

文章编号 1004-924X(2014)02-0351-09

# 基于地球椭球的空间相机侧摆摄影像移补偿

武星星\*, 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:** 高分辨率空间相机采用侧摆摄影模式来提高时间分辨率, 而地球椭球等因素会使空间相机在侧摆摄影时不同视场位置的像移速度和偏流角不同。针对这一问题, 推导了基于地球椭球的空间相机在侧摆摄影时不同视场位置的像移速度和偏流角计算公式。以某立体测绘卫星上携带的高分辨率相机为例, 分析了侧摆摄影时统一和分片调整行周期与偏流角对调制传递函数的影响。分析和在轨测试实验表明, 以传递函数下降 5% 为约束, 侧摆 10° 摄影时, 若积分级数大于 22 级, 则应分片调整行周期。和统一调整行周期相比, 积分级数为 32 级时, 分片调整行周期沿轨方向的传递函数下降从 10.28% 减少到 0.11%。而积分级数固定为 16 级时, 统一调整行周期时的侧摆角不应超过 13.2°。

**关键词:** 空间相机; 侧摆摄影; 像移; 地球椭球; 调制传递函数

**中图分类号:** V443.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0351

## Image motion compensation of scroll imaging for space camera based on earth ellipsoid

WU Xing-xing\*, LIU Jin-guo

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

\* Corresponding author, E-mail: starglare@126.com

**Abstract:** The scroll imaging of a space camera can improve its temporal resolution. However, the space camera shows different image motion speeds and drift angles at different positions of field of view in the scroll imaging because of the earth ellipsoid and varied scroll angles. To overcome the problem, the formulas of image motion speeds and drift angles at different positions of field of view were deduced for the scroll imaging based on earth ellipsoid. By taking a high resolution space camera carried on a stereoscopic mapping satellite for an example, the influence of row transfer periods and drift angles adjusting uniformly and individually on Modulation Transfer Function(MTF) was analyzed. Analysis results and on-orbit testing experiments under a constraint of 5% drop for the MTF indicate that the row transfer periods should be adjusted individually if the integral stages are more than 22 in scroll imaging with scroll angle of 10°. In comparison to adjusting row transfer periods uniformly, the drop of MTF along the track direction would be cut down from 10.28% to 0.11% by adjusting row transfer periods individually. If integral stages are fixed to 16, the scroll angle by adjust-

收稿日期: 2013-08-20; 修订日期: 2013-10-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61108066); 吉林省科技发展计划资助项目(No. 20130101028j-c)

ting row transfer periods uniformly should not be over  $13.2^\circ$ .

**Key words:** space camera; scroll imaging; image motion; earth ellipsoid; Modulation Transfer Function (MTF)

## 1 引言

目前,空间遥感相机的空间分辨率和光谱分辨率提高得很快,为了在战时或发生自然灾害时能快速获取目标区域影像,对空间相机的时间分辨率也有了更高的要求。增加组网卫星数量、采用侧摆摄影模式和扩大空间相机的视场角是在维持卫星轨道高度不变的前提下提高空间相机时间分辨率的主要方法。高分辨率空间相机由于焦距长、视场角较小,多采用侧摆摄影模式来缩短重访周期,满足应急遥感观测的需要。以 IKONOS 卫星为例,当侧摆  $26^\circ$  摄影时其重访周期由 141 天缩短至 3 天<sup>[1]</sup>。

空间相机的像移由空间相机和地物点的相对运动引起,空间相机轨道运动引起的像移速度主要和相机与地物点的距离等有关,而地球自转引起的像移速度和方向主要和地物点的经度和纬度等有关。当空间相机采用侧摆摄影模式时,视场中心与视场边缘对应的地物点远离星下点,且具有较大的经度差和纬度差。而地球的形状为椭球体,地物点和相机的距离随侧摆角和星下点与升交点夹角等变化,因此目前已有的基于圆地球的星下点成像空间相机像移计算模型<sup>[2]</sup>将不再适用。国内外学者研究了侧摆成像时不同视场位置的异速问题<sup>[3-7]</sup>,也有学者提出采用差分法来进行像移计算<sup>[8]</sup>,但这些方法都将地物点投影在圆球体或平面上,没有考虑地球椭球的影响。本文在分析空间相机侧摆摄影模式工作原理的基础上,推导基于地球椭球的空间相机侧摆摄影各视场位置的像移速度和偏流角计算公式。

高分辨率空间相机的焦面较长,一般由多片 CCD 在像面基板上拼接而成<sup>[9]</sup>,因而可以统一或分片调整各片 CCD 的运行周期来进行像移补偿,而偏流角由卫星或偏流角调整机构统一调整<sup>[10]</sup>。不同的运行周期和偏流角调整方式导致的像移匹配残差不同,对成像质量的影响也不同。空间相

机的成像质量通常用奈奎斯特(Nyquist)空间频率下的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)来评价,本文以某立体测绘卫星上携带的高分辨率相机为例,对侧摆摄影时统一和分片调整行周期与偏流角对 MTF 的影响进行分析,以使空间相机在不同摄影模式下采取正确的方式和参数进行像移补偿。

