

文章编号 1004-924X(2009)09-2224-06

# 飞行器侧摆和前后摆及控制误差的优化设计

闫得杰<sup>1,2</sup>, 韩诚山<sup>1</sup>, 李伟雄<sup>1,2</sup>

(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:** 为了降低飞行器侧摆及前后摆对 TDICCD 空间相机成像质量的影响, 提出了对飞行器侧摆角和前后摆角范围及控制误差的要求, 以获取高信噪比和高分辨力图像。根据 TDICCD 空间相机像移产生机理, 给出了侧摆和前后摆引起的像移及像移计算参数的数学公式。应用调制传递函数(MTF)作为图像质量的评价依据, 确定了满足空间相机成像质量要求的侧摆角和前后摆角范围, 分析了飞行器侧摆和前后摆对地面像元分辨率的影响。计算得出, 相机成像过程中, 当侧摆角和前后摆角的控制误差为  $0.1^\circ$ , 且侧摆角和前后摆角的视轴角不大于  $4.8^\circ$ ; 或当侧摆角和前后摆角的控制误差为  $0.05^\circ$ , 侧摆角和前后摆角的视轴角不大于  $9.5^\circ$  时, 可满足积分级数 96 级, MTF 不小于 0.95 的要求。实验结果表明, 该方法简单, 易于实现, 适用于 TDICCD 空间相机成像质量的研究。

**关键词:** 空间相机; 侧摆和前后摆; 像移; 像质; 调制传递函数

**中图分类号:** V475.3; V448.22 **文献标识码:** A

## Optimization design of scroll and pitch and their control errors on aircraft

YAN De-jie<sup>1,2</sup>, HAN Cheng-shan<sup>1</sup>, LI Wei-xiong<sup>1</sup>

(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 reduce the influence of scroll and pitch movements on the image quality of a TDICCD space camera, the requirements for the scopes of scroll angle and pitch angle and their control errors are put forward to obtain an image with high signal noise ratios and high resolution. According to the mechanism of camera image motion, the image motion caused by the scroll and pitch of aircraft and the formula for calculating the image motion are given. The image quality is evaluated by the Modulation Transform Function(MTF), and the scopes of scroll angle and pitch angle that can meet the requirements of the space camera image quality are determined. Furthermore, the influence of the scroll angle and pitch angle on the ground pixel resolution is analyzed. From calculations, it is concluded that, when the control error of scroll angle and pitch angle is  $0.1^\circ$  during the imaging and the angle of axis of sight caused by the scroll angle and pitch angle is no more than  $4.8^\circ$ ; or the control error of scroll angle and pitch angle is  $0.05^\circ$  and the angle of axis of sight is no more than  $9.5^\circ$ , the requirements of the integration progression is 96 and the MTF is no less than 0.95 can be met. The ex-

收稿日期:2009-03-02; 修订日期:2009-04-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

perimental results indicate that the proposed method is simple and easy to implement, which is suitable for the research on image quality of the TDICCD space camera.

**Key words:** space camera; scroll and pitch; image motion; image quality; Modulation Transform Function(MTF)

## 1 引言

随着空间应用技术的发展,航天领域对空间相机的分辨能力提出越来越高的要求。空间相机成像时,像移是影响成像质量的主要因素之一<sup>[1-10]</sup>,像移补偿是获得高信噪比、高分辨力图像的关键技术<sup>[2]</sup>。空间相机 TDICCD 正常工作的基本前提是光生电荷包转移速度与焦平面上图像的运动速度保持同步,任何误匹配都将导致图像模糊。多级 TDICCD 对地面同一目标曝光相当于积分时间延长,要想获得清晰的图像,必须在较长积分时间内使像移速度和 TDICCD 电荷转移速度保持同步<sup>[4]</sup>。

