

平台姿态误差对 TDICCD 相机成像几何质量的影响*

巫兆聪¹, 杨帆¹, 巫远¹, 朱军², 韩杏子²

(1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079; 2. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要:研究卫星平台姿态误差对 TDICCD 相机成像几何质量的影响有助于提出姿态指标设计要求以提高相机几何成像质量,以像点位移为中间参量,研究平台姿态误差和成像几何质量指标之间的定量关系。基于平台姿态误差引起的像移速度、偏流角和积分时间等成像参数误差分析,结合严密几何成像模型推导像点位移的误差模型,建立从像点位移量到相邻像元间角度畸变、长度畸变、像元分辨率和定位误差等几何质量指标的定量模型,构建从平台姿态误差到相机成像几何质量指标的完整定量分析链路。仿真实验结果表明,偏航角姿态误差是影响成像几何质量的主要因素。

关键词:平台姿态误差;像移;成像几何质量;TDICCD 相机

中图分类号:P237 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2017)02-101-06

Impact of satellite platform attitudes' error on imaging geometric quality of TDICCD

WU Zhaocong¹, YANG Fan¹, WU Yuan¹, ZHU Jun², HAN Xingzi²

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Dong Fang Hong Satellite Co. Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: The research of influence on TDICCD camera's imaging geometric quality can contribute to improving quality by advancing the design requirements of the platform. The quantitative relation of the platform attitude error and the imaging geometric quality based on the image point displacement was studied. The model of imaging parameters' error caused by attitude error was built, including the error of image motion velocity, the drift angle correction and integral time. The relation between imaging parameters' error and image motion combined with the strict geometric imaging model was deduced. The quantitative model of the geometric quality indexes under the influence of image motion was established, including angle distortion, length distortion, pixel resolution and positioning accuracy. The perfectly quantitative chain from attitude error to geometric quality indexes was created. The simulation experiment was conducted and the results indicate that the main influencing factor of geometric quality is the error of yaw angle.

Key words: platform attitudes' error; image motion; geometric quality of imaging; TDICCD camera

随着航天事业的迅速发展,各遥感应用领域对影像质量要求越来越高。遥感卫星在轨成像质量受到多种因素的影响,包括空间环境、光学成像系统、电子电路系统以及卫星平台等。卫星平台中影响成像质量的主要因素为姿态稳定度、姿态指向精度、姿态测量精度以及载荷成像时像移补偿和时间同步精度等平台技术指标^[1]。卫星在轨运行和成像过程中会产生姿态抖动,使姿态稳定度、姿态指向精度和像移补偿等成像条件改变,像点位置与理想情况下产生偏差,造成影像几何变形和模糊、空间分辨率降低、空间定位偏差、系统调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)改变等现象。

从平台姿态误差引起卫星成像条件变化出发,研究姿态角对时间延迟积分电耦合元件(Time Delayed and Integration Charge-Coupled Device, TDICCD)相机成像几何特性的影响,发掘其对影像几何质量的影响规律,有助于研究影像几何误差的来源及分布,并根据影像几何质量的要求提出对平台姿态指标设计的要求和相应的改进措施,以提高影像成像几何质量。

目前,国内外关于卫星平台对影像质量的影响研究主要集中于对 MTF 和像点位移的影响。Rudoler 等研究了平台颤振引起的姿态角误差对影像 MTF 的影响,建立了颤振对 MTF 的影响模型^[2-5];李勃等分析了平台姿态角和姿态稳定度

* 收稿日期:2015-09-20

基金项目:民用航天技术预先研究资助项目(2013669-7)

作者简介:巫兆聪(1968—),男,福建连城人,教授,博士,博士生导师, E-mail:zcwoo@whu.edu.cn

对 MTF 的影响规律^[6-9];孙阳等研究了卫星姿态误差对像移的影响^[10-11],上述研究均未涉及成像几何质量。岳庆兴等分析了卫星三轴姿态运动、偏流角误差等影响几何质量的动态因素,并进行基于模拟影像的几何质量分析^[12],但没有建立影响因素对影像几何质量影响的定量模型;金涛等从内外方位元素出发研究了星敏定姿误差、整星姿态误差等卫星系统误差对影像内部和外部几何精度的影响重要性^[13],没有给出量化模型。

本文针对 TDICCD 成像内部几何畸变和外部几何误差,从长度畸变、角度畸变、像元分辨率及定位误差等几何质量评价指标^[14]出发,以像点位移为桥梁,建立平台姿态误差和成像几何质量指标之间的定量分析模型。

