

## 基于地球椭球的离轴式双线阵相机像移补偿

武星星,刘金国,孔德柱,张立平,龙科慧

(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:** 离轴反射式双线阵立体测绘相机的视轴和光轴分离,由于地球为椭球体,视轴和光轴对应的地物点的距离随星下点与升交点的地心角而变化。而成像传感器与光轴垂直,对视轴对应的地物点成像,这些因素导致离轴反射式双线阵立体测绘相机的像移速度和偏流角随离轴角等变化。在对离轴反射式空间相机的成像原理进行分析的基础上建立其等效简化模型,推导了基于地球椭球的离轴反射式双线阵立体测绘相机的像移速度和偏流角计算公式。并以某离轴反射式双线阵立体测绘相机为例,对正视相机和后视相机统一调整行周期与偏流角对成像质量的影响进行分析。分析结果表明,以调制传递函数下降不超过 5% 为约束,当积分级数大于 4 时应分别调整正视相机和后视相机的行周期。统一调整偏流角时应以正视相机和后视相机偏流角的均值为准,积分级数应取 89 以内。

**关键词:** 地球椭球; 离轴; 双线阵; 像移; 调制传递函数

**中图分类号:** V445.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0838-07

## Image motion compensation of off-axis two-line camera based on earth ellipsoid

Wu Xingxing, Liu Jinguo, Kong Dezhu, Zhang Liping, Long Kehui

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

**Abstract:** As view axis and optical axis of reflective off-axis two-line stereo mapping camera are separate and the earth is in fact an ellipsoid, distances between objects on earth corresponding to view axis and optical axis vary with geocentric angle from substellar to ascend point. In addition imaging sensor is perpendicular to optical axis while imaging the objects on earth corresponding to view axis. All these factors lead to change of image motion speeds and drift angles along with off-axis angles. Equivalent simplified model of reflective off-axis space camera was established based on analysis of its imaging principle. Formulas of image motion speeds and drift angles of reflective off-axis two-line stereo mapping camera based on earth ellipsoid were deduced. Influence of adjusting row transfer periods and drift angles uniformly on imaging quality of a reflective off-axis two-line stereo mapping camera was analyzed. Results of analysis indicates that if no more than 5% drop of modulation transfer function is used as a constraint, row transfer periods of nadir-view camera and backward-view camera should be adjusted individually as TDI stages is greater than 4. When drift angles are adjusted uniformly, mean

收稿日期:2013-07-13; 修订日期:2013-08-14

基金项目:国家自然科学基金(61108066);吉林省科技发展计划项目(20130101028jc)

作者简介:武星星(1980-),男,副研究员,博士,主要从事空间遥感成像技术等方面的研究。Email:starglare@126.com

value of drift angles of nadir-view camera and backward-view camera should be used and TDI stages should not exceed 89.

**Key words:** earth ellipsoid; off-axis; two-line; image motion; MTF

### 0 引言

离轴反射式光学系统具有无中心遮拦、无色差、视场大和结构紧凑等优点,可以满足高分辨率空间相机成像质量好、谱段范围宽、覆盖范围广和重量轻等要求<sup>[1]</sup>。随着轴对称型非球面和自由曲面光学加工与装调技术的发展,以离轴三反和离轴四反为代表的离轴反射式光学系统已成功应用于 Quickbird-2、ALOS、Cartosat-1 等卫星携带的详查相机和立体测绘相机中<sup>[2-3]</sup>。传输型空间立体测绘相机主要分为单线阵、双线阵和三线阵立体测绘相机三类。单线阵立体测绘相机依靠前后摆或侧摆获取立体像对,对卫星平台的机动性、姿态稳定性和可靠性要求非常高。三线阵立体测绘相机对平台姿态稳定性要求低,但相机数量多,而地面像元分辨率是影响测绘精度的重要因素,随着空间分辨率的提高和焦距的增长,三线阵立体测绘相机的体积、重量和影像数据率急剧增大,因此在测制大比例尺地形图时用离轴反射式的双线阵立体测绘相机更为合适<sup>[4]</sup>。