飞行器对地观测时,为了扩大观测范围,提高重访周期,多采用侧摆和前后摆倾斜摄像的方法<sup>[7,9]</sup>。而地物与相机成像距离会随着飞行器侧摆和前后摆发生变化,成像距离的变化不仅带来图像比例尺的改变,而且会造成相机焦平面上像移速度发生变化,使像移速度与 TDICCD 电荷转移速度不匹配,恶化成像质量<sup>[5]</sup>。因此研究空间相机成像过程中飞行器的侧摆和前后摆对于改善相机的成像质量是十分必要的。

本文采用调制传递函数作为图像质量的评价依据,分析了飞行器侧摆和前后摆引起的像移对成像质量的影响,对满足空间相机成像质量要求的侧摆角和前后摆角范围和控制误差进行了优化设计。

## 2 侧摆和前后摆时视轴斜距的计算

从光学系统成像原理来讲,成像距离应该是光学系统成像的物距,即物空间的物面到光学系统主点的距离,可以近似为视轴所对的成像点到飞行器的距离。在图 1 中, $\varphi$  为飞行器的侧摆角,

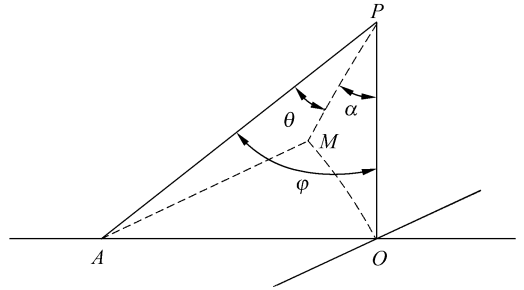


图 1 飞行器侧摆和前后摆示意图

Fig. 1 Sketch of scroll and pitch of aircraft

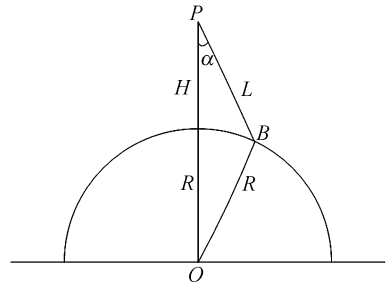


图 2 飞行器侧摆和前后摆成像示意图

Fig. 2 Sketch of scroll and pitch imaging

$\theta$  为飞行器的前后摆角, $\alpha$  为侧摆角为  $\varphi$ 、前后摆角为  $\theta$  时的视轴角。 $\alpha$  的计算公式如下:

$$\alpha = \arccos(\cos \theta \cos \varphi). \quad (1)$$

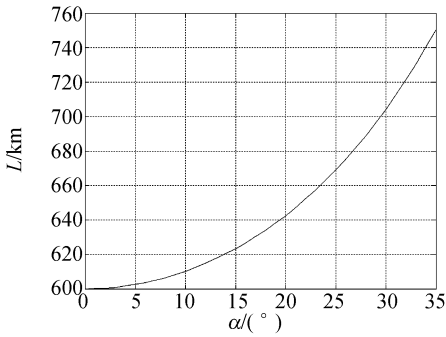
在图 2 中, $R$  表示地球半径(假设地球为圆球), $H$  表示飞行器到星下点的垂直距离, $L$  表示侧摆和前后摆情况下飞行器沿视轴方向至地球表面成像点的斜距,也即空间相机成像的物距。通过三角运算关系可以得到:

$$L = (R + H) \cos \alpha - \sqrt{R^2 - (R + H)^2 \sin^2 \alpha}, \quad (2)$$

式(3)可以确定在摄像点飞行器运动产生的沿推扫方向的地速  $v$ ,其中  $\Omega$  为飞行器运动的角速度。

$$v = \Omega((R + H) - L \cos \alpha). \quad (3)$$

假设飞行器到星下点的垂直距离  $H = 600$  km,地球半径  $R = 6\ 378$  km,由公式(2)可以得到物距  $L$  和视轴角  $\alpha$  的关系如图 3 所示。由此可以看出,随着视轴角  $\alpha$  的增大,物距  $L$  成非线性增加。