1 平台姿态误差对相机成像参数的影响

1.1 姿态误差引起像移速度误差

卫星轨道运动、地球自转和姿态角变化造成像点在焦平面上的相对运动,星上像移补偿装置根据像点位移速度补偿像点相对运动。由于平台运动引起的姿态角和姿态角速度误差,像移速度产生偏差,产生像点位移。

像移速度的影响如图 1 所示,在 TDICCD 方向上像移速度变化引起固有推扫速度、电荷转移速度与像移速度失配,造成像素模糊和地面采样距离变化等影响;在垂直 TDICCD 方向上像移速度变化产生影像行间的错位、像元间距的变化,各像点收集的电荷混淆,影像从而产生沿 TDICCD 和垂直 TDICCD 方向上的像移,影响成像几何质量。

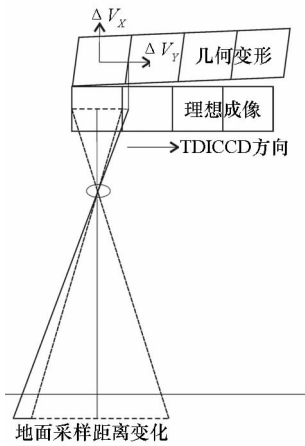


图 1 像移和像移速度变化影响示意图
Fig. 1 Impact of change in image motion and image motion velocity

1.2 姿态误差引起偏流角和积分时间误差

在 TDICCD 相机成像时,偏流角调整机构工

作,跟踪并补偿卫星产生的偏流角,使卫星偏航姿态角实时与偏流角保持一致。而姿态角误差使 TDICCD 成像时产生偏流角补偿残差,偏航角相对于正确的偏流角方向存在着一定的角度误差,引起相机扫描线角度变化,同时影响 TDICCD 成像积分时间。偏流角校正误差和积分时间误差将导致附加的非正常像移,使影像光生电荷与焦平面上影像运动不同步,导致像面上产生像点位移。像移产生原理如图 2 所示,TDICCD 在理想推扫与偏流角校正误差 $\Delta\beta$ 的情况下像点由 A 移动到 A',产生沿 TDICCD 方向和垂直 TDICCD 方向的像移,影响成像几何质量。

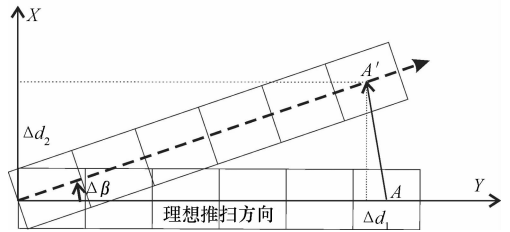


图 2 偏流角校正误差影响示意图
Fig. 2 Impact of error in calibration of drift angle

2 姿态误差对像移的影响模型

通过上述像移速度误差、偏流角和积分时间误差对像移的影响进行分析,基于物方空间坐标系到像平面坐标系的空间坐标系变换^[15]建立严密成像几何关系,综合考虑像移速度、偏流角和积分时间误差,建立沿 TDICCD 方向和垂直 TDICCD 方向的像移误差模型。

2.1 严密成像几何模型

相机成像过程中空间坐标变换经过大地坐标系、地心固连坐标系、地心赤道坐标系、卫星轨道坐标系、卫星本体坐标系、相机坐标系和像平面坐标系这 7 个坐标系的旋转、平移和缩放变换,据此建立严密成像几何模型。

成像物方点空间坐标 (X_T, Y_T, Z_T) 经过轨道六根数中的升交点赤经 Ω 、轨道倾角 i 和纬度幅角 u 进行旋转变换到卫星轨道坐标系,旋转矩阵 $A_{01} = C_y(-u - \pi/2)C_x(i - \pi/2)C_z(\Omega)$;卫星轨道坐标系通过翻滚角 φ 、俯仰角 ω 和偏航角 κ 三个姿态角旋转变换到卫星本体坐标系,旋转矩阵 $A_{10} = C_z(\kappa)C_y(\omega)C_x(\varphi)$;卫星本体坐标系通过相机安装矩阵旋转和平移变换到相机坐标系,变换矩阵为 M_{cb} ;相机坐标系通过相机焦距 f 和成像距离 H 缩放变换到像平面坐标系。

