

天宫一号高光谱成像仪严密成像几何模型研究

刘志文¹, 刘定生², 魏静波³

1.中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094;

2.中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094;

3.南昌大学, 南昌 330031

摘要:为了获得高信噪比影像数据,天宫一号高光谱成像仪采用了运动补偿技术增加探测器积分时间的成像模式。针对此种成像方式,本文分析了成像仪的成像特点与发射镜的运动规律,建立了反射镜角度与观测矢量的几何关系,形成了基于天宫一号高光谱成像仪的严密成像几何模型。该模型符合反射镜运动补偿条件下像点与对应地物点的几何关系,通过理论精度分析和实际应用验证了纠正模型的正确性,并能获得与理论相符的实际几何定位精度。

关键词:系统几何校正,严密成像几何模型,反射镜,运动补偿

中图分类号:TP751.1 **文献标志码:**A

引用格式:刘志文,刘定生,魏静波. 2014. 天宫一号高光谱成像仪严密成像几何模型研究. 遥感学报,18(增刊): 62-67

Liu Z W, Liu D S and Wei J B. 2014. Rigorous geometric model of Tiangong-1 hyperspectral spectrometer. Journal of Remote Sensing, 18(Sup): 62-67 [DOI: 10.11834/jrs.2014z10]

1 引言

分析地物的光谱特征,高光谱乃至超光谱成像仪技术发展迅速,其基本原理是将景物像元的光谱谱段分成几十个乃至上百个光谱通道(Solomon等,1985;李幼平等,2006),获得地物反射光谱中更为精细的不同光谱上的响应特性。由于这类成像光谱仪划分光谱通道过多,每一个通道的谱宽极为狭窄,其焦平面阵列探测器中每个像元所接收到的能量大为降低(Kerekes等,1991),直接导致成像图像的信噪比严重下降。为了确保影像在具有高空间分辨率前提下,获得足够的信噪比,很多成像光谱仪采用了卫星运动补偿技术,通过增加积分时间的方法来提高信噪比(Eckardt等,2005;Sellar等,2005;Schumann等,2002)。这种成像方式采用反射镜沿卫星飞行的反方向旋转来改变观测方向,从而增加成像区域积分时间,如海洋地球测绘卫星 NEMO 中的 COIS(Wilson等,1999)、高分辨率成像光谱仪(High Resolution Imaging Spectrometer, HIRIS)(Goetz等,1989)等成像光谱仪都

采用了该方式,通过增加积分时间来提高像素的信噪比。

这类高光谱成像仪的应用为地面数据处理,尤其是几何定位处理提出了新的难题。在高光谱成像仪对地面进行扫描时,卫星向前飞行的同时反射镜同步向后旋转,使其观测矢量随时在改变,因此,几何定位模型需要充分考虑反射镜旋转改变观测矢量造成的影响。由于目前较为成熟的各类系统几何校正模型没有考虑反射镜旋转的因素(Toutin等,2004;Poli等,2011;Crespi等,2012),直接使用这些模型将使得校正后的图像产生沿飞行方向的拉伸变形。如何在系统几何校正中修正此变形,需在研究反射镜旋转对几何定位的影响的基础上,建立相应的严密成像几何模型。

本文针对天宫一号高光谱成像仪,重点分析了运动补偿过程中成像特点与运动方式,形成反射镜角度与观测矢量的几何关系,建立了基于反射镜运动补偿的严密几何成像模型。利用实验数据,进行几何校正实验,获得了与理论相符的实际几何定位精度。

