

长线阵 TDICCD 空间相机像移匹配及 MTF 分析*

武奕楠 张宇 韩双丽 金龙旭 王文华

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 长线阵 TDI(time delay and integration)CCD 空间相机通过机动成像可以获得更宽的地面幅宽,缩短重访周期。由于角度变换和地球曲率等因素,相机不同视场位置的像移速度和偏流角存在差异,TDICCD 焦面越长,机动角度越大,差异越大。通过像移解析模型计算像面上各点像速矢量,定量分析空间相机在侧摆和俯仰成像时视场上各点像移速度和偏流角差异对调制传递函数(MTF)的影响,并以 MTF 为约束确定各工况下的像速匹配模式和参数指标。分析结果表明:侧摆成像时,以沿 TDICCD 积分方向上的 MTF 退化为主;俯仰成像时,垂直于 TDICCD 积分方向上的 MTF 退化较多。以某工程实例计算:以传函下降 5% 为约束,以最大侧摆角 40° 成像时,可采用 32 级积分级数。俯仰 30° 成像时,可用积分级数不能超过 8 级;俯仰 10° 成像时,积分级数不超过 16 级。

关键词: TDICCD 空间相机;像移匹配;MTF;像移速度;偏流角

中图分类号: V447 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3040

Image Motion compensation and MTF analyse of
long array TDICCD space camera

Wu Yinan Zhang Yu Han Shuangli Jin Longxu Wang Wenhua

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Long array TDI(Time Delay and Integration)CCD space camera can obtain wider coverage and shorten revisit cycle by maneuvering imaging. However, the space camera shows different image motion speeds and drift angles at different positions of field of view because of angle conversion and the earth curvature. Longer the TDICCD focal plane is, larger the maneuvering angle and greater the differences are. The image motion vector in different position of the image area were calculated by the model of image motion velocity. The effect about the differences of image motion speed and drift angle among different fields of view on modulation transfer function(MTF) was quantitative analyzed when space camera imaging with pitch and scroll angle. Motion speed matching patterns and parameters of various conditions were confirmed by the restriction of MTF. The analysis result shows that MTF parallel to the direction of integral mainly declined when imaging with scroll angle; MTF perpendicular to the direction of integral mainly declined when imaging with pitch angle. By taking a engineering case for calculation: integral stages can not be over 32 when imaging with the maximum scroll angle 40° under a constraint of 5% drop for MTF. In the same way, integral stages can not be over 8 when pitching 30° imaging and 16 when pitching 10° imaging.

Keywords: TDICCD space camera; image motion compensation; MTF; image motion speed; drift angle

1 引言

随着空间遥感任务的不断拓展,对空间相机成像质量的要求也不断提高。空间相机由于景物点相对光学遥感系统发生相对运动及成像几何等因素,像面上地球景物对应的像点呈复杂运动,像面上不同位置像点的运动速度矢量各异,为了保证像点运动与 CCD 电荷转移在速度和方向上

的同步^[1],使相机能对地面景物高分辨力清晰成像,空间相机必须进行像移匹配。

在侧摆和俯仰成像模式中,像移速度差异和偏流角差异会分别对调制传递函数(modulation transfer function)MTF 产生不同程度的影响,目前的定量分析大都基于上述某一方面^[2-4]。而评估一个空间相机的成像能力和适用范围,需要综合考虑上述问题。长线阵空间相机焦平面采用

多片 TDI(time delay and integration)CCD 拼接,具有更宽的视场,通过推扫成像可获得更大的地面覆盖宽度。同时,视场上各点像移速度矢量受视场角度、球面几何畸变等影响差异会更大,对 MTF 的影响也更大。

通过基于坐标变换的像移速度矢量模型计算焦面上各位置像元的像速矢量,分析了相机在侧摆和俯仰成像时视场上各点像移速度匹配误差和偏流角匹配误差对调制传递函数 MTF 的影响,以 MTF 为约束确定各工况下的像速匹配模式和参数指标,定量分析了机动成像角度、TDICCD 积分级数使用范围和制约关系,同样可为其他空间相机的使用提供参考。

