

# 应用地球椭球的大视场空间相机像移补偿

武星星 刘金国 周怀得

(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** 在大视场空间相机摄影过程中,不同视场位置对应的地物点存在较大的经度差和纬度差,导致地球自转引起的像移速度的大小和方向不同。而地球实际为椭球体,地物和投影中心的距离随视场位置、星下点与升交点夹角的变化而变化,使卫星轨道运动产生的像移速度随之变化。在分析大视场空间相机成像原理的基础上,推导了基于地球椭球的大视场空间相机在不同视场位置的像移速度和偏流角计算公式,并以某大视场空间相机为例,分析了各片电荷耦合器件(CCD)统一和分片调整行转移周期及偏流角对成像质量的影响。实验结果及分析表明,以调制传递函数(MTF)的下降不超过 5%为约束条件,当时间延迟积分(TDI)级数大于 8 级时,应分片调整该相机各 CCD 的行转移周期,当 TDI 级数不超过 8 级时,可以统一调整行周期。当 TDI 级数为 16 级,分片调整行周期时沿轨道方向 MTF 的下降率从 17.33%减小到 0.53%。

**关键词** 遥感;地球椭球;视场;像移;调制传递函数

**中图分类号** V445.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0528001

## Image Motion Compensation of Space Camera with Large Field of View Using Earth Ellipsoid

Wu Xingxing Liu Jinguo Zhou Huaide

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

**Abstract** During the imaging process of space camera with large field of view, longitudes and latitudes of objects on earth corresponding to different field of view positions differ from each other. As a result magnitudes and directions of image motion speeds caused by rotation of the earth are different. As the earth is actually an ellipsoid, distances between objects on earth and the projection center change along with field of view position and geocentric angle from ascending node to subastral point. Therefore image motion speed caused by orbital motion of the satellite varies. Formulas for calculation of image motion speed and drift angle at different field of view positions using earth ellipsoid are deduced based on analyzing imaging principle of space camera with large field of view. Influences of adjusting row transfer periods uniformly and separately and drift angles of a space camera with large field of view on imaging quality are analyzed. Results of experiments and analysis indicate that using no more than 5% reduction of modulation transfer function (MTF) as a constraint condition, row transfer periods can be adjusted uniformly if no more than 8 time delay intergration (TDI) stages are used. Otherwise row transfer period of each CCD chip should be adjusted individually. If 16 TDI stages are used, reduction rate of along-orbit MTF should be cut down from 17.33% to 0.53% as row transfer period of each CCD chip is adjusted individually.

**Key words** remote sensing; earth ellipsoid; field of view; image motion; modulation transfer function

**OCIS codes** 280.4788; 110.4100; 110.4153

## 1 引言

当遥感卫星的轨道高度一定时,其覆盖宽度随

着空间相机视场角的增大而增加,大视场空间相机可以在保持较高空间分辨率的同时,实现对感兴趣

**收稿日期**: 2012-11-16; **收到修改稿日期**: 2012-12-10

**基金项目**: 国家自然科学基金(61108066)资助课题。

**作者简介**: 武星星(1980—),男,博士,副研究员,主要从事空间遥感成像技术方面的研究。

E-mail: starglare@126.com

目标的大范围快速搜索,在军事和救灾等领域具有十分重要的意义和价值。随着光学系统设计和加工技术的发展,超大视场光学系统已开始应用于空间相机中<sup>[1~4]</sup>。

当空间相机的视场角较小时,可以采用目前已经提出的基于圆地球的星下点成像空间相机像移计算模型<sup>[5]</sup>,用中心视场的像移速度代替其他视场位置的像移速度进行全视场的像移补偿<sup>[6,7]</sup>。在大视场空间相机摄影过程中,不同视场位置对应的地物点存在较大的经度差和纬度差,导致地球自转引起的像移速度的大小和方向不同。而地球实际为椭球体,地物和投影中心的距离随视场位置、星下点与升交点夹角的变化而变化,使卫星轨道运动产生的像移速度随之变化。在这些因素的综合作用下,大视场空间相机的像移速度和偏流角随视场位置的不同有显著的变化。如果仍以中心视场的像移速度进行全视场的像移补偿,会导致其他视场位置存在大的像移速度匹配残差而使成像质量下降。

也有学者研究了侧摆成像时的不同视场位置的异速问题,但将不同视场位置对应的地物点投影在平面或圆球体上,没有考虑地球椭球的影响<sup>[8]</sup>。本文在分析大视场空间相机成像原理的基础上,推导了基于地球椭球的大视场空间相机不同视场位置的像移速度和偏流角计算公式。大视场空间相机的焦面通常由多片传感器在一块基板上拼接而成,因而各片传感器可以统一或分片调整行转移周期来进行像移补偿,但只能统一调整偏流角。以某视场角为 $76^\circ$ 的空间相机为例,对统一和分片调整行周期以及统一调整偏流角对调制传递函数(MTF)的影响进行分析,使相机在轨工作时正确地选取工作模式和参数。

