

弹载大视场红外线扫图图像几何畸变仿真研究

尚 超^{1,2}, 陈宝国¹

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;

2. 红外探测器技术航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 高速机动、大视场、线扫等均会引起弹载大视场线列扫描红外图像的几何畸变, 从而影响巡飞弹的整体战术效能。利用探测器像面参数、坐标变换、地表模型、物像共线方程和墨卡托地图投影模型分别建立了相机的像方坐标方程、位姿变换方程、物像转换方程和物方地图投影方程, 进而构成了从像面坐标系到地图坐标系的完整严格成像模型, 利用 Matlab 对该模型进行静态仿真, 确定航高、摆扫角度、地表模型等模型参数造成的几何畸变特性的强度, 为弹载几何畸变校正算法的工程优化提供了依据。

关键词: 红外; 大视场; 线列扫描; 几何畸变

中图分类号: TJ765 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0204002

Simulation of image geometric distortion of missile-borne IR linear image with large filed of view

Shang Chao^{1,2}, Chen Baoguo¹

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector, Luoyang 471009, China)

Abstract: Serious geometric distortion in IR linear scanning image will affect the tactical efficiency of patrol missiles, which is generated from high speed maneuvering, large filed of view (LFOV), pendulum scanning of the missile-borne image. The strict imaging model was constructed by converting the pixel serial numbers of infrared image into certain map projection coordinates of the surfacial scene, which was composed of four equations. Image plane coordinates equation was built by pixel parameters of infrared chip surface. Image spacial coordinates equation was built to transform image plane coordinates into earth-centered earth-fixed(ECEF) coordinates. The surfacial object coordinates equation was built in ECEF system by collinear equation and the earth surface model. The last map coordinates equation was built by certain map projection model form the object ECEF coordinates. The static simulation of geometric distortion was implemented in Matlab to ascertain the effect of model parameters such as navigation height, pendulum angle, the earth model and so on. The results could be used as the basis for the engeering optimization of geometric distortion correction algorithm.

Key words: IR; LFOV; linear scanning; geometric distortion

收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-11-21

作者简介: 尚超(1981-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事红外探测信息处理技术方面的研究。Email: newstarsc@163.com

0 引言

大视场线列扫描红外相机是侦察巡飞弹的关键设备,其采用线列匀速摆扫方式沿航迹垂向连续拍摄线列图像序列,一个摆扫周期获得一幅沿航迹垂向的大视场图像帧,然后沿航向连续拍摄大视场图像帧序列,最终通过数字处理生成大面积侦察图像。

在飞行摄影过程中,弹体的高动态位姿变化、地表曲率、地形起伏、摄影参数误差等都会造成摆扫图像产生不同程度的几何畸变。目前图像几何畸变校正研究主要集中星载^[1-4]、机载^[5-7]及其他成像设备^[8-10]等领域,而弹载大视场线列摆扫相机的几何畸变特性亟待研究。

