

# 含扫描反射镜的星载相机异速像移分析

张树青 李 韬

(哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要** 在星载相机中,扫描反射镜通常会带来异速像移,导致时间延迟积分(TDI)CCD上像移分布不均,不同摆角下,这种分布情况均不同,给像移补偿造成困难,难以获得清晰的成像效果。为此进行分析,建立了含扫描反射镜的像移模型。针对某一低轨卫星参数进行仿真,得到了在不同摆角下,不同视场对应的像面像移量和偏流角。若以像面中心像移量和偏流角作为补偿标准,补偿后,CCD各点的偏流角残差较小,当像移量残差小于1/3 pixel时,即可认为补偿有效。不同摆角下,这种补偿效果是不同的。通过分析,当摆角在 $(-20^\circ, -0.12^\circ)$ 和 $(0.17^\circ, 20^\circ)$ 内时,异速像移明显,成像效果不佳;在 $(20^\circ, 35^\circ)$ 、 $(-35^\circ, -20^\circ)$ 和 $(-0.12^\circ, 0.17^\circ)$ 范围内时,补偿效果好,利于成像;摆角为0,即对星下点拍照时,成像效果较好,此时摆角的控制精度应在 $(-0.12^\circ, 0.17^\circ)$ 范围内。以上研究可为稳像机构设计提供一定参考。

**关键词** 遥感;异速像移;像移计算;偏流角;扫描反射镜;像移补偿

**中图分类号** V216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0228006

## Analysis on Different Rates Image Motion of Space Camera with a Scanning Mirror

Zhang Shuqing Li Tao

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China)

**Abstract** In the remote sensing camera of a satellite, its scanning mirror always bring the different rates image motion, which will make distribution of each point's image motion on time delayed integration (TDI) CCD non-uniform. The distribution changes with angles of mirror, and it makes compensation for image motion difficult and effect of photograph un-satisfactory. For analyzing this situation, model of camera's image motion vector with a scanning mirror is built. By concreting parameters, values of image motion and drift angles of each point on CCD with different angles of mirror are gained. When central point of CCD's image motion is chosen as the standard of compensation, after compensation, if image motion value around all parts of CCD is below 1/3 pixel, the compensation is effective. With different angles of mirror, this effect of compensation is different. By analysis, when the angle of mirror is within the scope of  $(-20^\circ, -0.12^\circ)$  and  $(0.17^\circ, 20^\circ)$ , photos' effect would be dim. This effect is satisfactory when angles of mirror are within the scope of  $(20^\circ, 35^\circ)$   $(-35^\circ, -20^\circ)$  and  $(-0.12^\circ, 0.17^\circ)$ . When angle of mirror is 0, this effect is satisfactory, and control precision of mirror's angle should be within the scope of  $(-0.12^\circ, 0.17^\circ)$ . All of this study above can offer some reference for design of image stabilization mechanism.

**Key words** remote sensing; different rates image motion; calculation of image motion; drift angle; scanning mirror; image motion compensation

**OCIS codes** 280.4788; 110.2960; 110.4753

## 1 引 言

在航天遥感系统中引入物方扫描反射镜,可以有效地增加系统的横向视场,扩大观测范围。但是,

扫描镜的引入通常会导致视轴倾斜,在像面上产生大小分布不均的异速像移。卫星与地球表面的相对运动,是遥感系统产生像移的根本原因<sup>[1]</sup>。像移会

收稿日期: 2013-08-12; 收到修改稿日期: 2013-10-24

作者简介: 张树青(1982—),男,博士,讲师,主要从事空间遥感相机稳像技术、EUV收集系统、红外仿真系统等方面的研究。E-mail: ciom.ac@163.com

