

宽覆盖型光学遥感相机侧摆像移速度计算

李广泽*, 孔德柱, 刘金国

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:根据宽覆盖相机的特性,分析了其侧摆成像的几何关系。建立了地面物点到相机像面的空间坐标变换关系,在此基础上,推导了基于圆地球模型的相机侧摆像移速度计算公式,并以像移失配传递函数 MTF_{mismatch} 作为评价方法分析了相对像移匹配误差对像质的影响。以某宽覆盖型相机为例,计算了不同侧摆角和不同地心角条件下的像面像移速度。计算结果表明:像面各点的侧摆像移速度均不相同,且变化趋势也不相同,远地点处像移速度相对变化量最大。在侧摆角为 25° 且积分级数为 48 的条件下,像移失配传递函数的最大值为 0.681。外场成像试验结果表明,积分级数控制在 16 级以内时的相机成像质量良好。

关键词:宽覆盖相机;光学遥感相机;侧摆;像移速度;调制传递函数

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130605.0750

Computation of scroll image motion velocity of wide coverage optical remote camera

LI Guang-ze*, KONG De-zhu, LIU Jin-guo

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

* Corresponding author, E-mail: Lgzandrew@tom.com

Abstract: According to the feature of a wide coverage space camera, the geometrical relation of scroll imaging was analyzed. The space coordinate transform process from an object point on the earth to the image point in the focal plane was found. Furthermore, the calculation formulas of scroll image motion velocity were deduced based on a round earth model by using the transform of space coordinate system. The effect of relative image motion match error on the image quality was analyzed by the image motion mismatch modulation transfer function (MTF_{mismatch}). By taking a wide coverage space camera for an example, image motion velocities at different scroll angles and different centrifugal angles were researched. Computation results indicate that the image motion velocities and their variation trends with the scroll angle are different in the different positions of image plane. The MTF_{mismatch} caused by mismatch image motion velocity reaches 0.681 at the perigee if the scroll angle is 25° and the TDI stage is 48. The actual field experimental results show that it is necessary to keep the

收稿日期:2013-07-15;修订日期:2013-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61108066)

TDI stages within 16 to ensure good image quality.

Key words: wide coverage camera; optical remote camera; scroll; image motion velocity; Modulation Transfer Function (MTF)

1 引言

随着空间光学技术的飞速发展,光学遥感相机向着更高分辨率和更大覆盖宽度的趋势发展。宽覆盖型相机的地面分辨率虽然不如高分辨率相机,但凭借其地面覆盖宽度大的突出特点,已逐步成为航天光学遥感相机中的重要分支。自上世纪90年代以来,国际上已经有多颗星载宽覆盖型光学遥感相机在轨应用,如 Landsat 7、EO-1、IRS-1C&1D 等^[1]。宽覆盖型相机具有广泛的应用前景,可应用于科学探测、灾害监测、资源普查等领域。同时,卫星平台轨道和姿态控制能力的不断提升也为在轨采用侧摆成像工作方式提供了技术基础,所以宽覆盖型相机在轨工作时不仅可采用星下点成像方式,也可采用侧摆工作方式。利用侧摆工作方式可进一步扩大对地观测范围并提高对地观测的时间分辨率,充分发挥宽覆盖相机的优势。

宽覆盖型相机进行侧摆成像时,成像距离随卫星侧摆的角度增加而增大,这会引起相机的地面像元分辨率随之下落,直接导致像面影像的像移速度发生较大变化;同时,卫星在轨道面的飞行过程和地球自转等因素都直接影响侧摆工作方式下的像移速度。目前,已有国内相关学者提出了基于平地球的侧摆像移计算模型,但未考虑地球曲率的影响,所以该模型只适用于覆盖宽度较小的光学遥感相机^[2];也有学者提出应用地球椭球模型进行像移计算的方法,但这些方法并不适用于相机侧摆成像方式^[3]。所以,只有分析以上各种因素的影响,建立像移速度模型,才能够准确计算侧摆像移速度。对于空间光学遥感相机来说,导致其在轨成像质量下降的主要因素包括相机温度分布、光学系统入瞳杂光、光机结构稳定性等^[4-6]。除上述因素以外,像移速度失配也是导致成像质量退化的重要因素,只有准确计算侧摆像移速度,才能够减小像移失配值,保证相机在轨工