## 2 基于地球椭球的空间相机侧摆摄影像移计算

图 1 所示为某立体测绘卫星上携带的高分辨率相机侧摆摄影的工作原理,从该立体测绘卫星的 02 星开始增加了侧摆摄影模式以提高时间分辨率。从图 1 中可以看出,在该高分辨率相机侧摆摄影过程中,视场中心和视场边缘对应的地物点远离星下点。由于地球的形状为椭球体,不同视场位置对应的地物点和空间相机投影中心的距离随侧摆角、视场角和轨道高度的不同而变化。侧摆角越大,视场角越大,轨道高度越高,地球椭球导致的不同视场位置与投影中心的距离差越大,同时不同视场位置对应的地物点的经度差和纬度差也越大。而地球自转在地物点引起的线速度的大小和方向与地物点的纬度和经度有关。

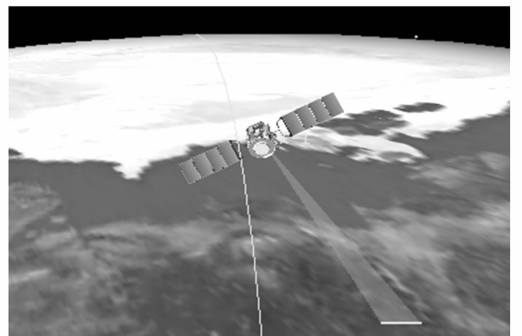


图 1 高分辨率相机侧摆摄影原理

Fig. 1 Scroll imaging principle of high-resolution camera

图 2 所示为基于地球椭球的空间相机侧摆摄影像移计算原理。图中  $O-XYZ$  和  $O'-X'Y'Z'$  分别为地心赤道惯性坐标系和地理坐标系。 $O$  为地心,  $X$  轴指向春分点,  $Z$  轴指向北极,  $O'$  为星下点,  $X'$  轴指向天顶,  $Z'$  轴指向卫星飞行方向。 $O''-X''Y''Z''$  为侧摆光轴中心坐标系,  $O''$  为侧摆摄影时相机光轴与地球表面的交点,  $X''$  轴沿光轴指向相机投影中心  $Q$ ,  $Z''$  轴与  $Z'$  轴同向, 指向卫星飞行方向。 $\gamma$  为星下点与升交点地心角,  $i_0$  为轨道倾角,  $\Omega$  为轨道面升交点赤经。 $P$  为侧摆角为  $\tau$  时半视场角  $\theta$  对应的地物点,  $P'$  为与  $P$  对应的像点, 规定  $O''$  在  $Y'$  轴上的坐标为正时  $\tau$  取正值,  $P$  在  $Y''$  轴上的坐标为正时  $\theta$  取正值。

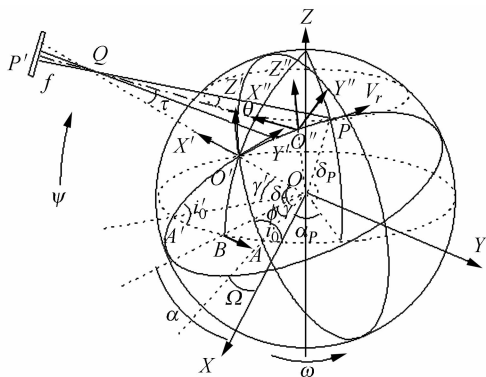


图 2 基于地球椭球的空间相机侧摆摄影像移计算原理  
Fig. 2 Imaging motion computing principle of space camera scroll imaging based on earth ellipsoid

设卫星轨道运动角速度和地球自转角速度分别为  $\psi$  和  $\omega$ , 由于地物点  $P$  与投影中心  $Q$  的相对运动是由卫星的轨道运动和地球自转合成的, 因此在计算中视  $Q$  为静止, 而地物点  $P$  绕地球自转轴以  $\omega$  角速度转动, 同时沿轨道运动方向绕地心以  $-\psi$  角速度转动, 根据合成运动求得物移速度后由投影几何关系即可求得像移速度。由于立体测绘卫星平台能够实现姿态稳定度优于  $0.0002$  ( $^\circ$ )/s, 指向精度优于  $0.02^\circ$ 。根据文献[11]的研究, 即使积分级数取 96 级, MTF 的下降也不超过  $1\%$ [11], 因此在计算中忽略了姿态对像移速度的影响。

从图 2 可以看出, 线阵 CCD 的投影面  $PA'O$  的方位随星下点与升交点间地心角  $\gamma$  变化, 根据直角球面三角公式, 投影面  $PA'O$  与轨道面的夹

角  $i_0'$  为:

$$\cos i_0' = \cos \gamma \cdot \sin(\pi - i_0), \quad (1)$$

采用 WGS84 地球椭球模型, 椭球方程为:

$$\frac{x^2 + y^2}{R_1^2} + \frac{z^2}{R_2^2} = 1, \quad (2)$$

其中:  $R_1 = 6\,378\,137$  m,  $R_2 = 6\,356\,752$  m。

投影面  $PA'O$  与地球椭球的交线为一个椭圆, 椭圆方程为:

$$\frac{x_C^2}{R_1^2} + \frac{y_C^2}{R_3^2} = 1, \quad (3)$$

其中:

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{\sqrt{(R_1 \sin i_0')^2 + (R_2 \cos i_0')^2}}, \quad (4)$$

将式(1)代入式(4)得:

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{\sqrt{R_1^2 + (R_2^2 - R_1^2) \cdot \cos^2 \gamma \cdot \sin^2 i_0}}. \quad (5)$$

从式(3)~(5)可以看出, 该椭圆的形状随星下点与升交点间地心角  $\gamma$  变化, 而轨道面与地球椭球的交线形成的椭圆的形状和方位都不变[12]。图 3 所示为侧摆摄影时投影面在地球椭球上的截面图。

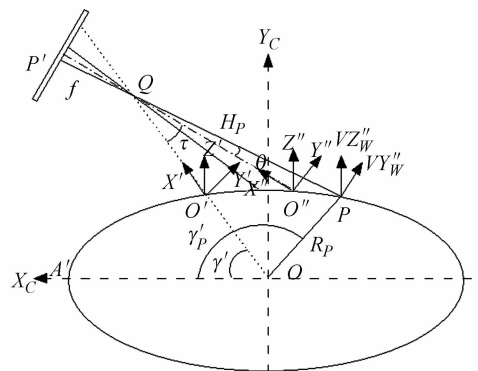


图 3 侧摆摄影时投影面在地球椭球上的截面图  
Fig. 3 Cross-section drawing of projection plane on earth ellipsoid for scroll imaging

根据图 3, 设  $RH$  为利用星载 GPS 接收机测得的卫星与地心的距离  $QO$ , 地物点  $P$  距地心  $O$  的距离  $R_P$  可以通过求解方程组(6)得到:

$$\begin{cases} \frac{RH \cdot \sin \gamma' - y_C}{RH \cdot \cos \gamma' - x_C} = \tan(\gamma' - \tau - \theta) \\ x_C^2 + y_C^2 = R_P^2 \\ \frac{x_C^2}{R_1^2} + \frac{y_C^2}{R_3^2} = 1 \end{cases}, \quad (6)$$

则地物点  $P$  与空间相机投影中心  $Q$  的距离

$$H_P = RH \cdot \cos(\theta + \tau) - \sqrt{RH^2 \cdot \cos^2(\theta + \tau) - RH^2 + R_P^2}. \quad (7)$$

地物点  $P$  与投影面的升交点  $A'$  的地心角:

$$\gamma_P' = \gamma' + \arccos \frac{R_P^2 + RH^2 - H_P^2}{2RH \cdot R_P}. \quad (8)$$

地物点  $P$  绕地心以  $-\psi$  角速度转动产生的物移速度  $vZ_O''$  的方向与  $O''Z''$  轴平行, 计算公式为:

$$vZ_O'' = -R_P \cdot \psi \cdot \frac{R_P^2 + RH^2 - H_P^2}{2RH \cdot R_P}. \quad (9)$$

地物点  $P$  绕地球自转轴以  $\omega$  为角速度的转动产生的物移速度  $v_r$  平行于赤道面, 其在地心赤道惯性坐标系  $X$  轴和  $Y$  轴的分量分别由式(10)和式(11)计算得到, 其在  $Z$  轴的分量为 0:

$$vX_r = -R_P \cdot \cos \delta_P \cdot \omega \cdot \sin \alpha_P, \quad (10)$$

$$vY_r = R_P \cdot \cos \delta_P \cdot \omega \cdot \cos \alpha_P, \quad (11)$$

式中:  $\alpha_P$  和  $\delta_P$  分别为地物点  $P$  在赤道惯性坐标系中的赤经和赤纬, 已知  $i_0'$  和  $\gamma_P'$  利用直角球面三角公式可以求得。

已知  $v_r$  在赤道惯性坐标系各坐标轴上的分量, 当建立了由赤道惯性坐标系到侧摆光轴中心坐标系  $O'-X''Y''Z''$  的旋转矩阵, 即可求得  $v_r$  在坐标系  $O'-X''Y''Z''$  各坐标轴上的分量。从图 2 可以看出, 需要经过 4 次旋转。首先将地心赤道惯性坐标系绕  $Z$  轴由  $Y$  向  $X$  转  $-\Omega$ , 接着绕  $X$  轴由  $Z$  向  $Y$  转  $(\pi/2 - i_0)$ , 然后绕  $Y$  轴由  $Z$  向  $X$  转  $-\gamma$ , 此时与地理坐标系  $O'X'Y'Z'$  同向。最后绕  $Z'$  轴由  $Y'$  向  $X'$  转  $\tau$  后, 与侧摆光轴中心坐标系  $O'X''Y''Z''$  各坐标轴同向。根据旋转顺序,  $v_r$  在侧摆光轴中心坐标系  $X''$ 、 $Y''$ 、 $Z''$  轴上的分量  $vX_r''$ 、 $vY_r''$ 、 $vZ_r''$  可以由公式(12)计算得到:

$$\begin{bmatrix} vX_r'' \\ vY_r'' \\ vZ_r'' \end{bmatrix} = \mathbf{RM}_{Z'} \cdot \mathbf{RM}_{Y'} \cdot \mathbf{RM}_{X'} \cdot \mathbf{RM}_Z \cdot \begin{bmatrix} vX_r \\ vY_r \\ vZ_r \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{RM}_{Z'}$ 、 $\mathbf{RM}_{Y'}$ 、 $\mathbf{RM}_{X'}$  和  $\mathbf{RM}_Z$  依次为绕  $Z'$  轴、 $Y$  轴、 $X$  轴和  $Z$  轴的旋转矩阵, 如式(13)~(16)所示:

$$\mathbf{RM}_{Z'} = \begin{bmatrix} \cos \tau & -\sin \tau & 0 \\ \sin \tau & \cos \tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{RM}_{Y'} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{RM}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin i_0 & -\cos i_0 \\ 0 & \cos i_0 & \sin i_0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{RM}_Z = \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega & 0 \\ -\sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

则地物点  $P$  在沿轨即  $Z''$  轴方向的物移速度为:

$$vZ_w'' = vZ_O'' + vZ_r''. \quad (17)$$

地物点  $P$  在垂轨即  $Y''$  轴方向的物移速度即为  $vY_r''$ 。设空间相机的焦距为  $f$ , 由公式(7)可以计算得到  $H_P$ , 则地物点  $P$  对应的像点  $P'$  在沿轨方向和垂轨方向的像移速度分别为:

$$v_{\text{along}}^r = (vZ_O'' + vZ_r'') \cdot \frac{f}{H_P \cdot |\cos \theta|}, \quad (18)$$

$$v_{\text{across}}^r = vY_r'' \cdot \frac{f}{H_P \cdot |\cos \theta|}, \quad (19)$$

像点  $P'$  处的像移速度主向量值和偏流角分别为:

$$v_r = \sqrt{v_{\text{along}}^r{}^2 + v_{\text{across}}^r{}^2}, \quad (20)$$

$$\beta_r = \arctan \frac{v_{\text{across}}^r}{v_{\text{along}}^r}. \quad (21)$$

### 3 行周期与偏流角调整方式对 MTF 的影响

为达到地面像元分辨率的要求, 高分辨率空间相机的焦距很长, 同时为了保证视场角和地面覆盖宽度, 焦面多采用多片 CCD 在像面基板上拼接而成。在摄影过程中空间相机控制器根据计算得到的像移速度调整 CCD 的行转移周期与之匹配, 进行电子式的像移补偿<sup>[13]</sup>。各片 CCD 的行周期可以统一或分片调整, 而偏流角由卫星姿控系统 and 像面偏流角调整机构统一调整。以某立体测绘卫星上携带的高分辨率相机为例, 采用基于地球椭球的空间相机侧摆摄影像移计算方法, 对侧摆摄影时统一和分片调整行周期与偏流角对调制传递函数的影响进行分析, 理论分析结果如图 4~11 所示。

该立体测绘卫星采用太阳同步圆轨道, 轨道高度 500 km, 高分辨率相机视场角  $6.88^\circ$ , 焦距  $f = 2.1875 \text{ m}$ 。图 4 为侧摆角  $\tau = 30^\circ$  时像移速度随星下点与升交点夹角  $\gamma$  的变化曲线。

从图 4 可以看出, 当侧摆  $30^\circ$  摄影时, 0 视场

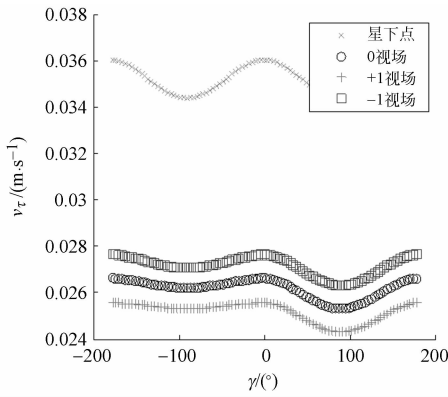


图 4  $\tau=30^\circ$ 时像移速度随星下点与升交点夹角变化曲线

Fig. 4 Image motion velocity curves along with  $\gamma$  as  $\tau=30^\circ$

( $\theta=0^\circ$ )、+1 视场( $\theta=3.44^\circ$ )和-1 视场( $\theta=-3.44^\circ$ )处的像移速度都远小于星下点的像移速度。不同视场位置的像移速度不同,+1 视场的像移速度最小。而当  $\gamma=90^\circ$ 时各个视场位置的像移速度最小。图 5 为侧摆角  $\tau=30^\circ$ 时偏流角随星下点与升交点夹角  $\gamma$  的变化曲线。