收稿日期:2014-01-10;修订日期:2014-04-10

基金项目:载人航天工程天宫一号民用试应用项目

第一作者简介:刘志文(1979—),男,博士,现从事遥感图像处理等研究。E-mail:zwliu@csu.ac.cn

2 反射镜运动补偿原理

天宫一号高光谱成像仪运动补偿原理如图1所示,在成像仪开始扫描时,卫星平台处于 B_0 处,反射镜指向星下点的前方 A_0 处;成像过程中,随着卫星的不断向前飞行,反射镜按照一定的规律沿着卫星飞行方向向后旋转,使光轴相对于卫星平台以2倍的反射镜旋转角速度,逆飞行方向后摆;当反射镜与传感器之间的夹角为 45° 时,反射镜指向星下点;当成像结束时,卫星平台在 B_t 处,反射镜指向星下点沿飞行方向的后方 A_t 处。这样完成一次运动补偿,然后迅速调整反射镜位置,使观测方向再次指向卫星平台的前方,进行下一次运动补偿。在整个成像过程中,卫星星下点移动位移为 S_0S_t ,而传感器扫描位移为 A_0A_t ,补偿倍数为: $N=S_0S_t/A_0A_t$,则相对于非运动补偿的情况,探测器对目标区域 A_0A_t 的积分时间增大至 N 倍。通过控制反射镜的旋转速度,可以调整运动补偿倍数,改变探测器积分时间。

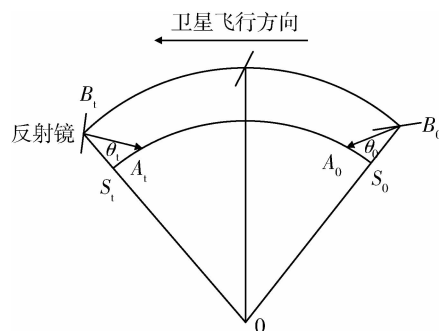


图1 反射镜运动补偿成像原理

Fig.1 Imaging principle with motion compensation

3 反射镜运动补偿成像几何特征分析

3.1 反射镜旋转特征

为了实现运动补偿成像模式,反射镜按一定的运行规律(李欢等,2009)旋转。假设运动补偿倍数为 N 倍时,反射镜角速度 ω 为:

$$\omega = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{N}\right) \frac{v_0}{R+h} \cdot \frac{\frac{R+h}{R} \cos \left[\left(1 - \frac{1}{N}\right) \frac{v_0 t}{R+h} - \arcsin \left(\frac{R+h}{R} \sin \theta_0 \right) \right] - 1}{1 + \left(\frac{R+h}{R}\right)^2 - 2 \left(\frac{R+h}{R}\right) \cos \left[\left(1 - \frac{1}{N}\right) \frac{v_0 t}{R+h} - \arcsin \left(\frac{R+h}{R} \sin \theta_0 \right) \right]} \quad (1)$$

式中, ω 是反射镜旋转角速度, v_0 是卫星飞行速度, h 是卫星平台飞行轨道高度, θ_0 是对目标进行扫描时的观测角, t 为控制器积分时间, R 为地球半径。在假定卫星轨道高度 h 为832 km,补偿倍数 N 为2倍,地球半径 R 为6378.137 km的情况下,反射镜旋转角速度变化曲线如图2所示:

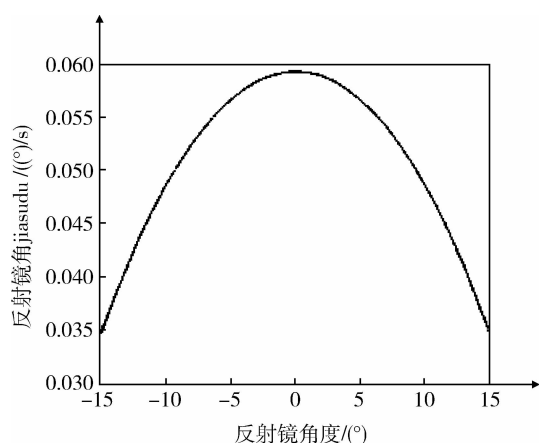


图2 反射镜旋转角速度变化曲线

Fig.2 Curve of Angular velocity

从反射镜旋转角速度变化曲线可以看出,成像开始后反射镜旋转角速度逐渐增加,当反射镜指向

星下点时达到最大值,随后渐渐减小。

3.2 成像几何分析

高光谱成像仪是采用反射镜运动补偿线阵推扫式成像方式,满足中心投影的共线条件方程。其与非运动补偿成像仪成像的主要区别为:成像过程中,反射镜旋转角速度随反射镜角位置的不同不断的调整变化(如图1所示),导致对地观测矢量呈现非匀速线性变化;而非运动补偿成像仪在扫描过程中,除了卫星平台姿态影响外,对地观测矢量基本上保持不变。因此,为了描述此模式下像素点与对应地物点的成像几何关系,需要推导出反射镜旋转而造成的反射镜角度与观测矢量的变化关系。