2 像移速度矢量计算

通过定义地面景物到像面坐标系的 7 个坐标系,利用坐标变换理论^[5],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,构造像面位置方程,推导出像面速度矢量计算解析式。建立的坐标系主要有:地心惯性坐标系 $I(I_1, I_2, I_3)$,地球坐标系 $E(E_1, E_2, E_3)$,卫星轨道坐标系 $B(B_1, B_2, B_3)$,卫星本体坐标系 $S(S_1, S_2, S_3)$,相机坐标系 $C(C_1, C_2, C_3)$,像面坐标系 $P(P_1, P_2, P_3)$,地理坐标系 $G(G_1, G_2, G_3)$ 。

基于几何模型,建立像面位置方程所进行的坐标变换顺序为:地理坐标系→地球坐标系→地心惯性系→卫星轨道坐标系→卫星本体系→相机坐标系→像面坐标系。

坐标变换主要包括旋转和平移^[6]。绕被转动的坐标系的 x, y, z 轴旋转 α 角度得到的旋转矩阵有如下标准形式:

$$\begin{aligned} C_x(\alpha) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \\ C_y(\alpha) &= \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \\ C_z(\alpha) &= \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

若新坐标系原点 O' 在原坐标系的坐标为 $[g, h, k]^T$, 则当原坐标系的原点 O 平移到 O' 点后,原坐标系 (x, y, z) 和新坐标系 (x', y', z') 关系为:

$$[x', y', z']^T = [x, y, z]^T - [g, h, k]^T \quad (2)$$

实际工程计算采用齐次坐标变换坐标矩阵,可同时反映旋转和平移变换,通过坐标变换可以得到像面坐标系上任一点 (p_1, p_2, p_3) 的关于时间 t 的位置方程组 $P(t)$:

$$P(t) = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

像速解析式由位置方程组 $P(t)$ 对时间为 0 点微分得

到。即:

$$V_P = \left. \frac{dP}{dt} \right|_{t=0} = \begin{bmatrix} dP_1/dt \\ dP_2/dt \\ dP_3/dt \\ 0 \end{bmatrix}_{t=0} = \begin{bmatrix} V_{p1} \\ V_{p2} \\ V_{p3} \\ 0 \end{bmatrix}_{t=0} \quad (4)$$

像面上坐标为 (p_1, p_2) 点的像速大小由像速矢量的模量确定。

$$V_p = \sqrt{V_{p1}^2 + V_{p2}^2} \quad (5)$$

(实际成像原理和像面位置约束忽略 V_{p3} 分量)

像速方向由偏流角值确定。

$$\beta_{偏流} = \arctan\left(\frac{V_{p2}}{V_{p1}}\right) \quad (6)$$

根据像移速度模量 V_p 调整 TDICCD 行频,根据偏流角 $\beta_{偏流}$ 调整卫星偏航角以实现像速矢量匹配。如引言所述,由于实际物像在像面上的速度矢量和 CCD 电荷移动速度矢量存在误差^[7],像移速度残差引起的 MTF 退化会作用于 TDICCD 积分方向,记为纵向 MTF_{||};由于像面上各点偏流角存在差异,偏流角匹配误差引起的 MTF 退化垂直于 TDICCD 积分方向,记为横向 MTF_⊥。

计算工程参数如下:卫星轨道倾角 $i_0 = 100.5^\circ$,相机焦距 $f = 3.5$ m,轨道高度 $H = 500$ km,地物高度 $h = 0$,卫星下行。焦面采用 9 片 TDICCD 拼接,每片包含 12 000 个像元,设最高积分级数 32 级,卫星最大机动角度为 40° 。

3 像移速度匹配误差分析

3.1 相机机动成像像移速度分析

计算相机侧摆和俯仰成像情况下焦平面上各点像移速度值,图 1 所示为侧摆成像像速分布情况,选取各片 CCD 中心点作为特征点计算,如图 1 中 CCD 片号所排列,侧摆角 φ 为 $-40^\circ \sim 40^\circ$ (左侧摆为正)。由于地球自转和地球球面影响,在同一工况下,像移速度随星下点纬度变化。总体趋势为纬度越低,像移速度越大,但视场上各位置点相对于视场中心点的像移速度差值随纬度变化可忽略,对纵向 MTF 影响很小,所以为简化因素将成像时刻星下点纬度统一设为 0° 。