在离轴反射式双线阵立体测绘相机摄影过程中,离轴角的存在导致视轴和光轴分离<sup>[5]</sup>。正视相机的光轴垂直对地,而成像传感器与光轴垂直,对视轴对应的地物点成像,由于地球的形状为椭球体,双线阵相机视轴对应的地物点与光轴对应的地物点之间的距离随星下点与升交点的地心角变化。目前已经提出的星下点成像空间相机像移计算模型和三线阵立体测绘相机的像移计算方法仅适用于同轴光学系统<sup>[6-7]</sup>,有学者研究了离轴三反相机的偏流角计算问题,但采用圆地球模型,没有考虑地球椭球的影响<sup>[8]</sup>。文中推导基于地球椭球的离轴式双线阵立体测绘相机的像移速度和偏流角计算公式,并以某离轴反射式双线阵立体测绘相机为例,对正视相机和后视镜统一调整行周期与偏流角对成像质量的影响进行分析,为在轨行周期和偏流角调整模式和参数的选取提供依据。

### 1 基于地球椭球的离轴式双线阵相机像移计算

图 1 为某离轴反射式空间相机的成像原理及等效简化模型。从图 1 可以看出,该空间相机采用带平面调焦镜的离轴三反光学系统,以电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 阵列为成像传感器,地物点沿视轴发出的光线依次经过主镜、次镜、三镜和平面调焦镜,到达 CCD 阵列进行成像。主镜、次镜和三镜对应的光轴和视轴存在夹角,该夹角即为离轴角。CCD 阵列在安装时并非和视轴垂直,而是和光轴垂直。从图 1 可知,该离轴反射式空间相机和图 1 右侧的等效简化模型在几何上完全等效,因此在后续的分析 and 计算中采用等效简化模型。

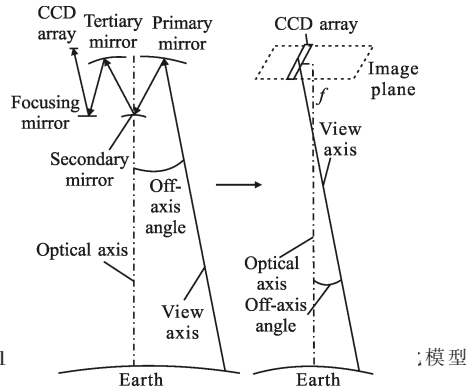


图 1 Imaging principle and equivalent model of reflective off-axis space camera

图 2 为离轴反射式两线阵立体测绘相机的像移原理。正视相机的光轴垂直对地,视轴沿轨道运动方向向前离轴,离轴角为  $\theta_z$ 。后视镜的视轴沿轨道运动方向向后离轴,离轴角为  $\theta_h$ 。正视相机和后视镜视轴夹角为  $\varphi$ 。OXYZ 为地心赤道惯性坐标系, O 为地心, X 轴指向春分点, Z 轴指向北极。  $i_0$  为轨道倾角,  $\Omega$  为升交点赤经,  $\gamma$  为星下点与升交点地心角。  $\alpha$  和  $\beta$  分别为星下点 A 在地心赤道惯性坐标系下的赤

经和赤纬。由于立体测绘卫星平台的指向精度和平台稳定度比普通卫星平台高一个数量级，姿态对像移和成像质量的影响很小<sup>[9-10]</sup>，因此在计算中忽略姿态的影响。

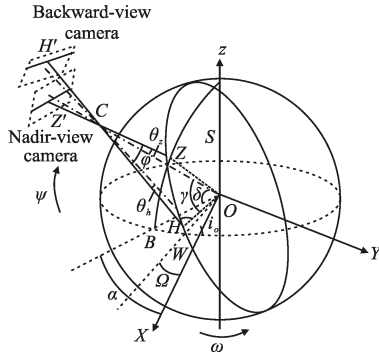


图 2 离轴反射式双阵立体测绘相机像移原理

Fig.2 Image motion principle of reflective off-axis two-line stereo mapping camera

像移由相机和地物点的相对运动造成，该相对运动是卫星绕地球的轨道运动和地球的自转运动合成的结果。设地球自转角速度为  $\omega$ ，卫星轨道运动角速度为  $\psi$ ，则可以视相机为静止，而地物点在以  $\omega$  为角速度绕地球自转轴转动的同时，以  $-\psi$  为角速度绕地心沿轨道面转动。地球的形状为一椭球体，椭球方程为<sup>[7]</sup>：