(1) 反射镜角位置的求解

在成像过程中反射镜角速度不断变化,故在求取任一扫描行的反射镜角位置值时,不能根据星载平台提供的反射镜角位置值进行简单插值,需要根据反射镜角速度计算,反射镜角度计算公式如下:

$$\vartheta_{\text{CCD}} = \vartheta_{t_0} + \omega \times (t - t_0) \quad (2)$$

式中, ϑ_{CCD} 为扫描行反射镜角度, t 为扫描行的采集时间, t_0 为平台采集反射镜角度时刻, ϑ_{t_0} 为 t_0 时刻平台采集的反射镜角位置, ω 为根据式(1)计算的反

射镜旋转角速度。

(2) 观测矢量求解

在运动补偿模式成像时,反射光(如图1中的 $\overrightarrow{B_0A_0}$ 、 $\overrightarrow{B_tA_t}$ 所示)随着反射镜旋转而以两倍反射镜角速度而旋转变,如图3所示。

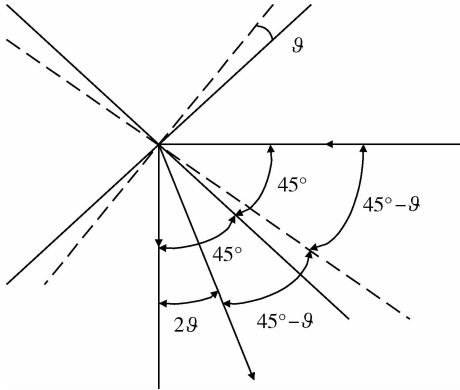


图3 观测矢量与扫描镜旋转方向的关系图

Fig.3 Observation vector and the direction of rotation of the scan mirror

根据反射镜入射角、法线和反射角的几何关系,可建立观测矢量的表达式,如式(3)所示:

$$\mathbf{u}_{\text{SEN}} = \mathbf{U}_{\text{sen}} - 2N_{\text{CCD}}(\mathbf{U}_{\text{sen}} \cdot N_{\text{CCD}}) \quad (3)$$

式中, \mathbf{U}_{sen} 为入射光矢量, N_{CCD} 为反射镜法线矢量,是关于反射镜角度的函数, \mathbf{u}_{SEN} 为观测矢量。求解出来的反射光观测矢量(\mathbf{u}_{SEN})是扫描成像过程中的真实观测矢量。

因此,高光谱成像仪成像几何关系满足中心投影的共线条件方程,并且观测方向随着反射镜的变化按式(3)的关系而改变。

4 反射镜运动补偿严密几何成像模型

严格成像几何模型描述的是地物点的影像坐标和地面坐标之间的数学关系。对任何一个成像仪,在成像过程都可以通过一系列坐标转换来描述(孙家柄等,1997)。本文根据反射镜运动补偿模式的成像几何特征,尤其反射镜旋转的运动规律,建立反射镜运动补偿模式的严格成像几何模型。

4.1 相关坐标转换

在成像模型的建立过程中,主要涉及一些坐标转换过程,如图4所示。

4.2 中心投影严格成像方程

由第3.2节对高光谱成像仪成像几何关系分析

可知,反射镜运动补偿成像模式是满足中心投影的共线方程和观测矢量随反射镜变化而变化的。因此,首先建立满足中心投影的严密成像几何方程,然后在此方程的基础上,依反射镜角度与观测矢量的几何关系获得对地观测矢量,代入中心投影的严密成像几何方程形成反射镜运动补偿严密成像几何方程。