对系统成像质量造成严重破坏,必须对其进行消除或补偿。常见的像移补偿方式有<sup>[2-6]</sup>:1)图像式补偿,通过数学方法建立导致图像退化的数学模型,通过一定算法对图像进行恢复,这种方法计算量大,并且实时性相对较差;2)缩短曝光时间补偿,这种方法虽然对像移的影响有所改善,但也会减小信噪比;3)光学式补偿,采用特定的光学系统,使感光介质在曝光时间内始终对地面同一目标成像,例如在镜头前方增加反射镜或旋转光栅,这种方式通常会造成成像畸变;4)机械式补偿,通过移动焦面,使其移动速度和方向与像移平均速度一致,来实现补偿,这种方式对结构的运行及制作精度要求高;5)时间延迟积分(TDI)电子学补偿,使 TDI CCD 电荷转移的速度与像移平均速度同步,来实现补偿;6)全帧转移/帧转移 CCD 补偿,将每一列像素看作一个线阵 TDI CCD,每列像素用相互独立的且按像移速度变化规律变化的脉冲驱动电荷转移来完成像移补偿。最常采用的补偿方式是 TDI 电子学补偿,但是,当像面存在异速像移时,以像移平均速度作为电荷转移速度来实施补偿,会造成某些点补偿不够,而某些点过补偿,仍然无法获得清晰的成像效果。

不同的扫描镜摆角下,异速像移分布情况是不同的。本文建立了含摆镜的像移模型,针对某一低轨卫星参数,得到了不同的反射镜摆角和视场下 CCD 上各点的像移量和偏流角,并分析了哪些摆角下进行像移补偿可获得较好的补偿效果,可为稳像机构设计提供一定的参考。

## 2 含扫描镜的星载相机像移模型

传统的像移模型一般是通过坐标变换、物像矢量共轭关系和差分法等方式来得到的<sup>[7-12]</sup>,这些模型通常只适用于星下点或卫星斜视状态下的像移计算,对于含有扫描反射镜的情况不再适用。本文通过坐标变换得到了物面拍照点的相对运动速度矢,再用镜面反射矩阵和缩放因子将该速度矢映射至像面,得到像移模型。该方法可适用于所有含扫描镜的航天遥感相机像移计算中。

### 2.1 扫描镜工作原理

如图 1 所示,扫描反射镜以卫星速度方向( $S_1$ )为轴转动,初始位置与  $S_2$  成  $45^\circ$ 。通过转动反射镜,可以增大遥感相机横向视场,获得更大的观测范围。但是,由于反射镜的斜视作用,会导致 CCD 上像移分布不均,产生异速像移。

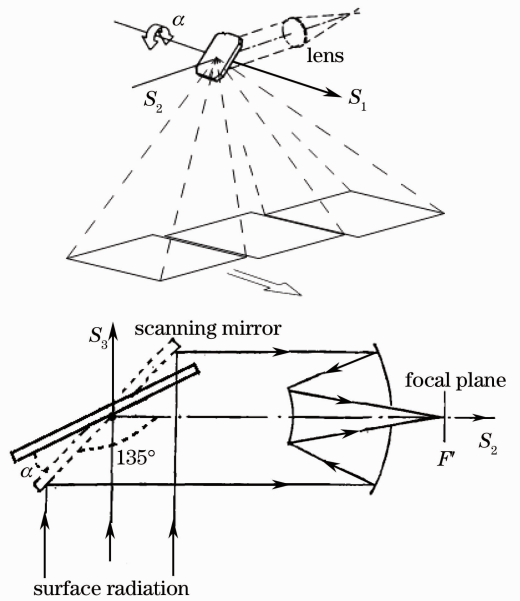


图 1 扫描反射镜示意图

Fig. 1 Schematic of the scanning mirror

### 2.2 坐标系规定

三种坐标系规定如图 2 所示:

1) 地球惯性坐标系  $I$ , 原点在地心处,  $I_2$  轴指向北极,  $I_3$  轴由地心指向卫星升交点,  $I_1$  轴满足右手法则, 该坐标系保持惯性静止。

