

# 指向镜低频正弦振动下遥感器图像的畸变及校正

胡春晖<sup>1,2</sup> 颜昌翔<sup>1</sup> 邵建兵<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 用于视场扫描或者像移补偿的指向反射镜在摄像时的低频角度抖动导致相邻帧间推扫距离产生差异,按照帧间等像素间隔方式输出图像会导致局部畸变。为研究角抖动引起畸变的原因、特点以及校正方法,在航天遥感器像移补偿模型基础上建立图像畸变计算模型,准确引入轨道参数、卫星姿态和指向镜安装方位等因素。在具体参数下仿真得到靶标畸变图样,并采取以特征点像移量来校正图像输出的方法。分别对指向镜无抖动、有抖动两种情况下校正后的图案做最小二乘拟合。仿真结果表明畸变大小除了与轨道、抖动参数有关外,还与景物方向有关,理想状况下采用的畸变校正方法精度优于 1 pixel;实验验证也取得了较好效果。

**关键词** 遥感;畸变校正;坐标变换;像移速度矢;指向反射镜

**中图分类号** TP70; TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0428002

## Pointing Mirror Low Frequency Sine Oscillation Induced Remote Sensor Image Distortion and Correction

Hu Chunhui<sup>1,2</sup> Yan Changxiang<sup>1</sup> Shao Jianbing<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Low frequency oscillation of pointing mirrors used for field scanning or image motion compensation induces push length difference between adjacent frames. Local distortion occurs when constant pixel interval between frames is used to output image. The image distortion is modeled based on a space remote sensor image motion model to investigate reasons and features of distortion caused by angle oscillation, as well as to correct it. Orbit parameters, satellite attitude and pointing mirror position are introduced into the model precisely. Distortion patterns are figured out with specified necessary parameters, and image motion of feature point is used to correct the image output. For corrected images with and without mirror oscillations, least square fittings are made. Simulation shows that distortion magnitude relates not only with orbit and vibration parameters, but also with target's direction. Under ideal condition, distortion rectification accuracy is better than one pixel by the proposed method. Experiments also verify the preferable effects.

**Key words** remote sensing; distortion rectification; coordinate transformation; image motion velocity vector; pointing mirror

**OCIS codes** 280.4788; 120.5800; 120.7280; 110.2960

## 1 引言

光学遥感器采用平面指向反射镜以实现大视

场、高像质。指向镜按用途可分为视场扫描和像移补偿两类,前者弥补平台大姿态运动的控制不便,灵

**收稿日期**: 2012-09-25; **收到修改稿日期**: 2012-10-26

**基金项目**: 国防预研基金(O5001SA050)资助课题。

**作者简介**: 胡春晖(1986—),男,博士研究生,主要从事光学仪器总体误差分析和光学装调等方面的研究。

E-mail: famous226@163.com

**导师简介**: 颜昌翔(1973—),男,博士,研究员,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yancx@ciomp.ac.cn (通信联系人)

活实现沿轨和穿轨扫描<sup>[1]</sup>;后者减小像移速度,增加曝光时间,平衡像移状态下信噪比与分辨率的矛盾<sup>[2]</sup>。指向镜作为运动部件,由于电机控制、轴系晃动和安装等误差的综合影响,实际时间-角度特性有别于视场扫描或像移补偿理论曲线<sup>[3]</sup>,形成指向镜控制误差,其对像质的影响是采用指向镜作为解决方案的光学遥感器设计时必须考虑的问题。

本文将指向镜控制误差中周期为帧周期1个量级及以上的振动分量定义为低频抖动误差。指向镜的高频抖动误差可以用平台振动等效,这导致积分时间内点扩展函数进一步模糊,使调制传递函数(MTF)下降,此方法在理论上已有较充分的论述<sup>[4~8]</sup>。低频抖动误差在平台轨道运动、地球自转、指向镜运动、探测器帧频控制等因素的综合作用下将导致景物局部畸变,目前在此方面研究并不充分。本文在像移补偿模型<sup>[9,10]</sup>的基础上,建立指向镜扫描时低频抖动误差导致景物局部畸变的计算模型,针对具体参数仿真得到景物畸变图,并根据特征点的像移量对这种畸变做校正。仿真结果表明在准确知道状态参数的情况下,本方法能够达到较高的精度。实验结果证明了此方法的可行性。

