

文章编号 1004-924X(2008)11-2199-05

飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响

闫得杰^{1,2}, 徐抒岩¹, 韩诚山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 研究生部, 北京 100039)

摘要:通过分析飞行器姿态对像移补偿结果的影响, 提出空间相机对飞行器姿态精度的要求以实现高精度的像移补偿。根据调制传递函数对像移匹配特性的要求进行分析, 确定了允许的像移匹配误差。然后, 用蒙特卡洛法(即统计试验法)对像移速度误差进行分析和计算。最后, 确定了满足空间相机像移补偿要求的姿态精度。通过计算得出, 满足 96 级 TDI-CCD 像移匹配误差要求的飞行器指向精度应优于 0.1° , 姿态稳定度应优于 $0.005^\circ/\text{s}$ 。实验结果表明, 本文提出的方法简单, 易于实现, 适用于空间相机像移补偿系统的研究。

关键词:空间相机; 飞行器姿态; 像移补偿; 调制传递函数; 蒙特卡洛法

中图分类号:V475.3; V448.22 **文献标识码:**A

Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera

YAN De-jie^{1,2}, XU Shu-yan¹, HAN Cheng-shan¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In order to realize high precision image motion compensation, the requirements of space camera system was put forward by analyzing the effect of aircraft attitude on image motion compensation. The image motion match characteristics demanded by Modulation Transform Function(MTF) of camera was analysed to determine the permitted errors of image motion matching. Then, the Monto-Carlo method (statistic distribution method) was used to analyse and calculate the errors of image motion velocity. Finally, the attitude accuracy suitable for image motion compensation was obtained. The conclusions drawn by calculation suggest that the attitude accuracy should be higher than 0.1° and the attitude stability accuracy higher than $0.005^\circ/\text{s}$, which can meet the requirements of errors of image motion matching of 96 TDI-CCD integration progression. The method is simple, easy to implement and suitable for the study of image motion compensation of space camera system.

Key words: space camera; aircraft attitude; image motion compensation; Modulation Transform Function(MTF); Monto-carlo method

收稿日期:2008-08-07; 修订日期:2008-09-03.

基金项目:国家重大国防科研项目

1 引言

TDI-CCD 器件最突出的特点是能够利用其多级光敏元件对运动的同一目标进行多次积分,而每个光敏元积分所获得的较弱信号可叠加为一较强信号输出,使得系统的信噪比得到改善^[4]。对星载航天相机来说,飞行器轨道运动、地球自转和飞行器姿态变化会造成像点在焦平面上的相对运动,形成像移^[2]。但以上像移都有确定的值和方向,因此可采用在像移的合成矢量方向上进行像移匹配,也就是使 TDI-CCD 时间延迟转移速率和合成矢量速度值相等,并调整飞行器运动方向与相机实际成像方向之间的夹角即偏流角来补偿像移。但由于相机本身的焦距误差和偏流角误差以及飞行器飞行速度、飞行高度、姿态变化、侧视畸变以及 TDI-CCD 自身的转移速率的控制误差等一系列误差,最终使 TDI-CCD 行转移速率和实际的地面目标的像的移动速度不完全同步,从而产生残余误差^[1]。像移是对航天相机分辨力影响最大的因素,因此对像移补偿误差进行分析和计算是保证相机获得高分辨力图像的基本前提。

2 像移匹配误差要求

2.1 TDI-CCD 的工作原理

使用 TDI 方法增加曝光时间,可以获得高分辨力和高信噪比。当飞行器飞行到摄像目标上方时,TDI 积分信号经过 CCD 探测器后通过转移累加到 CCD 下一行,与此同时,要求转移的速率与图像移动的速率相同,如图 1 所示。设置像素积分时间可以与地面速度相匹配,所以,电荷沿着轨道方向从一个像区定时地循环到下一个相应的单

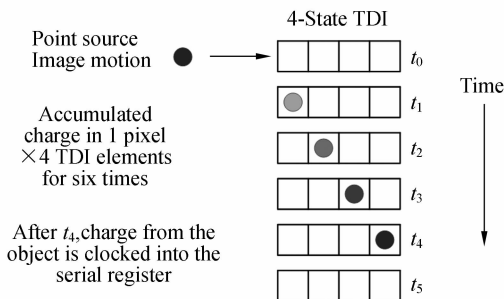


图 1 TDI-CCD 工作原理

Fig. 1 Operating principle of TDI-CCD

元。空间相机可以使用 12, 24, 36, 48, 72, 96 或其它数值 TDI 级数(沿着轨道方向的探测单元)匹配景物辐射到 CCD 最大容量。在积分过程中,飞行器的方位将补偿图像的拖尾现象。当残余的图像拖尾和飞行器指向精度超出了实际范围时,就会使要求的分辨力严重降低^[3]。96 级是满足所有要求的最大级数。

