

TDI CCD 相机的卫星姿态稳定度确定

薛旭成*, 傅瑶, 韩诚山

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为解决卫星平台振动造成的图像质量下降问题,提高 TDI CCD 相机成像质量,分析了卫星姿态稳定度的范围及影响。讨论了卫星平台振动与 TDI CCD 成像质量的相关性,推导了卫星平台姿态稳定度和像移的关系公式,得出 TDI CCD 相机对卫星姿态稳定度的要求与轨道高度以及积分级数有关。实验验证了公式推导,结果显示:轨道高度越高,积分级数越大,对卫星姿态稳定度的要求就越严格。数据表明:轨道高度在 200 ~ 1 000 km 变化时,对卫星姿态稳定度的要求从 0.037 7 rad/s 提升至 0.006 35 rad/s; TDI CCD 相机的积分级数在 1 ~ 100 间变化时,对卫星姿态稳定度的要求从 0.014 rad/s 提升到 0.000 14 rad/s。本文工作确定了卫星姿态稳定度和轨道高度以及积分级数的关系,有助于 TDI CCD 成像质量的提升。

关键词:平台振动;TDICCD 相机;卫星姿态;像质

中图分类号:V447.3; TN386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130605.0767

Confirmation of satellite attitude stabilization for TDI CCD camera

XUE Xu-cheng*, FU Yao, HAN Cheng-shan

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

* Corresponding author, E-mail: xue0818@163.com

Abstract: To solve the image degradation caused by satellite platform vibration and to improve TDI CCD image quality, the range of satellite attitude stabilization and its effect were analyzed. First, the dependence of the satellite platform vibration on the TDI CCD image quality was discussed. Then, equations which gave the relationship between image motion and attitude stabilization were derived. Finally, it was concluded that the satellite attitude stabilization was relevant to orbit altitudes and integral stages. The experiment results indicate that the higher the orbit altitude is and the bigger the integral stages are, the more rigorous the requirement of satellite attitude stabilization is. From obtained data, it is demonstrated that when the orbit altitude changes from 200 km to 1 000 km, the requirement of satellite attitude stabilization need to improve from 0.037 7 to 0.006 35 rad/s. Meanwhile, when the integral stages change from 1 to 100, the requirement of satellite attitude stabilization need to be improved from 0.014 to 0.000 14 rad/s. The work in this paper confirms the re-

收稿日期:2013-07-23;修订日期:2013-09-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61036015)

relationships of satellite attitude stabilization, orbit altitudes and integral stages, which contributes to improve TDI CCD image quality.

Key words: platform vibration; TDI CCD camera; satellite attitude; image quality

1 引言

时间延迟积分 CCD (Time Delayed and Integration CCD, TDICCD) 是一种光电传感器, 通过对同一目标多次曝光、延迟积分的方式成像。与一般线阵 CCD 相比, 其响应度更高, 动态范围更宽, 在光线较暗的场所也能输出一定信噪比的信号, 可极大地改善恶劣环境条件引起信噪比低的不利因素。因此, 在空间探测、航天遥感领域有着广泛应用。TDI CCD 在沿着 CCD 列方向的推扫成像过程中, 在第一个积分周期内, 目标在某列的第一个像元进行曝光积分, 得到的光生电荷并不像普通 CCD 一样进行读出, 而是下移一个像元; 在第二个积分周期目标恰好移动到该列的第二个像元进行曝光积分。得到的光生电荷与上一个像元移来的电荷相加再移到下一个像元……, 直到第 M 个积分周期时, 目标已移到该列的第 M 个像元进行曝光积分, 第 M 个积分周期结束时, 第 M 个像元的光生电荷与前 $(M-1)$ 个像元的电荷相加后移入读出寄存器, 并像普通 CCD 器件一样进行读出。可见读出的电荷是单个像元的 M 倍, 而噪声只增加了 \sqrt{M} 倍, 信噪比却提高了 \sqrt{M} 倍, 这种累积曝光的方式^[1-2], 使得 TDI CCD 的灵敏度更高。用该方式成像时, 必须保证像移速率与电荷转移速率的匹配以及像移方向必须沿着 TDI 方向, 否则会造成相机在 TDI 方向和垂直 TDI 方向上像质的退化。也就是说, TDI CCD 多级累积积分的特性, 使其必须在较长的累积积分时间内保证像移速度与转移速度的匹配, 才能获得清晰的图像, 因此, 分析卫星平台振动时姿态控制精度的高低对该类型相机的影响对于提高卫星姿态的稳定性, 从而提高卫星图像质量具有重要意义。

