

机动成像过程中 TDICCD 成像质量影响分析

韩杏子

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要 具有快速姿态调节能力的敏捷卫星,可灵活、快速地机动到感兴趣区域并进行成像,大大提高卫星观察的时效性,并扩大观察范围。目前敏捷卫星大多采用星下点推扫成像或沿平行于卫星飞行方向推扫成像的方式,研究机动成像过程中,分析时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)成像参数及图像质量的变化情况,对成像过程中的误差影响进行了分析,给出了关键参数变化情况的仿真结果,提出实现机动成像卫星的控制措施建议。

关键词 机动成像; 时间延迟积分电荷耦合器件; 敏捷卫星

中图分类号 V448.22 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s114004

Analysis of Effect on Image Quality of TDICCD During Dynamic Imaging

Han Xingzi

(DFH Satellite Co., Ltd. Beijing 100094, China)

Abstract Agile satellite can point to any interested place very deftly and fast, improving observe range and time efficiency of mission greatly. Most agile satellite take pictures either along satellite track or parallel with satellite track. Imaging parameter and imaging quality of change time delay and integration charge coupled devices (TDICCD) during dynamic imaging process are analysed, error effects on image quality are given, and simulation result of main parameters change is acquired, in the end satellite control method is proposed.

Key words dynamic imaging; time delay and integration charge coupled devices; agile satellite

OCIS codes 010.1490; 040.1520; 110.2970

1 引言

目前低轨小卫星携带的高分辨率轻小型相机幅宽一般为几十公里,回归周期高达几十天,无法保证对地观察的时效性。随着技术水平的提升,对于快速、及时地对特殊目标成像的需求,要求卫星具有快速机动的能力,可灵活、快速地机动到感兴趣区域并进行成像,敏捷卫星应运而生^[1-3]。

敏捷卫星可以利用高速的姿态机动能力,快速改变传感器的对地指向,实现对地目标的快速灵活地观测。姿态敏捷控制可极大地增强卫星灵活性,提高观测效率,快速高效地获取所需的非星下点目标遥感数据,是当今世界商业遥感卫星的一个发展方向。

敏捷卫星强大的机动能力,对成像任务提出了

新的要求,即期望实现在卫星姿态调节的过程中进行成像。

2 机动成像介绍

目前多数卫星均采用星下点推扫成像方式,或沿平行于星下点轨迹的航迹线,通过卫星姿态调节实现相机光轴稳定指向后,利用卫星的飞行运动实现时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)推扫成像,如图 1 所示。这种成像模式对 TDICCD 相机而言,由于成像过程中卫星指向不变,实质上仍然是一种静态推扫成像。

对于航迹线与卫星飞行方向不平行的区域,若要实现动态监视,需要通过卫星的姿态机动(滚动或俯仰+滚动)实现沿航迹线的指向,同时,要实时修

收稿日期: 2013-11-08; 收到修改稿日期: 2013-11-12

作者简介: 韩杏子(1983—),女,博士,工程师,主要从事光学载荷总体设计方面的研究。E-mail: xingerdu@sohu.com

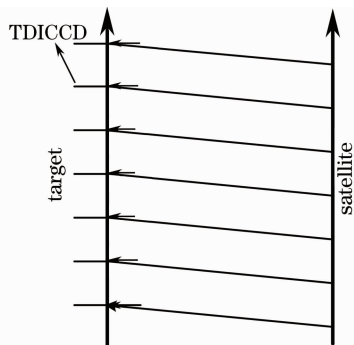


图 1 一般卫星成像模式

Fig. 1 Normal work mode of the satellite

正 TDICCD 偏流角,使得 TDICCD 能够实现沿航迹线方向的推扫成像^[4-5]。

TDICCD 基于对同一目标进行多次曝光实现延时积分,大大增强了光能收集,提高了信噪比。但由于 TDICCD 这种特殊的工作方式,要求同一列上的每一个像元都对同一目标曝光积分,才能保证成像质量。

若要实现卫星沿偏离星下点成一定角度的航迹线成像,需要卫星姿态进行实时调整。由于航迹线偏离星下点轨迹,TDICCD 电荷转移方向与电荷转移速度随着推扫轨迹实时变化,需要进行实时调整,以保证成像质量如见图 2 所示。