## 2 基于地球椭球的大视场空间相机像移计算

图1为视场角为 $76^\circ$ 的某大视场空间相机的成像模型。从图1中可以看出,在大视场空间相机推扫成像过程中,不同视场位置的地物点存在较大的经度差和纬度差。由于地球自转在地物点引起的线速度的大小和地物点的纬度有关,而方向和地物点的经度有关,因而不同视场位置地球自转引起的像移速度的大小和方向不同。而且由于地球为椭球体,各视场位置对应的地物点位于一个椭球面上,而非平面或圆球面。

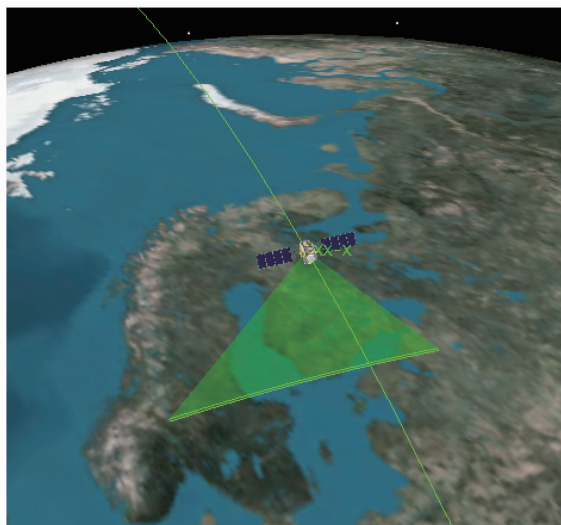


图1 大视场空间相机成像模型

Fig. 1 Imaging model of space camera with large field of view

图2为应用地球椭球的大视场空间相机像移计算原理。图2中 $O-XYZ$ 为地心赤道惯性坐标系,原点 $O$ 为地心, $X$ 轴指向春分点, $Z$ 轴指向北极。 $O'-X'Y'Z'$ 为地理坐标系,原点 $O'$ 为星下点, $X'$ 轴指向天顶, $Z'$ 轴指向卫星轨道运动前向, $Y'$ 轴与 $X'$ 轴和 $Z'$ 轴呈右手系。 $C$ 为空间相机的投影中心, $G$ 为半视场角 $\theta$ 对应的地物点, $G'$ 为半视场角 $\theta$ 对应的像点,规定地物点在 $Y'$ 轴上的坐标为正时 $\theta$ 取正值。 $O O'A$ 为轨道面, $i_0$ 为卫星轨道倾角, $\Omega$ 为轨道面的升交点赤经, $\gamma$ 为星下点与升交点地心角。 $\alpha$ 为星下点赤经, $\phi$ 为星下点与升交点的赤径之差, $\delta$ 为星下点赤纬。 $\psi$ 为卫星轨道运动相对于地心的角速度, $\omega$ 为地球自转角速度。

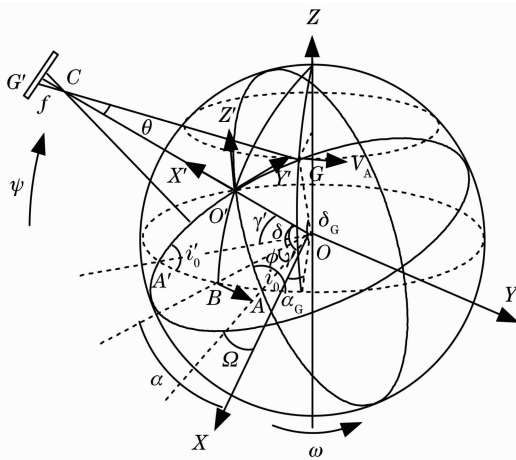


图2 应用地球椭球的大视场空间相机像移计算原理  
Fig. 2 Imaging motion computing principle of space camera with large field of view applying earth ellipsoid

由于像移是由卫星和地物点的相对运动产生的,因此可以视空间相机为静止,而地物点的速度为绕 $Z$ 轴以 $\omega$ 为角速度的转动和沿轨道运动方向绕地心以 $-\psi$ 为角速度的转动合成的结果。随着卫星平台的指向精度和稳定度不断提高,姿态对像移的影响很小,因此在计算中忽略了姿态对像移速度的影响。