作时的动态传递函数和成像质量。

本文根据宽覆盖相机侧摆成像的几何关系,分析其侧摆成像特点,建立侧摆像移速度计算模型,为宽覆盖相机的侧摆像移速度计算提供理论依据。

2 侧摆成像几何关系

在侧摆成像与星下点成像这两种不同的工作条件下,相机成像几何关系发生显著变化。下面以卫星平台向飞行方向左侧侧摆作为参考方向,对相机侧摆成像的几何关系进行分析。

如图1所示, S 为相机光学系统主点, ab 为相机焦面, f 为相机主距, c 为像面中心点, H 为相机飞行轨道高度, R 为地球半径, O 为地心, O' 为相机相对地心的星下点, α 为像点 g 视场角, φ 为卫星平台侧摆角, β 为 g 点入射光线 GS 与地球半径 GO 之间夹角, θ 为 GO 与星下点连线 SO 之间的地心角,像面像点 a 为近地点,像面像点 b 为远地点。

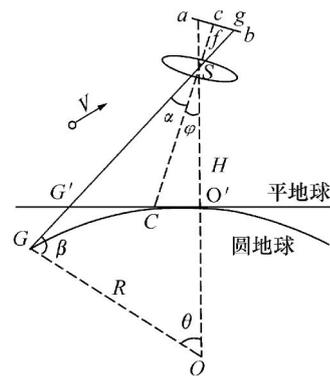


图1 遥感相机侧摆成像示意图

Fig. 1 Scroll imaging scheme of remote camera

分析成像几何关系可采用两种地球参考模型,即平地球模型和圆地球模型。基于这两种模型的像面像点成像斜距明显不同。以像面 g 点为例,基于平地球模型的对地成像斜距是 $G'S$,基于

圆地球模型的成像斜距是 GS 。 GS 和 $G'S$ 之间存在误差 GG' ，且随着侧摆角的增大而增加。由于成像斜距是影响像移速度的主要因素，所以成像斜距误差 GG' 导致基于平地球模型计算像移速度较基于圆地球模型计算得到的像移速度产生一定误差。所以，为保证像移速度计算精度，应以圆地球作为参考模型。

下面以地面物点 G 的坐标为例，建立侧摆成像几何关系。在 $\triangle GOS$ 中， β 可根据正弦定理计算：

$$\frac{R}{\sin(\alpha + \varphi)} = \frac{H + R}{\sin\beta}, \quad (1)$$

像点的像方视场角 α 为：

$$\alpha = \arctan(NA/f), \quad (2)$$

式中： A 为像元尺寸， N 为 g 相对像面中心点 c 的像元偏移量， f 为光学系统焦距。

则地心角 θ 为：

$$\theta = \pi - \varphi - \alpha - \beta. \quad (3)$$

在以星下点 O' 作为原点的地理坐标系中，物点 $G(g_1, g_2, g_3)$ 的地理坐标为：

$$g_1 = 0, \quad (4)$$

$$g_2 = R\sin\theta, \quad (5)$$

$$g_3 = R(\cos\theta - 1), \quad (6)$$

式中， g_1, g_2, g_3 分别表示物点 G 相对星下点 O' 的前向坐标，横向坐标和纵向坐标。

由于 G 点在成像过程中始终与星下点 O' 处于同一平面，所以 g_1 恒为 0；由于像面各点坐标都不相同，造成各像点的视场角和其对应的地心角 θ 也不同，所以像面中各像点对应地面物点的 g_2 和 g_3 也不相同，导致各像点像移速度也是相异的。根据对成像几何关系的分析，利用式(5)和式(6)能够确定相机覆盖宽度内各物点在地理坐标系中的坐标范围，在此基础上才能够计算像面各像点的侧摆像移速度。

3 侧摆像移速度计算

3.1 空间坐标系定义

从地面景物到光学遥感相机的物像转换关系来看，地面地理坐标系向相机坐标系变换过程中共涉及 7 个空间坐标系，分别为地理坐标系 G 、地

球坐标系 E 、地心惯性坐标系 I 、轨道坐标系 B 、卫星平台坐标系 S 、相机坐标系 C 和像面坐标系 P 。各空间坐标系定义如图 2 所示，全部采用右手系^[7-8]。

