

## 星载 TDICCD 相机方位扫描像移模型研究

张树青, 张媛, 周程灏, 王治乐

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 在应用坐标系变换方法实现星载 TDICCD 相机星下点扫描像移模型的基础上, 将 45° 旋转扫描反射镜(以下简称 45° 镜)用于 TDICCD 相机成像以扩大扫描视场。首先深入分析了 45° 镜的成像特性及 K 镜消像旋的原理, 并利用 Matlab 对 K 镜消像旋效果进行仿真, 验证了加入 K 镜的合理性。然后利用 45° 镜及 K 镜对光矢量的转换矩阵, 建立了 TDICCD 相机方位扫描时的像移模型, 为后续像移分析提供理论依据。

**关键词:** TDICCD; 像旋; 方位扫描; 像移

**中图分类号:** O43    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1823-07

## Image motion model of azimuthally photography for satellite borne TDICCD camera

Zhang Shuqing, Zhang Yuan, Zhou Chenghao, Wang Zhile

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The 45-degree-rotated scanning mirror (RS mirror) was employed into the field of Wide-of-View (FOV) imaging with a scanning TDICCD camera by using the Coordinate Transformation method of building sub-satellite point image motion model with the Satellite Borne TDICCD camera. The imaging characteristics of the RS mirror and the Offsetting Image Rotation principle of the K Mirror were fully discussed. The effect diagram after offsetting image rotation with the K Mirror was further simulated to verify the rationality of K Mirror. Based on the light vector transformation matrix of the RS Mirror and K Mirror, the image rotation model was finally derived when bearing scanning TDICCD camera was used, which could support the theoretical foundation of subsequent image rotation analysis.

**Key words:** TDICCD; image plane rotation; azimuthally photography; image motion

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-25

作者简介: 张树青(1982-), 男, 博士, 讲师, 主要从事空间红外光学系统设计方面的研究。Email: Sq.zhang@hit.edu.cn

## 0 引言

TDICCD 推扫成像技术以其对同一目标多次曝光获得足够高光电灵敏度和信噪比等优点,广泛应用于星载对地高分辨率光学遥感<sup>[1]</sup>。TDICCD 相机对地扫描时会产生前向像移和横向像移,二者合成是像点的实际像移<sup>[2]</sup>。建立精确的像移模型是精确校正像移的前提条件。目前最常用的 TDICCD 像移模型是由长光所王家琪院士建立的其次坐标变换方法,但是此模型的适用范围只针对星下点成像<sup>[3]</sup>,与实际情况存在差异。

为扩大扫描视场,多在遥感器镜头前增设 45°镜<sup>[4]</sup>,由于 45°镜绕光轴转动进行多行迹拍照时,不但会使所拍摄目标不连续,还会在像面产生较大偏流角,造成积分图像模糊,因此选用 K 镜进行消像旋<sup>[5]</sup>。文中从光反射矢量理论<sup>[6]</sup>出发,分别推导了 45°镜和 K 镜对光矢量的转换矩阵,结合原星下点扫描像移模型,最终建立了基于坐标变换法的 TDICCD 方位扫描像移模型。

## 1 45°镜的成像特性

图 1 是探测器经 45°镜反射到地面的光学示意图。

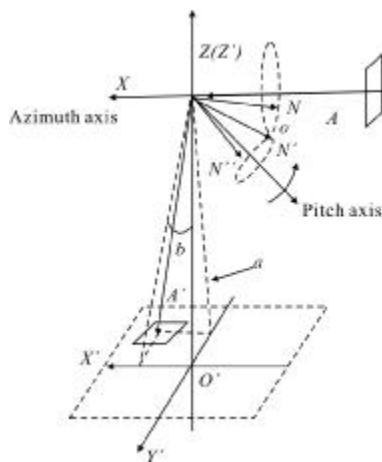


图 1 45°镜成像示意图

Fig.1 Sketch map of imaging of 45° mirror

对于 45°镜扫描的成像系统,一般认为探测器的位置是固定的,因此需要考察像方目标点固定,随扫描镜的转动,探测器经光学系统投影到地面的成像情况,因此在下文的讨论中,将探测器当作物面,而