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

当采用 WGS84 地球椭球模型时， $R_1=6389137\text{ m}$ ， $R_2=6356752\text{ m}$ 。卫星轨道面和地球的交线是一个椭圆，椭圆方程为：

$$\frac{x_o^2}{R_1^2} + \frac{y_o^2}{R_1^2 \cdot R_2^2} \cdot [(R_1 \sin i_0)^2 + (R_2 \sin i_0)^2] = 1 \quad (2)$$

式中： $i_0$  为轨道倾角。

图 3 为轨道面在地球椭球上的截面图，图中  $Z$  和  $H$  分别为正视相机和后视相机视场中心对应的地物点， $Z_G$  为星下点， $H_G$  为后视相机光轴与地球椭球的交点。 $\gamma_z$  为地物点  $Z$  与升交点  $W$  间地心角， $\gamma_h$  为地物点  $H$  与升交点  $W$  间地心角， $\beta_z$  为地物点  $Z$  与星下点  $Z_G$  间地心角， $\beta_h$  为星下点  $Z_G$  与地物点  $H$  间地心角。平面坐标系  $ZX_zY_z$  的原点为地物点  $Z$ ， $X_z$  轴指向天顶， $Y_z$  轴垂直于  $O_z$ 。坐标系  $Z_GX'_zY'_z$  的原点为星下点  $Z_G$ ， $X'_z$  轴指向天顶， $Y'_z$  轴垂直于正视光轴。

坐标系  $HX_HY_H$  的原点为  $H$ ， $X_H$  轴指向天顶， $Y_H$  轴垂直于  $OH$ 。坐标系  $H_GX'_HY'_H$  的原点为  $H_G$ ， $X'_H$  轴沿后视相机光轴指向投影中心  $C$ ， $Y'_H$  轴垂直于  $CHG$ 。

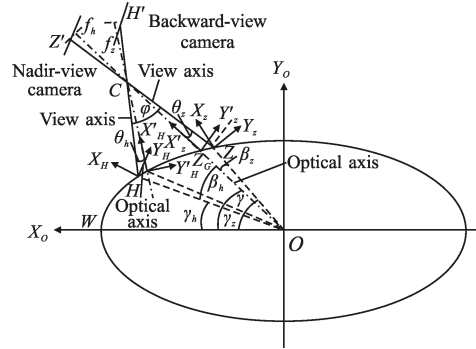


图 3 轨道面在地球椭球上的截面图

Fig.3 Cross-section drawing of orbit plane on earth ellipsoid

设星载 GPS 接收机测得的卫星与地心的距离为  $D$ ，则对于正视相机，地物点  $Z$  和地心  $O$  的距离  $R_z$  可以解方程组(3)得到：

$$\begin{cases} \frac{D \cdot \sin \gamma - y_o}{D \cdot \cos \gamma - x_o} = \tan(\gamma - \theta_z) \\ x_o^2 + y_o^2 = R_z^2 \\ \frac{x_o^2}{R_1^2} + \frac{y_o^2}{R_1^2 \cdot R_2^2} \cdot [(R_1 \sin i_0)^2 + (R_2 \sin i_0)^2] = 1 \end{cases} \quad (3)$$

地物点  $Z$  与投影中心  $C$  的距离  $L_z$  由公式 (4) 计算得到：

$$L_z = D \cdot \cos \theta_z - \sqrt{D^2 \cdot \cos^2 \theta_z - D^2 + R_z^2} \quad (4)$$

地物点  $Z$  与星下点  $Z_G$  间地心角为：

$$\beta_z = \cos^{-1} \frac{R_z^2 + D^2 - L_z^2}{2D \cdot R_z} \quad (5)$$

则地物点  $Z$  与升交点  $W$  间地心角为：

$$\gamma_z = \gamma + \beta_z = \gamma + \cos^{-1} \frac{R_z^2 + D^2 - L_z^2}{2D \cdot R_z} \quad (6)$$

