低轨凝视卫星动态跟踪对成像的影响分析

杨秀彬,林星辰

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘 要:为实现凝视卫星动态跟踪清晰成像,建立了卫星对地实时跟踪成像的数学模型,推导了卫星凝视跟踪成像时本体坐标系相对轨道坐标系的姿态角和角速度的变化,设计了物像位置与速度矢量映射算法,搭建了焦平面像点与地面景物点位置与速度变化的一一对应关系,结合蒙特卡洛方法统计分析了动态跟踪成像过程中卫星的姿态变化及姿态动态跟踪精度对成像的影响。最后,利用 CMOS 相机和小卫星姿态控制系统全物理仿真平台对凝视成像进行了仿真分析。结果表明:卫星凝视成像过程中,像面存在卫星姿态变化及姿态动态跟踪精度引起的像在探测元上的驻留时间小于探测器的积分时间,分析及仿真得出,为满足驻留时间大于或等于积分时间的要求,仿真平台动态跟踪精度优于0.002(°)/s 时,可实现 500 km 凝视卫星 2 m 分辨率动态跟踪清晰成像。

关键词: CMOS; 凝视; MTF; 信噪比

中图分类号: TP386.5 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)S-0203-06

Analysis of influence of LEO staring satellite dynamic tracking on imaging

Yang Xiubin, Lin Xingchen

(National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to achieve a clear dynamic staring imaging, the imaging model of satellite real-time imaging to track the target was designed, body posture angular velocity relative orbital coordinate system were designed when satellite staring imaging, the coordinate transformation method was used to real-time compute the time of the line transfer process in the gazing, the method of Monte Carlo was used to statistical calculate the influence of imaging under the satellite's attitude point precision and stability in the mode of staring-imaging. Finally, the CMOS prototype and the minitype three-axis air bearing table constructed for attitude control were used to simulate the digital domain CMOS staring imaging. The results show that in the satellite staring imaging process, the integration time in the image plane which caused by satellite attitude change and attitude dynamic tracking is greater than the accuracy of the detector, analysis and simulation results show, in order to meet shift of less than or equal to the detection element size requirements, simulation platform dynamic tracking accuracy better than 0.002 (°)/s, can achieve satellite getting 2 m clear resolution dynamic imaging in 500 km.

收稿日期:2014-10-19; 修订日期:2014-11-15

基金项目: 吉林省青年基金项目(201201010)

作者简介:杨秀彬(1981-),男,副研究员,博士,主要从事卫星轨道设计和相移补偿方面的研究工作。Email: yangxiubin@nankai.edu.cn

Key words: CMOS; staring-imaging; MTF; SNR

0 引 言

目前,低轨道(LEO)对地观测小卫星光学载荷获 取地面图像的方式主要采用推扫成像和光机扫描成 像,国内外低轨道卫星凝视成像模式还比较少。"凝 视"光学小卫星是具备可以连续观察光学载荷视场 内景物变化,获得比传统推扫成像模式更多的关于 景物地区的动态信息等独特特点的一种新型对地观 测卫星。"凝视"卫星的"凝视"成像模式是指卫星在 沿轨道进动过程中, 虽然目标区域和卫星的相对位 置关系不断变化,但通过调整卫星的姿态角度和姿 态角速度,可使卫星中的光学有效载荷的光轴始终 动态指向地球上的指定景物区域, 从而实现光学有 效载荷对景物区域内的连续成像,因此,"凝视"成像 卫星具备较高的时间分辨率,同时"凝视"成像卫星 能够提供的积分时间较长,有益于提高信噪比,可同 时观测全视场内发生的现象,成像效率高。随着航天 事业发展, 低轨对地观测卫星对时间分辨力要求越 来越高,凝视成像卫星将其优点全部或部分发挥出 来,大大拓宽卫星成像技术的应用领域[1-5]。