地面当作像面。

图中 X 轴沿卫星飞行方向,为方位轴,与系统光轴重合;Z 轴过地心指向天顶;Y 轴与其他两轴遵从右手准则,为俯仰轴。系统光轴经 45°镜反射形成视轴,视轴在像平面上的轨迹称为扫描轨迹。驱动方位轴和俯仰轴可改变视轴的二维指向。当指向镜处于零位时,初始视轴与 Z 轴重合;当指向镜偏离零位时,视线的指向角可分别用其方位角 a 和俯仰角 b 表示,定义如下:

(1) 视线方位角 a:指视轴在穿航平面(即 Y'O'Z'平面)内的投影与 Z 轴夹角;

(2) 视线俯仰角 b:指视轴在沿航平面(即 X'O'Z'平面)内的投影与 Z 轴夹角。

### 1.1 45°镜的转动矩阵

在定坐标系中观察,物矢量 A 经 45°镜反射后的像矢量为 A',则有:

$$A' = (G_{10} \cdot R \cdot G_{10}^{-1}) \cdot A \quad (1)$$

由转动矩阵  $S_{p,\theta}$  定义<sup>[6]</sup>可知,45°镜先绕方位轴 X 旋转  $\alpha$  角再绕俯仰轴 Y 旋转  $\beta$  角的转动矩阵  $G_{10}$ ,为绕 X 轴转动  $\alpha$  角的转动矩阵  $S_{x,\alpha}$  与绕 Y 轴转动  $\beta$  角的转动矩阵  $S_{y,\beta}$  的乘积,即:

$$G_{10} = S_{x,\alpha} \cdot S_{y,\beta} \quad (2)$$

方位转动轴矢量为  $P_x[1 \ 0 \ 0]'$ ,俯仰转动轴矢量为  $P_y[0 \ 1 \ 0]'$ ,将两式带入转动矩阵计算公式,可得:

$$S_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$S_{y,\beta} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

由此可得指向镜同时绕方位、俯仰轴旋转的转动矩阵为  $G_{10}$ :

$$G_{10} = S_{x,\alpha} \cdot S_{y,\beta} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta & \cos\alpha & -\sin\alpha\cos\beta \\ -\cos\alpha\sin\beta & \sin\alpha & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

已知在初始位置时,45°镜法线矢量与指向镜夹角为 45°,则法线矢量为:

$$N = -\frac{\sqrt{2}}{2}i + 0j - \frac{\sqrt{2}}{2}k \quad (5)$$

依据光反射矢量理论得 45°镜反射矩阵:



探测器所成的地面像元距离星下点也就越远越大,像旋就越大。图 3 模拟了 9×9 阵列探测器经 45° 镜方位扫描所得的地面像元轨迹,取  $\beta=0$ 、 $\alpha=-36^\circ\sim 36^\circ$ ,在同一扫描带内仅模拟 9 个扫描角值处的地面像元轨迹,从图 3 可以初步看出地面像元轨迹随方位角  $\alpha$  的变化规律。

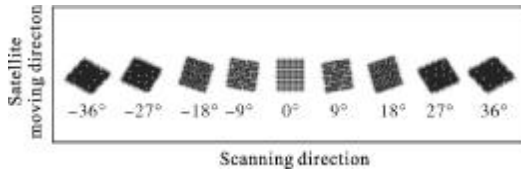


图 3 地面像元轨迹图

Fig.3 Sketch map of ground pixel trajectory

## 2 像旋的校正

目前常用的消像旋方法有两大类:电子图像消像旋和光学消像旋<sup>[7-8]</sup>。电子图像消像旋是采用软件处理的方法将 45° 镜扫描得到畸变图像校正为正确图像,这种方法有时间延迟,多应用于对实时性要求不太高的仪器中,对 TDICCD 相机而言,这是致命缺点,无法采用。