2) 地球坐标系  $E$ , 该坐标系固联于地球, 原点与  $I$  系原点重合,  $E_2$  指向北极, 与  $I_2$  轴重合, 坐标系  $E_2$ , 以角速度  $\omega$  旋转。

3) 卫星坐标系  $S$ , 原点在卫星轨道上,  $S_1$  沿卫星速度方向,  $S_3$  指向天顶(并过  $I$  系原点),  $S_2$  满足右手法则且与轨道面垂直。

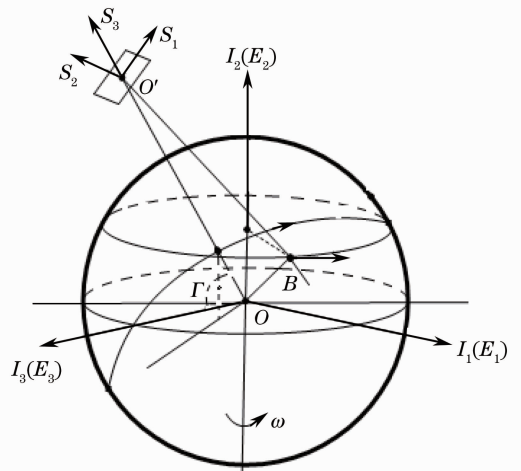


图 2 坐标系示意图

Fig. 2 Coordinate system

### 2.3 开始时刻观察点的视轴长度及其在卫星坐标系中的坐标

图3为图2中沿面 $BOO'$ 的横截面,其中, $h$ 为轨道高度, $R$ 为地球平均半径。在卫星坐标系中,反射镜摆角为 $\alpha$ ,位于1位置。开始拍照时刻( $t=0$ ),地面某点 $B'$ 通过反射镜反射,进入镜头后,成像于CCD上。由于反射镜尺寸相对轨道高度可忽略不计,将 $B'$ 发出的光线平移至线段 $BO'$ 处,即认为观察点 $B'$ 与 $B$ 重合,此时, $l$ 即可认为是观察点的视轴长度。

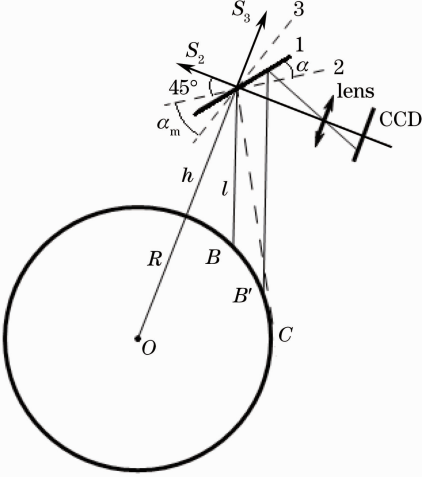


图3 卫星坐标系

Fig.3 Satellite coordinate system

反射镜初始位置(2位置)与光轴( $S_2$ 轴)成 $45^\circ$ ,摆动 $\alpha$ 角后(1位置),镜面单位法向量可写为

$$\mathbf{N} = [0, -\cos(\pi/4 + \alpha), -\sin(\pi/4 + \alpha)]^T,$$

反射镜反射矩阵<sup>[2]</sup>为

$$\mathbf{H} = \mathbf{E} - 2\mathbf{N}\mathbf{N}^T.$$

若 $B$ 点的视场为 $\omega$ , $B$ 点发出的光经反射后的反射光单位向量可写为

$$\mathbf{R}_2 = (0, \cos \omega, \sin \omega)^T.$$

入射光单位向量为 $\mathbf{R}_1 = \mathbf{H}\mathbf{R}_2$ ,于是

$$\cos \angle OO'B = \mathbf{R}_1 \cdot (0, 0, 1). \quad (1)$$

在三角形 $OO'B$ 中使用余弦定律,可得

$$l = (h + R) \cos \angle OO'B - \sqrt{R^2 - (h + R)^2 \sin^2 \angle OO'B}. \quad (2)$$