基于上述空间坐标系转换流程,建立像平面

上像点 (x_i, y_i) 与成像物方点空间坐标 (X_T, Y_T, Z_T) 的计算模型,如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \end{bmatrix} = -\frac{f}{H} \mathbf{M}_{cb} \mathbf{A}_{bo} \left(\mathbf{A}_{oi} \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -r \end{bmatrix} \right) \quad (1)$$

式中, r 为卫星到地心的距离。

2.2 像移速度误差模型

TDICCD相机成像时的像点坐标计算需考虑卫星成像时刻对应的轨道参数和姿态参数,轨道参数和姿态参数与时间相关。因此,根据TDICCD成像时像点坐标与时间的关系推导相机成像时对应的像移速度 $[V_x, V_y, V_z]$,计算模型为:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = -\frac{f}{H} \mathbf{M}_{cb} \left[\dot{\mathbf{A}}_{bo} \left(\mathbf{A}_{oi} \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -r \end{bmatrix} \right) + \mathbf{A}_{bo} \left(\dot{\mathbf{A}}_{oi} \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{oi} \begin{bmatrix} \dot{X}_T \\ \dot{Y}_T \\ \dot{Z}_T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\dot{r} \end{bmatrix} \right) \right] \quad (2)$$

式中: $\dot{\mathbf{A}}_{oi}$ 为 \mathbf{A}_{oi} 对时间的导数,由卫星真近点角和角速度确定; $\dot{\mathbf{A}}_{bo}$ 为 \mathbf{A}_{bo} 对时间的导数,由姿态角 $(\varphi, \omega, \kappa)$ 和姿态角速度 $(\dot{\varphi}, \dot{\omega}, \dot{\kappa})$ 确定; $[X_T, Y_T, Z_T]^T$ 为物方点在地心赤道坐标系中的坐标, $[\dot{X}_T, \dot{Y}_T, \dot{Z}_T]^T$ 为物方空间坐标在地球自转影响下的变化量; \dot{r} 为卫星的径向速度。

在卫星成像时刻,卫星轨道参数、星地距离、成像物方点坐标以及相机安装矩阵均为定值。因此,像移速度的误差主要来源于姿态角和姿态角速度误差。姿态角和姿态角速度的函数关系为:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_x \\ \Delta V_y \\ \Delta V_z \end{bmatrix} = \mathbf{F}_1(\Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa) + \mathbf{F}_2(\Delta\dot{\varphi}, \Delta\dot{\omega}, \Delta\dot{\kappa}) \quad (3)$$

其中, \mathbf{F}_1 为姿态角误差 $(\Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa)$ 的函数模型, \mathbf{F}_2 为姿态角速度 $(\Delta\dot{\varphi}, \Delta\dot{\omega}, \Delta\dot{\kappa})$ 的函数模型。

2.3 偏流角和积分时间误差模型

相机成像时刻的偏流角和积分时间为像移速度的函数。因此,偏流角和积分时间误差由姿态角和姿态角速度误差决定。

相机成像时刻的偏流角如式(4)所示,积分时间如式(5)所示。

$$\beta = \arctan(V_y/V_x) \quad (4)$$

$$T = d / \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (5)$$

式(5)中, d 为TDICCD像元尺寸。

在存在姿态角和姿态角速度误差的情况下,偏流角误差和单级积分时间误差用像移速度误差分别表示为:

$$\Delta\beta = \arctan\left(\frac{V_y + \Delta V_y}{V_x + \Delta V_x}\right) - \beta \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{d}{\sqrt{(V_x + \Delta V_x)^2 + (V_y + \Delta V_y)^2}} - T \quad (7)$$

2.4 姿态误差引起的像移误差模型

综合考虑姿态误差引起的像移速度误差、偏流角与积分时间误差,建立垂直于TDICCD方向和沿TDICCD方向的像移误差计算模型,如式(8)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_x \\ \Delta V_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Delta\beta & \sin\Delta\beta \\ -\sin\Delta\beta & \cos\Delta\beta \end{bmatrix} (T + \Delta T) \quad (8)$$