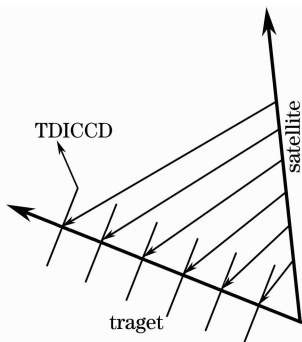


图 2 机动成像模式

Fig. 2 Work mode of dynamic image

对 TDICCD 沿偏离卫星飞行方向推扫成像的过程中,TDICCD 积分时间、地面像元分辨率变化情况进行了仿真分析,同时对卫星稳定度、积分时间误差、积分时间调节频率等对图像质量的影响因素进行了仿真分析,为卫星实现机动成像提供参考。

3 仿真分析

对卫星沿与飞行轨迹成 0°/20°/40°/60°/80°/90°夹角的目标条带进行推扫成像时,如图 2 所示,TDICCD 积分时间及地面像元分辨率(GSD)的变化

情况进行了仿真。

仿真中做了如下假设:

1) 假设卫星沿目标条带方向的推扫速度保持恒定;

2) 假设卫星已完成偏航机动,TDICCD 的线阵方向与推扫方向垂直;

3) 假设卫星姿态机动转序为 3-1-2。

仿真输入条件:

1) 轨道高度 $h=700$ km;

2) 轨道倾角 $i=98.1598^\circ$;

3) 地面目标纬度为 0° ;

4) 卫星沿目标条带方向的推扫速度 $v=6.667$ km/s;

5) TDICCD 的像元尺寸 $d=10$ μm ;

6) 相机焦距 $f=10$ m。

3.1 机动成像过程中成像参数变化分析

3.1.1 积分时间变化情况

当卫星沿着与卫星飞行方向有一定夹角的目标进行推扫成像时,卫星姿态实时变化,引起 TDICCD 积分时间随时间变化,积分时间 T_{int} 计算方法为

$$T_{int} = \frac{d \times h}{f \times v \times \cos r \times \cos^2 p}, \quad (1)$$

式中 r 和 p 分别表示卫星的侧摆角和俯仰角。

对图 2 所示机动成像过程中的积分时间变化情况进行了仿真分析,设置推扫时间为 60 s,结果如图 3 所示。

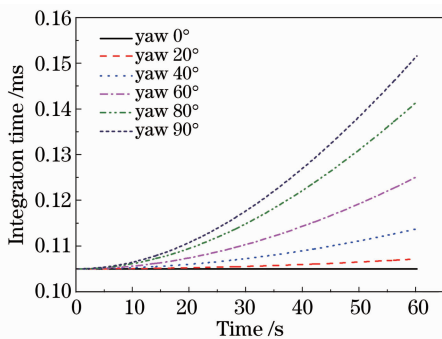


图 3 机动成像过程中积分时间变化情况

Fig. 3 Integration time change during dynamic image

可见机动成像过程中,TDICCD 积分时间随偏离星下点轨迹角度的增大,变化速率也逐渐加剧。随着时间的推移,积分时间逐渐增大,在 60 s 成像时间内,当推扫方向垂直于星下点轨迹(偏航 90°)成像时,积分时间变化可达 0.05 ms。

3.1.2 GSD 变化情况

当卫星沿着与卫星飞行方向有一定夹角的目标

进行推扫成像时,由于卫星姿态实时变化,图像地面分辨率也随时间变化。

GSD 可分为沿推扫方向(级数方向) D_{GS}^1 和沿垂直于推扫方向(线阵方向) D_{GS}^2 两种情况,通常卫星采用沿卫星飞行方向推扫成像的模式,此时 $D_{GS}^1 = D_{GS}^2$,在卫星姿态实时变化的情况下,这两个方向的分辨率会出现差异。GSD 计算公式为

$$D_{GS}^1 = \frac{d \times h}{f \times \cos r \times \cos^2 p},$$

$$D_{GS}^2 = \frac{d \times h}{f \times \cos^2 r \times \cos p}. \quad (2)$$

对机动成像过程中 GSD 变化情况进行了仿真分析,设置推扫时间为 60s,结果如图 4 所示。

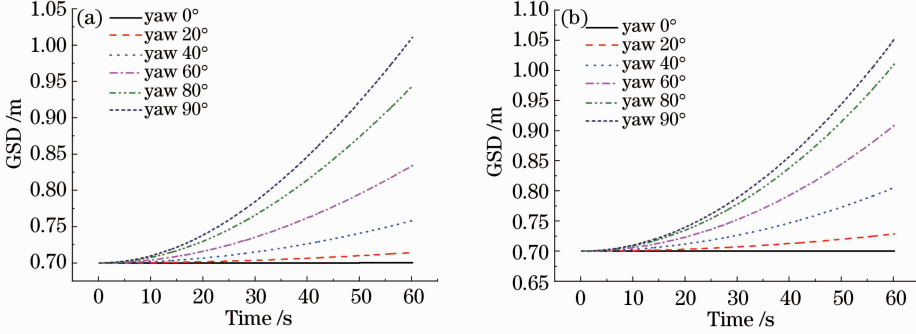


图 4 机动成像过程中 GSD 变化情况。(a) 沿推扫方向 GSD;(b) 沿垂直推扫方向 GSD
Fig. 4 GSD change during dynamic image. (a) Along orbit; (b) perpendicular to orbit