文中采用光学消像旋法中的 K 镜消像旋法,K 镜消像旋法类似于道威棱镜消像旋法,不同之处是采用反射镜代替道威棱镜,采用反射来实现两个道威棱镜的出入射折射,当 K 镜和 45° 镜一同绕方位轴转动且转速始终为 45° 镜转速的一半时,系统像旋将被消除(如图 4 所示)。与道威棱镜相比,K 镜不存在由于棱镜折射引起的光能量损失和色散等问题,非常适用于星载 TDICCD 相机对地扫描成像。

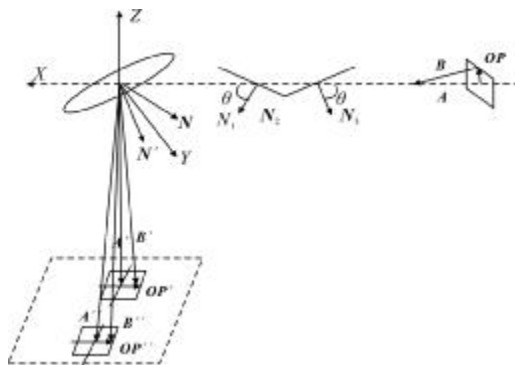


图 4 K 镜消像旋示意图

Fig.4 Sketch map of eliminating image rotation

### 2.1 K 镜消像旋的原理

设 K 镜中的三面反射镜的反射矩阵分别为  $R_1$ 、

$R_2$ 、 $R_3$ ,则 K 镜的反射特性矩阵  $R_K$  为:

$$R_K=R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \quad (12)$$

三面反射镜的法线矢量分别为:

$$N_1=[\cos\theta \quad 0 \quad -\sin\theta]'$$

$$N_2=[0 \quad 0 \quad 1]'$$

$$N_3=[-\cos\theta \quad 0 \quad -\sin\theta]'$$

对应得到:

$$R_K=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

设入射光线的入射矢量为  $A$ ,则  $A'$  为经 K 镜系统转动后的出射矢量, $A''$  为经 45° 镜系统后而成的像矢量。由于像旋是 45° 镜的方位扫描引起的,因此根据方位角校正像旋即可。45° 镜系统绕 X 轴转动了  $\alpha$  角,则 K 镜绕 X 轴转动  $\alpha/2$  角。

根据旋转反射理论可知:

$$A'=(G_{10}' \cdot R^{-1} \cdot G_{10}'^{-1}) \cdot A \quad (15)$$

式中: $G_{10}'$  为 K 镜绕 X 轴的旋转矩阵:

$$G_{10}'=S_{x,\frac{\alpha}{2}}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\frac{\alpha}{2} & -\sin\frac{\alpha}{2} \\ 0 & \sin\frac{\alpha}{2} & \cos\frac{\alpha}{2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

可得 K 镜的转动矩阵  $M_2$  为:

$$M_2=G_{10}' \cdot R^{-1} \cdot G_{10}'^{-1}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & -\cos\alpha \end{bmatrix} \quad (17)$$

仍取  $OP=[0 \quad 0 \quad 1]'$  为入射矢量, $OP$  先经 K 镜,得到  $OP'$ , $OP'$  作为 45° 镜的入射矢量再次反射,得到最终出射矢量  $OP''$ ,即:

$$OP'=M_2 \cdot OP=[0 \quad \sin\alpha \quad -\cos\alpha]'$$

$$OP''=M_2 \cdot OP'=\begin{bmatrix} \cos 2\beta \\ \sin\alpha \sin 2\beta \\ -\cos\alpha \sin 2\beta \end{bmatrix} \quad (19)$$