3 像移误差引起内部几何畸变和外部几何误差

3.1 内部几何畸变模型

3.1.1 角度畸变

像元覆盖的两相邻边夹角在理想情况下为直角。由于在沿TDICCD方向和垂直于TDICCD方向的像移,相邻像元之间产生角度畸变。角度畸变模型表示为:

$$\Delta\theta = \arctan \frac{\Delta x}{d + \Delta y} \quad (9)$$

3.1.2 长度畸变

相邻像元中心的长度在理想情况下为像元尺寸。由于在沿TDICCD方向和垂直于TDICCD方向的像移,相邻像元中心的长度随着像移产生误差,造成长度变形。长度畸变模型表示为:

$$\Delta s = \sqrt{(\Delta x)^2 + (d + \Delta y)^2} - d \quad (10)$$

3.2 外部几何误差模型

3.2.1 像元分辨率误差

像元分辨率描述TDICCD像元对应的地面采样距离。由于沿TDICCD方向的像移,单位积分时间内像元推扫长度变化产生像元分辨率误差。像元分辨率误差模型表示为:

$$\Delta R = \Delta y \cdot \frac{H}{f} \quad (11)$$

3.2.2 像元定位误差

像元定位精度表现TDICCD像元在物方空间坐标中的位置精度。由于在沿TDICCD方向和垂直于TDICCD方向的像移,物方点坐标存在 X 和 Y 方向上的坐标误差,由于 Z 坐标受到地面高程

影响,在此不做具体分析。根据式(1)推导像元对应物方点空间坐标的坐标误差模型,可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta L_x \\ \Delta L_y \\ \Delta L_z \end{bmatrix} = \frac{H}{f} \mathbf{A}_{oi}^{-1} \mathbf{A}_{bo}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ r \end{bmatrix} \quad (12)$$

由于物方空间坐标定义在空间直角坐标系,其 X 和 Y 方向的坐标值变化除了与像移相关,还与成像星下点经纬度相关,像元定位误差表示为物方空间距离的变化值。

4 仿真实验与分析

采用 CAST2000 平台的技术参数及某遥感卫星的轨道和传感器参数仿真姿态误差对成像几何质量的影响,分析引起成像几何质量退化的主要姿态参数。结合上述平台姿态误差对像移影响模型和像移对成像几何质量的影响模型,实验仿真姿态角和姿态角速度存在误差与理想姿态情况下像点的位置差值,研究在不同姿态角和姿态角速度误差下单级积分时间内沿 TDICCD 方向和垂直于 TDICCD 方向的像移影响量变化规律,并根据像移变化研究姿态角度误差对成像角度畸变、长度畸变、像元分辨率和定位误差的影响规律。

CAST2000 平台具备良好的性能和可靠性,拥有高精度的控制能力,已成功用于高分一号、实践九号 A 星等高分辨率遥感卫星。表 1 为 CAST2000 平台主要的技术指标,表 2 为由 CAST2000 搭载的某遥感卫星轨道和 TDICCD 相机参数。

表 1 CAST2000 平台技术指标

Tab.1 Technical indicators of CAST2000

姿态控制精度(三轴,3δ)	≤0.1°
姿态稳定度(三轴,3δ)	≤0.001°/s
姿态测量精度(三轴,3δ)	≤0.03°

表 2 某遥感卫星轨道和传感器参数

Tab.2 Parameters of orbit and sensor

轨道基本参数		TDICCD 相机参数	
轨道高度	500 km	焦距	1.2 m
倾角	97.458°	像元尺寸	7 μm
偏心率	0		
近地点幅角	0		
升交点赤经	138.137°		

4.1 姿态误差对像移影响仿真与分析

姿态角误差对沿 TDICCD 方向和垂直于

TDICCD 方向的像移影响情况如图 3 所示。根据实验仿真结果分析得出:偏航角是姿态角中主要影响像平面上像移的因素,偏航角在对像平面垂直于 TDICCD 方向像移较沿 TDICCD 方向像移影响量大,影响量级在亚像元级。在多级积分时间下,姿态角误差对 TDICCD 的像移影响可达到像元级。