卫星振动的影响会直接引起图像的像移。文献[3]分析了卫星姿态精度对 TDI CCD 相机的影响, 通过分析、计算卫星姿态控制精度导致的像移量及其与调制传递函数的对应关系, 给出了 TDI

CCD 相机对卫星姿态精度的要求; 文献[4]以 PHI 为色散型光谱仪模型, 研究计算了俯仰角、侧滚角、偏航角以及三角综合对光谱数据的空间图像和光谱的影响程度, 并且仿真了各种振动下的畸变光谱数据立方体, 得到了卫星平台振动造成光谱数据畸变的一般规律; 文献[5]为了对卫星振动图像进行稳像处理, 分析了卫星振动对 TDI CCD 成像质量的影响, 提出了一种对卫星振动进行补偿的方法。文献[6]提出了一个推扫 CCD 相机调制传递函数 (MTF) 值的模型, 并分别测量了卫星高低频振动所引起的 MTF 的下降。文献[7]分析了不同频率下的振动对图像质量的影响。文献[8]分析了平台振动对像质的影响。这些文献主要分析了卫星不同方向的振动导致的成像质量的变化, 但没有给出卫星振动导致成像质量下降和轨道高度、相机参数、地面像元分辨率等指标间的关系。

本文首先对高频振动和低频振动对成像的影响进行了分析, 然后重点分析了低频情况下姿态角速度导致的像移取决于哪些参数。由于 TDI CCD 在一定轨道高度推扫成像时, 分辨率越高则每行曝光时间越短, 姿态角速度在这一行曝光时间内导致的像移也变小。所以分析显示低频情况下姿态角速度导致的像移取决于轨道高度和积分级数, 而和地面像元分辨率没有关系。最后通过实验验证了这一结论。

2 卫星振动对 TDICCD 成像影响分析

卫星在轨运行期间, 由于动量轮变速转动、喷气、指向控制、太阳帆板调整等运动, 会使平台震颤, 从而引起像移, 影响相机稳定性, 造成像质模糊^[9]。尤其是对于 TDI CCD 相机来说, 如果不能保证卫星姿态稳定度在合理的范围内, 在多级累积积分的过程中就很容易产生像移。因此对卫星姿态稳定度的研究对于分析平台振动, 提高图像质量具有重要价值。

卫星平台的振动分为高频振动和低频振动两类。从相机角度分析,区分高频振动和低频振动要看振动频率和相机曝光时间的关系。在相机曝光时间内如果振动可以完成一个周期,那么就是高频振动;相机曝光时间内如果振动不能完成一个周期,那么就是低频振动。由于相机曝光时间内,高频振动完成了一个振动周期,所以描述高频振动时要用其振动幅度来表达其对成像质量的影响;而低频振动则需要用角速度来进行描述,角速度越大,单位时间内振动的幅度也越大。

高频振动导致成像质量下降,可以用调制传递函数来表达^[10],如下式所示:

$$H(\rho) = e^{-2(\pi\sigma\rho)^2}, \quad (1)$$

式中: ρ 为空间频率, σ 为振动振幅大小。可见控制高频振动振幅的大小是提高成像质量的关键。相机安装在卫星上时,往往采取隔振措施,高频振动传递到相机的幅度一般较小。而低频振动的隔振效果则较小,对成像的影响较大,因此本文主要分析低频振动下平台姿态的稳定度对成像的影响及和轨道高度和相机参数的关系。为了分析平台姿态稳定度对成像的影响,图 1 给出了描述相机成像的角度关系。