机动成像过程中,GSD 随着偏航角度的增加,变化速率增大。扫描方向和垂直于扫描方向 GSD 变化略有不同。在偏航角 90° 的情况下,成像 60 s 时间内,GSD 变化可达接近 0.4 m,在地面图像处理中,需对不同 GSD 的图帧像进行重采样处理。

3.2 机动成像过程中误差分析

平台抖动是影响 TDICCD 图像质量的一个重要因素,对于机动成像模式,由于成像过程中姿态持续进行调整,平台抖动会有一定程度的加剧,对图像质量的影响会更为明显。

对于 TDICCD 而言,理想的积分时间是地物在焦面上所成的像移动一行所需要的时间即要求像移速度和 TDICCD 电荷转移速度相同。积分时间计算公式为

$$T_{int} = \frac{d \times H}{f \times v} = \frac{d}{f \times (v/H)},$$

式中 H 代表卫星中心到目标的距离, v 代表目标点的扫描速率, v/H 代表速高比。

由于 TDICCD 这种特殊的工作方式,要求相机积分时间与目标推扫速度严格匹配,否则会在焦面产生像移,引起图像模糊,该误差称为积分时间同步误差。

要控制积分时间同步误差,保证图像质量,需严格按照速高比计算的理论积分时间对相机进行实时调节,但是由于受到积分时间调节频率的限制,不可能严格做到积分时间的实时同步,根据调节频率的不同,带来的误差也不同。

3.2.1 卫星平台稳定度影响分析

当姿态角发生速率为 $\dot{\Phi}$ 时的线性变化时,在积分时间内,姿态角速率产生的像面上像移量为

$$d_\Phi = fN_{TDI} \tan(\dot{\Phi}t_i) \approx fN_{TDI} \dot{\Phi}t_i. \quad (3)$$

对调制传递函数(MTF, $M_{TF\Phi}$)的影响为

$$M_{TF\Phi}(N) = \sin c(Nd_\Phi), \quad (4)$$

式中 N_{TDI} 为 TDI 积分级数, N 为奈奎斯特频率。

根据上述公式计算出的不同稳定度下焦面像移及 MTF 下降因子如表 1 所示。

表 1 平台稳定度对 MTF 的影响

Table 1 Attitude stability effect on modulation transfer function (MTF)

Attitude stability	TDI stage					
	6	12	24	48	72	96
0.0001	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	0.9999
0.0005	1.0000	1.0000	0.9998	0.9992	0.9983	0.9969
0.001	1.0000	0.9998	0.9992	0.9969	0.9931	0.9878
0.005	0.9988	0.9953	0.9810	0.9252	0.8365	0.7208

通常认为,在一个延时积分成像时间内像面位移小于 1/10 pixel 时可以满足成像要求。机动成像过程中,可根据需要适当降低对像移的要求,根据用户对图像质量的实际需求,参照表 1 中稳定度对图像 MTF 影响的分析结果,确定对卫星平台稳定度的要求。

3.2.2 积分时间同步误差影响分析

根据 TDICCD 成像原理,理想的积分时间是地物在焦面成的像移动一行(级)所需要的时间。当满足理想积分时间条件时,像的移动速度和 TDICCD 电荷转移速度相同,没有像移。如果积分时间不匹配,将导致像移模糊,系统 MTF 下降。机动成像过程中,由于卫星姿态不断变化,引起相机积分时间随推扫时间不断变化,因此需对相机的积分时间不断进行调整。

积分时间同步误差引起的像移为

$$\Delta x = T_{\text{error}} \times d \times N_{\text{TDI}}, \quad (5)$$

式中 T_{error} 表示积分时间同步误差百分数。

根据(4)式可求得积分时间同步误差对 MTF

的影响,如表 2 所示

表 2 积分时间同步误差对 MTF 的影响
Table 2 Effect of integration time error on MTF

Integration time error	TDI stage		
	Stage 12	Stage 24	Stage 48
0.2%	1.000	0.999	0.996
0.3%	0.999	0.998	0.991
0.5%	0.999	0.994	0.976