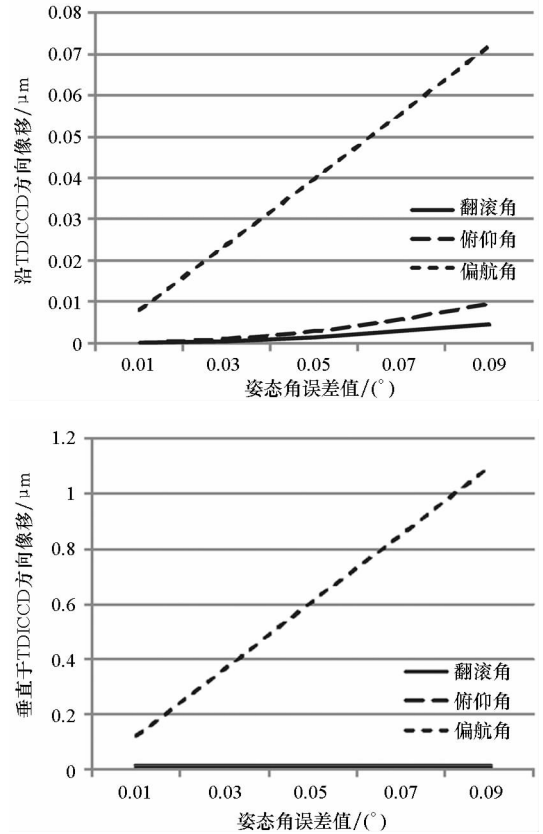


图 3 姿态角误差对沿 TDICCD 方向和垂直于 TDICCD 方向像移的影响

Fig.3 Impact of attitude angle error on image motion in horizontal and vertical direction of TDICCD

姿态角速度误差对沿 TDICCD 方向和垂直于 TDICCD 方向的像移影响情况如图 4 所示。根据实验仿真结果分析得出:在姿态角速度中,翻滚角速度主要对沿 TDICCD 方向的像移产生影响,俯仰角速度主要对垂直于 TDICCD 方向的像移产生影响,影响量级为 10⁻³ 像元级。

通过对比姿态角误差与姿态角速度误差对像移的影响量级,TDICCD 像移误差主要由姿态角误差产生。因此,在分析像移对 TDICCD 成像几何质量的影响时,主要考虑姿态角误差对几何质量的影响。

4.2 成像几何质量仿真和分析

姿态角误差对 TDICCD 成像角度畸变、长度畸变、像元分辨率和几何定位误差影响情况分别

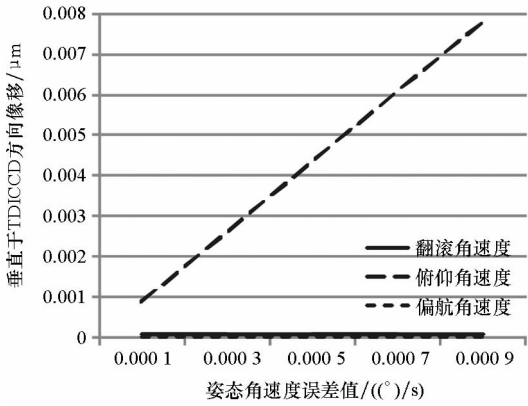
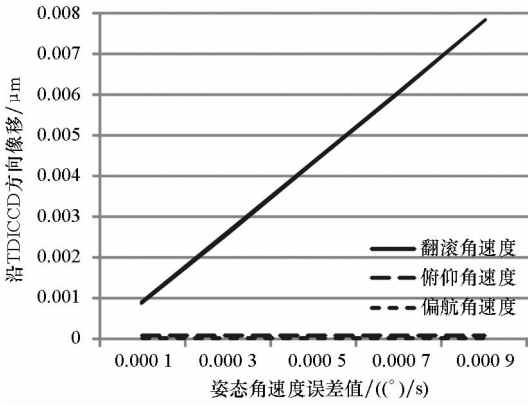


图 4 姿态角速度对沿 TDICCD 方向和垂直于 TDICCD 方向像移的影响

Fig. 4 Impact of attitude angular velocity error on image motion in horizontal and vertical direction of TDICCD

如图 5~8 所示。在翻滚角、俯仰角和偏航角的误差量级在 10^{-2} (°) 时,相邻像元之间的角度畸变影响量在 10^{-3} (°) 量级,长度畸变影响量在亚像元级,像元分辨率影响量在 10^{-2} m 量级,像元几何定位误差在 10^{-1} m 量级。

仿真实验仅考虑的是相邻像元之间的几何误差,在 TDICCD 沿像元阵列推扫和多级积分时间情况下,几何误差会根据姿态角随着平台运动产生的变化量进行累加,极大地影响 TDICCD 成像影像的几何质量。