根据球面三角的基本公式，地物点  $Z$  绕地球自转轴转动产生的物移速度在  $Y_z$  方向和垂直轨道面方向的分量分别为：

$$V_{Y_{ZZ}} = \omega \cdot R_z \cdot \cos i_0 \quad (7)$$

$$V_{Z_{ZZ}} = -\omega \cdot R_z \cdot \cos \gamma_z \cdot \sin i_0 \quad (8)$$

地物点  $Z$  绕地心以  $-\psi$  为角速度转动产生的物移速度的方向和  $Y_z$  平行，大小为：

$$V_{Y_{ZG}} = -\psi \cdot R_z \quad (9)$$

地物点  $Z$  的物移速度在  $Y_z$  方向总的分量为：

$$VY_Z = VY_{ZZ} + VY_{ZG} = R_Z \cdot (\omega \cdot \cos i_0 - \psi) \quad (10)$$

由于成像传感器与光轴垂直,根据图3中的几何关系,地物点Z在沿轨方向物移速度 $V_{\text{along}}^Z$ 的方向与 $Y'_Z$ 轴平行,而 $Y_Z$ 轴和 $Y'_Z$ 轴的夹角为 $\beta_z$ ,因此 $V_{\text{along}}^Z$ 的计算公式为:

$$V_{\text{along}}^Z = R_Z \cdot (\omega \cdot \cos i_0 - \psi) \cdot \cos \beta_z \quad (11)$$

地物点Z在垂轨方向的物移速度 $V_{\text{across}}^Z$ 为:

$$V_{\text{across}}^Z = VZ_{ZZ} = -\omega \cdot R_Z \cdot \cos \gamma_Z \cdot \sin i_0 \quad (12)$$

设正视相机的焦距为 $f_z$ ,则根据投影几何关系,与地物点Z对应的像点Z'处的沿轨和垂轨方向的像移速度分别为:

$$VP_{\text{along}}^Z = R_Z \cdot (\psi - \omega \cdot \cos i_0) \cdot \frac{f_z \cdot \cos \beta_z}{L_Z \cdot \cos \theta_z} \quad (13)$$

$$VP_{\text{across}}^Z = \omega \cdot R_Z \cdot \cos \gamma_Z \cdot \sin i_0 \cdot \frac{f_z}{L_Z \cdot \cos \theta_z} \quad (14)$$

正视相机的像移速度主向量值和偏流角分别为:

$$VP_Z = \sqrt{VP_{\text{along}}^Z{}^2 + VP_{\text{across}}^Z{}^2} \quad (15)$$

$$\tau_z = \arctan \frac{VP_{\text{across}}^Z}{VP_{\text{along}}^Z} \quad (16)$$

对于后视相机,地物点H和地心O的距离 $R_H$ 可以解方程组(17)得到:

$$\begin{cases} \frac{D \cdot \sin \gamma - y_o}{D \cdot \cos \gamma - x_o} = \tan(\gamma + \varphi - \theta_z) \\ x_o^2 + y_o^2 = R_H^2 \\ \frac{x_o^2}{R_1^2} + \frac{y_o^2}{R_1 \cdot R_2} \cdot [(R_1 \sin i_0)^2 + (R_2 \sin i_0)^2] = 1 \end{cases} \quad (17)$$

地物点H与投影中心C的距离 $L_H$ 由公式(18)计算得到:

$$L_H = D \cdot \cos(\varphi - \theta_z) - \sqrt{D^2 \cdot \cos^2(\varphi - \theta_z) - D^2 + R_H^2} \quad (18)$$

星下点 $Z_G$ 与地物点H间地心角为:

$$\beta_h = \cos^{-1} \frac{R_H^2 + D^2 - L_H^2}{2D \cdot R_H} \quad (19)$$

则地物点H与升交点W间地心角为:

$$\gamma_h = \gamma - \beta_h = \gamma - \cos^{-1} \frac{R_H^2 + D^2 - L_H^2}{2D \cdot R_H} \quad (20)$$