低轨道对地观测凝视卫星成像过程中,卫星通过实时调整姿态角度和姿态角速度实现光学有效载荷的光轴始终动态跟踪地球上的指定目标区域,为保证成像质量,要求卫星的姿态变化及姿态动态跟踪精度引起的像移量小于或等于探测元尺寸,使被观测目标的像在探测元上的驻留时间较长,大于或等于探测器的积分时间。文中结合低轨道凝视卫星在轨凝视成像数学模型和物像位置与速度矢量映射算法,重点研究了凝视卫星姿态变化及姿态动态跟踪精度对成像质量的影响。

1 低轨凝视卫星成像数学模型

1.1 "凝视"卫星成像的期望姿态

为实现在轨道进动、卫星进动和地球自转情况 下运动卫星对运动目标的凝视动态跟踪,凝视成像 需要保证光学探测器的光轴矢量始终指向目标,如 图 1 所示。

为了实现凝视卫星对目标点的凝视观测,应使得探测器的光轴始终与观测矢量 C 重合,即矢量 S₃。对

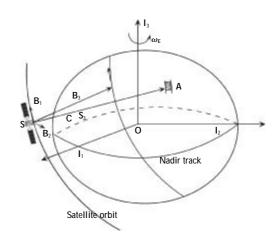


图 1 在轨凝视观测示意图

Fig.1 Diagram of staring observation

于大多数对地观测卫星来说,光学探测器的光轴与星体的偏航轴重合。欧拉轴垂直于星体的偏航轴,沿星体 \mathbf{Z} 轴机动的角速度为 $\mathbf{0}$,也就是说对地凝视时偏航角 ψ 的取值不唯一。按照卫星欧拉轴 $\mathbf{1}$ - $\mathbf{2}$ - $\mathbf{3}$ 的转序旋转,可以得到卫星凝视时星体坐标系相对于卫星轨道坐标系的期望期望俯仰角 φ_c 和横滚角 ψ_c 的取值以及星体在轨道坐标系表示的角速度 ω_c [6-8]:

$$\varphi_{c} = \arcsin[2(\mathbf{q}_{c0}\mathbf{q}_{c2} + \mathbf{q}_{c1}\mathbf{q}_{c3})], \tag{1}$$

$$\theta_{c} = \arctan \frac{2(q_{c2}q_{c3} - q_{c0}q_{c1})}{q_{c0}^{2} - q_{c1}^{2} - q_{c2}^{2} + q_{c3}^{2}},$$
 (2)

$$\omega_{c} = 2E^{T}(Q_{c})Q_{c}, \qquad (3)$$

式中: $Q_c(q_{c0},q_{c1},q_{c2},q_{c3})$ 为星体相对轨道坐标的姿态四元数。

结合星体姿态动力学与运动学, 仿真分析了焦距 1.75 m, 像元尺寸 7 μm, 轨道高度 500 km 的凝视卫星侧摆 40°对某目标进行凝视成像过程, 凝视卫星动态凝视跟踪成像 STK 仿真示意图如图 2 所示, 仿

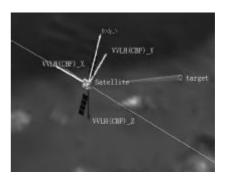


图 2 凝视卫星动态凝视跟踪成像 STK 仿真示意图 Fig.2 STK dynamic simulation of staring satellite tracking target

真计算得到凝视卫星动态跟踪目标点的姿态角和姿态角速度变化曲线如图 3 和图 4 所示。

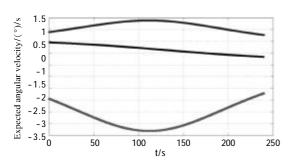


图 3 凝视卫星动态跟踪目标点的姿态角速度变化曲线

Fig.3 Angular velocity curve of satellite tracking target when staring imaging

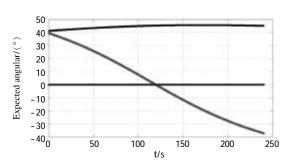


图 4 凝视卫星动态跟踪目标点的姿态角变化曲线

Fig.4 Angular curve of satellite tracking target when staring imaging

1.2 物像映射模型

凝视卫星可以实现小视场角载荷在大范围内目标点的动态跟踪成像,动态跟踪成像存在短时间内的大侧摆角和大俯仰角变化,姿态跟踪过程中存在姿态动态跟踪精度,这两项均会使被观测目标的像在探测元上的驻留时间较短,成像像移量大于探测元尺寸,影响凝视卫星成像质量,需要搭建地面动态景物点与像点位置与速度的对应关系,分析姿态动态变化时景物在焦平面上像点的像移量与探测元尺寸关系。成像目标的物方光线追迹是目标在相机坐标系内进行观测时光线方向和位置的确定。从地理坐标系到像面坐标系需