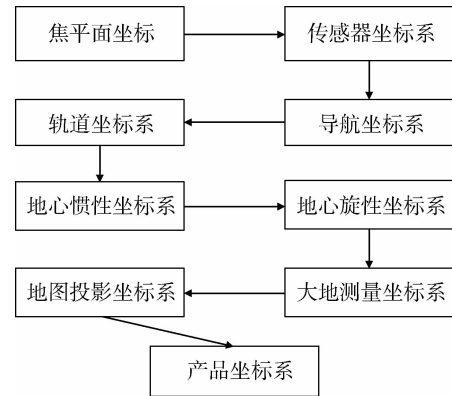


图4 系统几何校正所用坐标系及其转换关系

Fig.4 Coordinate system and its conversion relation

4.2.1 中心投影的严密几何成像方程

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} + m * \mathbf{T}_{\text{Ecr/Eci}} * \mathbf{T}_{\text{EciOrb}} * \mathbf{T}_{\text{Orb/Nav}} *$$

$$\mathbf{T}_{\text{Nav/Sen}} * \mathbf{T}_{\text{Sen/FP}} * \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, (X, Y, Z) 为地面点在地心旋转坐标系下的坐标, (X_C, Y_C, Z_C) 为在成像时卫星在地心旋转坐标系下的位置, (x, y) 为焦平面坐标系下的影像坐标, (x_0, y_0) 为焦平面坐标系下的主点坐标, f 为焦距, m 为尺度因子, $\mathbf{T}_{\text{Sen/FP}}$ 为焦平面坐标系到传感器坐标系的转换矩阵, $\mathbf{T}_{\text{Nav/Sen}}$ 为传感器坐标系到导航坐标系的转换矩阵, $\mathbf{T}_{\text{Orb/Nav}}$ 为导航坐标系到轨道坐标系的转换矩阵, $\mathbf{T}_{\text{EciOrb}}$ 为轨道坐标系到地心惯性坐标系的转换矩阵, $\mathbf{T}_{\text{Ecr/Eci}}$ 为地心惯性坐标系到地心旋转坐标系的转换矩阵。

4.2.2 反射镜运动补偿严密几何成像方程

根据成像仪的成像几何关系及坐标系的定义,反射镜旋转而造成的观测矢量变化在传感器坐标系中满足式(3)所描述的变化关系,求解出的观测矢量为反射镜运动补偿成像过程中的对地观测矢量。

首先入射光矢量为:

$$\mathbf{U}_{\text{sen}} = \mathbf{T}_{\text{SEN/FP}} * \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \quad (5)$$

反射镜法线矢量为:

$$\mathbf{N}_{\text{CCD}} = \begin{bmatrix} -\sin(\vartheta_{\text{ccd}}) \\ 0 \\ \cos(\vartheta_{\text{CCD}}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, θ_{ccd} 为反射镜角度。把式(5)和式(6)代入式(3)中可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{\text{SEN}} &= \mathbf{T}_{\text{SEN/FP}} * \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} - 2 \begin{bmatrix} -\sin(\vartheta_{\text{ccd}}) \\ 0 \\ \cos(\vartheta_{\text{CCD}}) \end{bmatrix} \\ &= \left(\mathbf{T}_{\text{SEN/FP}} * \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(\vartheta_{\text{ccd}}) \\ 0 \\ \cos(\vartheta_{\text{CCD}}) \end{bmatrix} \right) \quad (7) \end{aligned}$$

以此对地观测矢量代替中心投影中的传感器坐标系下观测矢量,最终形成反射镜运动补偿模式的精密成像几何方程:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} + m * \mathbf{T}_{\text{ECR/ECI}} * \mathbf{T}_{\text{ECIORB}} * \mathbf{T}_{\text{ORB/NAV}} * \mathbf{T}_{\text{NAV/SEN}} * \mathbf{u}_{\text{SEN}} \quad (8)$$