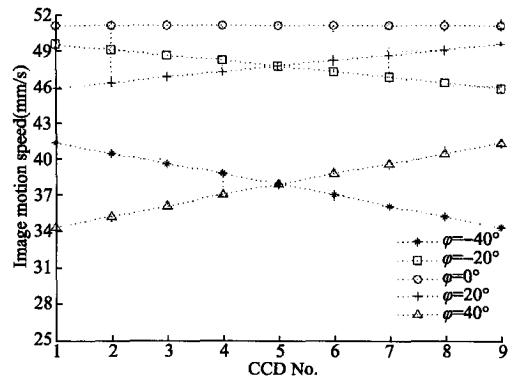


图 1 侧摆成像焦平面像移速度

在平飞状态下各片 CCD 像速大小一致,随着侧摆角度的增大,视场上各位置像点对应的地物视线长度发生变化,各片 CCD 相对于焦面中心点的像速差异逐渐增大。焦面越长,视场约宽,视场边缘和视场中心的像速差值越大。

俯仰成像时,视场各位置对应的视线长度随俯仰角度统一变化。图 2 所示为俯仰成像像速分布情况,视角范围 θ 为 $0^\circ \sim 40^\circ$ (后摆为正),相同角度俯仰成像像速相等,显然俯仰成像焦面上各点像移速度大小一致。

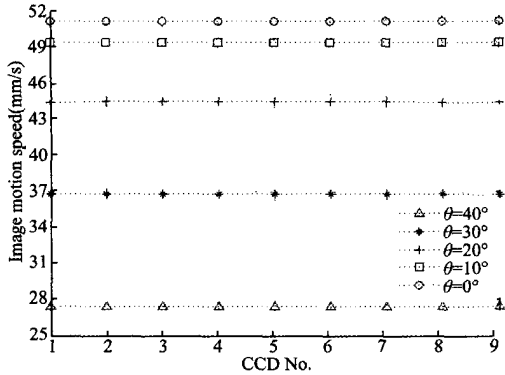


图 2 俯仰成像焦平面像移速度

3.2 像移速度匹配对 MTF 的影响

像移速度匹配模式包括同速匹配和异速匹配。同速匹配以 TDICCD 焦面中心片中心点像移速度为基准统一规划各片 CCD 行频。异速匹配以各片 TDICCD 中心点像移速度为基准分别规划各片 CCD 行频。同速匹配更便于相机电子学统一控制,但像速差异较大时会降低 MTF。异速匹配增加了相机的控制复杂度,但匹配精度更高。由于侧摆成像时不同视场位置像速差值较大,分析侧摆成像焦面各点 $MTF_{\parallel}$ 分布情况来确定匹配模式。

计算同速匹配模式下由于像移速度残差引起的 $MTF_{\parallel}$ [8]:

$$MTF_{\parallel} = \frac{\sin\left(\pi \frac{M f_c \Delta V}{2 f N V_m}\right)}{\pi \frac{M \cdot f_c \Delta V}{2 f N V_m}} \quad (7)$$

$$\Delta V = V_m - V_i \quad (i = 1 \sim 9) \quad (8)$$

式中: M 为 TDICCD 积分级数,取 32 级; V_m 为第 5 片中心点像移速度模量, ΔV 为每一片 CCD 中心像素像移速度模量 V_i 与 V 的差; $\Delta V/V_m$ 为像速匹配相对误差; f_c 为特征频率,取等同于奈奎斯特频率 f_N 。考虑正负侧摆成像像速差异随侧摆角对称分布,相同角度 $MTF_{\parallel}$ 对等,在侧摆 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内,每间隔 10° 计算各片 CCD 中心点 $MTF_{\parallel}$,结果图 3 所示。