2.2 像移匹配误差要求的确定

空间相机获取图像质量的优劣一般用整个系统的调制传递函数值 MTF 来评价。该系统包括地面目标、大气、光学系统、像移、探测器、电子线路等各子系统。系统总的 MTF 等于各子系统的 MTF 之积。其中像移匹配残差而得出的调制传递函数值 MTF^[8]为

$$MTF_{\text{match}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_c}{f_N} \cdot M \cdot \frac{\Delta v_P}{v_P}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_c}{f_N} \cdot M \cdot \frac{\Delta v_P}{v_P}}, \quad (1)$$

式中:

f_c 为特征频率,等于奈奎斯特频率 f_N ;

M 为 TDI-CCD 的积分级数;

v_P 为像移速度;

Δv_P 为像移速度残差。

像移速度相对误差对调制传递函数的影响如图 2 所示。

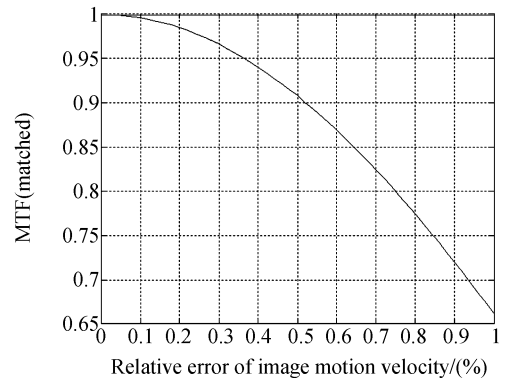


图 2 调制传递函数与像移速度相对误差的关系

Fig. 2 Relationship between modulation transfer function and relative error of image motion velocity

为使相机具有较高的调制传递函数,必须使由姿态精度影响的纵、横两个方向上像移补偿残差控制在一定范围内。调制传递函数下降 2% (根据总体指标要求确定)对成像质量无本质影

响,可以作为像移补偿残差的计算约束。经过计算,对于 96 级 TDICCD 而言,MTF 下降 2% 时的像移补偿残差为 0.2 个像元。

为了获得 Nyquist 频率下较高的对比传递函数,要求经过 96 级转移(即转移到第 96 级时),其累积的行转移误差不 > 0.2 个像元,即

$$\frac{\Delta v_p}{v_p} \leq (0.2a/t)/(96a/t) = 0.208\% \quad (2)$$

式中:

a 为像元尺寸;

t 为积分时间。

允许的偏流角误差为:

$$\Delta\beta_p \leq \arctan\left(\frac{\Delta v_{p2}}{v_{p1}}\right) \cong \arctan\left(\frac{\Delta v_{p2}}{v_p}\right) = \arctan((0.2a/t)/(96a/t)) = 7' \quad (3)$$

由此可得在不同的积分级数下允许的像移补偿速度实时计算值的相对误差,见表 1。

表 1 在不同的积分级数下允许的像移匹配误差
Tab.1 Permitted errors of image motion match in different integration progressions

积分级数	允许的像移速度匹配 相对误差 $[\Delta v_p/v_p]$	允许的偏流角 误差 $[\Delta\beta_p]$
96	2.08/1 000	7'
72	2.78/1 000	9'
48	4.16/1 000	14'
36	5.56/1 000	19'
24	8.32/1 000	28'
12	16.64/1 000	57'

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过 4 个环节的变换,可以得到物像点的对应关系式:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{S}_4 \mathbf{S}_3 \mathbf{S}_2 \mathbf{S}_1 \mathbf{X} = \mathbf{S} \mathbf{X} \quad (5)$$

采用求导的方法,求取任意像点的瞬时速度。

像面上任意点的像移速度的计算^[8]如下:

$$\mathbf{S}_0 = \mathbf{S}|_{t=t_0} \quad (6)$$

$$\mathbf{X}_0 = \mathbf{S}_0^{-1} \mathbf{X}_0' \quad (7)$$

$$\mathbf{v} = \left(\frac{d\mathbf{S}}{dt} \right)_{t=t_0} \mathbf{X}_0 \quad (8)$$

3 像移匹配误差的计算方法

3.1 像移速度计算

像移速度的计算方法可采用速高比法、坐标变换法^[6]和动态物像矢量共轭关系法^[5]等。当考虑有姿态变化引起的像移速度计算时,采用坐标旋转变换的方法来实现。

坐标变换有平移、旋转和缩放 3 种基本变换。为便于计算和表示坐标变换,采用齐次坐标变换矩阵是一种很方便的方法。采用坐标变换的方法计算像移速度,将地面物体在地理坐标系中的位置对应变换成像面坐标系中的像坐标,可以形成像移的分析表达式或计算模型^[6]。