地物点H绕地球自转轴转动产生的物移速度在 $Y_H$ 方向和垂直轨道面方向的分量分别为:

$$VY_{HZ} = \omega \cdot R_H \cdot \cos i_0 \quad (21)$$

$$VZ_{HZ} = -\omega \cdot R_H \cdot \cos \gamma_H \cdot \sin i_0 \quad (22)$$

地物点H绕地心以 $-\psi$ 为角速度转动产生的物移速度的方向和 $Y_H$ 平行,大小为:

$$VY_{HG} = -\psi \cdot R_H \quad (23)$$

地物点H的物移速度在 $Y_H$ 方向总的分量为:

$$VY_H = VY_{HZ} + VY_{HG} = R_H \cdot (\omega \cdot \cos i_0 - \psi) \quad (24)$$

与正视相机类似,地物点H在沿轨方向物移速度 $V_{\text{along}}^H$ 的方向与 $Y'_H$ 轴平行, $Y_H$ 轴和 $Y'_H$ 轴的夹角为 $(\beta_h + \varphi - \theta_z - \theta_h)$ ,因此 $V_{\text{along}}^H$ 为:

$$V_{\text{along}}^H = R_H \cdot (\omega \cdot \cos i_0 - \psi) \cdot \cos(\beta_h + \varphi - \theta_z - \theta_h) \quad (25)$$

地物点H在垂轨方向的物移速度 $V_{\text{across}}^H$ 为:

$$V_{\text{across}}^H = -\omega \cdot R_H \cdot \cos \gamma_H \cdot \sin i_0 \quad (26)$$

设后视相机的焦距为 $f_H$ ,与地物点H对应的像点H'处的沿轨和垂轨方向的像移速度分别为:

$$VP_{\text{along}}^H = R_H \cdot (\psi - \omega \cdot \cos i_0) \cdot \frac{f_H \cdot \cos(\beta_h + \varphi - \theta_z - \theta_h)}{L_H \cdot \cos \theta_h} \quad (27)$$

$$VP_{\text{across}}^H = \omega \cdot R_H \cdot \cos \gamma_H \cdot \sin i_0 \cdot \frac{f_H}{L_H \cdot \cos \theta_h} \quad (28)$$

后视相机的像移速度主向量值和偏流角分别为:

$$VP_H = \sqrt{VP_{\text{along}}^H{}^2 + VP_{\text{across}}^H{}^2} \quad (29)$$

$$\tau_H = \text{tg}^{-1} \frac{VP_{\text{across}}^H}{VP_{\text{along}}^H} \quad (30)$$

## 2 行周期与偏流角调整方式对成像质量的影响

在空间相机摄影过程中,为了消除像移带来的图像模糊问题,需要实时计算像移速度和偏流角并进行补偿。像移补偿的方法主要分为机械式、光学式、电子式和图像式等,离轴反射式双线阵立体测绘相机以时间延迟积分(Time Delay and Integration, TDI)CCD为成像传感器进行推扫式摄影,通过调整TDI CCD的行周期,使CCD电荷包在沿轨方向的转移频率和像移速度一致,实现电子式的像移补偿。在双线阵立体测绘相机中,正视相机和后视相机可以统一或分别调整行周期。当统一调整行周期时,正视相机和后视相机的输出数据量相同,利于后续的压缩传输,同时便于在地面处理时进行影像匹配以构

成立体像对。当正视相机和后视相机各自分别调整偏流角时,需要在相机焦平面处增设像面偏流角调整机构,像面偏流角调整机构的控制误差会引入到双线阵立体测绘相机的平面定位误差和高程误差中,影响其测绘精度,因此应尽量采取由卫星姿控系统统一调整偏流角的方式。

但当正视相机和后视相机以都正视相机为准统一调整行周期和偏流角时,后视相机存在像移匹配残差和偏流角调整残差,从而导致成像质量下降。文中以某离轴反射式双线阵立体测绘相机为例,采用前面提出的基于地球椭球的离轴式双线阵立体测绘相机的像移计算方法,对正视相机和后视相机统一调整行周期与偏流角对调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)的影响进行分析。