## 2 指向镜低频抖动误差致图像畸变计算模型

### 2.1 图像畸变原因

图1是将像移补偿功能推扫式遥感器聚于一小拍摄区内,不同帧时线阵CCD经光学系统在地球上的投影。图中实线、虚线分别对应指向镜无控制误差、有低频控制误差的情况。

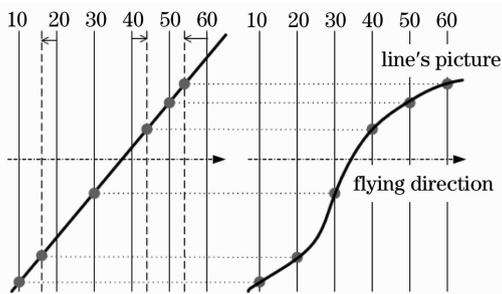


图1 图像畸变原因

Fig.1 Reason of image distortion

指向镜无控制误差时,在几百帧的短拍摄时间内,像移速度矢可视为常量<sup>[10]</sup>,地面直线景物在不同帧时被摄点位置不同,但与被摄点共轭的CCD像元编号等差变化。CCD固定帧频输出图像时,相邻帧的被摄点在飞行方向的投影相等,因此地面直线景物被

输出为直线。当指向镜存在低频抖动时,不同帧时被摄点的共轭像元编号也存在低频抖动,CCD仍按照固定帧频输出图像,导致出现图像畸变。

### 2.2 图像畸变计算模型

从畸变原因可见,为了得到准确的畸变量,需要计算不同帧时与被摄点共轭的像元编号。影响计算的因素有指向镜角位置、卫星位置和姿态以及景物位置,采用像移补偿坐标变换的方法<sup>[9~11]</sup>能够准确引入这些因素。如图2所示,本文所采用坐标系模型中地心惯性坐标系 $I$ 、地球坐标系 $E$ 、航天器轨道坐标系 $B$ 、航天器坐标系 $S$ 同文献<sup>[9]</sup>;定义景物坐标系 $V(V_1, V_2, V_3)$ ,固联于地球,原点为初状态下视轴与地表交点,其地球经度、纬度、地理高程分别为 $\alpha_v, \lambda_v, h_v, V_1, V_2, V_3$ 分别指向当地正东、正北、天顶。

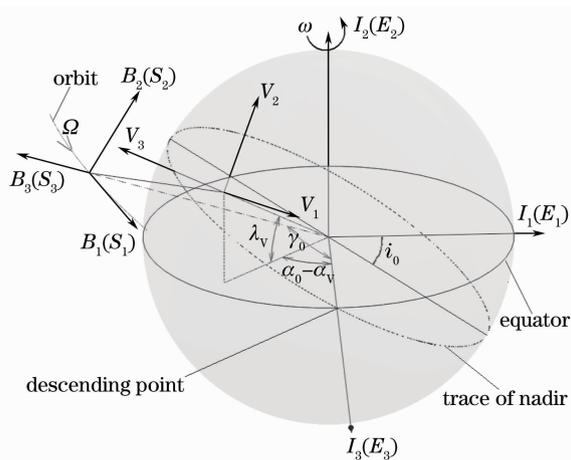


图2 航天光学遥感器对地成像中的几何关系

Fig.2 Geometrical relationship in earth observation of space optical remote sensor