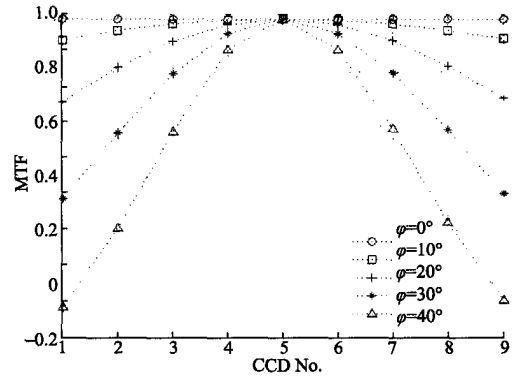


图 3 侧摆成像同速匹配 $MTF_{\parallel}$ 示意

在同速匹配模式,随着侧摆角度的增大,各片 CCD 相对中心片的像移速度残差越大,导致 MTF 越低,离中心视场越远, MTF 下降越明显,在正负侧摆 10° 范围内各片 CCD 的 MTF 都大于 0.92;而在侧摆 40° 成像时仅中心片 CCD 的 MTF 大于 0.9。显然同速匹配模式下 MTF 下降太多,无法满足空间相机大角度正负侧摆成像要求。

计算异速匹配模式下 $MTF_{\parallel}$,如式(7)中各参量, M 取 32 级; V_m 为每片 CCD 中心点像移速度模量, ΔV 为每片 CCD 左(右)端点像速模量 V_i 与 V_m 的差;在侧摆 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内,每间隔 10° 计算各片 CCD 端点 $MTF_{\parallel}$,结果如图 4 所示。

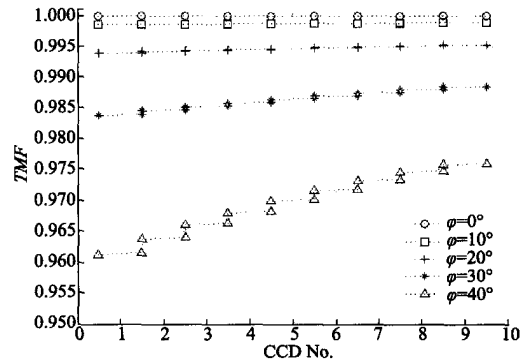


图 4 侧摆成像异速匹配 $MTF_{\parallel}$ 示意

在异速匹配模式下,以每片中心点像速作为基准适配该 CCD 两端像元,减小了像速残差。随着侧摆角度的增大,由于每片 CCD 中心点和左右边缘点对应的视线长度差异增大,像速差值变大, MTF 下降,但相比同速匹配模式退化很小。 40° 侧摆成像,视场边缘位置最低值为 0.964 1,以传函下降 5% 为约束 [7] 整个视场均可以满足相机成像要求。比较上述 2 种匹配模式下的 MTF 结果,相机在平飞、俯仰成像时应采用同速匹配模式,侧摆成像采用异速匹配模式。

4 偏流角匹配误差分析

4.1 相机机动成像偏流角误差

偏流角匹配误差由多种因素引起,主要包括:由于空间相机偏流调整机构按照焦平面中心像点偏流角 β_m 进行偏流角补偿,焦面上其他像点偏流角 β_x 与 β_m 之间的偏流角原理残差 $\Delta\beta_x$;卫星各轨道、姿态参数误差不为零时引起的运动偏流角估值误差;由于卫星轨道高度较高、地面成像幅宽较大,地球表面曲面性质引起的偏流角在像面上的畸变量;相机装调误差等^[9-11]。为说明原理,本文只考虑理想情况下的偏流角原理残差和畸变偏流角。

相机侧摆或俯仰成像的角度愈大、成像位置距离像面中心区域越远几何畸变愈明显,如图 5 所示。成像视场越宽,机动角度越大,畸变角度越大,成像质量退化更严重。

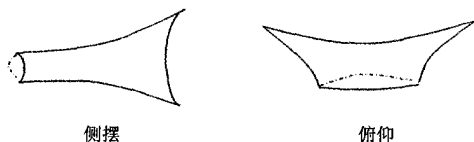


图 5 畸变示意

选取各片 CCD 左右端点为特征点计算畸变偏流角。俯仰成像时,畸变方向垂直于 CCD 积分方向,偏流角畸变量随俯仰角的增大而增大,离焦面中心越远畸变量越大,前后摆 40° 时视场边缘畸变量大于 4°, 如图 6 所示;侧摆成像时,由于畸变方向平行于 CCD 积分方向,引入的横向畸变