该离轴反射式双线阵立体测绘相机采用太阳同步轨道,工作轨道高度 700 km,轨道倾  $i_0=98.186^\circ$ ,正视相机离轴角  $\theta_z$  和后视相机离轴角  $\theta_h$  都为  $5^\circ$ ,正视相机和后视相机视轴夹角  $\varphi=31^\circ$ 。图 4 为正视相机光轴位置不变、离轴角  $VP_z$  分别取  $0^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $5^\circ$  和  $7^\circ$  时像移速度  $VP_z$  随  $\gamma$  的变化曲线。

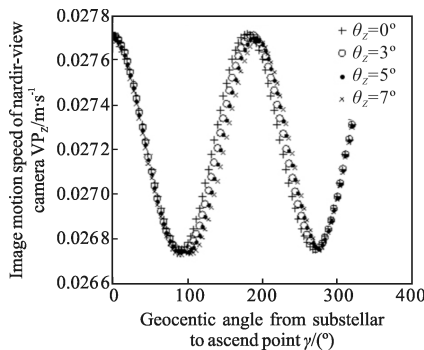


图 4 正视相机取不同离轴角时像移速度随  $\gamma$  变化曲线

Fig.4 Image motion curves of nadir-view camera along with  $\gamma$  as different off-axis angles were used

图 5 为后视相机光轴位置不变、离轴角  $\theta_h$  分别取  $0^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $5^\circ$  和  $7^\circ$  时像移速度  $VP_h$  随  $\gamma$  的变化曲线。

当离轴角  $\theta_z$  和  $\theta_h$  都为  $0^\circ$ ,即为正视和后视相机采用同轴光学系统时的像移速度。从图 4 和图 5 可以看出,随着离轴角的增大,正视相机和后视相机采用离轴光学系统时的像移速度与采用同轴光学系时的像移速度的差距不断增大,由于地球椭球的影响,后视相机更为明显。

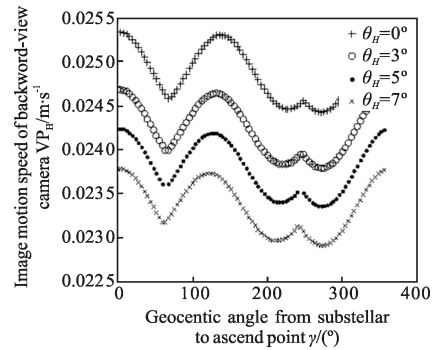


图 5 后视相机取不同离轴角时像移速度随  $\gamma$  变化曲线

Fig.5 Image motion curves of backward-view camera along with  $\gamma$  as different off-axis angles were used

因此如果以同轴系统的像移计算模型来对离轴系统进行像移补偿,势必存在大的误差而导致成像质量的下降。像移匹配残差引起的奈奎斯特(Nyquist)空间频率下沿轨方向 MTF 由公式(31)计算,偏流角调整残差引起的 Nyquist 空间频率下垂直轨方向 MTF 由公式(32)计算<sup>[1]</sup>。

$$MTF_{\text{along}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{N \cdot \Delta VP}{VP}\right)}{\frac{\pi}{2} \frac{N \cdot \Delta VP}{VP}} \quad (31)$$

$$MTF_{\text{across}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} N \cdot \text{tg} \Delta \tau\right)}{\frac{\pi}{2} N \cdot \text{tg} \Delta \tau} \quad (32)$$

式中: $N$  为积分级数, $\Delta VP/VP$  为像移速度匹配相对误差, $\Delta \tau$  为偏流角调整残差。

从公式(31)和(32)可以看出,为了提高  $MTF_{\text{along}}$  和  $MTF_{\text{across}}$ ,应尽量减少  $\Delta VP/VP$  和  $\Delta \tau$ 。当以正视相机为准调整后视相机的行周期和偏流角,后视相机由于存在较大的像移匹配残差和偏流角调整残差导致成像质量出现较大幅度的下降,而正视相机成像质量良好。

从图 4、图 5 可以看出,由于正视相机和后视相机的像移速度之差和偏流角之差随星下点与升交点地心角  $\gamma$  而变化,因此  $MTF_{\text{along}}$  和  $MTF_{\text{across}}$  也随  $\gamma$  而变化。设在  $\gamma \in [0^\circ, 360^\circ]$  内  $MTF_{\text{along}}$  的最小值为  $MTF_{\text{along}}^{\min}$ ,  $MTF_{\text{across}}$  的最小值为  $MTF_{\text{across}}^{\min}$ 。