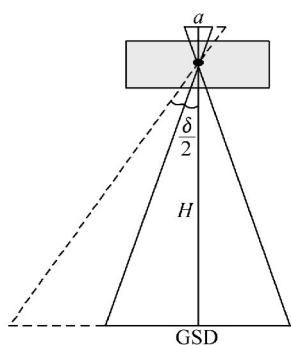


图 1 姿态角偏离示意图

Fig. 1 Schematic diagram of attitude angle deviation

上图中 TDI CCD 的瞬时视场角以 α (单位为 rad)来表示。这里 θ (单位为 rad)表示卫星的指向精度, θ' (单位为 rad/s)表示卫星的姿态稳定度, τ 表示卫星的曝光时间,则 $\theta' \cdot \tau$ 可以看作是在一定曝光时间内姿态稳定性造成相机非正常像移的角度的大小,对应图 1 中虚线部分表示的偏离角度(姿态角速度可以有俯仰角速度、滚动角

速度及偏流角速度 3 个方向。这里分析滚动角速度)。由图中可见,偏离瞬时视场角的角度越大,成像时的图像质量越差。所以要保证成像时的调制传递函数 MTF (Modulation Transfer Function) 达到预期值,需要对该角度设定在一定范围内,否则传递函数会下降到不可接受的地步,因此得出式(2)如下:

$$\theta' \cdot \tau < \frac{\delta}{\alpha}, \quad (2)$$

式中, α 为常数,其大小将影响 MTF 值的大小, α 越大,MTF 值越大。根据 MTF 值的要求,可以确定 α 的大小。

式(2)中:

$$\tau = m \cdot \tau_m, \quad (3)$$

式中: m 是 TDI CCD 当前积分级数, τ_m 是 TDI CCD 当前行转移时间(行周期)。

由式(2)和式(3)可以推导出下式:

$$\theta' \cdot m \cdot \tau_m < \frac{\delta}{\alpha}. \quad (4)$$

又因为垂直对地成像时,地面像元分辨率(GSD)关系式为:

$$\tan \frac{\delta}{2} = \frac{\frac{GSD}{2}}{H} = \frac{GSD}{2H}, \quad (5)$$

式中, H 为卫星轨道高度。一般情况下瞬时视场角 δ 较小,由于 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\tan x}{x} = 1$,有 $\tan \frac{\delta}{2} = \frac{\delta}{2}$,因此由式(5)可得:

$$\delta = \frac{GSD}{H}. \quad (6)$$

又由遥感相机 CCD 行转移时间(行周期)公式,有:

$$\tau_m = \frac{GSD}{v_N}, \quad (7)$$

式中, v_N 表示星下点平均速度(地速),其大小可以用下式计算:

$$v_N = v_g \cdot \frac{R}{R+H}, \quad v_g = \sqrt{\frac{G \cdot M}{R+H}}, \quad (8)$$

式中: G 是万有引力常数, M 是地球质量, R 为平均地球半径, H 为卫星轨道高度, v_g 是卫星速度平均速度, v_N 是星下点平均速度(地速)。由式(7)

和(8)可以推导出:

$$\tau_m = \frac{GSD(R+H)}{\sqrt{\frac{G \cdot M}{R+H}} \cdot R} \quad (9)$$

至此,将式(9)、(6)代入(4),可推导出式(10):

$$\frac{\theta' \cdot m \cdot GSD(R+H)}{\sqrt{\frac{G \cdot M}{R+H}} \cdot R} < \frac{GSD}{H \cdot \alpha}, \quad (10)$$

则:

$$\theta' < \frac{R \sqrt{G \cdot M}}{\alpha \cdot m \cdot H \cdot (R+H) \sqrt{R+H}}, \quad (11)$$

式中: R, G, M 都是常数, α 也是常数因子,因此可以得出结论,在保证MTF值下降到一定值的情况下,对卫星姿态稳定度(角速度)的要求和轨道高度 H 以及积分级数 m 有关,和地面像元分辨率GSD没有直接的关系。这是因为地面像元分辨率GSD的值越小,虽然瞬时视场角 δ 变小,但是同时TDI CCD的行转移时间(行周期)也相应地变小。

3 实验结果分析

卫星平台振动引起的图像质量下降可以用调制传递函数MTF进行评估,因此在实验中首先通过计算MTF来确定 α 值的大小。低频振动引起的MTF可以用下式表达:

$$MTF = \sin(\pi \cdot N \cdot v) / (\pi \cdot N \cdot v), \quad (12)$$

式中: N 表示像移量的大小, v 是空间频率。

从图1可知,图中虚线部分表示相机非正常像移的角度,其大小和像元尺寸成正比。因此,MTF公式可表达为,

$$MTF = \sin\left(\pi \cdot a \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot v\right) / \left(\pi \cdot a \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot v\right), \quad (13)$$

