向像移的研究前提和方法相同,因此,沿 TDI 方向的像移模型可表示为

$$I_{\text{vib}}^y(t) = I_{\text{syn}}^y(t) + I_{\text{con}}^y(t) = \sum_{i=1}^m K_i^y \sin(2\pi h_i^y f_0^y t + \phi_i^y) + \delta^y(t). \quad (8)$$

4 实验及结果分析

以某 TDICCD 空间相机于北纬 $38.8436^\circ \sim 39.4515^\circ$ 的升轨阶段在轨拍摄的可见光图像为实验对象,由于拍摄场景绝大部分为田地,可以认为目标景物相对于地球坐标系是静止。因此,该环境下拍摄的遥感图像可以作为验证像移模型的实验对象。

采用基于空间相机 TDI 传感器拼接区图像的像移测量方法,获得垂直于 TDI 积分方向的像移总

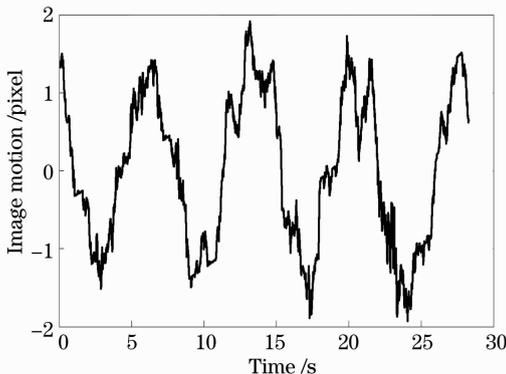


图2 飞船振动引起的像移曲线

Fig. 2 Image motion caused by spacecraft vibration

量,根据船下点纬度变化引起的像移的计算公式得到由纬度变化引起的像移^[8-9],从像移总量中减去纬度变化引起的像移,剩余的像移如图2所示,在目标景物相对于地球坐标系静止的情况下,可以认为这部分像移是由于飞船姿态不稳定、调姿动量轮变速转动、指向控制、太阳帆板调整等运动造成平台振动引起的。随时间增加,由平台振动引起的像移呈

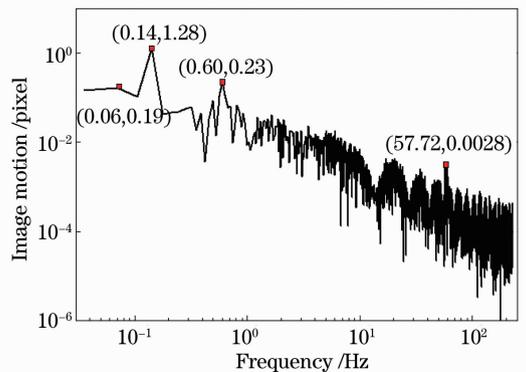


图3 飞船振动引起的像移幅频曲线

Fig. 3 Amplitude frequency of image motion caused by spacecraft vibration

现类周期运动形式,在此基础上叠加了高频小幅分量。

为进一步分析平台振动产生的像移随时间变化的运动规律,图 3 给出了该像移的幅频曲线,横轴为频率,纵轴为该频率下的正弦波幅值。由平台振动产生的像移频谱为连续谱和谐振峰的叠加,随着频率的增加,相应的正弦波幅值逐渐减少,存在 4 个峰

值,由于飞船在轨拍摄时,影响焦面稳定的平台振动因素复杂,所以各谐振频率间不是严格的整数倍数关系。

图 4 中(a)为像移中连续谱分量;(b)为像移中谐振峰分量,表达式为(9)式,从各个正弦波的频率可以看出,各个谐振峰的频率之间不是严格的整数倍数关系。

$$\hat{I}_{\text{syn}}^x(t) = 0.19\sin(2\pi 0.06t + 2.18) + 1.28\sin(2\pi 0.14t + 2.37) + 0.23\sin(2\pi 0.60t + 0.94) + 0.0028\sin(2\pi 57.72t + 2.54). \quad (9)$$