对公式(31)分析可知,影响  $MTF_{\text{along}}^{\min}$  的是像移速度匹配相对误差,而非像移速度匹配绝对误差,为了在统一调整行周期时正视相机的  $MTF_{\text{along}}^{\min}$  和后视相

机的  $MTF_{\text{along}}^{\min}$  一致, 使系统的整体成像质量达到最优, 调整正视相机和后视相机行周期时采用的像移速度  $VP_o$  应满足公式(33)的要求。

$$\frac{VP_z - VP_o}{VP_z} = \frac{VP_o - VP_H}{VP_H} \quad (33)$$

则统一调整行周期时最优的像移速度  $VP_o$  的计算公式为:

$$VP_o = \frac{2VP_z \cdot VP_H}{VP_z + VP_H} \quad (34)$$

表 1 为正视相机和后视相机以像移速度均值和最优像移速度为准调整行周期时  $MTF_{\text{along}}^{\min}$  的对比结果。从表 1 可以看出, 当以最优像移速度为准调整行周期时, 正视相机和后视相机的  $MTF_{\text{along}}^{\min}$  相同, 可以获得比以像移速度均值为准调整行周期时更好的整体性能。

表 1 以像移速度均值和最优像移速度为准调整行周期时  $MTF_{\text{along}}^{\min}$  对比

Tab.1 Comparison of  $MTF_{\text{along}}^{\min}$  as row periods were adjusted according to mean and optimal image motion speed

Camera and method	$N$	$MTF_{\text{along}}^{\min}$
Nadir-view camera using mean speed	3	0.979
Backward-view camera using mean speed	3	0.971
Nadir-view camera using optimal speed	3	0.975
Backward-view camera using optimal speed	3	0.975
Nadir-view camera using mean speed	4	0.962
Backward-view camera using mean speed	4	0.947
Nadir-view camera using optimal speed	4	0.956
Backward-view camera using optimal speed	4	0.956
Nadir-view camera using mean speed	5	0.942
Backward-view camera using mean speed	5	0.919
Nadir-view camera using optimal speed	5	0.932
Backward-view camera using optimal speed	5	0.932

为了保证空间相机的成像质量, 通常要求像移速度匹配残差与偏流角调整残差引起的 MTF 下降不超过 5%<sup>[9]</sup>。从表 1 可以看出, 当以 MTF 下降不超过 5% 为约束, 用最优像移速度统一调整行周期时两线阵立体测绘相机的积分级数不能超过 4 级, 而以像移速度均值统一调整行周期时积分级数不能超过 3 级。因此当统一调整行周期时应以最优像移速度为准, 积分级数不能超过 4 级。当积分级数超过 4 级

时应分别调整正视相机和后视相机的行周期。

图 6 为分别以偏流角均值为准调整两相机的偏流角和以正视相机偏流角为准调整后视相机偏流角时,  $MTF_{\text{across}}^{\min}$  随积分级数  $N$  的变化曲线。当统一调整偏流角时, 以正视相机和后视相机偏流角的均值为准是最优的方法。根据计算分析结果, 当正视相机偏流角为准调整后视相机偏流角、积分级数  $N=45$  时后视相机的  $MTF_{\text{across}}^{\min}$  为 0.951。而以正视相机和后视相机偏流角的均值统一调整两相机的偏流角、积分级数  $N=89$  时正视和后视相机的  $MTF_{\text{across}}^{\min}$  均为 0.951。