图3为指向镜视场指向模型<sup>[12]</sup>。 $S$ 是航天器坐标系;望远镜像方主点为 $H$ ,光轴沿 $S_1$ ,焦距为 $f$ ;指向镜转轴为 $S_2$ ;靶面坐标系原点位于望远镜焦点 $F$ , $x, y$ 轴分别平行于 $S_2, S_3$ ,像元周期为 $a$ 的线阵CCD沿 $x$ 轴对称安放。考虑CCD采样离散特征,第 $N_x$ 个像元与对应光线在 $S$ 系中的齐次坐标 $T$ 关系为

$$x = [N_x - 0.5 \times \text{sign}(N_x)] \times a,$$

$$T = \begin{bmatrix} \frac{f}{\sqrt{f^2 + x^2}} & \frac{-x}{\sqrt{f^2 + x^2}} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$N_x = \text{fix} \left[ -f \frac{T(2)}{aT(1)} \right] - \text{sign} \left[ f \frac{T(2)}{T(1)} \right],$$

$$N_y = \text{fix} \left[ -f \frac{T(3)}{aT(1)} \right] - \text{sign} \left[ f \frac{T(3)}{T(1)} \right], \quad (1)$$

式中 $\text{sign}(\cdot)$ 和 $\text{fix}(\cdot)$ 分别是符号、取整函数。指向镜对视场的取向用反射矩阵<sup>[12]</sup> $M_p$ 表示:

$$\mathbf{N}_p = [\cos(-\beta_m) \quad 0 \quad \sin(-\beta_m) \quad 0]^T,$$

$$\mathbf{M}_p = \mathbf{I} - 2\mathbf{N}_p\mathbf{N}_p^T, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{N}_p$  为指向镜反射面法向矢量在  $S$  系中的齐次坐标,  $\mathbf{I}$  为 4 阶单位矩阵,  $\beta_m$  为  $S_1$  到指向镜法向的转角。从  $S$  系到  $V$  系的坐标变换过程如图 4 所示。 $\phi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$  为航天器横滚、俯仰、偏航姿态角,  $R$  为地球半径,  $H$  为轨道高度,  $\gamma_0$  是 0 时刻轨道点与降交点对地心张角(图示位置为负),  $\alpha_0$  是 0 时刻降交点经度,  $\Omega$  为轨道运动角速度,  $i_0$  为轨道倾角,  $\omega$  地球自转角速度。对应的变换矩阵为

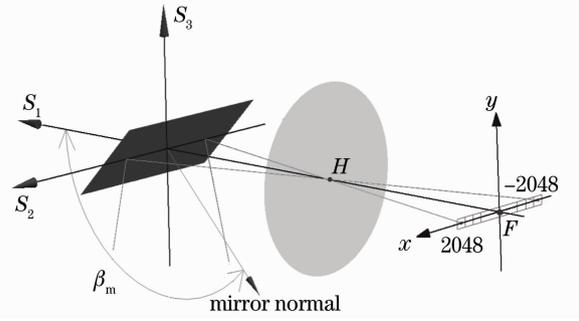


图 3 指向镜视场指向模型

Fig. 3 Field determination model of pointing mirror

$$\mathbf{M}_a = \mathbf{M}_1\mathbf{M}_2 \cdots \mathbf{M}_{10} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R+H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\gamma_0 + \Omega t) & 0 & -\sin(\gamma_0 + \Omega t) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\gamma_0 + \Omega t) & 0 & \cos(\gamma_0 + \Omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \cos i_0 & \sin i_0 & 0 & 0 \\ -\sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\omega t) & 0 & -\sin(\omega t) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\omega t) & 0 & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_v - \alpha_0) & 0 & -\sin(\alpha_v - \alpha_0) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha_v - \alpha_0) & 0 & \cos(\alpha_v - \alpha_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda_v & \sin \lambda_v & 0 \\ 0 & -\sin \lambda_v & \cos \lambda_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(R+h_v) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

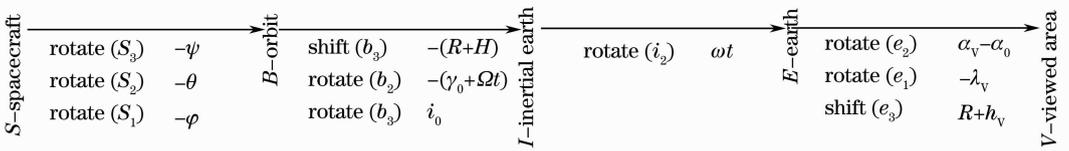


图 4 从卫星到景物的坐标变换链路

Fig. 4 Coordinate transformation chain from satellite to observation region

CCD 两端像元编号分别为  $N_{\max}$ 、 $N_{\min}$ , 由(1)式得到视场指向矢量  $\mathbf{T}_1$ 、 $\mathbf{T}_2$ , 将之变换到  $V$  系中:

$$\mathbf{T}_{v_n} = \mathbf{M}_a \mathbf{M}_p \mathbf{T}_n, \quad n = 1, 2. \quad (4)$$