由于地球的实际形状为椭球体,采用 WGS84 地球椭球模型,其椭球方程为

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

式中 $R_1$ 为椭球长半径, $R_2$ 为短半径, $R_1=6378137$  m, $R_2=6356752$  m。

卫星轨道面 $O'AO$ 和地球的交线为一个椭圆,椭圆方程为<sup>[9]</sup>

$$\frac{x_g^2}{R_1^2} + \frac{y_g^2}{R_3^2} = 1, \quad (2)$$

式中

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{\sqrt{(R_1 \sin i_0)^2 + (R_2 \cos i_0)^2}}. \quad (3)$$

卫星轨道面在地心赤道惯性坐标系中的位置不变,因而该椭圆的位置和形状不变,空间相机线阵传感器的投影面 $GO'O$ 和地球的交线也为一个椭圆,不同的是该椭圆的位置和形状随星下点与升交点夹角而变化。要得到该椭圆的方程,需求得投影面 $GO'O$ 和轨道面的夹角 $i'_0$ 。从图2可以看出, $A'O'A$ 构成一个直角球面三角,根据直角球面三角公式得到

$$\cos i'_0 = \cos \gamma \sin(180 - i_0), \quad (4)$$

则投影面 $GO'O$ 和地球的交线椭圆的方程为

$$\frac{x_t^2}{R_1^2} + \frac{y_t^2}{R_4^2} = 1, \quad (5)$$

式中

$$R_4 = \frac{R_1 R_2}{\sqrt{R_1^2 + (R_2^2 - R_1^2) \cos^2 \gamma \sin^2 i_0}}. \quad (6)$$

图3为线阵传感器的投影面 $GO'O$ 在地球椭球上的截面图。根据直角球面三角公式,星下点与该投影面的升交点 $A'$ 的地心角 $\gamma'$ 为

$$\tan \gamma' = \sin \gamma \tan(180 - i_0). \quad (7)$$

卫星在太空中的位置一般通过星载 GPS 接收机测量得到,并通过星上总线发送给空间相机控制器,设卫星在 WGS84 坐标系下的坐标为 $(x_{ECF}, y_{ECF}, z_{ECF})$ ,则卫星距地心的距离 $R_H$ 为

$$R_H = \sqrt{x_{ECF}^2 + y_{ECF}^2 + z_{ECF}^2}. \quad (8)$$

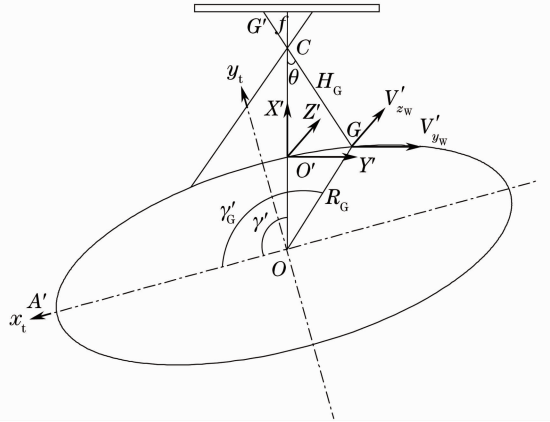


图3 线阵传感器的投影面在地球椭球上的截面图  
Fig. 3 Cross-section drawing of linear sensor projection plane on earth ellipsoid

则根据图3有

$$\begin{cases} \frac{R_H \sin \gamma' - y_t}{R_H \cos \gamma' - x_t} = \tan(\gamma' - \theta) \\ x_t^2 + y_t^2 = R_G^2 \\ \frac{x_t^2}{R_1^2} + \frac{y_t^2}{R_4^2} = 1 \end{cases}, \quad (9)$$

地物距地心的距离 $R_G$ 可以通过(9)式得到。地物点与空间相机投影中心的距离:

$$H_G = R_H \cos \theta - \sqrt{R_H^2 \cos^2 \theta - R_H^2 + R_G^2}. \quad (10)$$

地物点与线阵传感器投影面的升交点 $A'$ 的地心角:

$$\gamma'_G = \gamma' + \arccos \frac{R_G^2 + R_H^2 - H_G^2}{2R_H R_G}. \quad (11)$$