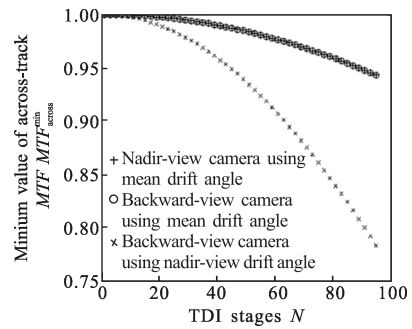


图 6  $MTF_{\text{across}}^{\min}$  随积分级数的变化曲线

Fig.6 Change of  $MTF_{\text{across}}^{\min}$  with TDI stages

因此统一调整偏流角时应以正视相机和后视相机的偏流角均值为准, 以 MTF 下降不超过 5% 为约束, 积分级数不应超过 89 级。积分级数主要由摄影时刻的太阳高度角、地物的反射率和相机的辐射响应度等决定, 经分析该两线阵立体测绘相机在轨摄影时的积分级数最高不超过 64 级, 因此只需由卫星姿控系统以正视相机和后视相机的偏流角均值为准统一调整偏流角即可, 不需要为正视相机和后视相机增设像面偏流角调整机构。上述分析结果已成功应用于某离轴反射式两线阵空间立体测绘相机的研制中。

### 3 结论

针对离轴反射式双线阵立体测绘相机的视轴和光轴分离以及地球椭球等因素导致像移速度和偏流角随离轴角等变化这一问题, 在分析离轴反射式空间相机的成像原理的基础上建立其等效简化模型, 推导了基于地球椭球的离轴反射式双线阵立体测绘相机的像移速度和偏流角计算公式。以某离轴反射式双线阵立体测绘相机为例, 对正视相机和后视相机统一调整行周期与偏流角对成像质量的影响进行分析。

分析结果表明,当统一调整行周期和偏流角时,为了满足测绘相机对系统整体成像性能的要求,应以文中给出的最优像移速度为准调整行周期,以正视相机和后视相机偏流角的均值为准调整偏流角。以调制传递函数下降不超过 5%为约束,当积分级数大于 4 时应分别调整正视相机和后视相机的行周期。当在轨使用的积分级数不超过 89 时,可以由卫星统一调整偏流角,无需增设像面偏流角调整机构。

#### 参考文献:

- [1] Wang Meiqin, He Zhonghou, Bai Jiaguang. Optical design of off-axis three-mirror anastigmatic system for imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 167-172. (in Chinese)  
王美钦, 王忠厚, 白加光. 成像光谱仪的离轴反射式光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 167-172.
- [2] Xue Donglin, Zheng Ligong, Zhang Feng. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(12): 2813-2820. (in Chinese)  
薛栋林, 郑立功, 张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2813-2820.
- [3] Yan Peipei, Fan Xuewu. New design of an off-axis reflective zoom optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1581-1586. (in Chinese)  
闫佩佩, 樊学武. 新型离轴反射式变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1581-1586.
- [4] Niu Rui, Wang Yu, Wang Jianrong. Prediction and simulation of location performance of spaceborne two-line array camera [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2011, 28(5): 351-355. (in Chinese)  
牛瑞, 王昱, 王建荣. 航天双线阵相机无控定位性能预测与仿真[J]. 测绘科学技术学报, 2011, 28(5): 351-355.
- [5] Wu Guodong. Calibration of inner orientation parameters and distortion for three-mirror off-axis TDICCD camera [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(3): 462-467. (in Chinese)  
吴国栋. 离轴三反时间延迟积分 CCD 相机内方位元素和畸变的标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 462-467.
- [6] Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, et al. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1585-1589. (in Chinese)  
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.
- [7] Wu Xingxing, Liu Jinguo. Image motion compensation of three-line stereo mapping camera using earth ellipsoid [J]. *Opt Precision Eng*, 2011(8): 1793-1800. (in Chinese)  
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.
- [8] Xie Shaobo, Zhou Weimin, Zhang Wei. Calculation and control for deviant angle of TMA camera on satellite [J]. *Aerospace Shanghai*, 2012, 29(1): 19-22. (in Chinese)  
谢少波, 周伟敏, 张巍. 离轴三反 (TMA) 相机在轨成像的偏流角计算与控制[J]. 上海航天, 2012, 29(1): 19-22.
- [9] Li Xiaoyun, Du Wei. Analysis of image motion effect on satellite TDICCD camera image quality [J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(3): 51-55. (in Chinese)  
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.
- [10] Li Weixiong, Yan Dejie, Wang Dong. Image motion compensation method of high resolution space camera's imaging with pitch angle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2442-2448. (in Chinese)  
李伟雄, 闫得杰, 王栋. 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): 2442-2448.
- [11] 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.