将轨道原点  $\mathbf{B}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$  变换到  $V$  系中:

$$\mathbf{B}_{v_0} = \mathbf{M}_a \mathbf{B}_0. \quad (5)$$

由  $\mathbf{T}_{v_n}$  和  $\mathbf{B}_{v_0}$  计算投影线段  $D_{\min}$ 、 $D_{\max}$  与目标景物的交点  $P$ , 得到矢量  $\mathbf{PB}_0$ . 在  $V$  系中的齐次坐标  $\mathbf{G}$ , 由(4)式的逆变换

$$\mathbf{G}_s = \mathbf{M}_p \mathbf{M}_a^{-1} \mathbf{G}, \quad (6)$$

及(1)式得到点  $P$  的  $x$ 、 $y$  方向 CCD 共轭像元编号  $\mathbf{N}_{Gx}$ 、 $\mathbf{N}_{Gy}$ . 对于线阵 CCD,  $\mathbf{N}_{Gy} = 0$ .

在几百帧的拍摄时间内, 虽然低频抖动已有若干个周期, 但此段时间仅占整个摄周期的小部分, 指向镜理论角速度近似恒定。输出图像时, 如果不对帧输出像素间隔进行校正, 只考虑推扫方向帧间分辨率与地面像元分辨率的比例, 则第  $i$  帧输出竖

坐标为

$$Y = (iL/N_{\text{frame}})/N_{\text{GSD}}, \quad (7)$$

式中  $L$  为  $N_{\text{frame}}$  帧内沿轨推扫距离,  $N_{\text{GSD}}$  为平均地面像元分辨率。

### 3 景物畸变仿真结果

定义  $\beta_m = 135^\circ$  时, 光轴与地球表面的交点为景物坐标系原点  $V$ 。仿真计算参数如下:  $H = 600 \text{ km}$ ,  $\varphi = 3^\circ$ ,  $\theta = 2^\circ$ ,  $\psi = 0^\circ$ ,  $\gamma_0 = 10^\circ$ ,  $\alpha_0 = 0^\circ$ ,  $i_0 = 60^\circ$ , 选取景物地理高程  $h_V = 0$ , 据此得  $\alpha_V = 5.058^\circ$ ,  $\lambda_V = -8.310^\circ$ ,  $N_{\text{GSD}} = 18.1 \text{ m}$ ; 有效焦距  $f = 500 \text{ mm}$ , 像元间距  $a = 15 \mu\text{m}$ , 补偿倍率<sup>[13]</sup> 选取为 3, 帧频 200 Hz, 指向镜在像移补偿速度基础上做周期为 96 frame、幅值  $\pm 30''$  的正弦抖动, 如图 5 所示。抖动导致不同帧推扫间距与无抖动时存在差异, 即帧推扫距离误差, 图 6 是景物坐标系  $x, y$  方向的推扫距离误差-帧数曲线图。

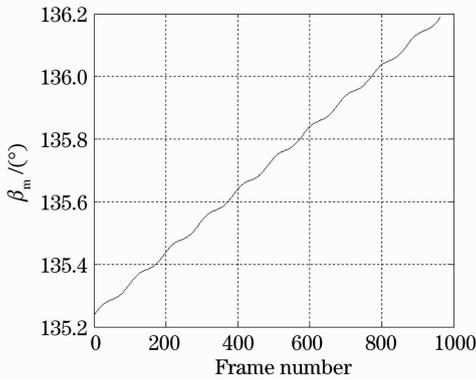


图 5 周期 96 frame、幅值  $\pm 30''$  的正弦振荡情况下指向镜角度-帧数关系

Fig. 5 Pointing mirror angle-frame relationship in presence of a sine oscillation with 96 frame period and  $\pm 30''$  amplitude