要经过7个坐标系的转换。P为目标光线与地理坐标系的交点,由P发出的光线矢量(g₁,g₂,0,1)经过坐标转换最终到达像面上。由地理坐标系到轨道坐标系的转换公式为:

$$\overrightarrow{OP}' = \begin{bmatrix} -f/H & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f/H & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -f/H & -f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_0 + \dot{\phi}t) & \sin(\phi_0 + \dot{\phi}t) & 0 \\ 0 & -\sin(\phi_0 + \dot{\phi}t) & \cos(\phi_0 + \dot{\phi}t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \overrightarrow{OP}$$

航天相机凝视成像时,垂直轨道方向上姿态指向不断变化,卫星飞行过程中存在俯仰和横滚角变化,导致了轨道坐标系相对于卫星本体坐标系发生旋转。光线矢量**OP**′经过从轨道坐标系到卫星本体坐标系的坐标转换到达卫星本体,得到矢量**OP**″。

图 5 为相机凝视成像时几何关系示意图。相关物理量有地球半径 R,卫星轨道角速率 Ω ,轨道高度 H,轨道倾角 i_0 ,摄影时刻轨道平面内降交点到卫星之间对应的中心角 γ_0 ,相机焦距 f,横滚角 φ_0 ,横滚角速度 $\dot{\varphi}$ 。图 6 为坐标转换图。

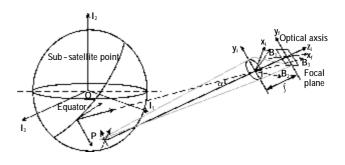


图 5 相机凝视成像几何关系

Fig.5 Geometric relation of camera staring imaging

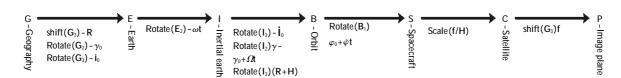


图 6 坐标转换图

Fig.6 Coordinate transformation

$$\overrightarrow{OP}'' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(R+H) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\gamma_0 + \Omega \mathbf{t}) & 0 & -\sin(\gamma_0 + \Omega \mathbf{t}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\gamma_0 + \Omega \mathbf{t}) & 0 & \cos(\gamma_0 + \Omega \mathbf{t}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos i_0 & \sin i_0 & 0 & 0 \\ -\sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega t & 0 & \sin \omega t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \omega t & 0 & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} .$$

$$\begin{bmatrix} \cos i_0 & -\sin i_0 & 0 & 0 \\ \sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_0 & 0 & \sin \gamma_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_0 & 0 & \cos \gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} .$$

对时间 t 微分后,即可得到像面上各点的像移方程:

$$\frac{d\overrightarrow{OP}'}{dt} = \begin{bmatrix} d\overrightarrow{OP}_{1}'/dt \\ d\overrightarrow{OP}_{2}'/dt \\ d\overrightarrow{OP}_{3}'/dt \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{p1} \\ V_{p2} \\ V_{p3} \\ 0 \end{bmatrix}, T = a/V \tag{4}$$

1.3 成像分析

虽然"凝视"卫星成像过程中光学载荷光轴和地球目标点之间没有相对运动,但卫星成像过程中存在三轴姿态的快速变化及姿态动态跟踪控制误差,使被观测目标的像在探测元上的驻留时间较短,小于探测器的积分时间,存在像移量大于探测元尺寸的现象,影响凝视成像质量。由于凝视成像数学模型非常复杂,求解微分方程过程非常繁琐,文中利用蒙特卡洛法[9-10],将卫星三轴姿态等相关参数及其误差的随机分布进行抽样,分布如表 1 所示,带入"凝视"卫星成像的期望姿态公式和凝视成像物像映射模型(1-5),统计计算结果。得到卫星姿态变化及姿态动态跟踪精度对凝视卫星成像的影响分布,如图 7 所