4.3 直接对地目标定位计算

利用卫星遥感影像进行对地目标定位,实质上是求解像点的对地观测矢量与地球椭球面的交点,由式(8)简化为式(9)求解地面交点,图5表明了点P直接对地目标定位的示意图。

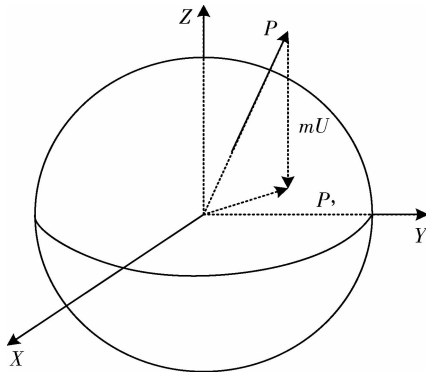


图5 对地目标定位示意图

Fig.5 Geometric positioning

$$\mathbf{X}_{\text{ECR}} = \mathbf{P}_{\text{ECR}} + m\mathbf{U}_{\text{ECR}} \quad (9)$$

式中, \mathbf{X}_{ECR} 地面点在地心旋转坐标系下的坐标, \mathbf{P}_{ECR}

在成像时卫星在地心旋转坐标系下的位置, m 为尺度因子, \mathbf{U}_{ECR} 为观测矢量。

用地球椭球体的半长轴和半短轴 (a, a, b) , 调整对地观测矢量和卫星位置矢量:

$$\mathbf{U}' = [u_1/a \quad u_2/a \quad u_3/b]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{P}' = [x_1/a \quad x_2/a \quad x_3/b]^T \quad (11)$$

待求的地面点位置矢量调整为:

$$\mathbf{X}' = [x_1/a \quad x_2/a \quad x_3/b]^T = \mathbf{P}' + m\mathbf{U}' \quad (12)$$

求调整参数 m 和 \mathbf{X}_{ECR} 。等式两边进行点乘,得:

$$\mathbf{X}' \cdot \mathbf{X}' = (\mathbf{P}' + m\mathbf{U}') \cdot (\mathbf{P}' + m\mathbf{U}') \quad (13)$$

虽然 \mathbf{X}' 各分量的值是未知的,但是根据定义, $\mathbf{X}' \cdot \mathbf{X}' = (\mathbf{X}')^2 = \|\mathbf{X}'\|^2 = 1$ 。注意到 $\mathbf{P}' \cdot \mathbf{P}' = (\mathbf{P}')^2 = \|\mathbf{P}'\|^2$, 及 $\mathbf{U}' \cdot \mathbf{U}' = (\mathbf{U}')^2 = \|\mathbf{U}'\|^2$, 简化并重组得:

$$1 = m^2(\mathbf{U}')^2 + 2m(\mathbf{U}' \cdot \mathbf{P}') + (\mathbf{P}')^2 \quad (14)$$

解这个 m 的二次方程,两个解中较小的一个是距离卫星较近的交点。如果没有实数解,就没有交点。

5 模型的校正理论分析与应用

5.1 模型理论定位精度分析

严格成像几何模型的实际校正精度主要受到轨道数据、姿态角、扫描时间、反射镜角位置等误差的影响。结合第3.1节假定的影像成像相关参数,依据以往星历参数处理中出现的误差范围,其中轨道误差、姿态误差、时间误差对定位精度的影响按参考文献(张过,2005)计算得出,反射镜角误差对定位精度的影响分析如式(14)、式(15)所示。综合分析了各类误差源对本文模型校正精度的影响,最终可得出模型的理论定位精度,如表1所示。

表1 星历参数误差情况下校正精度分析

Table 1 Precision analysis under the parameter error condition

误差分类	误差源	误差/m	
		Δx	Δy
轨道误差/m	X 方向误差 30 m	30	0
	Y 方向误差 30 m	0	30
	高度方向误差 30 m	0	8
姿态误差	ROLL 误差 0.010	0	112.24
	PITCH 误差 0.010	104.72	0
	YAW 误差 0.010	0	28
反射镜角误差	反射镜角误差 0.001	29.1	0
时间误差/s	0.01	74	0
误差总计		237.8	178.24
平面误差		297.18	