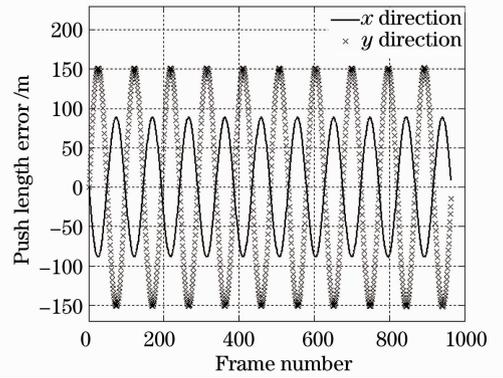


图 6  $x, y$  方向的推扫距离误差

Fig. 6 Push length error in  $x$  and  $y$  direction

为直观表达指向镜低频抖动对景物上各种几何特征成像的影响, 建立图 7 所示目标图案, 由圆心在景物原点处、半径为 5 km 的圆和 4 条依次成  $45^\circ$  角的直径组成, 其中  $AA'$  指向当地正西。图 8(a)、(b) 分别为指向镜在无控制误差和  $\pm 30''$  抖动误差时按照 (7) 式输出的景物图像。由于地球自转和轨道运动, 图 8(a) 出现整体的拉伸变形; 如果指向镜存在低频抖动, 如图 8(b) 所示, 将进一步出现扭曲。扭曲量与景物方向有关, 平行于 CCD 投影、推扫轨迹投影的直线不出现扭曲, 其他方向直线出现不同程度的扭曲。

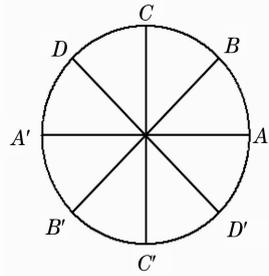


图 7 景物靶标原始图案

Fig. 7 Original pattern of target in view

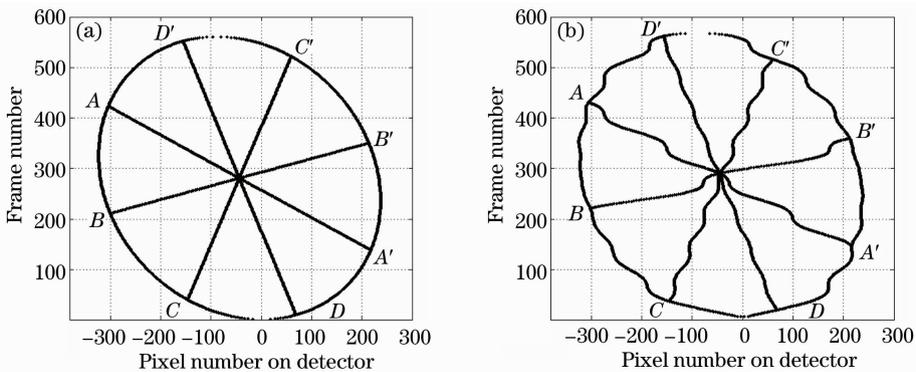


图 8 靶标输出图像。(a) 无指向镜控制误差; (b) 正弦振荡指向镜控制误差

Fig. 8 Pictures of target. (a) Without pointing mirror control error; (b) with pointing mirror control error as sine oscillation

### 4 依据像移量的景物畸变预校正方法

图 8(b)所示的景物畸变是由于实际摄影时,卫星在地球景物坐标系  $V$  上的帧间推扫距离和方向不同造成的,在知道各帧摄像时刻状态参数后,可以准确校正畸变。图 9 为景物在探测器靶面  $xy$  上第 1 frame 和第  $n$  frame 的位置关系,  $A_1 A_n$  是这段时间的像移量,

$$A_1 A_n = [\Delta x(n), \Delta y(n)], \quad (8)$$

可由选取景物特征点经(6)、(1)式计算得到。由于长度为 10 km 的被观测范围相对较小,区域内所有点与成像系统的几何配置关系大致相同,可认为不同点的像移一致,从而整个像面的像移可用特征点像移代替。将特征点选取为景物原点,在靶面上的像移如图 10 所示。据此得到第  $n$  frame  $x$ 、 $y$  方向