由像旋角的定义可知:

$$\tan\delta=\frac{OP_y''}{OP_x''}=\sin\alpha \tan 2\beta \quad (20)$$

文中应用在星载 TDICCD 上的 45° 镜只需做方位扫描即可,因此满足  $\alpha \neq 0$ 、 $\beta=0$ ,带入上式,显现像旋角  $\delta=0$ ,证明 K 镜可以完全校正 45° 镜只做方位扫描时所产生的像旋。

### 2.2 多元探测器消像旋

下面推导多元探测器上一元像元点发出的入射矢量经 K 镜及 45°镜系统后的成像情况。

已知第 i 行、第 j 列的像元入射矢量为:

$$A(i,j)=[f \ j \cdot d \ i \cdot d]'=f [1 \ j \cdot \sigma \ i \cdot \sigma]' \quad (21)$$

A(i,j)经 K 镜反射得出射矢量 A'(i,j)为:

$$A'(i,j)=M_2 \cdot A(i,j)=f \begin{bmatrix} 1 \\ j\sigma\cos\alpha+i\sigma\sin\alpha \\ j\sigma\sin\alpha-i\sigma\cos\alpha \end{bmatrix} \quad (22)$$

A'(i,j)经 45°镜反射得出射矢量 A''(i,j):

$$A''(i,j)=M_2 \cdot A'(i,j)=f \begin{bmatrix} -\sin 2\beta+i\sigma\cos 2\beta \\ \sin\alpha\cos 2\beta+j\sigma\cos\alpha+i\sigma\sin\alpha\sin 2\beta \\ -\cos\alpha\cos 2\beta+j\sigma\sin\alpha-i\sigma\cos\alpha\sin 2\beta \end{bmatrix} \quad (23)$$

仍旧模拟 9×9 阵列探测器经 45°镜方位扫描所得的地面像元轨迹,这次在探测器阵列与 45°镜之间加入 K 镜,取  $\beta=0$ 、 $\alpha=-36^\circ\sim 36^\circ$ ,在同一扫描带内模拟 9 个扫描角值处的地面像元轨迹,从图 5 可以看出经 K 镜校正后的地面像元轨迹随方位角  $\alpha$  的变化规律。

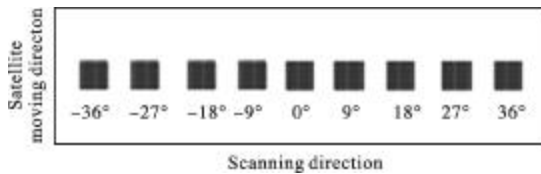


图 5 地面像元轨迹图

Fig.5 Sketch map of ground pixel trajectory

下面以方位角  $\alpha=-36^\circ$  时的地面像元轨迹为例,说明 K 镜消像旋的效果。

当  $\beta=0$ 、 $\alpha=-36^\circ$  时,此时地面所形成的像面旋转角为:

$$\tan\delta=[A_y''(-4,4)-A_y''(4,4)]/[A_x''(-4,4)-A_x''(4,4)]=[(\sin 36^\circ+4\sigma\cos 36^\circ)-(\sin 36^\circ+4\sigma\cos 36^\circ)]/(-4\sigma-4\sigma)=0 \quad (24)$$