地物点沿轨道运动方向绕地心以 $-\psi$ 为角速度的转动产生的物移速度,即

$$V_{z'_g} = -R_G \psi \cos(\gamma'_G - \gamma'), \quad (12)$$

$V_{z'_g}$ 由(12)式计算得到,其方向与 $Z'$ 轴平行。

根据图2中的几何关系,由 $i'_0$ 和 $\gamma'_G$ 利用直角球面三角公式容易求得地物点在赤道惯性坐标系中的赤经 $\alpha_G$ 和赤纬 $\delta_G$ ,地物点绕 $Z$ 轴以 $\omega$ 为角速度的转动产生的物移速度 $V_A$ 平行于赤道面,其在地心赤道惯性坐标系 $Z$ 轴的分量 $V_{z_A}$ 为0,在 $X$ 轴和 $Y$ 轴的分量:

$$V_{x_A} = -R_G \cos \delta_G \omega \sin \alpha_G, \quad (13)$$

$$V_{y_A} = R_G \cos \delta_G \omega \cos \alpha_G. \quad (14)$$

为了得到 $V_A$ 在地理坐标系 $X'$ 轴、 $Y'$ 轴和 $Z'$ 轴的分量 $V_{x'_A}$ 、 $V_{y'_A}$ 和 $V_{z'_A}$ ,建立由地心赤道惯性坐标系到地理坐标系的方向旋转矩阵,用该方向旋转矩阵乘以 $(V_{x_A}, V_{y_A}, V_{z_A})$ ,即可得到 $(V_{x'_A}, V_{y'_A}, V_{z'_A})$ 。从图2可以看出,将地心赤道惯性坐标系绕 $Z$

轴由 Y 轴向 X 轴转  $-\Omega$ , 绕 X 轴由 Z 轴向 Y 轴转  $(\pi/2 - i_0)$ , 绕 Y 轴由 Z 轴向 X 轴转  $-\gamma$ , 即可与地理坐标系的  $X'$  轴、 $Y'$  轴和  $Z'$  轴同向。绕 Z 轴由 Y 轴向 X 轴转  $-\Omega$  的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_{mz} = \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega & 0 \\ -\sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

绕 X 轴由 Z 轴向 Y 轴转  $\pi/2 - i_0$  的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_{mx} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin i_0 & -\cos i_0 \\ 0 & \cos i_0 & \sin i_0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

绕 Y 轴由 Z 轴向 X 轴转  $-\gamma$  的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_{my} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad (17)$$

则按照旋转顺序

$$\begin{bmatrix} V_{x'_A} \\ V_{y'_A} \\ V_{z'_A} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{my} \cdot \mathbf{R}_{mx} \cdot \mathbf{R}_{mz} \cdot \begin{bmatrix} V_{x_A} \\ V_{y_A} \\ V_{z_A} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

沿  $Z'$  轴方向的物移速度为

$$V_{z'_w} = V_{z'_g} + V_{z'_A}, \quad (19)$$

沿  $Y'$  轴方向的物移速度即为  $V_{y'_A}$ , 由(10)式可以计算得到地物点与空间相机投影中心的距离  $H_G$ , 设空间相机的焦距为  $f$ , 则半视场角  $\theta$  对应的像点在沿轨方向的像移速度和垂轨方向的像移速度分别为

$$V_{\text{along}}^\theta = [-R_G \psi \cos(\gamma'_G - \gamma') + V_{z'_A}] \times \frac{f}{H_G |\cos \theta|}, \quad (20)$$

$$V_{\text{across}}^\theta = V_{y'_A} \frac{f}{H_G |\cos \theta|}, \quad (21)$$

半视场角  $\theta$  对应的像点处的像移速度主向量值和偏流角分别为

$$V_\theta = \sqrt{(V_{\text{along}}^\theta)^2 + (V_{\text{across}}^\theta)^2}, \quad (22)$$

$$\beta_\theta = \arctan \frac{V_{\text{across}}^\theta}{V_{\text{along}}^\theta} = \arctan \frac{V_{y'_A}}{V_{z'_g} + V_{z'_A}}. \quad (23)$$

### 3 统一和分片调整行周期及偏流角对成像质量的影响

目前以电荷耦合器件(CCD)为传感器的空间相机通常采用电子式的像移补偿, 即通过调整 CCD 的行转移周期和像移速度的大小相匹配, 来消除像移导致的图像质量下降<sup>[10~12]</sup>。CCD 的行转移周期表征了 CCD 电荷包在沿轨方向的转移频率, CCD 在

完成当前行图像的光积分的同时进行上一行图像逐个像素电荷包的转移与读出。对于普通线阵 CCD, 实际的光积分时间可以和行转移周期相同, 也可以通过电子快门使之小于行转移周期。对于时间延迟积分电荷耦合器(TDI-CCD), 当积分级数为  $n$  时, 其光积分时间为  $n$  倍的行转移周期。