通过共线方程和坐标转换构建弹载大视场线扫相机的严格成像模型,对主要摄影参数引起的几何畸变进行 Matlab 仿真,为弹载相机几何畸变校正的工程优化提供理论指导。

1 成像模型构建

1.1 坐标系定义及成像原理

系统成像过程涉及到像素坐标系、像面坐标系、相机坐标系、弹体坐标系、导航坐标系、地理坐标系和地图坐标系等坐标系。图 1 为系统的成像原理和坐标系定义的示意图。

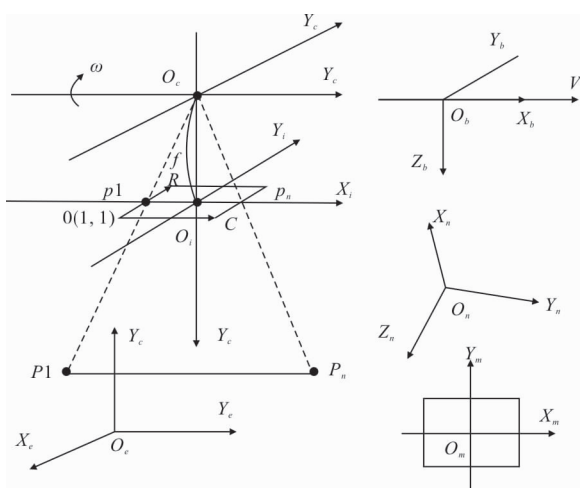


图 1 系统坐标系和成像原理示意

Fig.1 Schematic of coordinate system and imaging principle

图 1 中,平面直角坐标系 OCR 即像素行列坐标系 F_p ,行列起始序号为(1,1),序号增加方向为正

方向;平面直角坐标系 $O_i X_i Y_i$ 构成了像面坐标系 F_i , O_i 为线列探测器中心像素的中心位置, X_i 轴与 C 轴同向平行, Y_i 轴与 R 轴同向平行;空间直角坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 构成了相机坐标系 F_c , O_e 为投影中心, X_e 轴与 X_i 轴同向平行, Y_e 轴与 Y_i 轴同向平行, Z_e 轴遵守左手螺旋规则指向地面;空间直角坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 构成了弹体坐标系 F_b , O_b 点为弹体质心位置且可假定其与 O_e 点重合, X_b 轴与 X_e 轴同向重合, Y_b 轴与 Y_e 轴初始方向重合, Z_b 轴与 Z_e 轴初始方向重合;空间直角坐标系 $O_n X_n Y_n Z_n$ 构成了导航坐标系 F_n , 假定采用北东下(North-East-Down, NED)坐标系,假定 O_n 与 O_b 点初始位置重合, X_n 轴为地理正北方向, Y_n 轴为地理正东方向, Z_n 轴与 X_n 、 Y_n 轴正交并向下指地;空间直角坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 构成了世界坐标系,假定采用地心地固(Earth-Centered-Earth-Fixed, ECEF)坐标系,即 O_e 为地心位置, X_e 轴指向格林尼治平子午线与协议赤道的交点, Z_e 轴指向协议地北极方向, Y_e 轴与 X_e 、 Z_e 轴正交并遵守右手规则;平面直角坐标系 $O_m X_m Y_m$ 构成了平面地图坐标系 F_m , O_m 为目标侦察区域的中心位置, X_m 轴和 Y_m 轴由采用的地图投影坐标决定。

相机采用线列摆扫成像方式。在垂下视成像瞬间,线列探测器的成像模型为中心投影模型, O_c 点为投影中心, $O_c O_i$ 的距离等于焦距 f ;相机绕 X_c 轴顺时针方向以转速 ω 进行匀速旋转形成连续摆扫,在垂向大视场范围内获得由一系列“线列”图像拼接的“条幅”图像,当摆扫角度不为零时的成像模型变为倾斜中心投影模型;弹体飞行时,相机沿 X_b 轴以速度 ν 进行连续推扫,在航向飞行范围内获得由一系列“条幅”图像拼接的大面积侦察图像。

1.2 地球地表模型

自然地表是一个复杂的不规则曲面,难以建立解析数学模型。为了描述地球地表特征的空间分布,一般采用地表点的三坐标和对应属性来形成地表的数字模型。

在执行不同侦察任务时,目标地域的地表起伏差异极大。当航高和侦察范围很大时,必采用椭球面地表模型,文中选择应用最广泛的 WGS84(World Geodetic System)协议地球参考模型。当侦察的区域

适中时,由于地球扁率较小,地表模型可近似采用半径为 6371 km 的圆球模型。当侦察的区域非常小时,由于地表曲率很小,则地表模型可近似采用平面模型。

综上,可分别采用平面、圆球面和椭球面作为地表模型用于物像共线方程的求解。而地形起伏的影响,则利用相邻物点的物像连线的高程差进行分析。

1.3 地图投影模型

地图投影是采用一定的数学方法确定地表地理坐标与平面直角坐标之间的映射关系,将不可展的地球椭球面上的纬线网转移到平面地图上。墨卡托投影通过建立一个和地轴方向一致、与地球椭球面相切的圆柱面,然后等角度地将经纬线投影到圆柱面后展开,保证了地图坐标系中方向和角度的正确性,非常适合用于导航和定位领域。根据装备的应用特点,文中采用墨卡托投影作为地图投影坐标系。

1.4 严格成像模型

该系统的严格成像模型由下列步骤组成。首先,像素行列坐标到相机坐标的转换关系如公式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx & 0 & 0 & -dx \cdot c_0 \\ 0 & dy & 0 & -dy \cdot r_0 \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ r \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:\$(x_c, y_c, z_c)\$为像素点的相机空间坐标;\$(c, r)\$为像素列、行序号;\$(c_0, r_0)\$为中心像素的位置序号;\$(dx, dy)\$为像素行列中心距;\$f\$为焦距。然后,相机坐标到地心空间坐标的转换关系如公式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & x_{eo} \\ b_1 & b_2 & b_3 & y_{eo} \\ c_1 & c_2 & c_3 & z_{eo} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos \gamma \cos(\alpha + \theta) - \sin \gamma \sin \beta \sin(\alpha + \theta) \\ a_2 &= -\cos \gamma \sin(\alpha + \theta) - \sin \gamma \sin \beta \cos(\alpha + \theta) \\ a_3 &= -\sin \gamma \cos \beta \\ b_1 &= \cos \beta \sin(\alpha + \theta) \\ b_2 &= \cos \beta \cos(\alpha + \theta) \\ b_3 &= -\sin \beta \\ c_1 &= \sin \gamma \cos(\alpha + \theta) + \cos \gamma \sin \beta \sin(\alpha + \theta) \\ c_2 &= -\sin \gamma \sin(\alpha + \theta) + \cos \gamma \sin \beta \cos(\alpha + \theta) \\ c_3 &= \cos \gamma \cos \beta \end{aligned}$$