式中, a 是像元大小,由于在此主要为确定 α 值的大小,因此不考虑积分级数的影响。

为了确定 α 值的大小,计算相机奈奎斯特频率处($v = \frac{1}{2a}$)的MTF值,计算结果如表1所示。

表1 α 值与MTF值的对应关系

Tab.1 Corresponding relationship of α and MTF

| α | MTF |
|----------|-------|
| 1 | 0.637 |
| 2 | 0.9 |
| 3 | 0.95 |
| 4 | 0.97 |

α 值越大,则MTF值越高,本文实验中 α 值取为1。根据上述表格确定了系数 α 值的大小,下文将通过实验验证所推导的结论。已设 $\alpha = 1$,又已知地球质量 $M = 5.97219 \times 10^{24}$ kg,万有引力常数 $G = 6.67 \times 10^{-11}$ N·m²·kg⁻²,地球半径 $R = 6371 \times 10^3$ m,由式(11)可得出卫星姿态稳定性和轨道高度以及积分级数的关系,如图2、图3

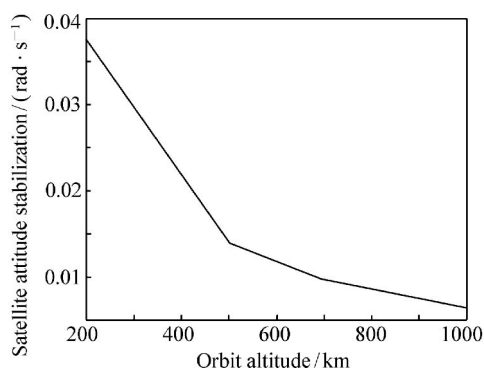


图2 轨道高度与卫星姿态稳定度的关系

Fig. 2 Relationship between orbit altitude and satellite attitude stabilization

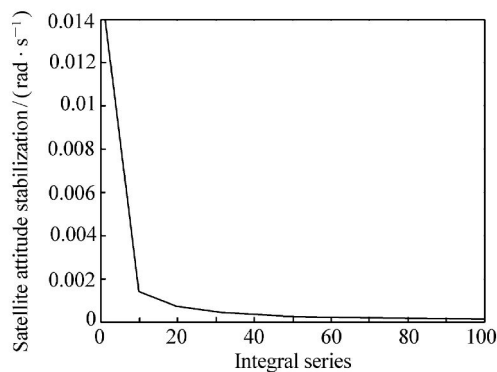


图3 积分级数与卫星姿态稳定度的关系

Fig. 3 Relationship between integral stages and satellite attitude stabilization

所示,图2中假设积分级数为1,轨道高度越高,对卫星姿态稳定度的要求也越严格。当轨道高度从 0.2×10^3 km至 1×10^3 km变化时,对卫星姿态稳定度的要求从 $-1(0.0377 \text{ rad/s})$ 数量级提高至 $-2(0.00635 \text{ rad/s})$ 数量级。图3中假设轨道高度为 0.5×10^3 km,从图中可见,当积分级数大于10时,卫星姿态稳定度的范围减小得很快,范围一直呈缩小的趋势。TDI CCD相机的积分级数从1~100变化时,对卫星姿态稳定度的要求从 $-1(0.014 \text{ rad/s})$ 数量级提高到 $-3(0.00014 \text{ rad/s})$ 数量级。

综合以上实验可以得出卫星姿态稳定度(角速度)和轨道高度以及积分级数有关。轨道高度越高,积分级数越大,卫星姿态稳定度的要求就越严格;并且随着积分级数的增长,对卫星姿态稳定度的要求显著增强。