根据计算结果,积分时间同步误差小于 0.2% 时,采用 48 级积分 MTF 下降 0.4%,对图像质量影响较小。

3.2.3 积分时间调节频率影响

对图 3 所示积分时间,以不同时间步长对时间求导,求得积分时间调节频率对同步误差的影响为

$$T_{\text{error}} = \frac{T_t - T_{t-1/F}}{T_t} \times 100\%, \quad (6)$$

式中 t 表示时间, F 表示积分时间调节频率。

图 5 给出了积分时间调节频率分别为(a)1 Hz 和(b)2 Hz 时,积分时间同步误差随时间变化情况。

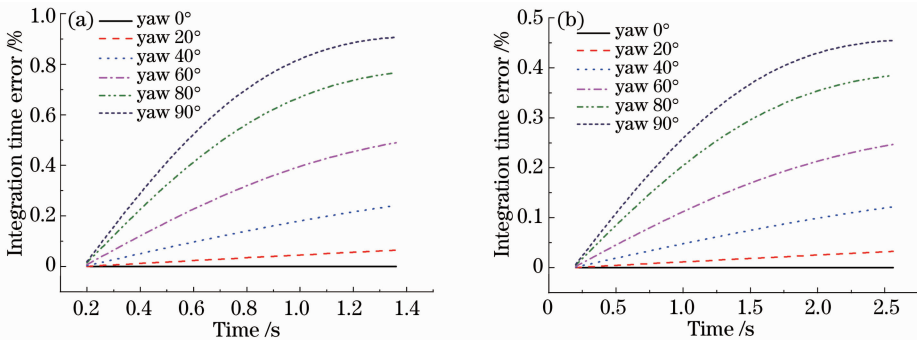


图 5 积分时间调节频率对同步误差影响

Fig. 5 Effect of time adjust frequency on integration time error

根据表的分析可知,当积分时间调节频率为 1 Hz 时,偏航角在 40° 以内,级数为 24 级,成像 1 min 时间内,传函下降小于 0.2%,级数为 48 级时,传函下降小于 0.9%。当积分时间调节频率大于 2 Hz 时,可满足所有 48 级 1 min 的成像要求。

4 结 论

机动成像是一种新型的卫星在轨成像模式,需要卫星具有较高的姿态机动能力,实现沿偏离卫星飞行方向的推扫成像。由于 TDICCD 特殊的成像原理,在卫星姿态不断调整的过程中,TDICCD 的成像条件也会出现不同。

对卫星沿偏离航迹线不同角度的目标进行推扫成像过程中,相机成像参数的变化情况进行了仿真

分析,并对这个过程中卫星平台稳定度、相机积分时间设置误差以及积分时间调节频率引起的误差对图像质量的影响进行了仿真,给出了具有参考价值的数据及结论,为卫星的这种新型工作模式提供了重要参考。

参 考 文 献

- Zhang Xinwei, Dai Jun, Liu Fuqiang. Research on working mode of remote sensing satellite with agile attitude control [J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4): 32-38.
- 张新伟,戴君,刘付强.敏捷遥感卫星工作模式研究[J].航天器工程,2011,20(4):32-38.
- Feng Zhongkui, Shi Dan, Chen Wenxi, et al.. The progress of French remote sensing satellite—from SPOT toward pleiades[J]. Remote Sensing Information, 2007, 4: 87-92.
- 冯钟葵,石丹,陈文熙等.法国遥感卫星的发展——从 SPOT 到 Pleiades[J].遥感信息,2007,4:87-92.
- Pleiades Programme Overview [M]. Presentation of SPOT

IMAGE Direct Receiving Station Meeting, 2006.

- 4 Huang Qundong, Yang Fang, Zhao Jiang. Drift angle analysis for agile satellite imaging when its attitude points to the earth changing continuously [J]. J Astronautics, 2012, 33(10): 1544-1551.
黄群东, 杨芳, 赵键. 姿态对地指向不断变化成像时的偏流角分析[J]. 宇航学报, 2012, 33(10): 1544-1551.

- 5 Huang Qundong, Yang Fang, Zhao Jiang. Calculation of image motion velocity for agile satellite dynamic imaging to changed continuously attitude point[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(12): 2812-2820.
黄群东, 杨芳, 赵键. 姿态对地指向不断变化成像时的像移速度计算[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2812-2820.

栏目编辑:李志兰