式中:\$(x_e, y_e, z_e)\$为像点的空间坐标;\$(x_{eo}, y_{eo}, z_{eo})\$为导航系统测量解算出来的系统质心(假定为投影中心)的空间坐标;\$(\alpha, \theta, \gamma)\$为导航系统测量解算的系统空间姿态角;\$\theta\$为相机测量解算的摆扫角度。然后,利用物像共线方程和地表模型方程求解地表物点的空间坐标,如公式(3)所示。

$$\begin{cases} \frac{X_e - x_{eo}}{x_e - x_{eo}} = \frac{Y_e - y_{eo}}{y_e - y_{eo}} = \frac{Z_e - z_{eo}}{z_e - z_{eo}} = t \\ \frac{X_e^2}{a^2} + \frac{Y_e^2}{b^2} + \frac{Z_e^2}{c^2} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中:第 1 个等式为两点式物像共线方程,\$t\$是方程的未知量,\$(X_e, Y_e, Z_e)\$是物点的空间坐标;第 2 个等式为地表曲面方程,\$(a, b, c)\$是地表椭球面模型的参数,可根据实际选择的地表模型来确定。若 \$a = b = c\$,则地表模型变为球面模型;若 \$(X_e^2, Y_e^2, Z_e^2)\$ 变更为 \$(X_e X_0, Y_e Y_0, Z_e Z_0)\$,则地表模型变为在球面\$(X_0, Y_0, Z_0)\$位置处的切平面模型。最后,利用空间坐标到地理坐标再到地图投影坐标的转换关系如公式(4)所示。

$$\begin{cases} L = \arctan\left(\frac{Y_e}{X_e}\right) \\ B = \arctan\left(\frac{Z_e(N+H)}{\sqrt{(X_e^2 + Y_e^2)[N \cdot (1 - e^2) + H]}}\right) \\ H = \frac{Z}{\sin B} - N \cdot (1 - e^2) \\ X_m = K \cdot \ln\left[\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{B}{2}\right) \cdot \left(\frac{1 - e \cdot \sin(B)}{1 + e \cdot \sin(B)}\right)^{\frac{c}{2}}\right] \\ Y_m = K \cdot (L - L_0) \\ K = \frac{c}{\sqrt{1 + e^2 \cdot \cos^2(B_0)}} \cdot \cos(B_0) \end{cases} \quad (4)$$

公式(4)中,前 3 个等式实现物点空间坐标\$(X_e, Y_e, Z_e)\$到地理坐标\$(B, L, H)\$的转换,后 3 个等式实现地理坐标到墨卡托投影平面坐标\$(X_m, Y_m)\$的转换。\$(c, e)\$是地表椭球面模型的参数,可根据实际选择的地表模型来确定。

2 几何畸变仿真分析

2.1 仿真环境

由于 Matlab 的“Mapping Toolbox”内置有坐标

转换、地图投影、地图绘制等函数，且“Symbolic Math Toolbox”工具箱可以方便地进行符号运算，能有效减少地图建模及方程求解的代码工作，因此，选择 Matlab 作为仿真工具。

文中主要针对相机内外方参数和地表特征等因素进行仿真分析。根据系统性能指标，仿真实验的参数设置如表 1 所示。

表 1 系统仿真条件

Tab.1 System simulation condition

Parameters name	Symbol	Value
Pixel numbers	$N_{col} \times N_{row}$	480×6
Pixel center distance	$D_{col} \times D_{row} / \mu\text{m}$	50×60
Parity line spacing	$L_{col} \times L_{row} / \mu\text{m}$	25×300
Focal length	f / mm	200
Swing cycle	$T / \mu\text{s}$	20
Swing angle range	$\theta / (^\circ)$	±60
Yaw angle range	$\alpha / (^\circ)$	±180
Pitch angle range	$\beta / (^\circ)$	±60
Roll angle range	$\gamma / (^\circ)$	±30
Flying height range	H / km	1-100
Longitude range	$B / (^\circ)$	±180
Latitude range	$L / (^\circ)$	±90

2.2 多级 TDI 位置分布影响

线列红外探测器共 6 级时间延迟积分(Time Delay and Integration, TDI)单元，随着相机摆扫顺序对同一物点进行积分并逐次累加输出。由于每级 TDI 单元与投影面的夹角不同，会造成 TDI 单元间的几何畸变，如图 2 所示。