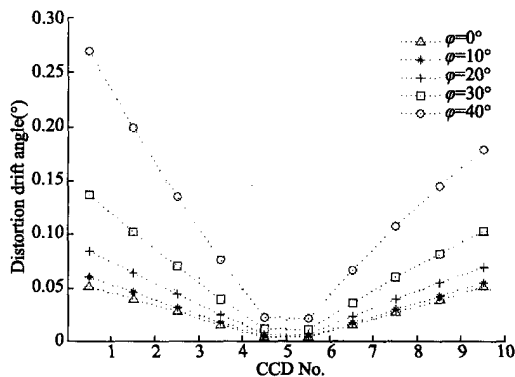


图 6 侧摆成像偏流角畸变量

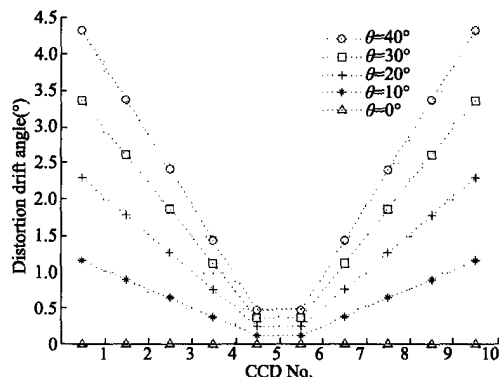


图 7 俯仰成像偏流角畸变量

相对很小,侧摆 40° 成像时中心片 CCD 畸变量小于 0.03°, 视场边缘偏流角畸变量小于 0.3°, 如图 7 所示。

偏流角原理残差在俯仰成像时很小,遍历各侧摆角和像面各特征点, $\Delta\beta_x < 0.006^\circ$, 相对于偏流角畸变量的影响可近似忽略;对于侧摆成像,侧摆 40° 成像遍历各特征点, $\Delta\beta_x < 0.05^\circ$, 同比小于偏流角畸变量,限于篇幅不单一陈列数据。由于整个像面只能通过偏流机构按一个角度调整,综上所述俯仰成像时像面上各位置偏流角与中心点相比差值较大,在视场边缘位置尤为明显,对 $MTF_{\perp}$ 会有较大影响。

4.2 偏流角误差对 MTF 的影响

偏流角匹配误差会导致横向 MTF 下降。分析空间相机在各机动模式下由偏流角畸变量和原理残差引起的 $MTF_{\perp}$ 变化,评估空间相机成像角度范围和 TDICCD 积分级数。

$MTF_{\perp}$ 计算公式如下:

$$MTF_{\perp} = \frac{\sin\left(\pi \cdot \frac{M \cdot f_c}{2f_N} \cdot \tan(\Delta\beta)\right)}{\pi \cdot \frac{M \cdot f_c}{2f_N} \cdot \tan(\Delta\beta)} \quad (9)$$

积分级数 M 取值范围为 (4, 8, 12, 16, 24, 32); $\Delta\beta$ 为偏流角匹配残差,即为选定的 CCD 特征点相对于像面中点的偏流角原理残差和畸变角之和。图 8、图 9 分别为侧摆成像和俯仰成像像面上各特征点在 32 级积分级数下的 $MTF_{\perp}$ 计算结果。