$B$ 点在 $S$ 系中的坐标为

$$(x_{0BS}, y_{0BS}, z_{0BS})^T = l \cdot \mathbf{R}_1. \quad (3)$$

### 2.4 像移模型的建立

如图3所示,从地球坐标系 $E$ 到卫星坐标系 $S$ 的坐标变换关系为:1)绕2轴转 $-\omega t$ ;2)绕3轴转 $i$ ;3)绕2轴转 $z = z + \Omega t$ ;4)绕3轴平移 $(R+h)$ ;5)绕3轴转 $\psi = \psi_0 + \psi' t$ ;6)绕2轴转 $\theta = \theta_0 + \theta' t$ ;7)绕1轴转 $\varphi = \varphi_0 + \varphi' t$ 。其中: $\omega$ 为地球自转角速度; $\Omega$ 为卫星轨道运动角速度; $\psi_0$ 、 $\theta_0$ 、 $\varphi_0$ 分别为卫星偏航角、俯仰角和横滚角; $\psi'$ 、 $\theta'$ 、 $\varphi'$ 分别为偏航、俯仰和横滚角速度; $\sin z = \sin \lambda / \sin i$ , $\lambda$ 为星下点纬度。变换矩阵可写为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(R+h) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i & \sin i & 0 & 0 \\ -\sin i & \cos i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega t & 0 & \sin \omega t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \omega t & 0 & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

某点在 $E$ 系的坐标变换到 $S$ 系时可写为

$$(x_S, y_S, z_S, 1)^T = \mathbf{T} \cdot (x_E, y_E, z_E, 1)^T. \quad (5)$$

为求得视场角为 $\omega$ 时,拍照点 $B$ 点在像面上产生的像移。令矩阵 $\mathbf{T}$ 中 $t=0$ ,得矩阵 $\mathbf{T}_0$ , (3)式中 $B$ 点坐标为 $S$ 系中的坐标,只须乘 $\mathbf{T}_0$ 的逆矩阵,就可得到 $B$ 点在 $E$ 系的坐标,即:

$$(x_{BE}, y_{BE}, z_{BE}, 1)^T = \mathbf{T}_0^{-1} \cdot (x_{0BS}, y_{0BS}, z_{0BS}, 1)^T. \quad (6)$$

拍照点 $B$ 点在 $E$ 系的坐标是一定值。

用(5)式的坐标变换矩阵 $\mathbf{T}$ ,再把 $B$ 点在 $E$ 系的坐标 $(x_{BE}, y_{BE}, z_{BE}, 1)^T$ 变换到 $S$ 系,有:

$$(x_{BS}, y_{BS}, z_{BS})^T = \mathbf{T} \cdot (x_{BE}, y_{BE}, z_{BE}, 1)^T. \quad (7)$$

由于矩阵 $\mathbf{T}$ 含有时间 $t$ , (7)式的物理意义事实上是 $E$ 系中拍照点 $B$ 点在不同时刻对应 $S$ 系中不同的点。

将(7)式中的 $x_{BS}$ 、 $y_{BS}$ 、 $z_{BS}$ 逐一求导,即可得 $B$ 点在 $S$ 系中的相对速度矢量 $(v_1, v_2, v_3)^T$ 。将该速度矢量映射到反射镜虚像空间中,令向量

$$(\mathbf{v}'_1, \mathbf{v}'_2, \mathbf{v}'_3)^T = \mathbf{H} \cdot \left( \frac{dx_S}{dt}, \frac{dy_S}{dt}, \frac{dz_S}{dt} \right)^T, \quad (8)$$