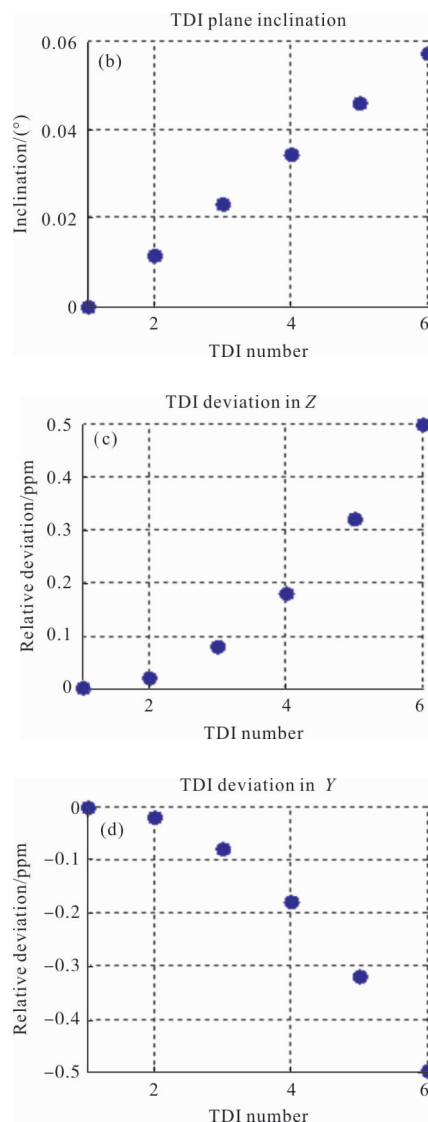
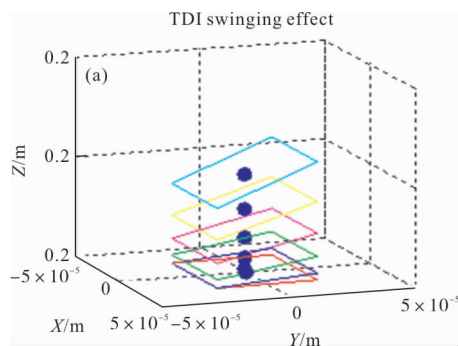


图 2 6 级 TDI 引起的几何畸变

Fig.2 Geometric distortion caused by 6 levels TDI

据图 2 可知，在弹体静止条件下，6 级 TDI 单元对同一地物点绕 X 轴进行逐行摆扫会造成倾角、Z 向及 Y 向的几何畸变。但是倾角偏差在 0.06° 以下，YZ 坐标相对偏差在 1 ppm(10⁻⁶) 以下，基本上可以忽略。

2.3 奇偶行位置分布影响

TDI 探测器的像元采用奇偶行交错排列布局，导致奇偶行像元与投影面的夹角不同，从而引起奇偶行之间的几何畸变，如图 3 所示。

据图 3 可知，奇偶行像元在摆扫时会造成倾角及 Z 向的几何畸变，但是倾角偏差约为 0.1°(2 mrad)，Z 坐标相对偏差约为 1 ppm，基本上可以忽略。

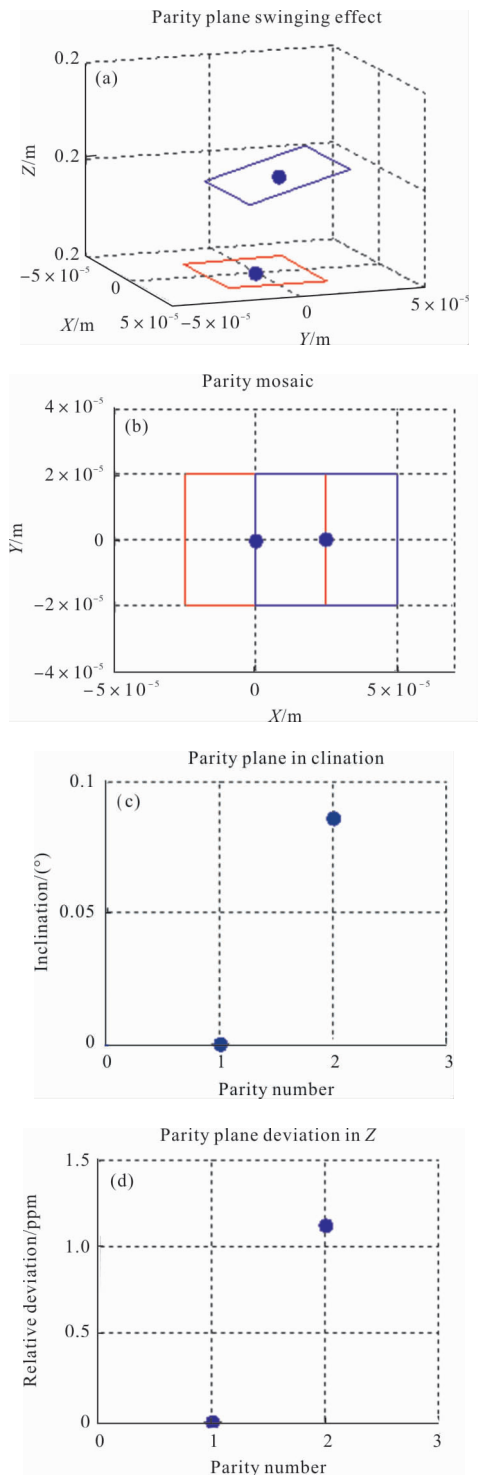


图 3 奇偶行分布引起的几何畸变

Fig.3 Geometric distortion caused by even and odd row line

2.4 扫描角度影响

相机绕 X 轴进行大范围逐行摆扫时, 边缘扫描行与中心扫描行的投影物距和投影倾角的变化会引入显著的几何畸变。根据系统扫描视场和航向固定

视场, 按照均匀分布选择 11 个摆扫角度, 每个角度对应一个扫描行, 每行选择左右两端和中心共 3 个像元, 每个像元虚拟化成由 4 个顶点和 1 个中心点组成的矩形, 并采用平面地表模型, 在航向静止条件下进行仿真, 结果如图 4 所示。