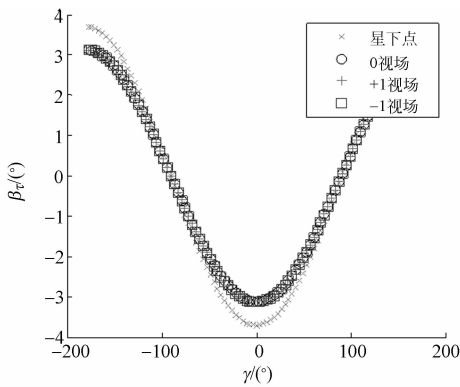


图 5  $\tau=30^\circ$ 时偏流角随  $\gamma$  的变化曲线

Fig. 5 Drift angle curves along with  $\gamma$  as  $\tau=30^\circ$

图 6 为 +1 视场和-1 视场与 0 视场偏流角之差随  $\gamma$  的变化曲线。从图 5 和图 6 可以看出,0 视场、+1 视场和-1 视场处的偏流角和星下点的偏流角相差较大,而当  $\gamma=0^\circ$ 即在赤道附近+1 视场和-1 视场与 0 视场的偏流角之差最大。图 7 为  $\gamma=90^\circ$ 时像移速度随侧摆角的变化曲线,图 8 为  $\gamma=0^\circ$ 时偏流角随侧摆角的变化曲线。

从图 7 和图 8 可以看出,随着侧摆角的增大,边缘视场与中心视场的像移速度之差和偏流角之

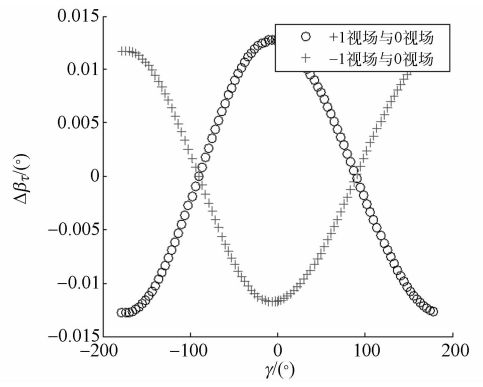


图 6  $\tau=30^\circ$ 时偏流角之差随  $\gamma$  的变化曲线

Fig. 6 Drift angle differences along with  $\gamma$  as  $\tau=30^\circ$

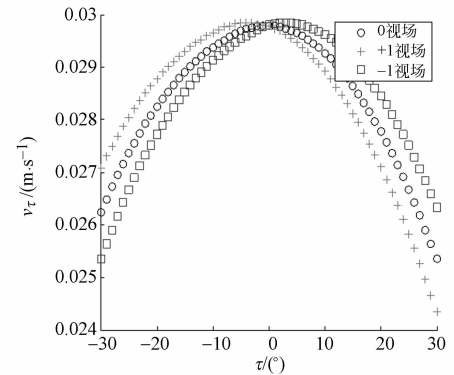


图 7  $\gamma=90^\circ$ 时像移速度随侧摆角的变化曲线

Fig. 7 Image motion velocity curves along with  $\tau$  as  $\gamma=90^\circ$

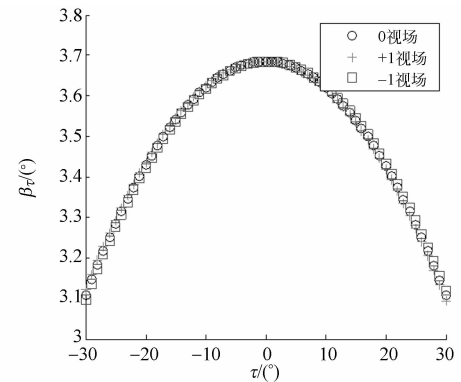


图 8  $\gamma=0^\circ$ 时偏流角随侧摆角的变化曲线

Fig. 8 Drift angle curves along with  $\tau$  as  $\gamma=90^\circ$

差同时增大。

高分辨率相机的焦平面采用 8 片 DALSA 公司生产的 TDI CCD 交错拼接而成,每片 CCD 含 4 096 个有效像元,第一片 CCD 的第一像元对应 +1 视场,第 8 片 CCD 的第 4 096 像元对应-1 视场。当统一调整行周期时只需计算 0 视场的像

移速度,各片 CCD 都采用 0 视场像移速度对应的行周期。而分片调整行周期时,各片 CCD 用 CCD 中心位置的像移速度来计算行周期并独立调整。偏流角根据计算得到的 0 视场的偏流角由卫星和像面偏流调整机构统一调整。像移匹配残差引起的奈奎斯特(Nyquist)空间频率下沿轨和垂轨方向的调制传递函数(MTF)分别由式(22)和(23)计算<sup>[14-15]</sup>:

$$MTF_{\text{along}} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} \frac{N \cdot \Delta v}{v})}{\frac{\pi}{2} \frac{N \cdot \Delta v}{v}}, \quad (22)$$

$$MTF_{\text{along}} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} N \cdot \tan \beta_c)}{\frac{\pi}{2} N \cdot \tan \beta_c}, \quad (23)$$