式中  $\mathbf{H}$  为镜面反射矩阵,  $\mathbf{v}'_1, \mathbf{v}'_2, \mathbf{v}'_3$  为 S 系中目标点经镜面反射后形成虚像的像移速度。在曝光时间内, 视轴长度变化较小, 仍以(2)式中结果代入计算, 则 CCD 上的像移速度( $S_1$  方向上的  $v_{i1}$ ,  $S_3$  为方向上为  $v_{i3}$ )、偏流角和像移量分别为

$$v_{i1} = \frac{f v'_1}{l \cos \omega}, \quad v_{i3} = \frac{f v'_3}{l \cos \omega}, \quad (9)$$

$$s = \frac{f \tau \sqrt{v_1'^2 + v_2'^2}}{l \cos \omega}, \quad (10)$$

$$\beta = \arctan(v'_3/v'_1), \quad (11)$$

式中  $\omega$  为视场角,  $f$  为镜头焦距,  $l$  为 B 点视轴长度,  $\tau$  为曝光时间,  $k = f\tau/l\cos\omega$  称为缩放因子。

### 3 反射镜摆角对异速像移的影响分析

仿真输入实际参数, 例如, 近地轨道的轨道高度  $H=340$  km, 轨道速度  $V_s=7.8$  km/s, 轨道倾角  $i=42.2^\circ$ , 星下点纬度  $\lambda=25^\circ$ , 三轴姿态角  $\psi=\theta=\varphi=0.3^\circ$ , 姿态角速度为 0, 镜头焦距  $f=3$  m, 曝光时间  $\tau=1$  ms, 视场角  $2\omega=\pm 1.5^\circ$ , 可得不同反射镜摆角和不同视场(单位均为 $^\circ$ )下 TDI CCD 上的像移量( $\mu\text{m}$ )/偏流角( $^\circ$ )。

表 1 不同摆角和视场下的像移量和偏流角  
Table 1 Value of image motion and drift angle

Image motion $\omega / \mu\text{m}$ Angle $\alpha / (^\circ)$	-1.5	-1	-0.5	0	0.5	1	1.5
-35	8.9/46.8	9.4/40.9	9.8/37.3	10.1/34.4	10.432.0	10.7/29.9	11.1/28.0
-30	16.03/7.4	16.50/6.5	16.97/5.7	17.47/4.9	17.98/4.2	18.51/3.4	19.05/2.7
-20	52.04/-10.5	53.61/-10.6	55.23/-10.8	56.90/-10.9	58.6/-11.0	60.4/-11.1	62.3/-11.3
-10	176.6/-9.4	182.3/-9.4	188.1/-9.4	194.2/-9.4	200.5/-9.4	207.1/-9.4	213.8/-9.4
-0.12	467.2/-3.8	469.6/-3.8	472.2/-3.8	472.0/-3.8	472.1/-3.8	471.5/-3.8	470.1/-3.8
0	468.4/-3.8	470.4/-3.8	471.6/-3.8	472.1/-3.8	471.9/-3.8	470.9/-3.8	469.1/-3.8
0.17	469.9/-3.7	471.3/-3.7	472.0/-3.7	470.6/-3.7	471.2/-3.7	469.6/-3.6	467.4/-3.6
10	219.4/3.0	213.0/3.0	207.8/3.0	200.8/3.1	195.0/3.1	189.4/3.1	184.0/3.2
20	78.9/12.1	77.3/12.2	75.7/12.3	74.2/12.4	72.8/12.6	71.4/12.7	70.1/12.8
30	44.9/23.7	44.4/23.9	44.0/24.0	43.6/24.2	43.2/24.3	42.9/24.5	42.5/24.7
35	38.6/28.8	38.3/29.0	37.9/29.2	37.5/29.4	37.0/29.7	36.4/29.9	35.5/30.4

上表中,  $\pm 35^\circ$  为反射镜最大摆角, 此时像面上的点发出的光线经反射镜后的反射光线刚好与地球相切于点 C(图 3 中)。

某一摆角下, 不同视场下的像移量大小不同, 造成这种现象的原因是在反射镜产生斜视情况下, 不同视场对应的视轴长度  $l$  不同, 使得(9)式中的缩放因子  $k = f\tau/l\cos\omega$  不同。这种由斜视产生的像移