4 结 论

本文分析了卫星平台振动对TDI CCD相机成像质量的影响,通过推导与卫星平台姿态稳定度相关的公式,得出结论,即:TDI CCD相机对卫星姿态稳定度(角速度)的要求和轨道高度以及积分级数有关。数据表明,轨道高度在200~1000 km变化时,对卫星姿态稳定度的要求从 $-1(0.0377 \text{ rad/s})$ 数量级提高至 $-2(0.00635 \text{ rad/s})$ 数量级;TDI CCD相机的积分级数从1变化至100时,对卫星姿态稳定度的要求从 $-1(0.014 \text{ rad/s})$ 数量级提高到 $-3(0.00014 \text{ rad/s})$ 数量级。从而可以在实际应用中针对不同的轨道高度得出相应的平台姿态稳定度的限制值,进而减少卫星平台的振动对图像质量的影响,有效提升图像质量。

参考文献:

- [1] 薛旭成,石俊霞,吕恒毅,等.空间遥感相机TDI CCD积分级数和增益的优化设置[J].光学精密工程,2011,19(4):857-863.
XUE X CH, SHI J X, LÜ H Y *et al.*. Optimal set of TDI CCD integration stages and gains of space remote sensing cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 857-863. (in Chinese)
- [2] 朱宏毅,郭永飞,薛旭成,等.多TDICCD拼接相机非均匀性实时校正正在FPGA中的实现[J].光学精密工程,2011,19(12):3034-3042.
ZHU H Y, GUO Y F, XUE X CH, *et al.*. Real-time correction of imaging nonuniformity for multi-TDICCD mosaic camera on hardware [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 3034-3042. (in Chinese)
- [3] 龙夫年,张旺,刘剑峰.卫星姿态精度对TDICCD相机的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2002,34(3):382-384.
LONG F N, ZHANG W, LIU J F. Effect of satellite attitude control accuracy on TDI CCD cameras [J]. *J. Harbin Institute Technology*, 2002, 34(3): 382-384. (in Chinese)
- [4] 王晓燕,唐义,唐秋燕,等.卫星平台振动对色散型光谱仪光谱成像质量的影响分析[J].光谱学与光谱分析,2011,31(12):3407-3411.
WANG X Y, TANG Y, TANG Q Y, *et al.*. Analysis of influence of satellite platform vibration on spectral imaging quality of dispersive imaging spectromete [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(12): 3407-3411. (in Chinese)
- [5] 石俊霞,薛旭成,郭永飞.卫星振动对TDICCD成像质量的影响及补偿方法[J].光电工程,2010,37(12):11-16.
SHI J X, XUE X CH, GUO Y F. Effect of satellite vibration on imaging quality of TDICCD camera and compensation method [J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2010, 37(12): 11-16. (in Chinese)
- [6] XU P, HAO Q, HUANG CH *et al.*. Degradation of image quality caused by vibration in push-broom camera [J]. *SPIE*, 2002, 4927: 813-817.
- [7] XUE B, CHEN X M, NI G Q. Image quality degradation analysis induced by satellite platform harmonic vibration [J]. *SPIE*, 2009, 7513: 75130N.
- [8] DENG Q, FENG H J, XU ZH H, *et al.*. Study on MTF of remote sensing imaging under arbitrary known vibration [J]. *SPIE*, 2012, 8420: 84200W.

- [9] 杨秀彬,常琳,金光.单框架控制力矩陀螺转子动不平衡对遥感卫星成像的影响[J].中国光学,2012,(4):358-365.
YANG X B,CHANG L,JIN G. Influence of dynamic imbalance of SGCMG rotor on remote sensing satellite imaging[J].
Chinese Optics,2012,5(4):358-365. (in Chinese)
- [10] ROBERT D. Fiete,*Modeling the Imaging Chain of Digital Cameras*[M]. Bellingham WA;SPIE Press,2010.

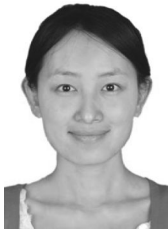
作者简介:



薛旭成(1980—),男,河北阳原人,博士,副研究员,2003年于长春理工大学获学士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光电成像及处理技术方面的研究。E-mail:xue0818@163.com



韩诚山(1972—),男,辽宁盖州人,研究员,硕士研究生导师,1993年于吉林工业大学获得学士学位,1998年、2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事空间有效载荷电控系统设计方面的研究。E-mail:xuan_han@yahoo.com.cn



傅瑶(1983—),女,吉林通化人,博士,助理研究员,2006年、2009年于东北师范大学分别获得学士、硕士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事遥感图像处理技术方面的研究。E-mail:yao.fu.felicity@gmail.com