其中: $N$ 为积分级数, $\Delta v/v$ 为像移速度匹配相对误差, $\beta_c$ 为偏流角调整残差。图9为当侧摆角 $\tau = 10^\circ$ 、积分级数 $N = 32$ ,分别采用统一调整和分片调整两种行周期调整模式时不同像元位置 $MTF_{\text{along}}$ 对比。

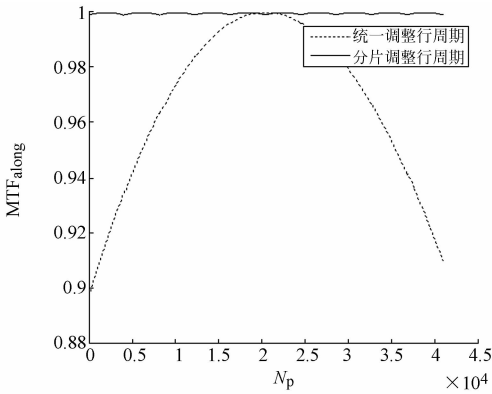
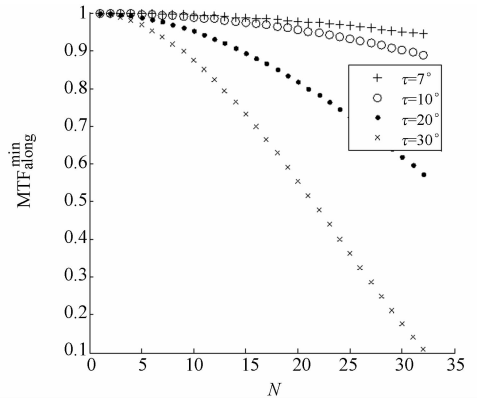


图 9  $\tau = 10^\circ, N = 32$  时不同像元位置的  $MTF_{\text{along}}$   
Fig. 9  $MTF_{\text{along}}$  of different pixels as  $\tau = 10^\circ$  and  $N = 32$

从图9可以看出,和统一调整行周期相比,分片调整行周期时各个像元位置的 $MTF_{\text{along}}$ 都明显得到提高。但分片调整行周期除了增加各片 CCD 控制电路的复杂性和在轨像移计算时间外,还导致各片 CCD 输出的数据量不同,给后续的图像压缩传输和地面处理带来困难,因此在满足成像质量要求的前提下应尽量采用统一调整行周期的方式。

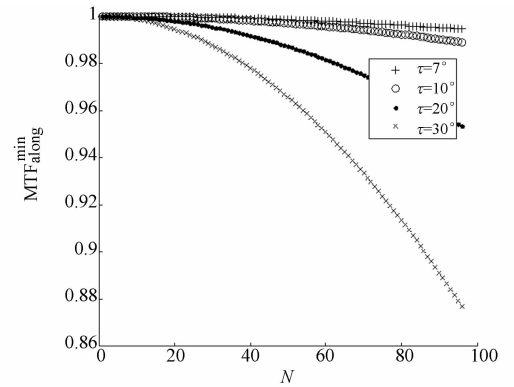
从图4、图6和图9可以看出,当 $\gamma = 90^\circ$ 时边缘视场和中心视场的像移速度匹配相对误差最

大,而不论分片或统一调整行周期,整个视场范围内边缘视场处的 $MTF_{\text{along}}$ 最小。当 $\gamma = 90^\circ$ 或 $-90^\circ$ 时(取决于侧摆角的正负)在边缘视场处取得 $MTF_{\text{along}}$ 的最小值,图10为以不同角度侧摆摄影时随积分级数的变化曲线。该立体测绘卫星为了避免大侧摆角导致的图像投影畸变,多数情况下侧摆角在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 以内,最大不超过 $30^\circ$ 。为了曲线比较的明晰,侧摆角分别采用 $7^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 和 $30^\circ$ 四种。



(a) 统一调整行周期

(a) Adjusting row transfer periods uniformly



(b) 分片调整行周期

(b) Adjusting row transfer periods individually

图 10 不同侧摆角  $MTF_{\text{along}}^{\text{min}}$  随积分级数的变化曲线  
Fig. 10 Change of  $MTF_{\text{along}}^{\text{min}}$  with TDI stages at different scroll angles

从图10可以看出,侧摆角 $\tau$ 越大, $MTF_{\text{along}}^{\text{min}}$ 随着积分级数的增加下降越快,而统一调整行周期和分片调整行周期相比 $MTF_{\text{along}}^{\text{min}}$ 的下降要快得多。表1为侧摆角 $\tau = 10^\circ$ 时不同积分级数下统一和分片调整行周期对比结果。

表 1  $\tau=10^\circ$  时不同积分级数下统一和分片调整行周期对比  
Tab.1 Comparison of adjusting row transfer periods uniformly and separately at different TDI stages as  $\tau=10^\circ$

N	MTF <sup>min</sup> <sub>along</sub>	
	统一调整行周期	分片调整行周期
4	0.998 3	0.999 9
8	0.993 4	0.999 9
16	0.973 7	0.999 7
22	0.950 6	0.999 5
32	0.897 2	0.998 9
96	0.284 1	0.989 7