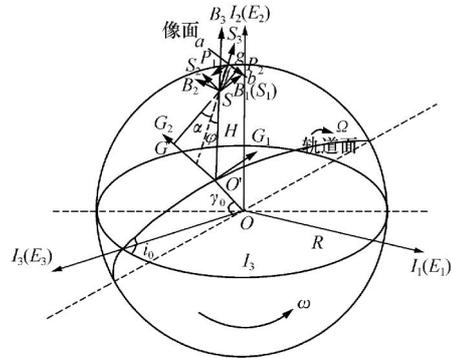


图2 各空间坐标系定义

Fig. 2 Definition of each space coordinate system

各参数定义如下： ω 为地球自转角速度， Ω 为卫星在轨道平面内周期运动的平均角速度， F 为相机光学系统的焦距， H 为卫星本体到星下点的高度， R 为相对地心的地球平均半径， A 为像点相对视场中心的视场角， φ 为卫星平台侧摆角， γ_0 为星下点与升交点之间的地心角， i_0 为轨道平面与赤道平面的夹角。

地心惯性坐标系 $I(I_1, I_2, I_3)$ 原点在地心， I_2 轴指向天顶， I_3 轴指向升交点， I_1 轴和 I_2, I_3 呈右手系。地球坐标系 $E(E_1, E_2, E_3)$ 原点与 I 系重合，在 I 系内绕 $I_2(E_2)$ 按照逆时针方向以角速度 ω 自转。轨道坐标系 $B(B_1, B_2, B_3)$ 的原点在轨道上， B_1 轴指向卫星平台前进方向， B_3 轴指向天顶， B_2 轴与 B_1 轴和 B_3 轴形成的轨道面垂直， B 坐标系沿轨道以角速度 Ω 作轨道运动。地理坐标系 $G(G_1, G_2, G_3)$ 中 G_1, G_2, G_3 表示地面物点偏离星下点的前向、横向和纵向距离， G 坐标系沿 G_3 轴平移 H 后与 B 坐标系重合，卫星平台坐标系 $S(S_1, S_2, S_3)$ 的原点与 B 坐标系的原点重合。当卫星无姿态运动时， S 系与 B 系完全重合，卫星的三轴姿态是指 S 系相对 B 系的三轴姿态。相机坐标系 $C(C_1, C_2, C_3)$ 与卫星平台坐标系在不考虑安装误差情况下是重合的，像面坐标系 P 的原点在像面中心，相机坐标系沿 C_3 轴平移 f ，再对 C_1 和 C_2 进行尺度变换得到 P_1 和 P_2 ，由 P 系中的 P_1 和 P_2 组

成像面。

3.2 物点在相机坐标系中坐标

相机成像过程中, 地球自转角速度和卫星轨道角速度引起物点在各坐标系中的坐标实时变化, 所以应考虑连续动态成像过程, 即建立各坐标系随时间变化的动态转换过程。如图 3 所示, 通过三维空间的 8 次线性变换可将地理坐标系转换为相机坐标系, 转换过程与工作时间 t 直接相关, 与相机像面传感器几何形态无关。

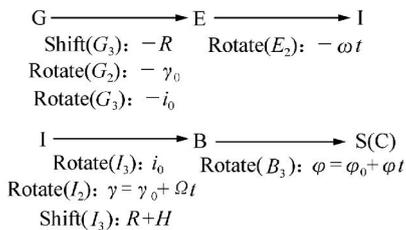


图 3 地理坐标系和相机坐标系之间的变换图
 Fig. 3 Geographical spot coordinate transformations from geographic coordinate system to camera coordinate system