像移速度矢量的大小和方向都在不断变化, 像移速度矢量的方向由卫星或像面偏流角调整机构调整偏流角使焦平面的方向始终与像移的方向垂直来修正<sup>[13]</sup>。而大视场空间相机的焦平面狭长, 一般由多片 TDI-CCD 在一块像面基板上拼接而成<sup>[14]</sup>, 不同片 TDI-CCD 对应的视场位置不同。偏流角只能以中心视场为准进行统一调整, 因此不同视场位置存在偏流角调整残差。各片 TDI-CCD 的行转移周期可以统一或分片调整, 同一片 TDI-CCD 内各个像素的行转移周期相同, 因此即使分片调整行转移周期, 各视场位置仍会有像移匹配残差。以视场角为  $76^\circ$  的某空间相机为例, 采用前面提出的基于地球椭圆的大视场空间相机不同视场位置的像移速度和偏流角计算方法, 对统一和分片调整行周期, 以及统一调整偏流角对成像质量的影响进行分析。

该空间相机工作轨道高度 650 km, 采用太阳同步圆轨道, 视场角为  $76^\circ$ 。图 4 为 0 视场( $\theta=0^\circ$ )、+1 视场( $\theta=38^\circ$ )和 -1 视场( $\theta=-38^\circ$ )像移速度随星下点与升交点地心角  $\gamma$  的变化曲线。从图 4 中可以看出, 多数情况下 +1 视场和 -1 视场的像移速度小于 0 视场的像移速度, 当  $\gamma$  接近  $0^\circ$  即地物位于赤道附近时像移速度最大。

图 5(a)为 0 视场、+1 视场和 -1 视场偏流角随星下点与升交点地心角  $\gamma$  的变化曲线。图 5(b)

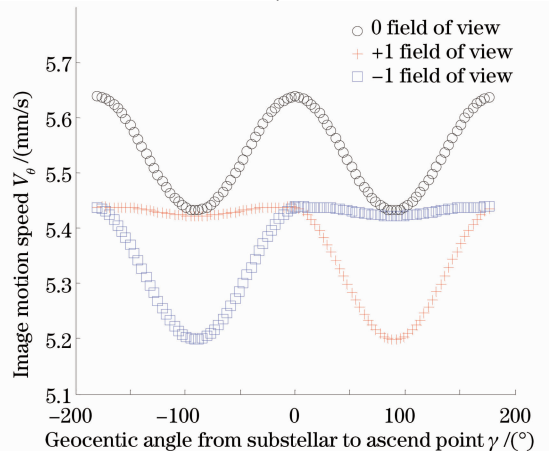


图 4 0、+1 和 -1 视场像移速度随  $\gamma$  的变化曲线  
Fig. 4 Curves of variaton of image motion velocity of 0, +1 and -1 field of view with  $\gamma$

为+1视场和-1视场分别与0视场偏流角之差随 $\gamma$ 的变化曲线。从图5可以看出,偏流角的绝对值

在赤道附近最大,靠近地球两极最小,+1视场和-1视场与0视场偏流角之差随 $\gamma$ 而变化。

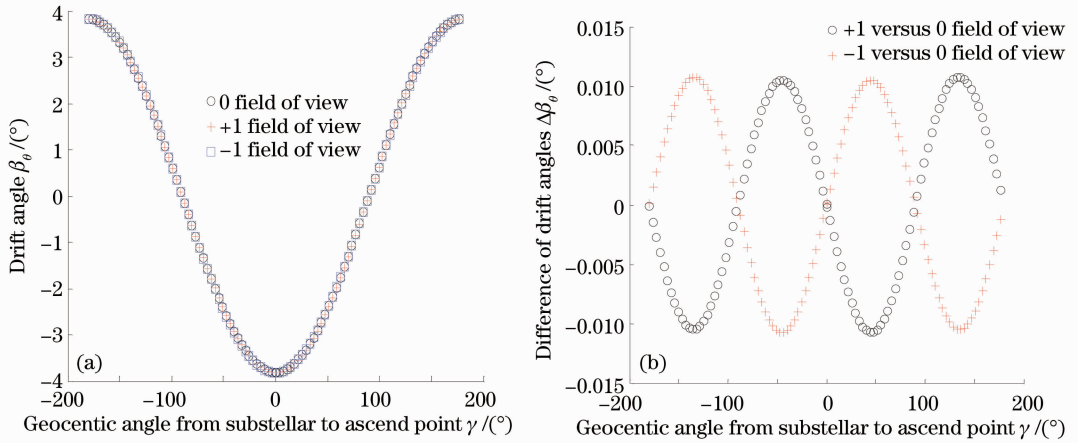


图5 (a)偏流角和(b)偏流角之差随 $\gamma$ 的变化曲线

Fig. 5 Curves of variation of (a) drift angle and (b) drift angle difference curves with  $\gamma$