通常认为 MTF 下降 5% 对成像质量无本质影响<sup>[16]</sup>, 从表 1 可以看出, 当侧摆角  $\tau=10^\circ$ 、积分级数  $N=22$  时, 统一调整行周期 MTF<sup>min</sup><sub>along</sub> 为 0.950 6, 因此当积分级数大于 22 级时, 应分片调整行周期。实际在轨工作时积分级数通常不超过 32 级, 当积分级数  $N=32$  时, 分片调整行周期和统一调整行周期相比沿轨方向 MTF 的下降从 10.28% 减少到 0.11%。

当积分级数由相机的辐射响应度、摄影时刻的太阳高度角和地物的反射率等确定后, MTF<sup>min</sup><sub>along</sub> 随侧摆角而变化。表 2 为积分级数  $N=16$  时以不同角度侧摆摄影统一和分片调整行周期 MTF<sup>min</sup><sub>along</sub> 的对比结果。由于表格可以明晰地进行多组数据的对比, 表 2 中对侧摆角分别为 6、12、13.2、18、24 和  $30^\circ$  六种情况进行比较。

表 2  $N=16$  时, 不同侧摆角统一和分片调整行周期对比  
Tab.2 Comparison of adjusting row transfer periods uniformly and separately with different scroll angles as  $N=16$

侧摆角 $\tau/(^\circ)$	MTF <sup>min</sup> <sub>along</sub>	
	统一调整行周期	分片调整行周期
6.0	0.989 3	0.999 8
12.0	0.958 9	0.999 6
13.2	0.950 3	0.999 4
18.0	0.905 1	0.998 9
24.0	0.821 5	0.997 9
30.0	0.698 4	0.996 4

从表 2 可以看出, 当积分级数固定为 16 级, MTF<sup>min</sup><sub>along</sub> 随侧摆角的增大而减小, 统一调整行周期时侧摆角  $\tau=13.2^\circ$  对应的 MTF<sup>min</sup><sub>along</sub> 为 0.950 3。因此为了避免成像质量的下降, 当积分级数固定为 16 级、统一调整行周期时侧摆角不应超过  $13.2^\circ$ 。

图 11 为统一调整偏流角时, 偏流角调整残差导致的垂轨方向 MTF 最小值 MTF<sup>min</sup><sub>across</sub> 随积分级数的变化曲线。从图 11 中可以看出, 侧摆  $30^\circ$  摄影时即使积分级数取 96 级, MTF<sup>min</sup><sub>across</sub> 仍大于 0.999 6, 即垂轨方向的传函下降不超过 0.04%, 因此统一调整偏流角对成像质量基本没有影响。

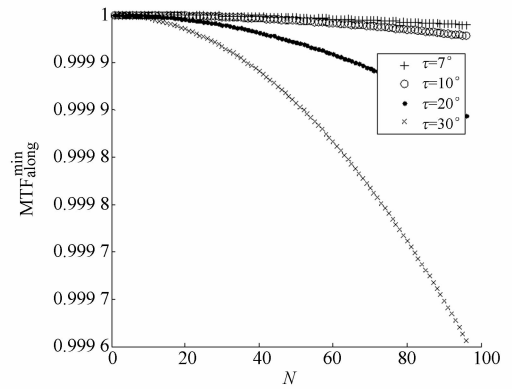


图 11 MTF<sup>min</sup><sub>across</sub> 随积分级数的变化曲线  
Fig.11 Change of MTF<sup>min</sup><sub>across</sub> with TDI stages



(a) 侧摆摄影 ( $\tau=10^\circ$ )  
(a) Scroll imaging ( $\tau=10^\circ$ )



(b) 星下点摄影 ( $\tau=0^\circ$ )  
(b) Substellar imaging ( $\tau=0^\circ$ )

图 12 高分辨率相机在轨测试实验成像结果  
Fig.12 Imaging results of on-orbit testing experiments

从某立体测绘卫星的 02 星开始,在侧摆摄影时根据空间相机侧摆摄影像移计算方法和上述分析结果选择行周期调整模式与参数来进行像移补偿,图 12 为在该立体测绘卫星 02 星高分辨率相机在轨测试实验中,对同一地物目标的成像结果,其中图 12(a)为侧摆  $10^\circ$  时摄影的成像结果,图 12(b)为侧摆角为  $0^\circ$  即星下点摄影时的成像结果。

从图 12 可以看出,侧摆摄影和星下点摄影时高分辨率相机均成像质量良好。通常用图像的信息熵和自相关函数峰值宽度作为图像清晰度的客观评价指标,图像的信息熵越大,自相关函数峰值宽度越小,说明图像中包含的信息量越大,细节越丰富。经计算图 12(a)的信息熵为 3.55,自相关函数峰值宽度为 27。图 12(b)的信息熵为 3.70,自相关函数峰值宽度为 25。可以看出此结果与前面的分析结果一致,说明提出的基于地球椭球的空间相机侧摆摄影像移计算方法和在轨行周期调整模式正确可靠。