分布, 叫做异速像移分布<sup>[13]</sup>。此外, 像移量和偏流角的增加或减少基本上是线性的, 因此, 在任意摆角下, 选择视场角  $\omega=0^\circ$  的偏流角和像移量作为机械或 TDI CCD 电子补偿<sup>[8]</sup>的补偿标准是合理的。

各个摆角下, 用  $\omega=0^\circ$  的偏流角进行偏流校正后, 再以该视场的像移量进行像移补偿, 所得到的像移量( $\mu\text{m}$ )/偏流角残差( $^\circ$ )如表 2 所示。

表 2 补偿后的像移残差

Table 2 Residual of image motion and drift angle after compensation

Image motion $\omega / \mu\text{m}$ Angle $\alpha / (^\circ)$	-1.5	-1	-0.5	0	0.5	1	1.5
-35	-1.2/12.4	-0.7/6.5	-0.3/2.8	0	0.3/-2.4	0.6/-4.5	0.9/-6.4
-30	-1.43/2.44	-0.97/1.60	-0.49/0.77	0	0.51/-0.76	1.04/-1.49	1.59/-2.20
-20	-4.86/0.40	-3.29/0.26	-1.67/0.13	0	1.73/-0.12	3.52/-0.25	5.37/-0.36
-10	-17.68/0.03	-11.99/0.02	-6.10/0.01	0	6.30/-0.01	12.82/-0.02	19.55/-0.02
-0.12	-4.51/0	-2.47/0	-0.86/0	0	0.11/0	-0.52/0	1.90/0.01
0	-3.69/-0.01	-1.72/0	-0.49/0	0	-0.26/0	-1.27/0	-3.01/0
0.17	-2.10/-0.01	-0.65/0	0.05/0	0	-0.79/0	-2.33/0	-4.53/0.01
10	18.65/-0.08	12.22/-0.05	6.01/-0.03	0	-5.80/0.03	-11.40/0.06	-16.80/0.09
20	4.69/-0.35	3.07/-0.23	1.50/-0.12	0	-1.45/0.12	-2.84/0.24	-4.18/0.37
30	1.25/-0.47	0.82/-0.31	0.40/-0.15	0	-0.39/0.15	-0.76/0.31	-1.12/0.46
35	1.1/-0.6	0.8/-0.4	0.4/-0.2	0	-0.5/0.2	-1.1/0.5	-1.9/0.9