图6为 $\gamma$ 分别为 $0^\circ$ 和 $91.98^\circ$ 时不同视场位置的像移速度,图7为 $\gamma$ 为 $-120.856^\circ$ 时不同视场位置的偏流角。从图6可以看出,当 $\gamma$ 为 $0^\circ$ 时,在对称视场位置的像移速度相同,但 $\gamma$ 不为 $0^\circ$ 时,像移速度并不随视场位置呈对称性。从图7可以看出,不同视场位置的偏流角各不相同,边缘视场处的偏流角与中心视场的偏流角相差最大。

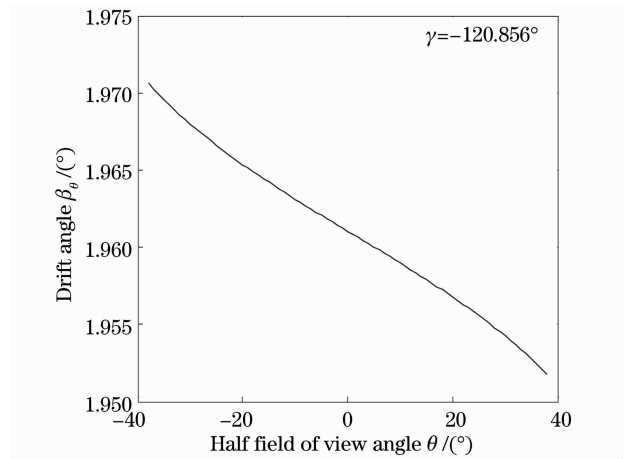


图7 不同视场位置的偏流角

Fig. 7 Drift angles at different field of view positions

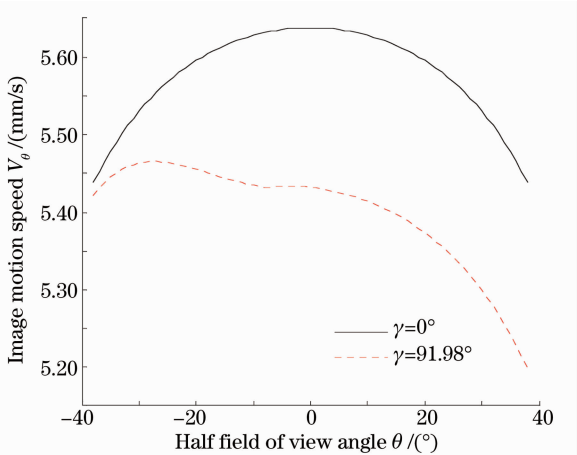


图6 不同视场位置的像移速度

Fig. 6 Image motion speeds at different field of view positions

图8为分别采用本文提出的基于地球椭球模型的像移计算方法和基于圆地球模型的像移计算方法计算得到的0视场位置沿轨方向的像移速度。由于地球的实际形状为椭球体,沿轨方向的像移速度应该随星下点与升交点地心角而变化,从图8可以看出,基于地球圆球模型计算得到的0视场位置沿轨方向的像移速度不随星下点与升交点地心角变化,

这显然与实际情况不符。而基于地球椭球模型计算的沿轨方向像移速度在赤道附近最大,在地球两极最小,这与地球赤道附近鼓起而两极扁平的实际形状吻合,因此基于地球椭球模型的大视场空间相机像移计算方法更为精确。

该大视场空间相机的焦平面采用11片CCD交错拼接而成,每片CCD含6000个有效像素,第1片CCD的第1像素对应+1视场,第6片CCD的中心对应中心视场,第11片CCD的第6000像素对应-1视场。当统一调整行周期时,各片CCD都采用中心视场像移速度对应的行转移周期。当分片调整行周期时,每片CCD采用该片CCD中心对应的视场位置的像移速度来计算行转移周期。像移匹配残差引起的奈奎斯特空间频率下的沿轨方向调制传递函

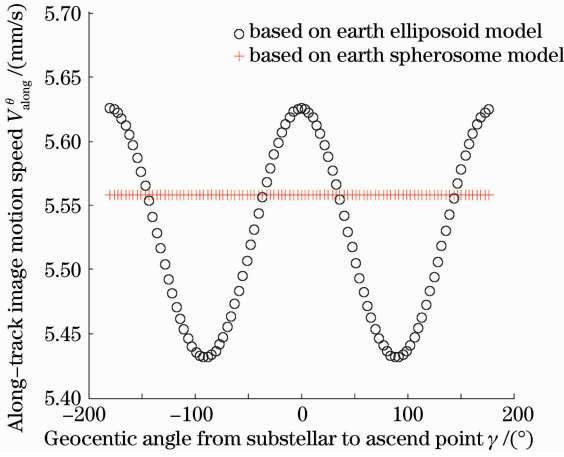


图 8 地球椭球模型与地球圆球模型计算沿轨方向像移速度比较

Fig. 8 Comparison of along-track image motion speeds computed based on earth ellipsoid model and earth spherosome model