以上变换都是以原点为中心的线性变换, 包括尺度变换、沿坐标轴的平移和绕坐标轴的旋转。由于三维空间中任意点的直角坐标可以采用奇次坐标表示, 所以采用奇次坐标变换的形式计算物各变换矩阵为:

$$\begin{aligned}
 M_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & M_2 &= \begin{bmatrix} \cos\gamma_0 & 0 & \sin\gamma_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\gamma_0 & 0 & \cos\gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 M_3 &= \begin{bmatrix} \cos i_0 & -\sin i_0 & 0 & 0 \\ \sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & M_4(t) &= \begin{bmatrix} \cos\omega t & 0 & \sin\omega t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\omega t & 0 & \cos\omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 M_5 &= \begin{bmatrix} \cos i_0 & \sin i_0 & 0 & 0 \\ -\sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & M_6(t) &= \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 M_7 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(R+H) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & M_8(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

点在相机坐标系中的坐标。物点从地理坐标系到地球坐标系的变换方程为式(7), 从地球坐标系到地心惯性坐标系的变换方程为式(8), 从地心惯性坐标系到轨道坐标系的变换方程为式(9), 从轨道坐标系到相机坐标系的变换方程为式(10)。

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ 1 \end{bmatrix} = M_3 \times M_2 \times M_1 \times \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \\ I_3(t) \\ 1 \end{bmatrix} = M_4(t) \times \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \\ B_3(t) \\ 1 \end{bmatrix} = M_7 \times M_6(t) \times M_5 \times \begin{bmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \\ I_3(t) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \\ C_3(t) \\ 1 \end{bmatrix} = M_8(t) \times \begin{bmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \\ B_3(t) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

经过上述变换,物点 g 在相机坐标系中的坐标为 $C(C_1(t), C_2(t), C_3(t))$ 。坐标变换矩阵 M_1 至 M_8 均是独立矩阵,互不相关。利用卫星姿轨参数可计算各矩阵中的元素,与相机本身的工程参数无关。

3.3 物点在像面坐标系中坐标

根据光学系统确定的物像转换关系和传感器的几何形态,物点在相机坐标系中的坐标向像面坐标系的变换过程如图4所示,坐标变换方程为

$$\begin{array}{l} C \xrightarrow{\quad} P \\ \text{Scale: } f/C_3 \\ \text{Rotate}(C_1): -\pi \\ \text{Rotate}(C_2): -\pi \end{array}$$

图4 物点像面坐标变换图

Fig. 4 Geographical spot coordinate transformations from camera coordinate system to imaging plane coordinate system

式(11)。

$$\begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \\ 1 \end{bmatrix} = M_9(t) \times \begin{bmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \\ C_3(t) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式(11)中的变换矩阵为:

$$M_9(t) = \begin{bmatrix} -f/C_3(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f/C_3(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f/C_3(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

像移速度 v_p 是 v_{p1} 和 v_{p2} 的矢量和,由下式计算得到。

$$v_p = \sqrt{v_{p1}^2 + v_{p2}^2}, \quad (16)$$

由式(14)和式(15)可见,像移速度是 H, φ, i_0

转换矩阵 $M_9(t)$ 的元素与转换矩阵 M_1 至 M_8 的元素相比,其计算过程完全不同。 $M_9(t)$ 中的各元素与相机光学系统的焦距成正比,与物点在相机坐标系中的坐标 $C_3(t)$ 成反比。各物点在地理坐标系中的坐标不同,则其对应的转换矩阵 $M_9(t)$ 中各元素也不同。由于像点与物点之间存在唯一的成像几何关系,所以 $M_9(t)$ 也是随各像点的空间位置不同而发生变化。此特点表明侧摆工作方式下,在相机坐标系中物点与像点之间的成像几何关系是处处相异的。

对式(7)至(11)进行整理后得到地面物点在像面坐标系中的坐标 $P(t)$:

$$P(t) = M_9(t)M_8(t)M_7M_6(t)M_5M_4(t) \cdot M_3M_2M_1G. \quad (12)$$

所以,利用9次奇次坐标变换可得到物点在像面坐标系中的对应坐标。

3.4 像移速度计算模型

像移速度是指卫星飞行过程中,地面物点在相机焦面所成的像在像面移动的速度。像移速度 v_p 在像面坐标系中可分解为垂轨像移速度 v_{p1} 和沿轨像移速度 v_{p2} 。计算 v_{p1} 和 v_{p2} 的方法有微分法和数值差分法^[9],由于微分法较数值差分法的精度高,所以采用微分法计算像点的像移速度 v_{p1} 和 v_{p2} :

$$v_p(t) = \begin{bmatrix} v_{p1}(t) \\ v_{p2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dP_1(t)/dt \\ dP_2(t)/dt \end{bmatrix}. \quad (13)$$