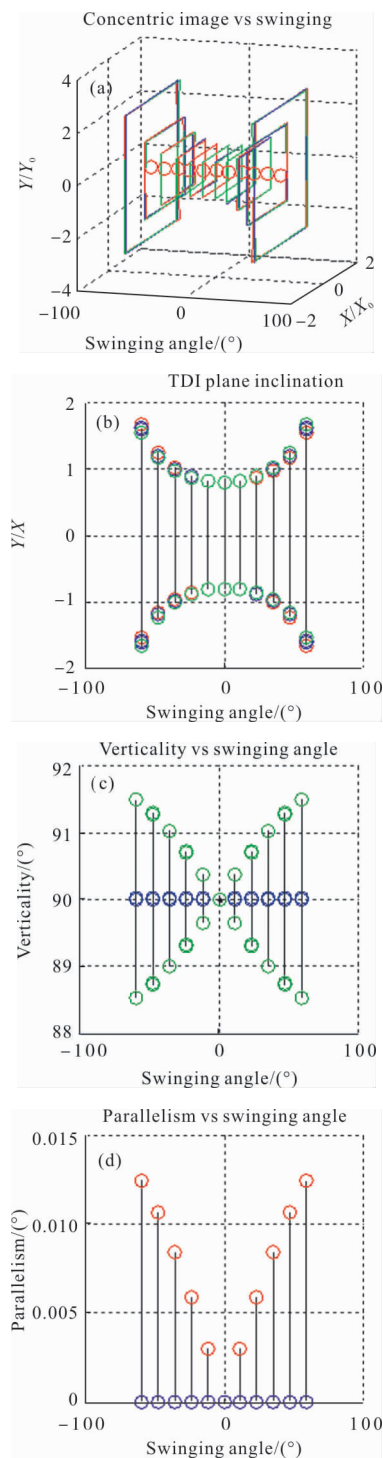


图 4 摆扫角度引起的几何畸变

Fig.4 Geometric distortion caused by sweeping angle

据图 4 可知,随着摆扫角度增大,图像存在明显几何放大,在 60°扫描角位置图像列、行方向放大倍数分别约为 2 倍和 3 倍,因此,摆扫会造成图像各向异性缩放。图像纵横比与摆扫角度的非线性关系进一步证明了图像存在各向异性缩放。垂直性分析表明,理想图元矩形顶角的角度变化与摆扫角大致成线性关系,最大变化量在 2°以内,因此,摆扫过程中物面图元不能保持矩形形状。平行性分析表明:理想图元矩形 X 向的两条边仍然能够保证平行性,而 Y 向的两条边则会失去平行性,最大夹角在 0.015°以内,因此,摆扫过程中图元会发生非线性变形。因此,摆扫角是图像几何畸变的重要因素之一。

相机及弹体姿态角的影响与摆扫角相同,几何畸变由三者综合后的实际成像角度决定。

2.5 航高影响

系统载体的航高范围较宽,必须考虑航高对图像几何畸变的影响,因此采用 2.4 节设定的仿真条件,通过改变航高参数对不同航高造成的畸变特性进行对比仿真,结果如图 5 所示。

据图 5 可知,在不同航高条件下,各仿真图元与中心图元的纵横比、边线垂直度、边线平行性均保持不变。因此,对于平面地表模型来说,单纯的航高变化仅会造成图元的各向同性缩放,但不会造成非线性几何畸变。