注:平面误差 = $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ 。

当反射镜角位置值为 $\theta/2$ 时,表示反射镜角位置偏离 45° 位置 $\theta/2^\circ$,光线的摆角为 θ ,反射镜角误差为 α ,在 x 方向和 y 方向定位精度误差如下:

$$\Delta x = h * (\tan(\theta + 2 * \alpha) - \tan\theta) \quad (15)$$

$$\Delta y = 0 \quad (16)$$

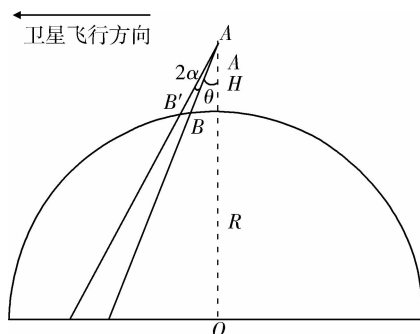


图6 反射镜指向误差分析

Fig.6 Error analysis of the scan mirror direction

式中, h 为卫星高度, R 为地球半径,点 B 为理论投影点,点 B' 为实现投影点。按照式(15)计算得出表1中的误差数值。

5.2 严密成像模型的应用

用本文建立的严格几何成像模型,进行天宫一号高光谱影像数据系统几何校正,获得了正确的校正影像和较高的几何定位精度,并且实际几何定位精度接近于天宫一号星历参数实际误差带来的理论几何定位精度,结果如图7右所示。

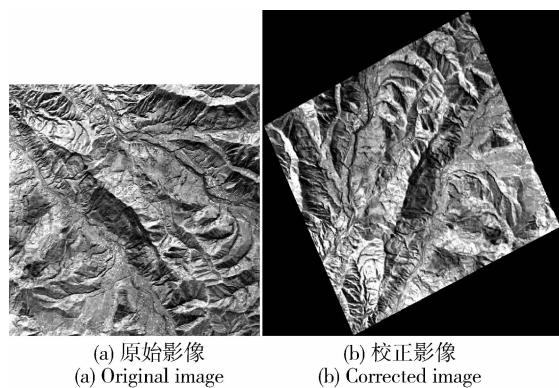


图7 高光谱影像及几何校正影像图

Fig.7 Original image and result image

6 结论

本文根据反射镜运动补偿成像光谱仪的成像原理,在分析了反射镜旋转运动规律后,建立了与卫星成像时观测矢量同步的反射镜旋转运动补偿

模型,进而推导出了高光谱成像仪的严密成像几何模型。通过理论分析与实际应用,表明该严密成像模型很好地描述了天宫一号高光谱成像仪成像时的几何关系,并且在系统几何校正中能取得与理论定位精度相近的几何校正精度。

志 谢 感谢中国科学院空间应用工程与技术中心为本研究提供天宫一号高光谱成像仪数据产品。

参考文献 (References)