将式(12)代入,计算 t 为0时刻的值,并化简后得到:

$$\begin{aligned} v_{p1} &= \{f(g_3 + R) [\cos(i_0)\omega - \Omega] + \\ & f\omega g_2 (\cos(i_0 + \gamma_0) - \cos(i_0 - \gamma_0))\} / [\sin(\varphi)g_2 - \cos(\varphi)g_3 + \cos(\varphi)H], \quad (14) \\ v_{p2} &= \{ (fg_3\omega Rg_2 - fg_2\omega RH + fg_2^3\omega) [-\cos(-\gamma_0 + \varphi + i_0) + \cos(\gamma_0 + \varphi - i_0) + \\ & \cos(-\gamma_0 + \varphi - i_0) - \cos(\gamma_0 + \varphi + i_0)] - fg_2g_3\omega H \cos(-\gamma_0 + \varphi - i_0) + \\ & (fg_2^2\omega H - fRH^2\omega + 2fRg_3\omega H) [\sin(\gamma_0 + \varphi + i_0) + \sin(-\gamma_0 + \varphi + i_0) - \sin(\gamma_0 + \varphi - i_0) - \\ & \sin(-\gamma_0 + \varphi - i_0)] \} / \{ 3g_2g_3^2 - g_2^3 \sin 3\varphi - 6g_3g_2H(\sin 3\varphi + \sin \varphi) + \\ & 3g_2H^2(\sin 3\varphi + \sin \varphi) + (3g_3^3 + 3g_2^2g_3)\sin \varphi + (3H^3 - 3g_3^3 - 9g_3H^2 - 3g_2^2g_3 + \\ & 3g_2^2H + 9g_3^2H)\cos \varphi + (H^3 - g_3^3 - 3g_3H^2 + 3g_2^2g_3 - 3g_2^2H + 3g_3^2G)\cos 3\varphi \}. \quad (15) \end{aligned}$$

等姿轨变量和坐标变量 g_2, g_3 的多元函数。相机在轨成像过程中姿轨变量的值可以通过卫星平台实时发送的数据提取,而坐标变量可利用式(1)~(6)计算得到,所以相机内控制单元可利用上

述算法进行实时计算。

由于地面物点坐标 g_2 和 g_3 处处相异,所以像面各点在同一摄像时刻的像移速度互不相同^[10-11];在不同摄像时刻,由于卫星沿轨飞行造成星下点相对升交点的地心角 γ_0 不断变化,像面同一点的像移速度也发生变化。

4 相对像移匹配残差对传递函数的影响

考虑相机在轨工作过程中,地心角 γ_0 的不断变化造成像移速度实时变化且在像面不同处的变化趋势是不同的,如果不实时调整相机工作的行频,则会出现像移速度失配问题。失配值为像移速度匹配残差,这种匹配残差会造成相机动态传递函数下降,导致相机在轨成像质量退化。对于采用 TDICCD 作为成像传感器的光学遥感相机来说,像质退化程度更加严重^[12-13]。像质退化的程度可用像移失配传递函数 MTF_{mismatch} 描述,计算方法如下式:

$$MTF_{\text{mismatch}} = \frac{\sin(\pi s f_c)}{\pi s f_c}, \quad (17)$$

式中: f_c 为空间频率; s 为由像移速度匹配残差引起的位移残差。

通常, s 可由下式计算:

$$s = \alpha M \frac{\Delta v_p}{v_p}, \quad (18)$$

式中: α 为像元尺寸, M 为积分级数, v_p 为像点的像移速度, Δv_p 为像移速度匹配残差, $\Delta v_p/v_p$ 为相对像移速度匹配残差。由于在奈奎斯特频率处 $f_c = 1/2\alpha$, 所以像移失配传递函数为:

$$MTF_{\text{mismatch}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi M \Delta v_p}{2v_p}\right)}{\frac{\pi M \Delta v_p}{2v_p}}. \quad (19)$$