图 3  $L$  和  $\alpha$  的关系Fig. 3 Relationship between  $L$  and  $\alpha$ 

### 3 侧摆角和前后摆角对像质的影响

#### 3.1 侧摆角和前后摆角引起的像移

为了扩大观测范围,提高重访周期,空间相机对地观测时采用侧摆和前后摆的摄像方式。在这种工作状态下,相机在成像过程中物距发生变化会使像移速度改变,使 TDICCD 行转移速率和实际的地面目标像的移动速度不同步,导致像质下降。为了保证同步,需要使图像移动一行的时间正好等于 CCD 推扫一行的时间<sup>[3]</sup>。

TDICCD 的行周期  $T$  的计算公式为

$$T = a \cdot \frac{L}{f' \cdot v}, \quad (4)$$

式中: $f'$ 为空间相机物镜的焦距; $a$ 为 TDICCD 像元尺寸。

在一个行周期内像移量  $s$  为

$$s = f' \cdot T \cdot \frac{v}{L}. \quad (5)$$

根据公式(5)可知,在相机物镜焦距一定的情况下,像移量的大小与相机成像的物距、TDICCD 行周期和飞行器运动产生的沿推扫方向的地速有关系。在飞行器侧摆和前后摆时,像移速度会发生相应变化,导致 TDICCD 行转移速率和实际地面目标的像移速度不同步,因此需要实时调整 TDICCD 的行转移速度。但由于侧摆角和前后摆角有一定的控制误差,导致 TDICCD 行转移速率和实际的地面目标像的移动速度不完全同步。由此要计算由于侧摆角和前后摆角控制误差引起的像移。

由侧摆角和前后摆角控制误差  $\Delta\alpha$  引起的各

参数的误差分别为物距  $L$  的误差  $\Delta L$ ,飞行器运动产生的沿推扫方向的地速  $v$  的误差  $\Delta v$ ,TDICCD 的行周期  $T$  的误差  $\Delta T$  和像移  $\Delta s$ 。具体表达式为

$$\begin{cases} \Delta L = \left( -(R+H)\sin\alpha + \frac{(R+H)^2 \sin\alpha \cos\alpha}{\sqrt{R^2 - (R+H)^2 \sin^2\alpha}} \right) \cdot \Delta\alpha \\ \Delta v = \Omega(L \cdot \sin\alpha \cdot \Delta\alpha - \cos\alpha \cdot \Delta L) \\ \Delta T = \frac{a}{f' \cdot v} \left( \Delta L - \frac{L}{v} \cdot \Delta v \right) \\ \Delta s = \frac{f'}{L} \left( T \cdot \Delta v + v \cdot \Delta T - \frac{v}{L} \cdot T \cdot \Delta L \right) \end{cases} \quad (6)$$

由上式可以看出侧摆角和前后摆角引起的像移  $\Delta s$  不仅与侧摆和前后摆引起的视轴角  $\alpha$  的大小有关,而且与侧摆角和前后摆角的控制误差  $\Delta\alpha$  的大小有直接关系,在侧摆和前后摆引起的视轴角一定的情况下,随着侧摆角和前后摆角控制误差的增大,像移  $\Delta s$  成线性增加。

#### 3.2 像移对调制传递函数的影响

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<sup>[8]</sup>。该系统包括地面目标、大气、光学系统、像移、探测器、电子线路等多个子系统。系统总的 MTF 等于各子系统的 MTF 之积。其中像移对成像质量影响的 MTF<sup>[1]</sup>为

$$\text{MTF} = \frac{\sin(N \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta s)}{N \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta s}, \quad (7)$$

式中: $f$ 为特征频率; $N$ 为 TDICCD 的积分级数;

式(7)表明了像移和所用的 TDICCD 积分级数与相机成像质量的关系。只要像移存在,相机成像质量将随着 TDICCD 积分级数的增加而下降。

#### 3.3 侧摆和前后摆对分辨力的影响

基于推扫式线阵 CCD 相机的工作原理和几何光学原理,在飞行器侧摆和前后摆的情况下,相机地面像元分辨力 GSD 的数学表达式为

$$\text{GSD} = a \cdot \frac{L}{f'}. \quad (8)$$

由公式(8)可以看出,地面像元分辨力与相机的物距成线性关系。物距越大,地面像元分辨力越低;物距越小,地面像元分辨力越高。由图 3 可得地面像元分辨力随着侧摆和前后摆角的增大而降低<sup>[10]</sup>。