图4、图5分别为摆角在 $10^\circ$ 和 $20^\circ$ 时,进行偏流角校正和像移量补偿前后的像移矢量分布图。图中

纵向为 TDI CCD 的纵向。单位均为  $\mu\text{m}$ 。

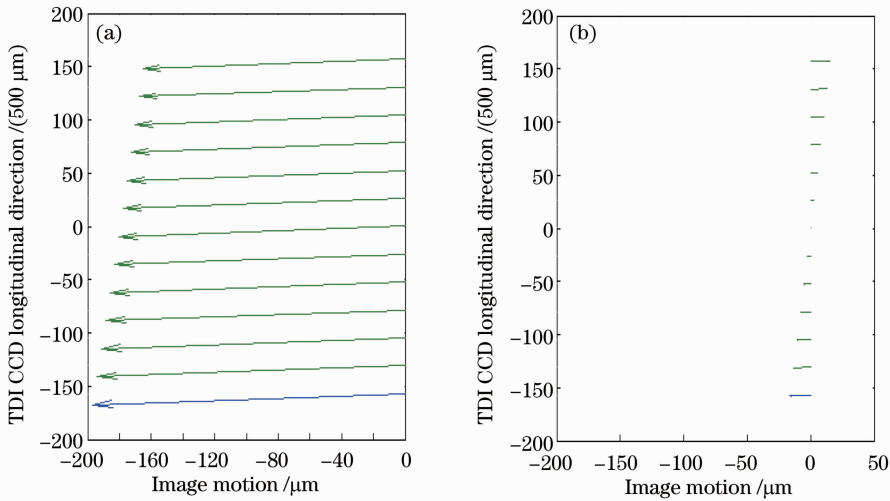


图4  $\alpha=10^\circ$ 时的像移矢量图

Fig. 4 Diagram of image motion vector when  $\alpha=10^\circ$

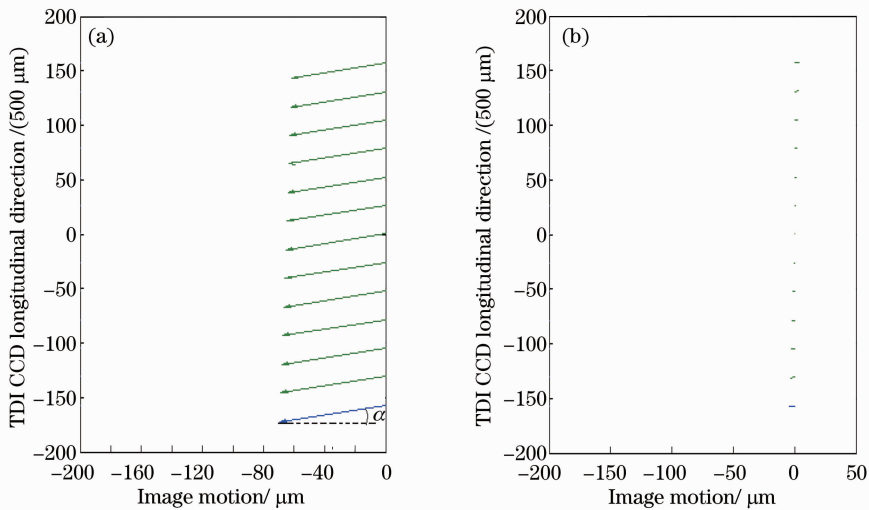


图5  $\alpha=20^\circ$ 时的像移矢量图

Fig. 5 Diagram of image motion vector when  $\alpha=20^\circ$

校正和补偿后的像移残差在  $1/3 \text{ pixel}$  ( $\sigma/3 = 13.5/3 \mu\text{m}$ ) 内,即在  $(-4.5 \mu\text{m}, 4.5 \mu\text{m})$  范围内时,可认为补偿有效,成像后能获得清晰的照片。对表1和表2进行分析,可得出以下结论:

1) 各视场的偏流角随摆角  $\alpha$  的增大而增大。不同摆角下,以  $0$  视场的偏流角进行偏流校正时,均可获得较好的效果。

2)  $\alpha=0^\circ$ ,即对星下点进行拍照时,仍然存在异速像移,其主要原因是物面为球面,像面各点在物面上的对应点的速度矢量存在差异。偏流角校正后,再以  $0$  视场的像移量进行补偿, $\alpha$  在  $(-0.12^\circ, 0.17^\circ)$  范围内时像移量残差较小。 $\alpha=0^\circ$ ,相机对星

下点成像,可获得非常好的效果,此时, $\alpha$  的控制精度应在  $(-0.12^\circ, 0.17^\circ)$  范围内。

3)  $\alpha$  越大,像移残差越小,造成这种情况的主要原因是,当  $\alpha$  增大时,各视场视轴长度  $l_i$  增大,导致其他视场缩放因子  $k_i$  与  $0$  视场缩放因子  $k_0$  的差值减小。 $\alpha$  在  $(20^\circ, 35^\circ)$  和  $(-35^\circ, -20^\circ)$  范围内时,各视场像移残差在  $1/3 \text{ pixel}$  内,可获得清晰的照片,拍照时, $\alpha$  应在此区间内取值。 $\alpha$  在  $(-20^\circ, -0.12^\circ)$  和  $(0.17^\circ, 20^\circ)$  范围内时,不利于拍照。