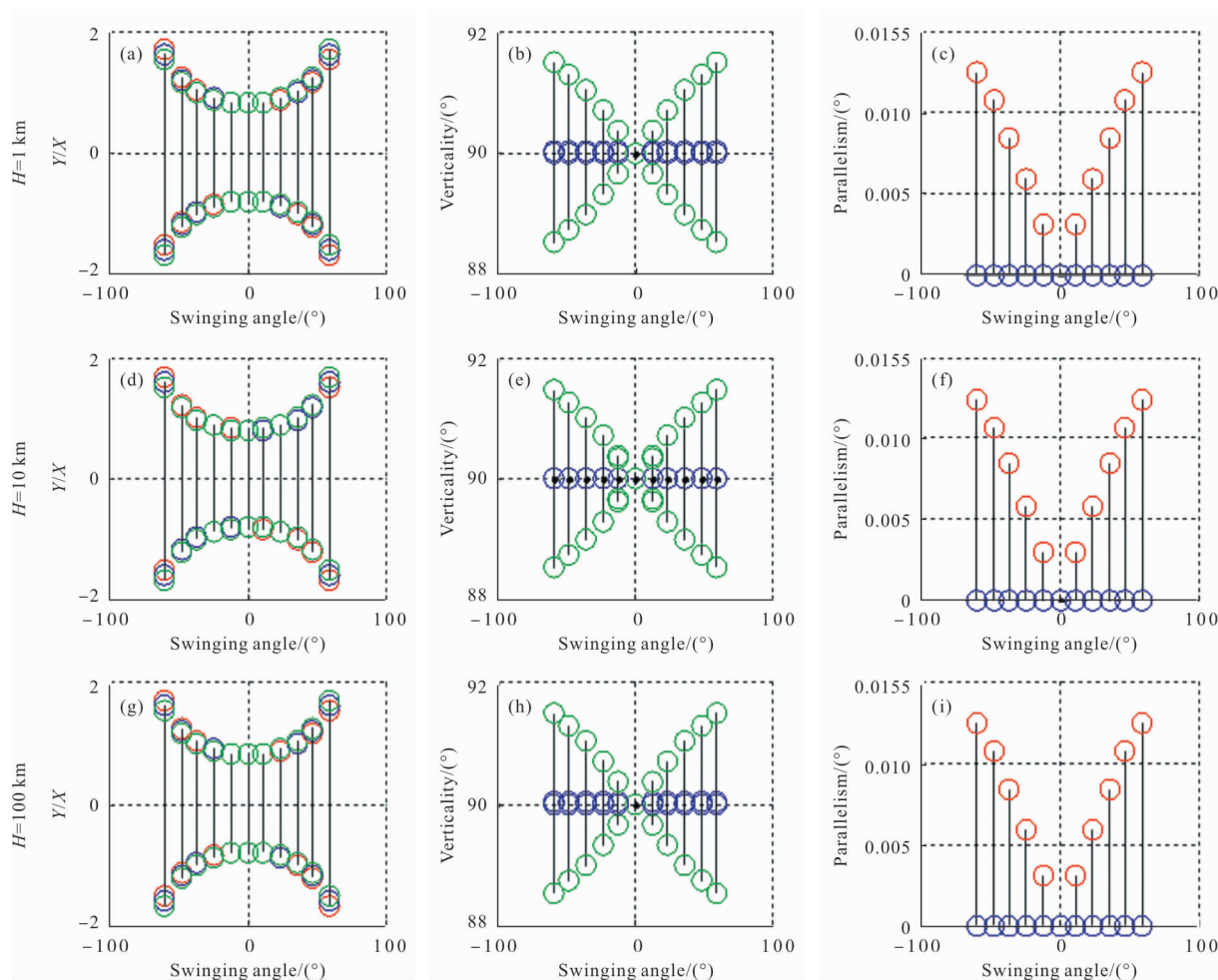


图 5 航高引起的几何畸变情况

Fig.5 Geometric distortion caused by flying altitude

2.6 地球曲率影响

由于系统扫描视场较大,且工作航高较高,必须

考虑地球曲率对几何畸变的影响。为了单纯评价地球曲率的影响,以平面地表模型为基准,在航高仿真

条件的基础上,对比 WGS84 椭球面模型进行仿真, 结果如图 6、7 所示。

虽然椭球面不可展开与平面直接对比, 但是单个像元的覆盖面积尺度远小于地球尺度, 因此图 6

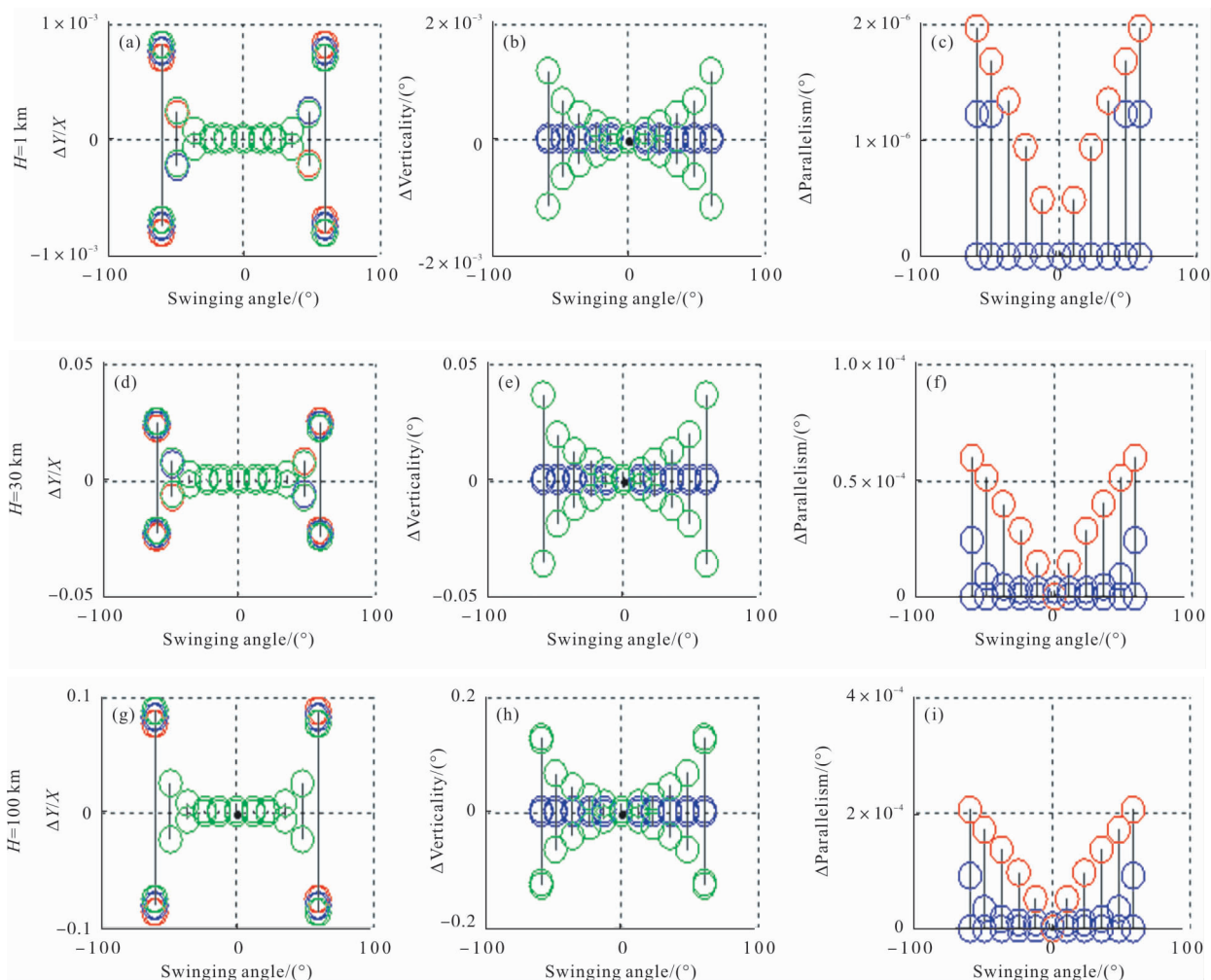


图 6 WGS84 引起的几何畸变

Fig.6 Geometric distortion caused by WGS84

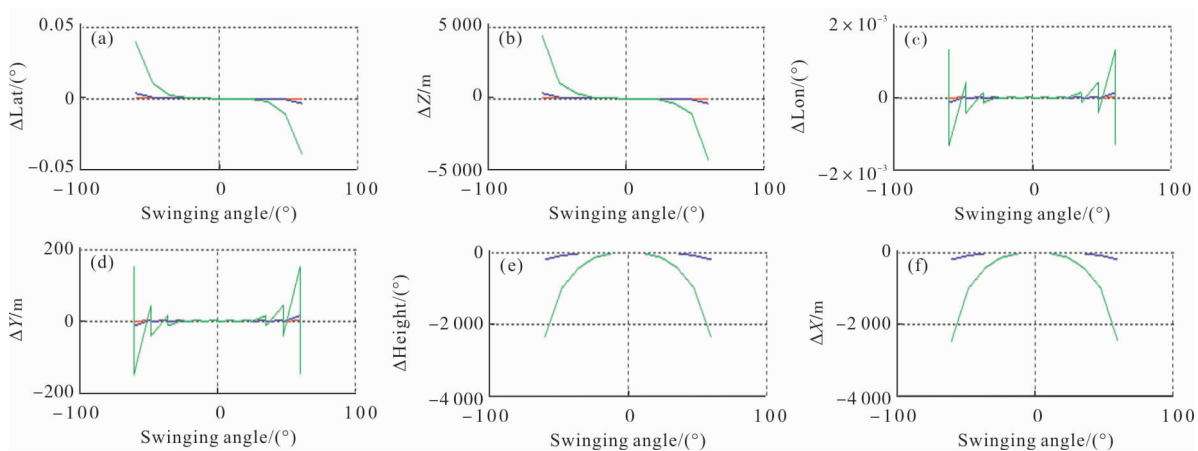


图 7 WGS84 引起的定位误差

Fig.7 Positioning error caused by WGS84