### 4 计算结果与分析

计算与分析基于以下基本条件:轨道高度为 600 km,TDICCD 像元尺寸为 10  $\mu\text{m}$ ,相机物镜的焦距为 2 m。

将公式(6)代入公式(7)可得侧摆角和前后摆角控制误差为 0.1°时,侧摆和前后摆引起的视轴角  $\alpha$  对 MTF 的影响,如图 4 所示。

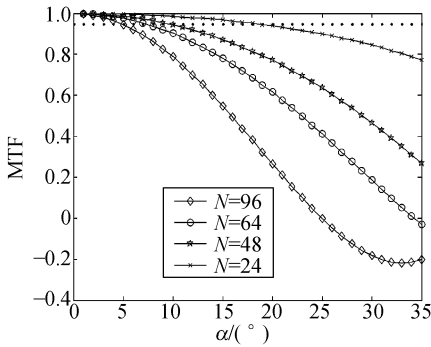


图 4 控制误差为 0.1°时 MTF 与  $\alpha$  的关系

Fig. 4 Relationship between MTF and  $\alpha$  at control accuracy of 0.1°

从图 4 中可以看出像移引起的 MTF 值随着侧摆角和前后摆角的增大而降低,若要求侧摆和前后摆引起的视轴角引起的 MTF 值不小于 0.95,视轴角不大于 4.8°,即可以满足 96 级 TDI-CCD 像移引起的 MTF 值不小于 0.95 的要求。对于不同的积分级数相机所允许的最大视轴角见表 1。

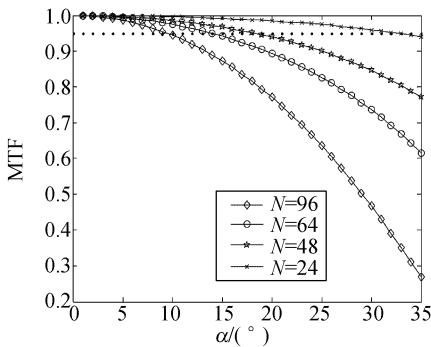


图 5 控制误差为 0.05°时 MTF 与  $\alpha$  的关系

Fig. 5 Relationship between MTF and  $\alpha$  at control accuracy of 0.05°

表 1 不同的积分级数下允许的最大视轴角(控制误差为 0.1°)

Tab.1 Permitted maximal sight angles in different integration progressions(control accuracy is 0.1°)

积分级数	96	64	48	24
允许的视轴角(°)	4.8	7.3	9.5	18.4

侧摆角和前后摆角控制误差为 0.05°时,侧摆和前后摆引起的视轴角  $\alpha$  对 MTF 的影响如图 5 所示。

从图 5 中可以看出视轴角不大于 9.5°可以满足 96 级 TDI-CCD MTF 值不小于 0.95 的要求。对于不同的积分级数相机所允许的最大视轴角见表 2。

表 2 不同的积分级数下允许的最大视轴角(控制误差为 0.05°)

Tab.2 Permitted maximal pitch angles in different integration progressions(control accuracy is 0.05°)

积分级数	96	64	48	24
允许的前后摆角(°)	9.5	14.0	18.4	32.8

根据公式(8)可以求出飞行器在不同侧摆和前后摆角度下相机地面像元分辨率,具体数据见表 3。

表 3 不同的视轴角度下地面像元的分辨率

Tab.3 Ground sampling distances in different sight angles

视轴角(°)	地面像元分辨率(m)
0	3.000
5	3.013
10	3.051
15	3.116
20	3.213
25	3.345
30	3.520

从表 3 可以看出地面像元分辨率随着侧摆角和前后摆角引起的视轴角的增加而下降。为了保证地面像元分辨率,应该控制侧摆和前后摆角在一定范围内。

### 5 结 论

本文对满足空间相机成像质量要求的飞行

器侧摆和前后摆及控制误差进行了优化设计。根据空间相机采用侧摆和前后摆摄像的工作方式,推导了侧摆角和前后摆角变化引起的像移的计算公式,提出了采用 MTF 作为图像质量评价的依据,确定了在不同的积分级数下允许的最大侧摆角和前后摆角和控制误差,为侧摆和前后摆控制提供了设计依据。实验结果表明:TDICCD 相机