5 计算分析与试验验证

以某相机为例,对其侧摆后的像面像移速度进行计算,此相机在轨工作时的地面覆盖宽度达到 900 km,属于典型的宽覆盖型相机。为覆盖像

移速度的整体变化范围,选取对应地面近地点和远地点的像点位置进行计算,其侧摆方向为沿飞行方向左侧摆。计算采用参数如下:

H 为 645 km, f 为 555 mm, α 最大值为 70° , A 为 $13 \mu\text{m}$, 地球平均半径 R 为 6 370 km, 像元总数为 60 000, N 最大值为 30 000。

相机侧摆 0° 、 15° 、 25° 条件下的像面像移速度计算结果如图 5 所示,近地点(0 像元)处像移速度最大,远地点(60 000 像元)处像移速度最小,像移速度从近地点到远地点是单调连续减小的。从像移速度随侧摆角 φ 的变化趋势来看,近地点和远地点处的像移速度变化相对较大。

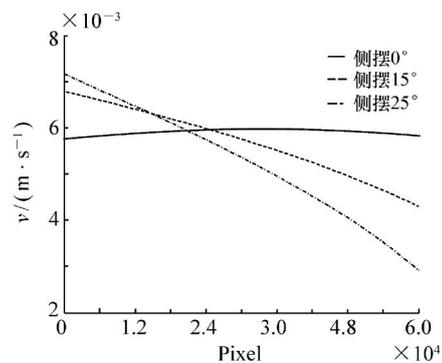


图5 侧摆 0° 、 15° 、 25° 条件下像面像移速度

Fig. 5 Image motion velocities at scroll angle of 0° , 15° and 25°

近地点像移速度计算结果如图 6 所示。地心角 γ_0 在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 内变化时,近地点像移速度随 γ_0 增加而减小;近地点像移速度随侧摆角 φ 的增大而增加;当侧摆角 φ 在 $[0^\circ, 25^\circ]$ 内连续变化时,像移速度变化范围为 $[5.81, 7.26] (10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$, 相对变化量最大值为 24.9%。

远地点像移速度计算结果如图 7 所示,地心角 γ_0 在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 范围内变化时,远地点像移速度随 γ_0 增加而减小;远地点像移速度随侧摆角 φ 的增大而减小,当侧摆角 φ 在 $[0^\circ, 25^\circ]$ 范围内连续变化时,像移速度变化范围为 $[3.65, 5.97] (10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$, 相对变化量最大值为 63.5%。

对比图 6 和图 7 可知,像移速度匹配残差值 Δv_p 随侧摆角 φ 的增加而增加。从全部像点的像移速度来看,远地点处像点像移速度最小,相对而言远地点处的相对像移速度匹配残差 $\Delta v_p/v_p$ 最

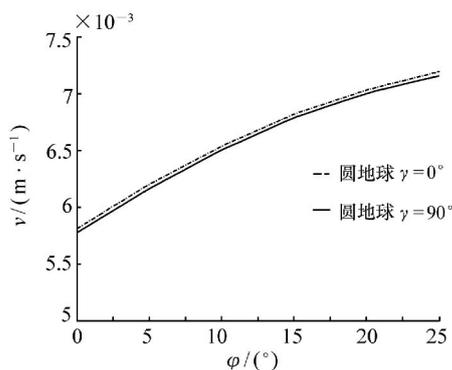


图6 近地点像移速度

Fig. 6 Image motion velocities at perigee

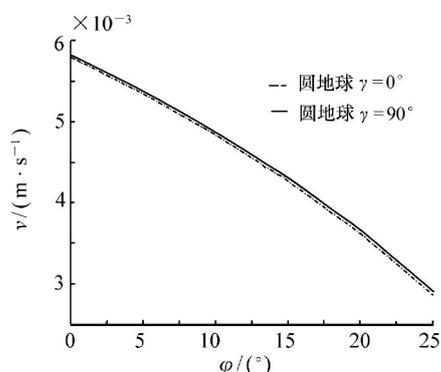


图7 远地点像移速度

Fig. 7 Image motion velocities at apogee

大,所以远地点处像移失配传递函数值 MTF_{mismatch} 最大,此位置处成像的像质退化程度最严重。在侧摆角 φ 为 25° 的条件下,远地点处相机 MTF_{mismatch} 计算结果如图8所示。随着地心角 γ_0 的增加,相机的 MTF_{mismatch} 不断下降,且下降程度随积分级数的增加而更加剧烈。在侧摆 25° 且积分级数为48的条件下, MTF_{mismatch} 的值为0.681。