示,纵坐标为相应数据的统计数量,横坐标为像点驻留时间与曝光时间比值,极限误差比值为±0.8。

表 1 随机分布计算

Tab.1 Random error computation

Index i , j	Uniform distribution random matrix	Normal distribution random matrix	Max	Random error
1	S _{i,1}		0.05°	$f_0 = 2(S_{i,1} - 0.5)f_{max}$
2	$S_{i,2}$		0.05°	$q_0 = 2(S_{i,2} - 0.5)q_{max}$
3	$S_{i,3}$		0.05°	$y_0 = 2(S_{i,3} - 0.5)y_{max}$
4	$S_{i,4}$		0.01°/s	$f_0 = 2(S_{i,1} - 0.5)f_{max}$
5	$S_{i,5}$		0.01°/s	$q_0 = 2(S_{i,2} - 0.5)q_{max}$
6	$S_{i,6}$		0.01°/s	$y_0 = 2(S_{i,3} - 0.5)y_{max}$
7		$T_{i,12}$	0.03°	$Df = sign OT_{i,12} s_f$
8		$T_{i,13}$	0.03°	$Dq = sign OT_{i,13} S_q$
9		$T_{i,14}$	0.03°	$Dy = sign OT_{i,14} s_y$
10		$T_{i,15}$	0.002°/s	Df=sign OT _{i,15} s _f
11		T _{i,16}	0.002°/s	$Dq = sign OT_{i,16} s_q$
12		T _{i,17}	0.002°/s	Dy=sign OT _{i,17} s _y

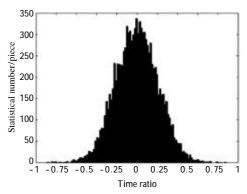


图 7 曝光时间极限误差分布图

Fig. 7 Limited error distribution of exposure time

1.4 误差引起的像移及其传递函数

由于凝视成像过程有驻留时间和实际的积分时间不同步造成的曝光时间失配导致传递函数下降。它产生的 MTF 匹配残余误差。

为对比图像需要,取特征频率 $V_c=V_p$;积分级次 M=1; $\Delta T_p/T_p$ 为曝光时间失配导致的残余误差。

2 试验仿真与分析

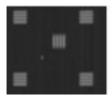
文中利用基于小型三轴气浮台的小卫星姿态控制系统和 IBIS5-B-1300 CMOS 成像系统进行仿真

试验,如图 8 所示。仿真平台主要由三轴气浮转台、反作用飞轮、光纤陀螺、TDI CCD 相机、台上控制计算机、动态靶标、Matrox Imaging 图像采集软件等构成。LED 屏幕尺寸 3 m×4 m,物距 3.4 m,三轴气浮转台对 LED 目标成像可实现俯仰±30°和侧摆±23°范围内的成像。小型三轴气浮转台的姿态角控制精度与姿态稳定度优于 0.05° ,0.005 (°)/s,姿态角和角速度确定值优于 0.03° 和 0.001(°)/s。CMOS 面阵相机选择像元尺寸为 7μ m,焦距为 6 mm,曝光时间为 50 ms。凝视仿真成像如图 9 所示,相对应的成像像移调制函数和图像的互相关相似性测度 ρ 见表 4。



图 8 小卫星全物理仿真系统实物图

Fig.8 Practicality of small satellite physical simulation system





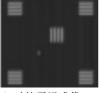


图 9 动态跟踪控制精度为 0.05°, 0.005(°)/s 时的凝视成像 Fig.9 Staring imaging dynamic tracking control accuracy is 0.05°, 0.005 (°)/s