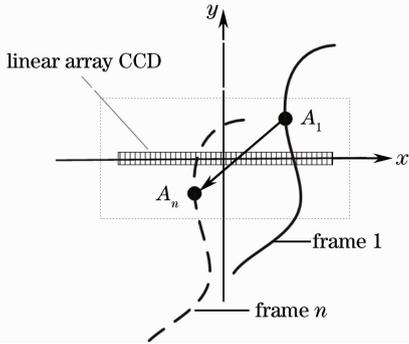


图 9 同一景物不同帧间像的平移

Fig. 9 Image shift of identical observation area between different frames

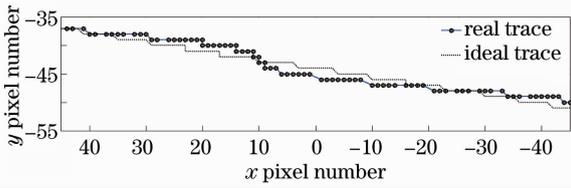


图 10 特征点像移轨迹

Fig. 10 Image motion trace of feature point

输出像素校正值  $p_x(n)$ 、 $p_y(n)$  为

$$\begin{aligned} p_x(n) &= N_x(n) - \Delta x(n), \\ p_y(n) &= -\Delta y(n). \end{aligned} \quad (9)$$

根据(9)式得到校正后的景物图像如图 11 所示。为了定量表述校正后图像对原图案的保持程度,通过求解(10)式的最小二乘问题,对图 11 上的离散圆周点做拟合得到最佳拟合圆的圆心  $(a, b)$  以及半径  $r$ ,对 4 条直径做直线拟合得到直线在  $y$  轴上的截距  $c_i$  以及斜率角  $k_i (i=A, B, C, D)$ :

$$\begin{aligned} \min_{(a,b,r)} \sum_j [(x_j - a)^2 + (y_j - b)^2 - r^2]^2, \\ \min_{(k_i, c_i)} \sum_j (x_j \tan k_i + c_i - y_j)^2. \end{aligned} \quad (10)$$

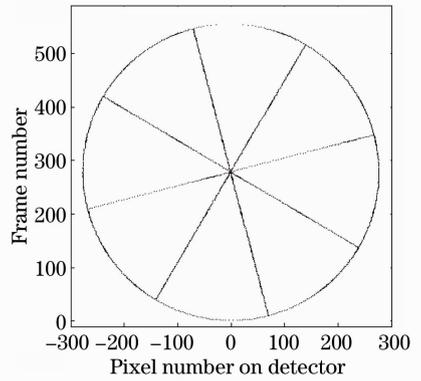


图 11 仿真校正图像

Fig. 11 Corrected image by simulation

采用同样的方法对指向镜没有波动的情况进行拟合,将两种情况下的拟合系数以及圆拟合最大误差列于表 1。两者的差别小于 1 pixel,可见在准确知道状态参数的情况下,本文采用的校正方法很好地消除了指向镜低频抖动导致的图像畸变。表 1 中圆拟合相对半径误差在两种情况下都存在,这是由固有的几何投影畸变<sup>[14,15]</sup>、特征点像移运动代替像面上所有点运动、像素量化误差等因素造成的。

表 1 校正图像最小二乘拟合结果

Table 1 Least-square fitting results of corrected image

Mirror movement	$(a, b); r$	$c_A; k_A$	$c_B; k_B$	$c_C; k_C$	$c_D; k_D$	$\max(\Delta r/r) / \%$
With oscillation	$(-0.46, 278.48);$ 276.96	278.59; 149.40°	279.04; 14.53°	280.03; 59.53°	276.19; 104.69°	0.6
Ideal movement	$(-0.46, 278.47);$ 276.97	278.67; 149.41°	279.11; 14.53°	280.09; 59.52°	276.19; 104.70°	0.6