的 MTF 值随着侧摆角和前后摆角及其控制误差和积分级数的增大而减小。相机成像过程中,当侧摆角和前后摆角控制误差为  $0.1^\circ$ ,并且侧摆角和前后摆角引起的视轴角不大于  $4.8^\circ$ ;或当侧摆角和前后摆角控制误差为  $0.05^\circ$ ,并且侧摆角和前后摆角引起的视轴角不大于  $9.5^\circ$ 时,可满足 96 级 TDICCD 的 MTF 值不小于 0.95 的要求。

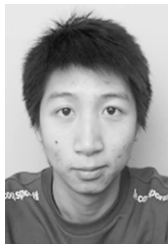
## 参考文献:

- [1] 闫得杰,徐抒岩,韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响[J]. 光学 精密工程,2008,16(11):2199-2203.  
YAN D J, XU SH Y, HAN CH SH. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2199-2203. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 樊超,梁义涛,李伟,等. 偏流角对空间相机影响研究[J]. 电光与控制,2008,15(11):76-79.  
FAN CH, LIANG Y T, LI W, et al.. Study on influence of drift angle on the space camera [J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(11):76-79. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] 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.  
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)
- [6] 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研究生部教材,1998.  
WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Changchun: Teaching Material of Department of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 1998. (in Chinese)
- [7] 翟林培,刘明,修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学 精密工程,2006,14(3):490-494.  
ZHAI L P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):490-494. (in Chinese)
- [8] 胡永力,谭南征. TDICCD 相机侧摆 MTF 的研究[J]. 航天返回与遥感,2003,24(1):33-37.  
HU Y L, TIAN N ZH. Study on scroll MTF of TDICCD camera [J]. *Spacecraft Recover & Remote Sensing.*, 2003, 24(1):33-37. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 何红艳,王小勇. 卫星变轨对航天扫描式 TDICCD 相机系统参数的影响[J]. 航天返回与遥感,2007,28(1):30-32.  
HE H Y, WANG X Y. The influence of altitude of satellite's orbit on the systemic parameters of the satellite and CCD camera [J]. *Spacecraft Recover & Remote Sensing.*, 2007, 28(1):30-32. (in Chinese)

## 作者简介:



闫得杰(1979—),女,吉林长春人,研究实习员,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



李伟雄(1985—),男,四川自贡人,博士研究生,2007年于长春理工大学获得学士学位,主要从事空间对地图像信息获取技术研究及总体误差理论分析。E-mail: Liwx@yahoo.com.cn



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年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士、博士学位,主要研究方向为空间有效载荷电控系统设计。E-mail: xuan\_han@yahoo.com.cn

(本栏目编辑:李树军)

## ● 下期预告

## 锻压制件及其模具的三维光学测量系统精度评价

张德海,梁 晋,郭 成

(西安交通大学 机械工程学院,陕西 西安 710049)

VDI2614/2634 是三维光学测量系统精度评价的通用方法。为制订国标《锻压制件及其模具光学三维几何量检测规范》,提出了一种应用于锻压制件的光学测量系统精度评价新方法,制定了测量方案。以每组为一个子系统,分别计算出每组的极差、平均差和标准差,定义平均差和测量平均值的比值为子系统的系统相对误差,定义极差和测量平均值的比值为子系统的偶然相对误差。综合考虑各子系统的相对误差和权重,计算出测量系统的系统精度和偶然精度。为统一评价标准,提出了标准系统精度、标准偶然精度和标准精度的概念和计算方法。利用此方法对自主开发的 XJTUOM 光学测量系统进行了评价,得出其标准精度为 0.89 的结论。该方法为锻压制件检测的国标制定提供了参考。