数  $F_{MT}^{along}$  和垂轨方向调制传递函数  $F_{MT}^{across}$  分别<sup>[15,16]</sup>

$$F_{MT}^{along} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{S\Delta V}{V}\right)}{\frac{\pi}{2} \frac{S\Delta V}{V}}, \quad (23)$$

$$F_{MT}^{across} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} Stan \beta_c\right)}{\frac{\pi}{2} Stan \beta_c}, \quad (24)$$

式中  $S$  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。

从图 4 和图 6 可以看出, +1 视场在  $\gamma=90^\circ$  时与 0 视场具有最大的像移速度偏差, -1 视场在  $\gamma=-90^\circ$  时与 0 视场具有最大的像移速度偏差, 而整个视场范围内边缘视场处与中心视场处的像移速度偏差最大。因此  $\gamma=90^\circ$  或  $-90^\circ$  时取得整个视场的沿轨方向  $F_{MT}^{along}$  的最小值  $F_{MT,min}^{along}$ 。图 9 为当  $\gamma=90^\circ$ , 积分级数取 16 级时统一和分片调整行周期不同像素位置的  $F_{MT}^{along}$ , 从图 9 可以看出, 当分片调整行周期后, 各个像素位置的沿轨方向传递函数都得到有效提高。

图 10 为以中心视场为准统一调整偏流角时, 偏流角调整残差导致的垂轨方向 MTF 最小值  $F_{MT,min}^{across}$  随积分级数的变化曲线。从图 10 可以看出, 即使积分级数取到 96 级, 垂轨方向 MTF 的下降率仍不超过 0.02%, 因而统一调整偏流角对成像质量基本没有影响。

表 1 为 TDI-CCD 采用不同积分级数下统一和分片调整行周期时沿轨方向 MTF 的最小值的对比结果。从表 1 可以看出, 当积分级数为 16 级时, 分片调整行周期对应的沿轨方向 MTF 的最小值为

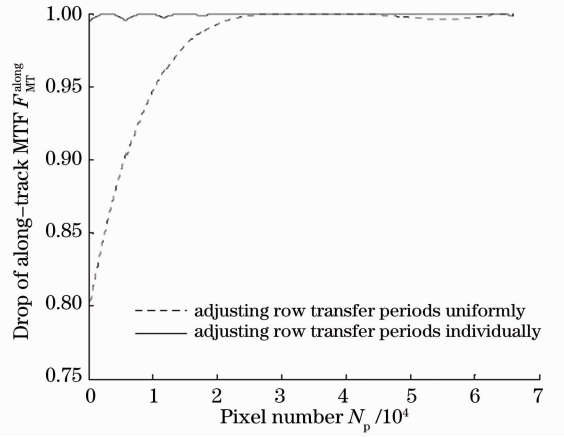


图 9 统一和分片调整行周期时不同像素位置的沿轨 MTF

Fig. 9 Along-track MTF of different pixels adjusting row transfer periods of CCD uniformly and individually

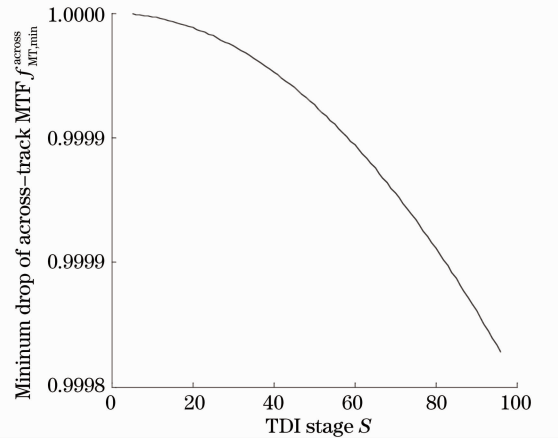


图 10 垂轨方向 MTF 最小值随积分级数变化曲线  
Fig. 10 Across orbit MTF minimum curve with the change of TDI stages

0.9947, 而统一调整行周期对应的沿轨方向 MTF 的最小值为 0.8267, 即分片调整行周期时沿轨方向 MTF 的下降率从 17.33% 减少到 0.53%。

表 1 不同积分级数下统一和分片调整行周期对比  
Table 1 Comparison of adjusting row transfer periods uniformly and individually at different TDI stages

TDI stage S	$F_{MT,min}^{along}$	
	Adjusting row transfer periods uniformly	Adjusting row transfer periods individually
1	0.9993	0.9999
4	0.9886	0.9997
8	0.9548	0.9987
10	0.9299	0.9979
12	0.9001	0.9970
16	0.8267	0.9947
24	0.6359	0.9882
32	0.4126	0.9791