通常认为调制传递函数下降5%以内对成像质量无本质影响,作为判断相对像移速度匹配残差的约束。按照此标准判断,在卫星侧摆 25° 且相机不调整积分级数的条件下,积分级数应该控制在16以内,以保证相机成像质量。利用相机进行外场成像试验,采用调整转台速度模拟地心角变化导致像移速度失配的试验方法,采集图像如图9和图10所示。对图像进行传递函数分析,结果表明积分级数为48级时的相机传递函数较16级时下降0.678,与图8中的分析结果相符合。

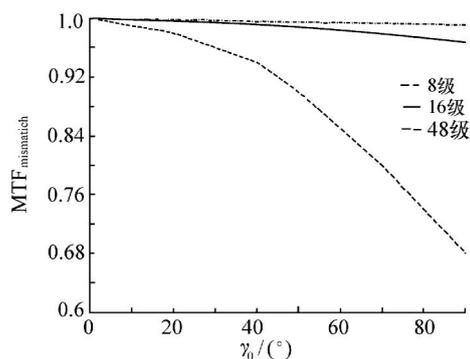
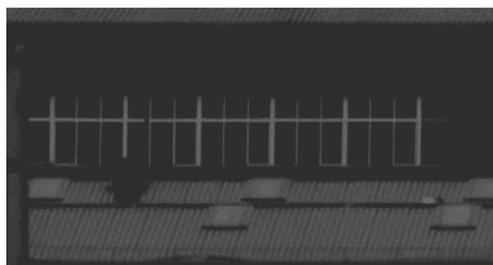
图8 MTF_{mismatch} 随地心角 γ_0 变化曲线Fig. 8 MTF_{mismatch} descending curves with γ_0 

图9 积分级数为16的图像

Fig. 9 Image with TDI stage of 16

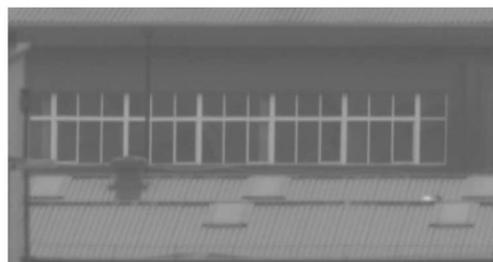


图10 积分级数为48的图像

Fig. 10 Image with TDI stage of 48

6 结论

本文分析了宽覆盖相机侧摆成像几何关系,利用空间坐标系变换方法推导了基于圆地球的相机侧摆像移计算公式。以某宽覆盖相机为例,分析了像面像移速度与侧摆角之间的关系,并以像移失配传递函数作为评价方法对相机图像质量退化的程度进行分析。分析结果表明,像面不同位

置处的像移速度随着侧摆角的增加呈现相反的变化趋势,近地点像移速度不断增加而远地点像移速度不断减小;在侧摆 25°条件下,远地点处像移

速度相对变化量最大,达到 63.5%。分析及实验室测试结果表明,在侧摆 25°条件下,为保证相机成像质量,积分级数应该控制在 16 以内。

参考文献:

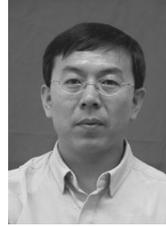
- [1] 姜景山,王文奎,都亨. 空间科学与应用[M]. 北京:科学出版社,2001:113-114.
JIANG J SH, WANG W K, DU H. *Space Science and Application*[M]. Beijing: Science Press, 2001:113-114. (in Chinese)
- [2] 马天波,郭永飞,李云飞. 科学级 TDICCD 相机的行频精度[J]. 光学精密工程,2010,18(9):2028-2035.
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(9):2028-2035. (in Chinese)
- [3] 武星星,刘全国. 应用地球椭球的三线阵立体测绘相机像移补偿[J]. 光学精密工程,2011,19(8):1794-1800.
WU X X, LIU J G. Image motion compensation of three-line stereo mapping camera using earth ellipsoid[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(8):1794-1800. (in Chinese)
- [4] 巩盾,田铁印,王红. 温度环境下空间遥感光学系统成像质量的检测[J]. 中国光学,2012,5(6):602-609.
GONG D, TIAN T Y, WANG H. Image quality testing of space remote sensing optical system under thermal environment [J]. *Chinese Optics*, 2012,5(6):602-609. (in Chinese)
- [5] 田铁印,王红,冯晟杰. 三线阵测绘相机光学系统的杂光分析与计算[J]. 中国光学,2012,5(6):583-589.
TIAN T Y, WANG H, FENG SH J. Analysis and calculation on stray light of three line array mapping camera[J]. *Chinese Optics*, 2012,5(6):583-589. (in Chinese)
- [6] 田铁印,王红,吴国栋. 杂光对三线阵相机光学系统成像的影响[J]. 液晶与显示,2012,27(6):847-851.
TIAN T Y, WANG H, WU G D. Impact of stray light on image of three line array camera[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2012,27(6):847-851. (in Chinese)
- [7] 黄群东,杨芳,赵健. 姿态对地指向不断变化成像时的像移速度计算[J]. 光学精密工程,2012,20(12):2812-2819.
HUANG Q D, YANG F, ZHAO J. Calculation of image motion velocity for agile satellite dynamic imaging to changed continuously attitude point[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(12):2812-2819. (in Chinese)
- [8] 王家骥,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.
WANG J Q, YU P, YAN CH X, et al. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004,24(12):1585-1589. (in Chinese)
- [9] 王运,颜昌翔. 基于差分法的空间相机像移速度矢量计算[J]. 光学精密工程,2011,19(5):1955-1960.
WANG Y, YAN CH X. Computation of image motion velocity vector for space camera based on difference method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(5):1955-1960. (in Chinese)
- [10] 孔德柱,刘全国,吕世良,等. 空间相机像移速度计算方法及 DSP 实现[J]. 光学精密工程,2009,17(8):1935-1941.
KONG D ZH, LIU J G, LÜ SH L, et al. Calculation method for image motion speed of space camera and DSP-based implementation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(8):1935-1941. (in Chinese)
- [11] 郭永飞. 侧摆成像下多片 TDICCD 拼接相机分段变速研究[J]. 光机电信息,2010,27(10):32-38.
GUO Y F. Research on subsection image motion mismatching for multi-TDICCD mosaic camera of scroll imaging [J]. *OME Information*, 2010,27(10):32-38. (in Chinese)
- [12] 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):857-853.
XUE X CH, SHI J X, LÜ H Y, et al. Optimal set of TDI CCD inergration stages and gains of space remote sensing cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(4):857-853. (in Chinese)
- [13] 李晓云,杜伟. 星载 TDICCD 相机像移对成像质量的影响分析[J]. 航天器工程,2011,20(3):51-56.
LI X Y, DU W. Analysis of Image motion effect on satellite tdiccd camera image quality [J]. *Spacecraft Eng.*, 2011,20

(3):857-853. (in Chinese)

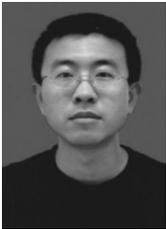
作者简介:



李广泽(1976—),男,吉林长春人,博士,副研究员,硕士生导师,1999年于吉林工业大学获得学士学位,2002年于吉林大学获得硕士学位,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间遥感相机嵌入式控制系统应用与视频图像处理等方面的研究。E-mail: Lgzandrew@tom.com



刘金国(1968—),男,吉林蛟河人,硕士,研究员,1991年于吉林工业大学获得学士学位,1994年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事空间遥感与图像处理等方面的研究。E-mail: liujg@ciomp.ac.cn



孔德柱(1980—),男,黑龙江肇东人,本科,助理研究员,2004年于吉林大学获得学士学位,主要从事航天器嵌入式软件设计与应用等方面的研究。E-mail: shangguanren8405@sina.com