4.3 成像几何质量对姿态的要求

通过对比翻滚角、俯仰角和偏航角对成像几何质量的影响,得出对成像几何质量影响的主要因素为偏航角。根据 TDICCD 成像时的质量误差要求^[16],像移的限差应控制在 $(2/N) \cdot d$,其中 N 为积分级数。在上述实验轨道和相机参数情况下,积分级数为 24 级时,像移应在 $0.6 \mu\text{m}$ 误差范围内,对应偏航角误差须保持在 0.049° 内;积分级数为 48 级时,像移应在 $0.3 \mu\text{m}$ 误差范围内,对应偏航角误差须保持在 0.035° 内;积分级数为 96 级时,像移应在 $0.15 \mu\text{m}$ 误差范围内,对应偏航

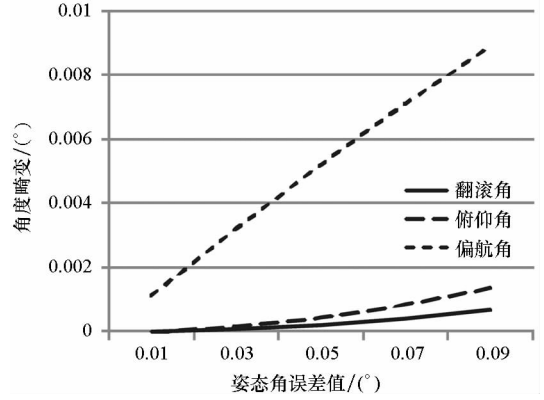


图 5 姿态角误差对成像角度畸变的影响
Fig. 5 Impact of attitude angle error on angular distortion

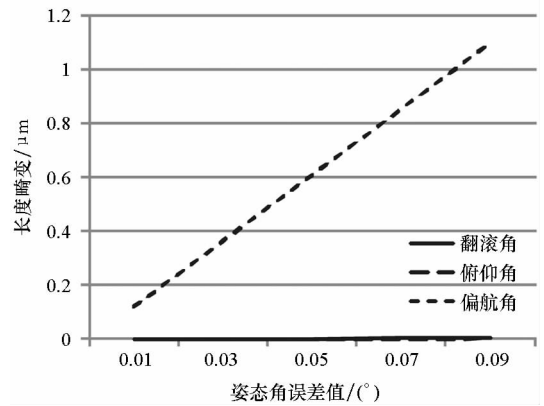


图 6 姿态角误差对成像长度畸变的影响
Fig. 6 Impact of attitude angle errors on linear distortion

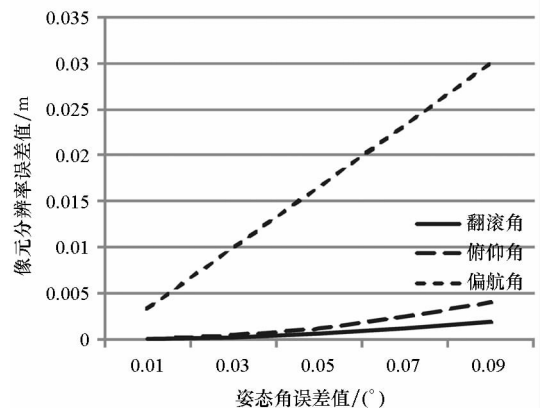


图 7 姿态角误差对成像像元分辨率的影响
Fig. 7 Impact of attitude angle errors on pixel resolution

角误差须保持在 0.011° 内。

TDICCD 成像时像移补偿过程中偏流角校正角度是由偏航角确定的。因此,在 TDICCD 成像过程中保证几何质量,需要提高偏航角的控制精度和测量精度。

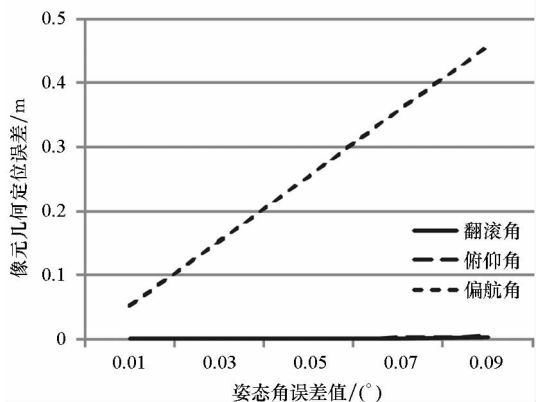


图 8 姿态角误差对像元几何定位误差影响

Fig. 8 Impact of attitude angle errors on positioning error

5 结论

建立了平台姿态角和姿态角速度误差对像点位移和几何成像质量的影响模型,研究了 TDICCD 相邻像元间成像角度畸变、长度畸变、像元分辨率和定位误差的影响模型和影响规律。仿真结果表明了偏航角误差为 TDICCD 成像几何质量的主要影响量。同时,针对影像几何质量的要求,分析了 TDICCD 成像质量对姿态角的误差限值,进而提出对姿态角度的约束,以提高 TDICCD 成像几何质量。