采用虚拟像元矩形顶点在椭球面上的 4 个投影点构成的虚拟平面构象近似表示实际的椭球面构象,利用其与平面地表模型构象的纵横比、垂直度、平行度的差值进行对比评价。结果表明:椭球面模型与平面模型的畸变特性存在差异,并且随着航高增加地表曲率的影响显著增大。但是当航高较低或者摆扫角度较小时,椭球面模型与平面模型差异很小。图 7 显示了像元中心点在两种地表模型中的投影位置偏差,表明地表曲率会造成显著的位置偏差,特别是大摆扫角和大航高条件。经度方向偏差较小是因为仿

真条件是沿纬度方向进行摆扫,纬度方向视角范围很宽,而经度方向的视角范围较窄。因此,在进行大航高、大面域的 TDI 摆扫成像、线列图像拼接及地图投影显示时,必须采用椭球面模型。

2.7 经纬度位置影响

经纬度的影响是由于地表椭球面上不同位置的曲率不一致造成的。弹体静止在不同经纬度位置的条件,沿纬度方向进行 $\pm 60^\circ$ 摆扫时引起的几何畸变仿真结果如图 8 所示;沿经度方向进行 $\pm 60^\circ$ 摆扫时引起的几何畸变仿真结果如图 9 所示。由图可知,