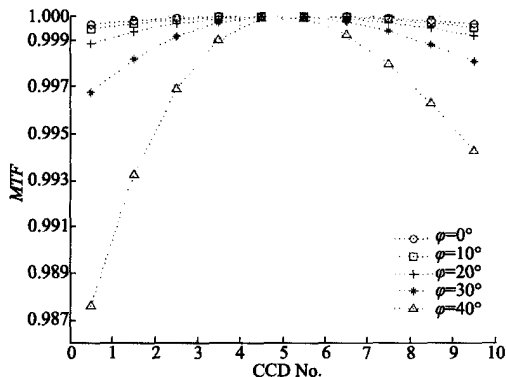


图 8 侧摆成像 $MTF_{\perp}$ 示意

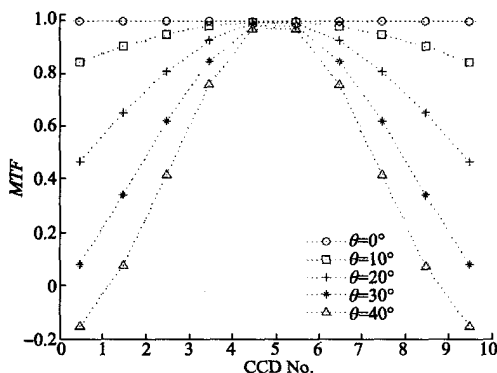


图 9 俯仰成像 $MTF_{\perp}$ 示意

由于侧摆角越大,离焦面中心越远, $\Delta\beta$ 越大, $MTF_{\perp}$ 越低,如图8所示,各片CCD特征点 $MTF_{\perp}$ 都大于0.95,显然侧摆成像时偏流角残差对MTF影响较小。俯仰成像时,视场边缘偏流角畸变最大,偏流角残差也最大, $MTF_{\perp}$ 最低。从图9看出从视场中间到两端 $MTF_{\perp}$ 下降趋势明显,如32级积分级数下,俯仰 10° 成像视场两端 $MTF_{\perp}$ 降至0.82,无法满足传函指标要求。由于同一工况下视场边缘 $MTF_{\perp}$ 最低,通过计算视场边缘点的 $MTF_{\perp}$ 可评估成像积分级数和机动角度范围。

图10为俯仰成像焦平面左边缘点 $MTF_{\perp}$ 分布情况,在同一视角下随着积分级数的增加, $MTF_{\perp}$ 呈明显下降;同一积分级数下,视角越大, $MTF_{\perp}$ 越低。俯仰 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围内,采用4级积分级数成像,整个视场上各点 $MTF_{\perp}$ 均大于0.95;俯仰 30° 成像时最高可采用8级积分级数;俯仰 10° 成像时最高可采用16级积分级数;。所以为满足 $MTF_{\perp}$ 指标要求,空间相机俯仰角越大,积分级数使用范围越小。在实际工程应用中,由于俯仰成像 $MTF_{\perp}$ 较低,需要适当降低传函约束或有效视场范围以增大积分级数和俯仰角度的调整空间。

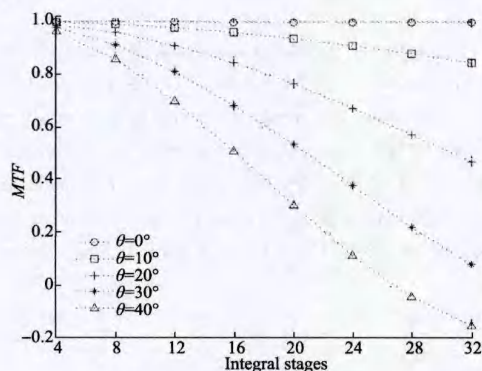
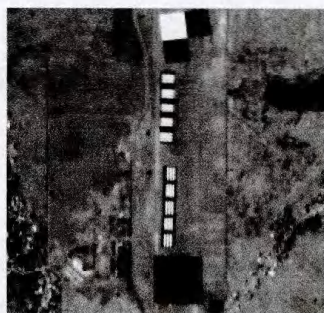


图10 俯仰成像视场边缘点 $MTF_{\perp}$ 示意

5 在轨成像结果

相机在轨实际成像样本如图11所示,图例1成像地区为云南,北纬 26.1° ,东经 100.8° 位置,相机对靶标平飞成像。图例2成像地区为美国北卡罗来纳州,北纬 35.5° ,西经 76.7° 位置,相机左侧摆 20.3° 对地成像。在轨平飞和侧摆成像时成像质量良好,通过靶标计算在轨传递函数大于0.1,满足在轨成像要求。由于俯仰成像MTF下降相对较多和任务需求小,目前在轨暂不应用。成像结果与理论计算相符,采用的像移匹配模式和MTF评估可行。