## 4 结 论

高分辨率空间相机采用侧摆摄影模式来提高时间分辨率,而地球椭球等因素导致空间相机在侧摆摄影时不同视场位置的像移速度和偏流角不同。本文针对这一问题推导了基于地球椭球的空间相机侧摆摄影不同视场位置的像移速度和偏流角计算公式。并以某立体测绘卫星上携带的高分辨率相机为例,对侧摆摄影时统一和分片调整行周期与偏流角对调制传递函数的影响进行分析。分析和在轨测试实验结果表明,以传函下降 5% 为约束,侧摆  $10^\circ$  摄影时,当积分级数大于 22 级应分片调整行周期。当积分级数为 32 级,和统一调整行周期相比,分片调整行周期时沿轨方向传函的下降从 10.28% 减少到 0.11%。统一调整偏流角对成像质量基本没有影响。当积分级数固定为 16 级,统一调整行周期时侧摆角不应超过  $13.2^\circ$ 。本文的研究可使空间相机在不同摄影模式下采取正确的方式和参数进行像移补偿。

## 参考文献:

- [1] GENE D, HOWARD B, FRANK G, et al. IKONOS satellite, imagery, and products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88:23-36.
- [2] 王家骥,于平,颜昌祥,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)
- [3] 马天波,郭永飞,李云飞.科学级 TDI CCD 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 TDI CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9):2028-2035. (in Chinese)
- [4] JUNG T S, PARK S Y, LEE U S, et al.. Design of an image motion compensation (IMC) algorithm for the communication, ocean, meteorological satellite (CMOS-1) [J]. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 2006, 23(1):29-38.
- [5] CHRIS M, JAN D P, ARNOLD S. Automatic forward motion compensation for micro satellites [C]. *IEEE Africon*, George, 2002:7-12.
- [6] 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, TAN N ZH. Study on scroll MTF of TDICCD camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(1):33-37. (in Chinese)
- [7] 陈绍龙.侧摆摄影偏流角和速高比的计算模型[J]. *航天器工程*, 2010, 19(1):36-40.  
CHEN SH L. Computation model of veer angle and velocity-height ratio for space camera in roll attitude [J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(1):36-40. (in Chinese)
- [8] 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):51-55.  
LI X Y, DU W. Analysis of image motion effect on satellite TDICCD camera image quality [J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(3):51-55. (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):1054-1060.  
WANG Y, YAN CH X. Computation of image motion velocity vector for space camera based on difference method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19

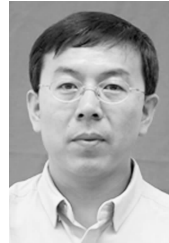
- (5):1054-1060. (in Chinese)
- [10] 吕恒毅,刘杨,郭永飞. 遥感相机焦面 CCD 机械拼接中重叠像元数的确定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5):1041-1047.  
LV H Y, LIU Y, GUO Y F. Computation of overlapping pixels of mechanical assembly CCD focal planes in remote sensing cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5):1041-1047. (in Chinese)
- [11] 于涛,徐抒岩,韩诚山,等. 空间相机偏流角的间歇式实时调整[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8):1908-1914.  
YU T, XU SH Y, HAN CH SH, *et al.*. Batch type real time adjustment for drift angle of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1908-1914. (in Chinese)
- [12] 武星星,刘金国. 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(8):1793-1800.  
WU X X, LIU J G. Image motion compensation of three-line stereo mapping camera using earth ellipsoid [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011(8):1793-1800. (in Chinese)
- [13] MILLER B M, RUBINVOICH E Y. Image motion compensation at charge coupled device photographing in delay-integration mode [J]. *Automation and Remote Control*, 2007, 68(3):564-571.
- [14] WONG H S, YAO Y L, SCHLIG E S. TDI charge-coupled devices: design and applications [J]. *Journal of Research and Development*, 1992, 36(1):83-105.
- [15] 杨秀彬,姜丽,金光. 数字域时间延迟积分时间 CMOS 相机高分“凝视”成像设计分析[J]. 光学学报, 2012, 32(9):0911004.  
YANG X B, JIANG L, JIN G. Design and analysis of CMOS camera based on TDI in digital domain to realize high-resolution staring imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9):0911004. (in Chinese)
- [16] 闫得杰,韩诚山,李伟雄. 飞行器侧摆和前后摆及控制误差的优化设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9):2224-2229.  
YAN D J, HAN C S, LI W X. Optimization design of scroll and pitch and their control errors on aircraft [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2224-2229. (in Chinese)

#### 作者简介:



**武星星**(1980—),男,河南洛阳人,博士,副研究员,2001年、2004年、2007年于吉林大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事空间遥感成像技术、智能控制等方面的研究。E-mail: star-glare@126.com

#### 导师简介:



**刘金国**(1968—),男,吉林蛟河人,研究员,主要从事空间遥感与图像处理方面的研究。E-mail: liujg@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)