下一步的工作是考虑多个姿态角耦合情况下像移和几何质量误差情况,并结合具体的平台运动模型分析整幅影像的几何质量影响情况。

参考文献 (References)

[1] 吕大旻, 白照广, 陆春玲, 等. 高分一号卫星成像质量控制技术及测试验证[Z]. 航天器工程, 2014, 23: 22 - 27. LYU Damin, BAI Zhaoguang, LU Chunling, et al. Control of GF - 1 satellite image quality and verification [Z]. Spacecraft Engineering, 2014, 23: 22 - 27. (in Chinese)

[2] Rudoler S, Hadar O, Fisher M, et al. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part 2: experiment[J]. Optical Engineering, 1991, 30(5): 577 - 589.

[3] Hadar O, Fisher M, Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part III: numerical calculation of modulation transfer function [J]. Optical Engineering, 1992, 31(3): 581 - 589.

[4] Hadar O, Dror I, Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part IV: real-time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification [J]. Optical Engineering, 1994, 33(2): 566 - 578.

[5] Stern A, Kopeika N S. Analytical method to calculate optical transfer functions for image motion and vibrations using moments [J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision, 1997, 14(2): 388 - 396.

[6] 李勃. 随机振动对 TDICCD 相机像质影响分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

LI Bo. Analysis of random vibration on image quality degradation of TDICCD camera [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

[7] 王俊. 航天光学成像遥感器动态成像质量评价与优化[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000. WANG Jun. Evaluation and optimization on dynamic imaging quality of an optical remote sensor [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000. (in Chinese)

[8] 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 Funian, ZHANG Wang, LIU Jianfeng. Effect of satellite control accuracy on TDICCD cameras [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(3): 382 - 384. (in Chinese)

[9] 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 Dejie, XU Shuyan, HAN Chengshan. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2199 - 2203. (in Chinese)

[10] 孙阳, 薛栋林, 郑立功, 等. 航天器平台在轨振动对遥感成像质量的影响[J]. 光学技术, 2013, 39(6): 553 - 558. SUN Yang, XUE Donglin, ZHENG Ligong, et al. Satellite platform on-orbit vibration's influence to image quality of remote sensing [J]. Optical Technique, 2013, 39(6): 553 - 558. (in Chinese)

[11] 庄绪霞, 王治乐, 阮宁娟, 等. 像移对星载 TDICCD 相机成像品质的影响分析[J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(6): 66 - 73. ZHUANG Xuxia, WANG Zhile, RUAN Ningjuan, et al. Influence analysis of image motion on image quality of satellite-board TDI camera optical system [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2013, 34(6): 66 - 73. (in Chinese)

[12] 岳庆兴, 邱振戈, 贾永红. TDI CCD 相机动态成像对几何质量的影响研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(3): 14 - 17. YUE Qingxing, QIU Zhengge, JIA Yonghong. Impact of TDI CCD camera dynamic imaging on geometric quality by mathematic simulation [J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(3): 14 - 17. (in Chinese)

[13] 金涛, 李贞, 李婷. 提高光学遥感卫星图像几何精度总体设计分析[J]. 宇航学报, 2013, 34(8): 1159 - 1165. JIN Tao, LI Zhen, LI Ting. System design and analysis for improving geometric accuracy of high-resolution optical remote sensing satellite image [J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(8): 1159 - 1165. (in Chinese)

[14] 蒲德祥, 董竹, 胡艳. 卫星遥感数字产品质量评价方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(3): 95 - 97. PU Dexiang, DONG Zhu, HU Yan. Research on methods of quality assessment of digital remote-sensing images [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013, 36(3): 95 - 97. (in Chinese)

[15] 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 Changxiang, WANG Jiaqi. Method of coordinate transformation for IM&IMC calculation in aerospace camera system [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(3): 203 - 207. (in Chinese)

[16] Wong H S, Yao Y L, Schlig E S. TDI charge-coupled devices: design and applications [J]. IBM Journal of Research and Development, 1992, 36(1): 83 - 106.