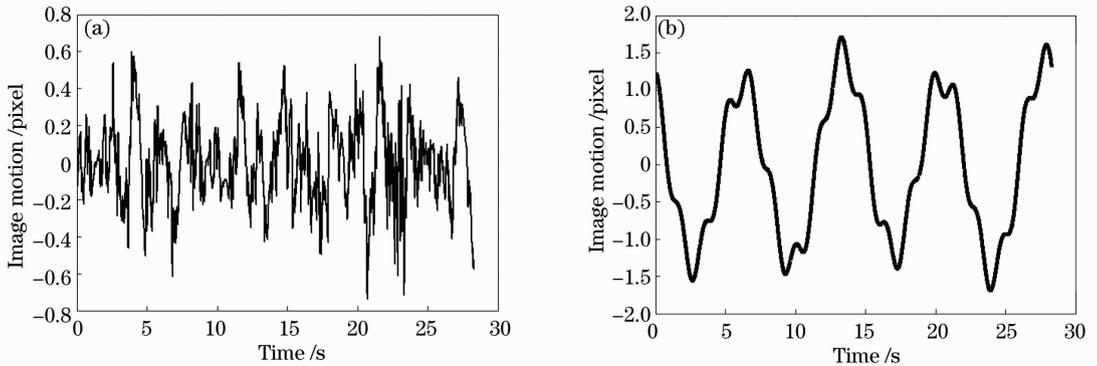


图 4 飞船振动引起的像移谐振分量和连续分量。(a)像移中连续分量;(b)像移中谐振分量

Fig. 4 Continuous component and harmonics component of image motion caused by spacecraft vibration. (a) Continuous component; (b) harmonics component

5 结 论

建立由飞船振动引起的像移模型,对高分辨率空间相机像移测量及像移补偿具有重要意义,目前对由飞船振动产生的空间相机焦面像移的研究主要集中在以 MTF 为指标衡量像移对成像质量的影响层面上,没有对由飞船振动产生的像移进行研究,而这对高分辨率空间相机的高精度像移测量及补偿具有重要意义。针对此问题,在 NASA 对 Landsat-4 卫星平台振动在轨测试结果的基础之上,建立了连续谱和各级非严格整数倍频谐波线性相加的焦面干扰力功率谱模型,推导出了相应的焦面干扰力时域模型,依据刚体运动学原理,建立了连续谱分量和各级非严格整数倍频谐波线性相加空间相机焦面像移模型。以某空间相机于北纬 $38.8436^{\circ} \sim 39.4515^{\circ}$ 升轨阶段一次任务 30 s 内在轨拍摄的可见光图像为实验对象,采用基于 TDI 传感器拼接区图像的像移测量方法,获得了空间相机焦面上垂直于 TDI 积分方向上的像移数据,根据船下点纬度变化引起的像移的计算公式得到由纬度变化引起的像移,从像移总量中减去这部分像移,得到由飞船振动引起的像

移数据,进行频谱分析,提取其中的连续谱分量和谐振峰分量,证明了由飞船振动产生的像移模型的正确性以及各谐振频率间非严格整数倍数关系。

参 考 文 献

- Liu Haiqiu, Xu Shuyan, Wang Dong. Space camera image motion measurement based on images from time deciyed integratnen sensors overlapped area [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0212001.
- 刘海秋, 徐抒岩, 王 栋. 基于空间相机 TDI 传感器拼接区图像的像移测量[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0212001.
- Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(12): 1585-1589.
- 王家骥, 于 平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.
- Li Weixiong, Yan Dejie, Xu Shuyan, *et al.*. Modification of the geocentric distance error of space cameras [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 1126-1133.
- 李伟雄, 闫得杰, 徐抒岩, 等. 空间相机地心距误差修正[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 1126-1133.
- Sun Yang. On-Orbit Platform Jitter Effect on Image Quality of High-Resolution Remote Sensor [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- 孙 阳. 卫星平台在轨颤振对高分辨率遥感器成像[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- Wu Mengyuan, Li Yingcai, Hu Yongming, *et al.*. Application of MTF in frame design for optical camera [J]. Chinese J Lasers,

- 2012, 39(8): 0816001.
- 吴萌源, 李英才, 胡永明, 等. 调制传递函数在光学相机支撑设计中的应用[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0816001.
- 6 Li Weixiong. Research on Method of Image Motion Compensation of High Resolution Space Cameras' Collecting Scene Agilely [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- 李伟雄. 高分辨率空间相机敏捷成像的像移补偿方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- 7 Sudey Jr J, Schalman J R. In-orbit measurements of Landsat-4 thematic mapper dynamic disturbances [J]. Acta Astronautica, 1985, 12(7): 485-503.
- 8 Chao Fan, Yingcai Li, Hongwei Yi. Influence analysis of drift angle on image quality of TDI CCD camera [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(9): 70-73.
- 樊超, 李英才, 易红伟. 偏流角对 TDI CCD 相机像质的影响分析[J]. 光电工程, 2007, 34(9): 70-73.
- 9 Wu Xingxing, Liu Jinguo, Zhou Huaide. Image motion compensation of space camera with large field of view using earth ellipsoid [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0528001.
- 武星星, 刘金国, 周怀得. 应用地球椭球的大视场空间相机像移补偿[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0528001.

栏目编辑: 殷建芳