## 4 结 论

通过坐标变换和速度矢量映射的方法,建立了

含扫描反射镜的星载遥感系统像移计算模型,该模型适用于各种轨道的星载相机像移计算。

通过仿真输入某低轨卫星实际参数,得到了不同摆角和视场下的像移量及偏流角。拍照时,摆角应在 $(20^\circ, 35^\circ)$ 和 $(-35^\circ, -20^\circ)$ 范围内,并以 $0^\circ$ 视场的偏流角和像移量进行偏流角校正和像移补偿,可获得清晰的拍摄效果。此外,摆角为 $0^\circ$ ,即对星下点成像时,通过校正补偿,也可获得清晰的效果,但摆角的控制精度应在 $(-0.12^\circ, 0.17^\circ)$ 范围内。

### 参 考 文 献

- Zhou Qingcai, Wang Zhijian. Calculating image motion of aerospace camera based on dynamic object image conjugate relation [J]. Chinese J Space Science, 2003, 23(1): 74-75.  
周庆才, 王志坚. 应用动态物像矢量共轭关系计算航天相机像移[J]. 空间科学学报, 23(1): 74-75.
- Tong Zilei. Compensation technology for the image motion of CCD camera [J]. Laser & Infrared, 2005, 35(9): 628-632.  
童子磊. CCD相机的像移补偿技术[J]. 激光与红外, 2005, 35(9): 628-632.
- Zhang Li, Tang Ensheng, Xu Jingwang. Studies on the image motion compensation methods of space camera [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007, 28(3): 19-22.  
张 丽, 汤恩生, 许敬旺. 空间相机像移补偿方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(3): 19-22.
- Zhang Yuxin, Liu Yu, Ge Wenqi. Development and prospect of image motion compensation technology [J]. Chinese J Optics and Applied Optics, 2010, 3(2): 112-118.  
张玉欣, 刘 宇, 葛文奇. 像移补偿技术的发展与展望[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 112-118.
- Liu Ming, Kuang Haipeng, Wu Hongsheng, *et al.*. Survey on the image motion compensation technology [J]. Electronics Optics & Control, 2004, 11(4): 46-49.  
刘 明, 匡海鹏, 吴宏圣, 等. 像移补偿技术综述[J]. 电光与控制, 2004, 11(4): 46-49.
- Wang Yueing, Wang Jianyu. Imaging motion model and compensation methods of spaceborne opto-mechanical scanner [J]. Infrared & Laser Engineering, 2012, 41(4): 952-957.  
王跃明, 王建宇. 星载光机扫描仪像移模型及补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 952-957.
- Yan Changxiang, Wang Jiaqi. Method of coordinate transformation for IM & IMC calculation in aerospace camera system [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(3): 203-207.  
颜昌翔, 王家骥. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 203-207.
- Wang Yun, Yan Changxiang. Computation of image motion velocity vector for space camera based on different method [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1054-1060.  
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.
- Yao Chengkang, Li Qinghui. Motion compensation realization for satellite borne camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 1090-1097.  
姚呈康, 李庆辉. 星载相机的像移补偿实现[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1090-1097.
- Wu Xingxing, Liu Jinguo, Zhou Huaide. Image motion compensation of space camera with large field of view using earth ellipsoid [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0528001.  
武星星, 刘金国, 周怀得. 应用地球椭球的大视场空间相机像移补偿[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0528001.
- Guo Qiang, Zhang Xiaohu. Image shift compensation modeling and analysis for two-dimensional scanning on geostationary orbit [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(10): 1779-1787.  
郭 强, 张晓虎. 地球同步轨道二维扫描像移补偿技术建模与分析[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1779-1787.
- Sun Hui, Zhang Shumei. Computation model and error budget for image motion of aerial imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2492-2499.  
孙 辉, 张淑梅. 机载成像系统像移计算模型与误差分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2492-2499.
- A G Lareau, A J Partynski. Dual-band framing cameras: technology and status [C]. International Symposium on Optical Science and Technology, 2000. 148-156.

栏目编辑: 李志兰