表 2 仿真图像分析值

Tab.2 Analysis value of experimental simulation image

Integral series	M _{像移}	r
Area array	0.7568	0.973 2

从图 8 和图 9 仿真分析得出,利用 CMOS 相机和小卫星姿态控制系统全物理仿真平台对 LED 大屏幕仿真成像,能够演示验证凝视卫星对目标实时跟踪成像,凝视成像仿真平台姿态角和姿态角速度控制精度分别优于 0.05°,0.005(°)/s 时,仿真成像对

应图像的传递函数和图像相似性测度能够达到0.985,0.9632。

3 结 论

综上所述,通过建立卫星对地实时跟踪成像的数学模型,分析了卫星凝视跟踪成像时本体相对轨道坐标系的姿态角和角速度的变化,依据凝视卫星动态跟踪成像的姿态角和姿态角速度的变化及动态跟踪精度对成像的影响,搭建了焦平面像点与地面景物点位置与速度变化的一一对应关系,结合蒙特卡洛方法统计分析了满足像移量小于或等于探测元尺寸的要求的动态跟踪成像过程中卫星的姿态变化及姿态动态跟踪精度。凝视成像仿真平台姿态角和姿态角速度控制精度分别优于 0.05°,0.005(°)/s 时,测量精度分别优于 0.002(°)/s 时,仿真成像对应图像的传递函数和图像相似性测度能够达到 0.756 8,0.973 2,可实现 500 km 凝视卫星 2 m 分辨率清晰成像。

参考文献:

- [1] Robertus Heru Triharjanto, Ayom Widipaminto. Video camera system on LAPAN TUBSAT micro satellite [C]//Proceeding of Asian Space Conference, 2007: 1-5.
- [2] Willem H Steyn, A view finder control system for an earth observation satellite [J]. Aerospace Science and Technology, 2006, 10: 248-255.
- [3] Qu H S, Zhang Y, Jin G. Improvement of performance for CMOS area image sensors by TDI algorithm in digital domain[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18 (8): 1896-1903. (in Chinese) 曲宏松,张叶,金光.基于数字域 TDI 算法改进面阵
 - 曲宏松, 张叶, 金光. 基于数字域 TDI 算法改进面阵 CMOS 图像传感器功能 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(8): 1896-1903.
- [4] Pain, Bedabrata, Cunningham, et al. CMOS image sensors capable of time delayed integration[R]. USA: NASA, 2001.
- [5] Ren huanhuan, Ruan Ping, He Jianwei, et al. Study of the radiation calibration of TDT-CCD spatial stereo camera [J]. Optica Sinica, 2010, 30(12): 3476-3480. (in Chinese) 任焕焕, 阮萍, 何建伟, 等. TDI CCD 空间立体相机辐射定标研究[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3476-3480.
- [6] Gérald Lepage, Jan Bogaerts, Guy Meynants. Time delay integration architectures in CMOS image sensors [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009, 56(11): 2524-2532.

- [7] Zhang Liang, Wang Jianyu, Jia Jianjun, et al. Design and performance of fine tracking system based on CMOS for quantum communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(2): 05008-1-05008-5. (in Chinese) 张亮, 王建宇, 贾建军, 等. 基于 CMOS 的量子通信精跟踪系统设计及检验 [J]. 中国激光, 2011, 38 (2): 05008-1-05008-5.
- [8] Fu Qiuyu, Lin Qingyu, Zhang Wancheng, et al. A high-speed CMOS image sensor for real-time vision chip[J]. Acta optical Sinia, 2011, 31(8): 28001. (in Chinese) 付秋瑜, 林清宇, 张万成, 等. 面向实时视觉芯片的高速

- CMOS 图像传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 28001.
- [9] Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, et a1. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling, error budget and synthesis [J]. Chin Optics Lett, 2005, 3(7): 414-417.
- [10] Yang Xiubin, He Xiaojun, Zhang Liu, et al, Effect and simulate of the deviant angle erroron TDI CCD cameras image
 [J]. Opo-Electronic Engineering, 2008, 35(11): 45-50. (in Chinese)
 - 杨秀彬, 贺小军, 张刘, 等. 偏流角误差对 TDI CCD 相机成像的影响与仿真[J]. 光电工程, 2008, 35(11): 45-50.