当积分级数为 8 级, 统一调整行周期时沿轨方向 MTF 的最小值为 0.9548, 通常认为 MTF 下降率不超过 5% 时对成像质量无本质影响, 因此当积分级数大于 8 级时, 应分片调整各 CCD 的行转移周期, 而当积分级数不超过 8 级时, 可以统一调整行周期。在某大视场空间相机的在轨测试实验中, 根据此结果设置相机的行周期调整方式和参数, 在各个视场位置均成像效果良好。

## 4 结 论

大视场空间相机不同视场位置对应的地物点的经度差和纬度差, 以及地球椭球等因素导致其像移速度和偏流角随视场位置的不同而变化。推导了基于地球椭球的大视场空间相机不同视场位置的像移速度和偏流角计算公式。并以某大视场空间相机为例, 分析了各片 CCD 统一和分片调整行周期及偏流角对成像质量的影响。实验结果及分析表明, 以 MTF 的下降率不超过 5% 为约束条件, 当积分级数大于 8 级时, 应分片调整该相机各 CCD 的行转移周期, 当积分级数不超过 8 级时, 可以统一调整行周期。即使积分级数取到 96 级, 垂轨方向 MTF 的下降率仍不超过 0.02%, 因而统一调整偏流角对成像质量基本没有影响。当积分级数为 16 级, 分片调整行周期时沿轨方向 MTF 的下降率从 17.33% 减小到 0.53%。

## 参 考 文 献

- 1 Yan Aqi, Zhu Qing, Cao Jianzhong *et al.*. Space optical system with large field of view and high resolution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 1975~1977  
闫阿奇, 祝青, 曹剑中等. 用于航天的高分辨率大视场光学系统设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10): 1975~1977
- 2 Xiaoxia Zhao, Yongjun Xie, Wei Zhao. Broadband and wide field of view foveated imaging system in space[J]. *Opt. Engng.*, 2008, **47**(10): 103202
- 3 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0822001  
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0822001
- 4 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680~2683  
郭永祥, 李英才, 梁天梅等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2680~2683
- 5 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  
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
- 6 Kong Dezhu, Liu Jinguo, Lü Shiliang *et al.*. Calculation method for image motion speed of space camera and DSP-based implementation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(8): 1935~1941  
孔德柱, 刘金国, 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
- 7 Yang Jukui, Xu Jingwang. The effect of the drift on three-line TDI CCD mapping camera[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2006, **27**(4): 27~32  
杨居奎, 许敬旺. 偏流对三线阵 TDI CCD 测绘相机的影响分析[J]. *航天返回与遥感*, 2006, **27**(4): 27~32
- 8 Ma Tianbo, Guo Yongfei, Li Yunfei. Precision of row frequency of scientific grade TDI CCD camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(9): 2028~2035  
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
- 9 Wu Xingxing, Liu Jinguo. Image motion compensation of three-line stereo mapping camera using earth ellipsoid[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(8): 1793~1800  
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, **19**(8): 1793~1800
- 10 B. M. Miller, E. Ya Rubinovich. Image motion compensation at charge coupled device photographing in delay-integration mode[J]. *Automation and Remote Control*, 2007, **68**(3): 564~571
- 11 Liu Ming, Kuang Haipeng, Wu Hongsheng. Survey on the image motion compensation technology[J]. *Electronics Optics and Control*, 2004, **11**(4): 46~49  
刘明, 匡海鹏, 吴宏盛等. 像移补偿技术综述[J]. *电光与控制*, 2004, **11**(4): 46~49
- 12 Fan Chao, Li Yingcai, Fu Hongliang. Research on measurement method of image motion of space camera based on optical correlator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0712006  
樊超, 李英才, 傅洪亮. 光学相关法测量空间相机像移的性能研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0712006
- 13 Yu Chunfeng, Ding Yalin, Hui Shouwen *et al.*. Analysis of image rotation for aerial remote sensor with three-mirror reflective optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0823002  
于春风, 丁亚林, 惠守文等. 三反射系统航空遥感器像旋转分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0823002
- 14 Li Guoning, Liu Yanyan, Jin Longxu *et al.*. Automatic test system for static transfer function of the big visual field time-delayed integration charge coupled device camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3171~3176  
李国宁, 刘妍妍, 金龙旭等. 大视场时间延迟积分电荷耦合器件相机静态传递函数自动测试系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3171~3176
- 15 H. S. Wong, Y. L. Yao, E. S. Schlig. TDI charge-coupled devices: design and applications [J]. *J. Research and Development*, 1992, **36**(1): 83~105
- 16 Yang Xiubin, Jiang Li, Jin Guang. 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  
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

栏目编辑: 张 腾