空间相机成像过程的坐标变换,按基本变换模型,分为 4 个阶段^[6],即:地物到飞行轨道的坐标变换 \mathbf{S}_1 ;飞行轨道到飞行器的坐标变换 \mathbf{S}_2 ;飞行器到相机的坐标变换 \mathbf{S}_3 ;相机到像面的坐标变换 \mathbf{S}_4 。

其中飞行轨道到飞行器的坐标变换就是由飞行器的姿态决定的,其变化顺序由飞行器姿态调整的顺序来改变偏航角(ψ)、滚动角(φ)和俯仰角(θ)。转换的矩阵 \mathbf{R} 为:

3.2 像移匹配误差计算

像移速度误差的计算方法有几何法、微分法和蒙特卡洛法等。由于像移速度计算公式包含很多不确定的参量,且公式较为复杂,求出微分对人工计算而言几乎是不可能。蒙特卡洛(Monte-Carlo)方法,是一类通过随机变量的统计试验、随机模拟,求解数学物理、工程技术问题近似解的数值方法。这类方法又被称为统计试验方法,随机模拟方法。采用蒙特卡洛法可以使这个问题变得

简明而清晰。通过对参数及其误差的随机分布进行抽样,代入公式计算,对结果进行统计,很容易得到像移计算误差分布以及方差结果。

蒙特卡洛方法比微分方法优越之处在于解决了均匀分布的参数的统计问题,解决了微分法中只能代表某一特定参数空间点的状况,完成对所有参数空间点的整体认识。

蒙特卡洛法步骤如下:

- (a) 列写像移速度的计算公式;
- (b) 列写参数变量及其误差分布;
- (c) 列出各参数的抽样样本空间;
- (d) 代入计算式计算,对结果统计,求出方差。

通过上述步骤,得到理论计算的总误差,从而可以对各个参数的误差进行必要的约束。

4 计算结果与分析

计算与分析是基于以下基本数据:轨道高度为 500 km,相机焦距为 3 000 mm,轨道倾角为 43°。根据式(4)~(8)可以得出像移速度的计算公式;表 2 列出了飞行器姿态参数、参数抽样样本空间分布和参数误差分布。

表 2 飞行器姿态参数和误差分布

Tab. 2 Attitudes and error distributions of aircraft

参数名称	参数抽样样本空间分布	参数误差分布
俯仰姿态角	均匀分布	正态分布
偏航姿态角	均匀分布	正态分布
滚动姿态角	均匀分布	正态分布
俯仰姿态稳定度	均匀分布	正态分布
偏航姿态稳定度	均匀分布	正态分布
滚动姿态稳定度	均匀分布	正态分布

图 3 和图 4 给出了姿态指向精度为 0.5°时姿态稳定度变化对应的像移匹配误差曲线。

从图 3 中可以看出姿态稳定度不大于 0.006°/s时,可以满足 96 级 TDI-CCD 像移速度匹配相对误差 0.2008%的要求。由图 4 可见姿态指向精度为 0.5°仅能满足 72 级 TDI-CCD 偏流角误差。

图 5 和图 6 给出了姿态指向精度为 0.1°时,姿态稳定度变化对应的像移匹配误差曲线。

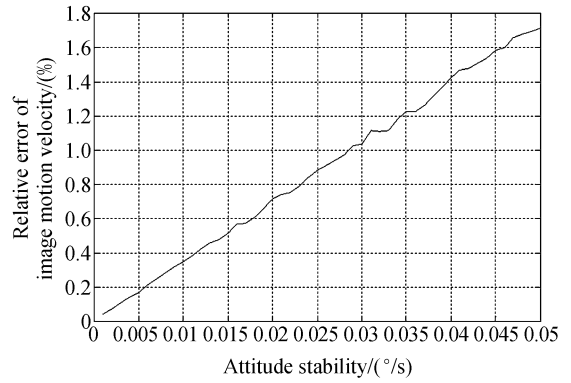


图 3 指向精度 0.5°时姿态稳定度与像移速度相对偏差的方差曲线图

Fig. 3 Relative error of image motion velocity and attitude stability when attitude accuracy is 0.5°

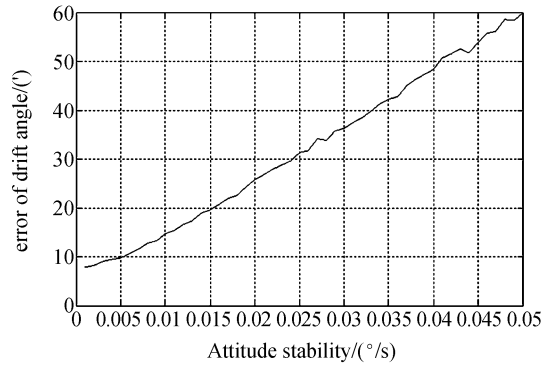


图 4 指向精度 0.5°时姿态稳定度与偏流角误差曲线图

Fig. 4 Error of drift angle and attitude stability when attitude accuracy is 0.1°