(a) 图例1



(b) 图例2

图11 相机实际成像样本

6 结论

通过基于坐标变换的像移速度矢量模型,计算空间相机在机动成像情况下视场上各点像速分布情况,以像移失配传递函数(MTF)为约束论证像移速度匹配模式、相机机动角度范围和积分级数之间的关系。分析像移速度匹配误差相关的 $MTF_{\parallel}$ 和偏流角调整残差相关的 $MTF_{\perp}$,以传函下降5%为约束,最高32级积分级数下,机动角度 40° 以内,确定相机在平飞和俯仰成像时可采用同速匹配,侧摆成像采用异速匹配。俯仰成像时,俯仰 30° 成像时最高可采用8级积分级数;俯仰 10° 成像时最高可采用16级积分级数。综合 $MTF_{\parallel}$ 和 $MTF_{\perp}$,通过像移速度异速匹配和偏流角调整,可保证各工况下相机侧摆成像均满足传函要求。俯仰成像时视场两端偏流角残差较大, $MTF_{\perp}$ 退化严重,需根据实际工程要求选取参数。各工况下的在轨成像结果和理论计算相符。通过综合考虑像移速度和偏流角失配对MTF的影响程度,可以全面的衡量空间相机的成像能力和范围,方法对于其他TDICCD相机也具有普适性。

参考文献

- [1] 薛旭成,石俊霞,吕恒毅,等.空间遥感相机TDICCD积分级数和增益的优化设置[J].光学精密工程,2011,19(4):857-863.

(下转第80页)

redundancy model exploiting dynamic reconfigurations [C]. NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems, IEEE, 2008; 26-33.

- [9] 杜新军, 周建华, 胡剑平. 在 SRAM 型 FPGA 中局部重构与配置刷新的兼容方案[J]. 遥测遥控, 2011, 32(2): 48-51.
- [10] 裴元强, 周刚. FPGA 的空间容错技术研究[J]. 微处理机, 2011, 6: 18-20.
- [11] 郝国峰, 王友仁, 孙川. 可重构硬件内建自测试与容错机制研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 856-860.

作者简介

冯汝鹏, 1985 年出生, 硕士研究生, 现就职于中国科

学院长春光学精密机械与物理研究所, 研究实习员。主要研究方向为星上 FPGA 容错性及星上电子学系统。

E-mail: xinlan_feng@163.com

徐伟, 1981 年出生, 博士, 副研究员, 2008 年于中科院长春光机所获博士学位, 主要研究方向为星载一体化卫星综合电子系统及高分辨率空间有效载荷控制器总体设计。

E-mail: xwciomp @126.com

朴永杰, 1984 年出生, 2011 年毕业于中科院长春光机所获工学博士, 副研究员, 主要研究方向为星上电子学系统及图像输处理方面。

E-mail: pyj0314@163.com

(上接第 75 页)

- [2] 李伟雄, 闫得杰, 王栋, 等. 高分辨率空间相机俯仰成像的像移补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2443-2448.
- [3] 武星星, 刘金国. 基于地球椭球的空间相机侧摆摄影像移补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 352-359.
- [4] 李广泽, 孔德柱, 刘金国. 宽覆盖型光学遥感相机侧摆像移速度计算[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 751-757.
- [5] 王家琪, 于平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.
- [6] 卢建, 辛玉林, 陈曾平. 飞机目标红外成像建模与仿真[J]. 电子测量级数, 2010, 33(7): 65-68.
- [7] 李清军, 刘志明, 张雪菲, 等. TDI CCD 全景航空相机行转移信号产生方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(9): 844-849.

[8] 王家琪. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 1998.

[9] 孟中, 甘至宏. 实时小波滤波器在空间相机像移速度滤波中的设计与实施[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 31-35.

[10] 杨秀彬, 贺小军, 张刘, 等. 偏流角误差对 TDICCD 相机成像的影响与仿真[J]. 光电工程, 2008, 35(11): 45-50.

[11] 石俊霞, 李佩玥, 郭永飞, 等. 航天遥感 TDICCD 相机面阵成像模式的实现[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(5): 97-101.

作者简介

武奕楠, 1984 年出生, 助理研究员, 主要研究方向为空间相机电子学成像和像移理论。

E-mail: wyn_buaa@163.com