- Crespi M, Fratarcangeli F, Giannone F and Perialice F. 2012. A new rigorous model for high-resolution satellite imagery orientation: application to EROS A and QuickBird. *International Journal of Remote Sensing*, 33(8): 2321-2354 [DOI: 10.1080/01431161.2011.608737]
- Eckardt A, Hofer S, Neumann C and Skrbek W. 2005. SNR estimation for advanced hyperspectral space instrument. *In Optics & Photonics 2005*. San Diego 2005: NO.5883-3
- Goetz A F H and Herring M. 1989. The high resolution imaging spectrometer (HIRIS) for EOS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(2): 136-144 [DOI: 10.1109/36.20291]
- Goetz A F H, Vane G, Solomon J E and Rock B N. 1985. Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science*, 228(4704): 1147-1153 [DOI: 10.1126/science.228.4704.1147]
- Giannone F. 2006. A rigorous model for High Resolution Satellite Imagery Orientation. Rome: University of Rome La Sapienza
- Jacobsen K and Passini R. 2003. Accuracy of digital orthophotos from high resolution space imagery // *Proceedings of ISPRS Workshop-High Resolution Mapping from Space 2003*. Hannover, Germany, 2003: 4-6
- Jung, H S, Kim S W, Won J S and Lee D C. 2007. Line-of-Sight vector adjustment model for geopositioning of SPOT-5 stereo images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(11): 1267-1276 [DOI: 10.14358/PERS.73.11.1267]
- Kerekes J P and Landgrebe D A. 1991. Parameter trade-offs for imaging spectroscopy systems [remote sensing]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(1): 57-65 [DOI: 10.1109/36.103293]
- Li Y P, Yu B X, Han C Y and Li Z. 2006. Tradeoff optimization design of optical con configuration on imaging spectrometer. *Optics and Precision Engineering*, 14(6): 974-979(李幼平, 禹秉熙, 韩昌元, 李柱. 2006. 成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构. *光学精密工程*, 14(6): 974-979) [DOI: 10.3321/j.issn:1004-924X.2006.06.009]
- Nieke J, Solbrig M and Neumann A. 1999. Noise contributions for imaging spectrometers. *Applied Optics*, 38(24): 5191-5194 [DOI: 10.1364/AO.38.005191]
- Poli D and Toutin T. 2011. Review of developments in geometric modeling for high resolution satellite pushbroomsensors. *The Photogrammetric Record*, 27(137): 58-73 [DOI: 10.1111/j.1477-9730.2011.

- 00665.x]
- Schumann L W and Lomheim T S. 2002. Infrared hyperspectral imaging Fourier transform and dispersive spectrometers: comparison of signal-to-noise-based performance // International Symposium on Optical Science and Technology. SPIE 4480, San Diego, 1 - 14 [DOI: 10.1117/12.453326]
- Sellar R G and Boreman G D. 2005. Comparison of relative signal-to-noise ratios of different classes of imaging spectrometer. Applied Optics, 44(9): 1614-1624 [DOI: 10.1364/AO.44.001614]
- Sun J B, Shu N and Guan Z Q. 1997. Remote sensing principle, method and Application. Beijing: Surveying and Mapping Press(孙家柄, 舒宁, 关泽群. 1997. 遥感原理, 方法和应用. 北京: 测绘出版社)
- Toutin T. 2004. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. International Journal of Remote Sensing, 25(10): 1893-1924
- Westin T and Forsgren J. 2001. Orthorectification of EROS A1 images. IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas: 8-9 [DOI: 10.1109/DFUA.2001.985713]
- Wilson T L and Davis C O. 1999. Naval EarthMap Observer (NEMO) Satellite. SPIE, 3753: 2-11 [DOI: 10.1117/12.366268]
- Zhang G. 2005. The lack of high resolution satellite remote sensing image geometric correction of control point. Wuhan: Wuhan University(张过. 2005. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正. 武汉: 武汉大学)

Rigorous geometric model of Tiangong-1 hyperspectral spectrometer

LIU Zhiwen¹, LIU Dingsheng², WEI Jingbo³

1. *Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*
2. *Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*
3. *Academy of Space Technology, Nanchang University, Nanchang 330031, China*

Abstract: In order to obtain higher signal-to-noise ratio, hyperspectral spectrometer typically adopts motion compensation techniques to increase the integration time of detector imaging. To the mirror motion compensation mode, the imaging characteristics are analyzed and a geometric relation between mirror angle and the observation vector is established. Based on the collinearity equations, a rigorous geometric model of this kind of spectrometer can be established. The model describes the physical properties of the imaging spectrometer through the relationship between the image and the ground coordinate system. The test results indicate that the validity of the model and high-precision imaging products can be obtained.

Key words: system geometric correction, rigorous geometric model, motion compensation, pointing mirror