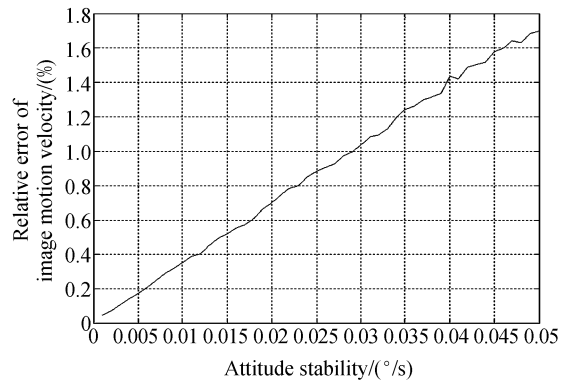


图 5 指向精度 0.1°时姿态稳定度与像移速度相对偏差的方差的曲线图

Fig. 5 Relative error of image motion velocity and attitude stability when attitude accuracy is 0.1°

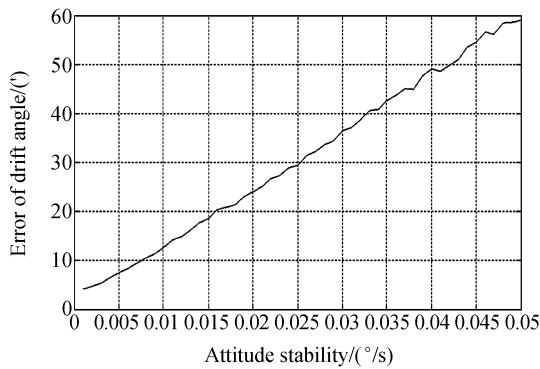


图 6 指向精度 0.1° 时姿态稳定度与偏流角误差曲线图

Fig. 6 Error of drift angle and attitude stability when attitude accuracy is 0.1°

从图 5 中可以看出姿态稳定度不 $>0.006^\circ/\text{s}$,

可以满足 96 级 TDI-CCD 像移速度匹配相对误差的要求。由图 6 可见姿态稳定度不大于 $0.005^\circ/\text{s}$, 能满足 96 级 TDI-CCD 偏流角误差。

5 结 论

本文根据空间相机高精度像移补偿的要求, 提出了通过调制传递函数确定不同的积分级数下允许的像移补偿速度实时计算值的相对误差, 然后采用蒙特卡洛法计算像移补偿误差, 从而确定了满足空间相机像移补偿精度要求的姿态精度, 为平台的分析与设计提供了理论依据。实验结果证明: 飞行器指向精度优于 0.1° , 姿态稳定度优于 $0.005^\circ/\text{s}$, 满足了 96 级 TDI-CCD 像移匹配误差要求。

参考文献:

- [1] MILLER B M, RUBINOVICH E Y. Image motion compensation at charge-coupled device photographing in delay-Integration mode [J]. *Automation and Remote Control*, 2007, 68(3): 564-571.
- [2] 王家骥, 金光, 颜昌翔. 光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 13(2): 105-116. WANG J Q, JING G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 13(2): 105-116. (in Chinese)
- [3] 龙夫年, 张旺. 卫星姿态精度对 TDI CCD 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. Effect of satellite attitude control accuracy on TDI CCD cameras[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(3): 382-384. (in Chinese)
- [4] 樊起, 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. FAN CH, LI Y C, YI H W. Influence analysis of drift angle on image quality of TDI CCD camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(9): 70-73. (in Chinese)
- [5] 许永森, 丁亚林, 田海英, 等. 斜视状态下航空遥感器像移的计算与补偿[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1779-1783. XU Y S, DING Y L, TIAN H Y, *et al.*. Calculation and compensation for image motion of aerial remote sensor in oblique situation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1779-1783. (in Chinese)
- [6] 颜昌翔, 王家骥. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(3): 203-207. YAN CH X, WANG J Q. Method of coordination transformation for IM&IMC calculation in aerospace camerasystem [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 203-207. (in Chinese)
- [7] 刘明, 吴宏圣, 匡海鹏, 等. 航空相机的像移补偿方法及应用[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(4): 30-34. LIU M, WU H SH, KUANG H P, *et al.*. Method and application of image motion compensation in aerospace camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 30-34. (in Chinese)
- [8] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 1998. WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 1998. (in Chinese)

作者简介: 闫得杰(1979—), 女, 吉林长春人, 主要从事航天遥感器像移补偿、软件设计等方面的研究。E-mail: dejieyan@yahoo.com.cn