可以证明,只要  $\beta=0$ ,无论方位角  $\alpha$  取何值,像旋角都为 0。

### 3 方位扫描摄影像移模型

文中推导星载 TDICCD 相机方位扫描像移模型所使用的数学基础为坐标系变换方法,在原有星下点扫描像移模型的基础上,加入 45°镜变换矩阵  $M_1$ 、

K 镜校正矩阵  $M_2$  以及调焦反射矩阵  $R_2$ ,成像系统图如图 6 所示。

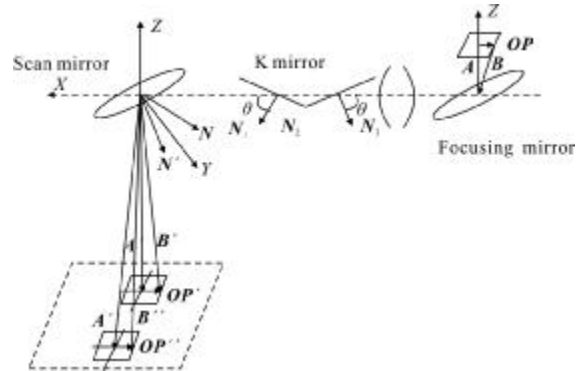


图 6 方位摄影成像系统示意图

Fig.6 Sketch map of azimuthally photography imaging

与星下点扫描像移模型中的坐标系定义<sup>[3]</sup>稍有不同的是,由于地面目标点位置变化和新加入三个坐标系的缘故,地理坐标系 G、相机坐标系 C 和像面坐标系 P 需要重新定义(坐标系 E、I、B、S 定义不变)。由于无法确定卫星内部各机构之间具体的位置关系,因此按理想情况下的简化结构处理,定义如下:(1)地理坐标系 G:地面目标点为原点, $G_1$ 轴为卫星前行方向, $G_3$ 轴过地心指向天顶, $G_2$ 轴与其他两轴遵从右手准则;(2)初始时刻,45°镜坐标系  $M_1$ 、消像旋坐标系 K 和相机坐标系 C 均与卫星坐标系 S 完全重合;摄影时刻,坐标系  $M_1$  和坐标系 K 分别绕 X 轴随 45°镜和 K 镜的旋转而旋转;(3)像面坐标系 P 的原点与  $M_2$  原点重合,x 轴方向为 TDICCD 积分方向,y 轴垂直于 TDICCD 积分方向。

地面目标经各系统成像到探测器上的整个坐标变换流程如图 7 所示。

在图 7 中,除去  $\gamma'_0$ 、 $i'_0$ 、 $h(\alpha)$  三个参数外,其他参

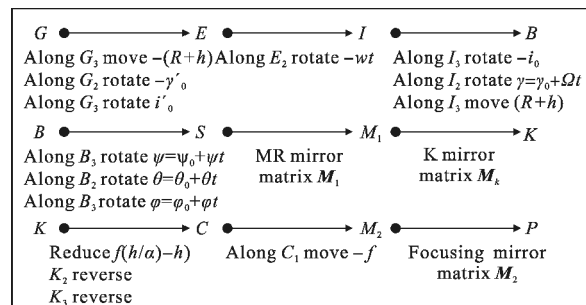


图 7 侧摆成像坐标系变化流程图

Fig.7 Flow diagram of coordinate system transformation of azimuthally photography

数的定义与星下点扫描像移模型中的定义完全相同。新参数定义如下:(1)  $\gamma'_0$  为地面目标点与升交点相对地心张角;(2)  $i'_0$  为地面目标点、升交点与地心构成的平面与赤道面之间的夹角;(3)  $h(\alpha)$  为卫星与地面目标点之间的距离。

根据上述分析,可以得到地面目标点坐标  $g=[g_1 \ g_2 \ 0]'$  到探测器像面像点坐标  $P=[P_1 \ P_2 \ 0]'$  的变换矩阵如公式(25)所示。

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f/[h(\alpha)-h] & 0 & 0 & f \\ 0 & -f/[h(\alpha)-h] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & -\cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin 2\beta & \sin\alpha \cos 2\beta & -\cos\alpha \cos 2\beta & 0 \\ \sin\alpha \cos 2\beta & \sin^2\alpha \sin 2\beta + \cos^2\alpha & \frac{1}{2}\sin 2\alpha(1-\sin 2\beta) & 0 \\ -\cos\alpha \cos 2\beta & \frac{1}{2}\sin 2\alpha(1-\sin 2\beta) & \sin^2\alpha + \cos^2\alpha \sin 2\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\alpha\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} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(R+H) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \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} \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} \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} \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} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R+h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g \\ g_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

## 4 结 论

综上所述,可以得出以下结论:

(1) 在光反射矢量理论和平面镜转动理论的基础上,推导了  $45^\circ$  镜转动矩阵,将其作用于面阵探测器各像元发出的光矢量,最终利用 Matlab 模拟得到卫星距离地面 720 km 处、方位角在  $-36^\circ \sim 36^\circ$  之间变化时的面阵探测器在地面所成像元的轨迹变化图。

(2) 由于  $45^\circ$  镜的方位扫描会使地面像元发生像旋,在对比各种消像旋方法优缺点的基础上,选择 K 镜进行消像旋,利用数学方法验证了 K 镜消像旋的原理,并推导出了 K 镜对光矢量的转动矩阵。再次利用 Matlab 模拟卫星距地 720 km、方位角在  $-36^\circ \sim 36^\circ$  之间变化时的地面像元轨迹变化图,9 个方位角

首先,令  $t=0$ ,将公式(25)化简展开,就可以得到像点坐标与目标点坐标间的关系方程,然后方程两边分别对时间  $t$  求导,可以推出在  $t=0$  时刻,像面坐标系中各个像点  $P_1$ 、 $P_2$  的前向像移速度  $V_{P1}$  和横向像移速度  $V_{P2}$ 。所以,星载 TDICCD 相机方位扫描成像的像移速度矢量在像面中投影  $V_P=[V_{P1} \ V_{P2}]$  和偏流角  $\eta=\tan^{-1}(V_{P1}/V_{P2})$  可以通过上述公式计算求出。

处的像元图均为矩形,验证了加入 K 镜的合理性。

(3) 将  $45^\circ$  镜应用于 TDICCD 方位扫描成像中,在原有星下点像移模型的基础上,结合前文推导出的  $45^\circ$  镜转换矩阵和 K 镜转换矩阵,最终建立了 TDICCD 方位扫描摄影时的像移模型,可以为后续方位扫描的像移分析提供理论依据。

## 参 考 文 献:

- [1] Wang Zhigang, Yan Jianping, Chen Shilu, et al. Study on satellite remote sensing high resolution image bias-angle and its compensation [J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(5): 39-42. (in Chinese)  
王志刚,袁建平,陈士槽,等. 高分辨率卫星遥感图像的偏流角及其补偿研究[J]. 宇航学报, 2002, 23(5): 39-42.
- [2] Yang Xiubin, He Xiaojun, Zhang Liu, et al. Effect and

- simulation of the deviant angle error on TDI CCD cameras image [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(11): 45-56. (in Chinese)
- 杨秀彬, 贺小军, 张刘, 等. 偏流角误差对 TDICCD 相机成像的影响与仿真[J]. *光电工程*, 2008, 35(11): 45-56.
- [3] 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, 4(12): 1585-1589.
- [4] Li Shuying, Zhou Shichun. Analysis of the imaging characteristics of the two-dimensional pointing mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(5): 17-22. (in Chinese)
- 李淑英, 周世椿. 二维指向镜的成像特性分析 [J]. *光电工程*, 2008, 35(5): 17-22.
- [5] Zhang E, Gong Huixing. Research and application of system for offsetting image rotation from 45° rotating scan mirror [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1999, 18 (2):125-132. (in Chinese)
- 张锷, 龚惠兴. 消除 45° 旋转扫描反射镜像旋转系统的研究及应用[J]. *红外与毫米波学报*, 1999, 18(2): 125-132.
- [6] Lian Tongshu. Reflecting Prim Conjugate Theory[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 1-3. (in Chinese)
- 连铜淑. 反射棱镜共轭理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 1-3.
- [7] Ma Hongzhang. Research on image rotation correction of multi-parallel scanning system with 45° mirror [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Engineering, 2005: 39-42.
- 马红章. 45° 镜多元并扫系统的像旋校正研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005: 39-42. (in Chinese)
- [8] Zhang Wei. Research on image aberrance correction of 45° rotating scan mirror [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008: 38-39. (in Chinese)
- 张维. 基于 45° 旋转扫描反射镜的图像畸变校正研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 38-39.