图 12 是对某在轨采用单轴指向镜做像移补偿、狭缝接收像的光学传感器传回的数据分别采用等帧间输出方法和本文预校正方法得到的图像。由于

状态参数和指向镜角位置参数存在误差,所以实际只能得到近似像移量,但直观上讲,采用本方法仍取得了较好的效果。



图 12 畸变校正效果。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 12 Effects of distortion correction. (a) Before rectification; (b) after rectification

## 5 结 论

航天遥感器在指向镜存在低频控制误差时,如果采用固定的帧输出像素间隔模式,会导致图像的畸变,畸变量的大小与景物方向、轨道参数、卫星姿态、指向镜低频控制误差量有关。本文在像移补偿模型的基础上,建立误差量-畸变量的关系模型;并在准确知道每一帧的状态参数情况下,采用特征点的像移曲线校正帧输出像素间隔,得到校正图案。本方法对指向镜低频抖动的校正精度很高,但局限性在于不能同时校正大角度斜视时固有的几何投影畸变;只给出小区域图像由于指向镜低频控制误差导致的局部畸变的高精度校正方法,在应用于大范围图像校正时只须将之分割为小区间分别处理,以满足特征点代替区间像移运动的条件。图像预处理方法能有效消除指向镜低频抖动导致的畸变,可为后续图像处理提供方便。

## 参 考 文 献

- 1 H. Bovensmann, J. P. Burrows, M. Buchwitz *et al.*. SCIAMACHY: mission objectives and measurement modes[J]. *J. Atm. Sci.*, 1999, **56**(2): 127~150
- 2 J. Pearlman, C. Segal, L. Liao. Development and operation of the EO-1 Hyperion imaging spectrometer [C]. *SPIE*, 2004, **4135**: 243~253
- 3 Wang Yiqun, Yan Changxiang, Jia Ping. Motion precision measurement of imaging spectrometer's scanning mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 185~189  
汪逸群, 颜昌翔, 贾平. 成像光谱仪扫描镜运动准确度测量[J]. *光子学报*, 2012, **41**(2): 185~189
- 4 O. Hadar, I. Dror, N. S. Kopeika. Image resolution limits resulting from mechanical vibration. Part IV: real time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification[J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(2): 218~227
- 5 Geng Wenbao, Zhai Linpei, Ding Yalin. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(2): 324~320  
耿文豹, 翟林培, 丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(2): 324~320
- 6 Qian Yixian, Liang Wei, Gao Xiaodong. Numerical analysis of

- dynamic modulation transfer function for high-resolution aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 192~196  
钱义先, 梁伟, 高晓东. 高分辨率航空相机动态调制传递函数数值分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 192~196
- 7 A. Stern, N. S. Kopeika. Analytical method to calculate optical transfer functions for image motion and vibrations using moments [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(2): 388~396
- 8 Zhao Yanyan, Yuan Yan, Su Lijuan. Point spread function estimation of blurring due to uniform linear motion in arbitrary direction [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0809003  
赵妍妍, 袁艳, 苏丽娟. 任意方向匀速直线运动模糊的点扩展函数估计[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0809003
- 9 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, 颜昌翔等. 航天光学传感器像移速度矢计算数学模型[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1585~1589
- 10 Wang Yun, Yan Changxiang. Computation of image motion velocity vector for space camera based on difference 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
- 11 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
- 12 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. 三反系统航空遥感器像旋分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0823002
- 13 Li Huan, Xiang Yang, Feng Yutao. Ground resolution for imaging spectrometer with motion compensation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(4): 745~749  
李欢, 向阳, 冯玉涛. 运动补偿成像光谱仪的地面分辨率[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(4): 745~749
- 14 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
- 15 Zhao Xingyuan, Li Lei, Mao Xia. Simulation of attitude aberration of downward-looking scene real-time image [J]. *Computer Simulation*, 2006, **23**(10): 181~184  
赵兴圆, 李磊, 毛峡. 下视景象实时图像姿态畸变的仿真[J]. *计算机仿真*, 2006, **23**(10): 181~184

栏目编辑: 王晓球