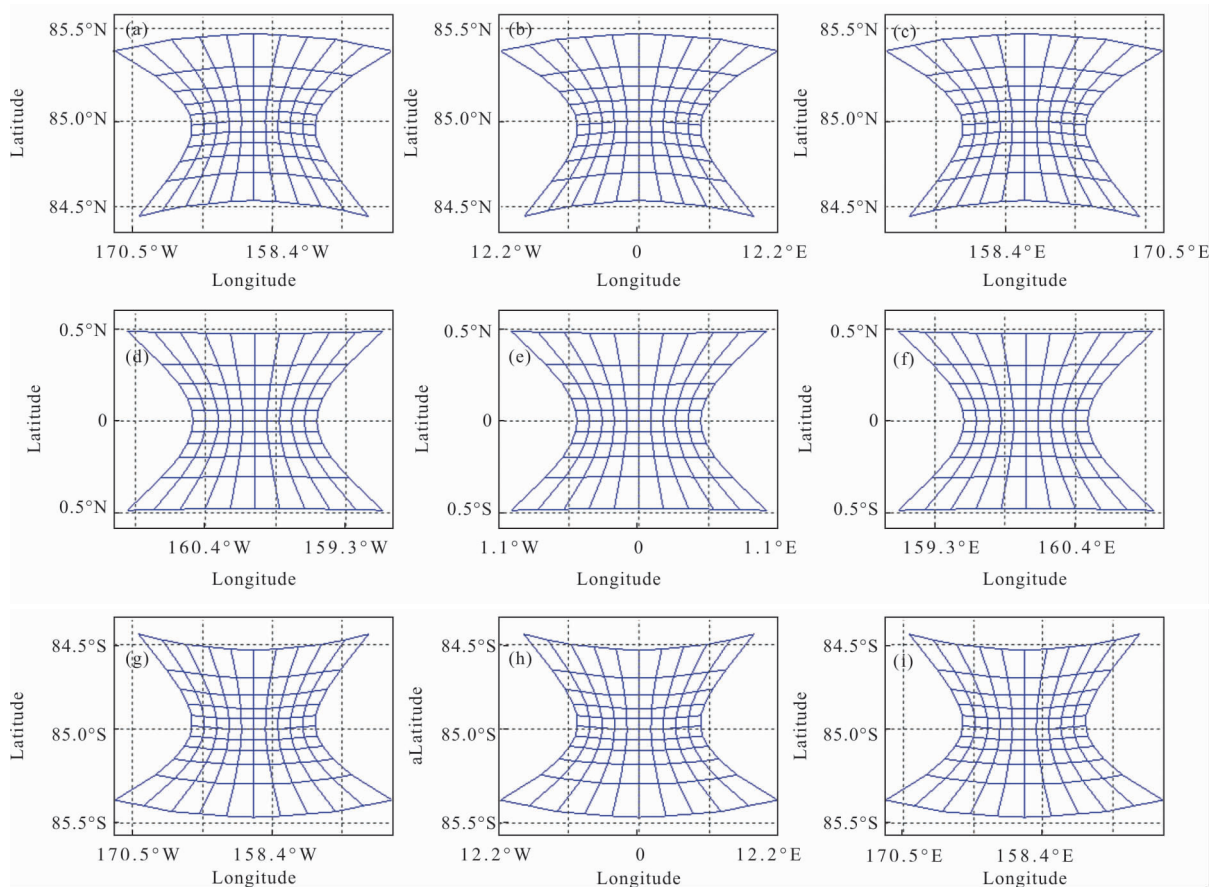
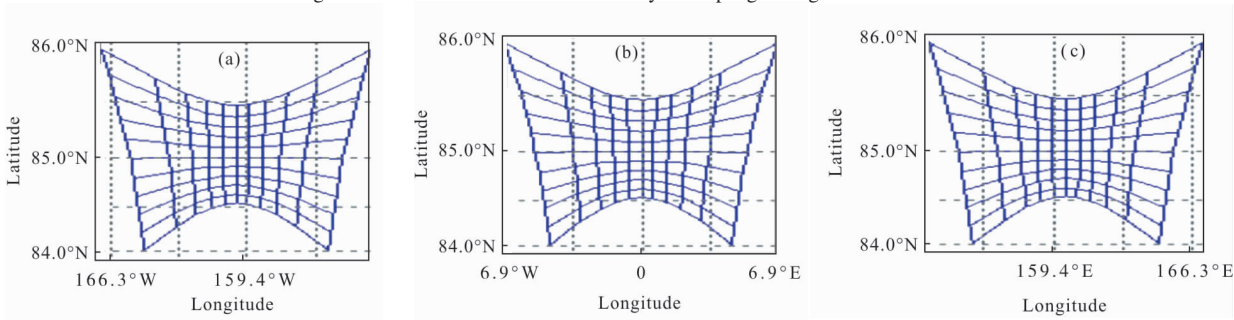


图 8 沿纬线摆扫的几何畸变情况

Fig.8 Geometric distortion caused by sweeping along the latitude



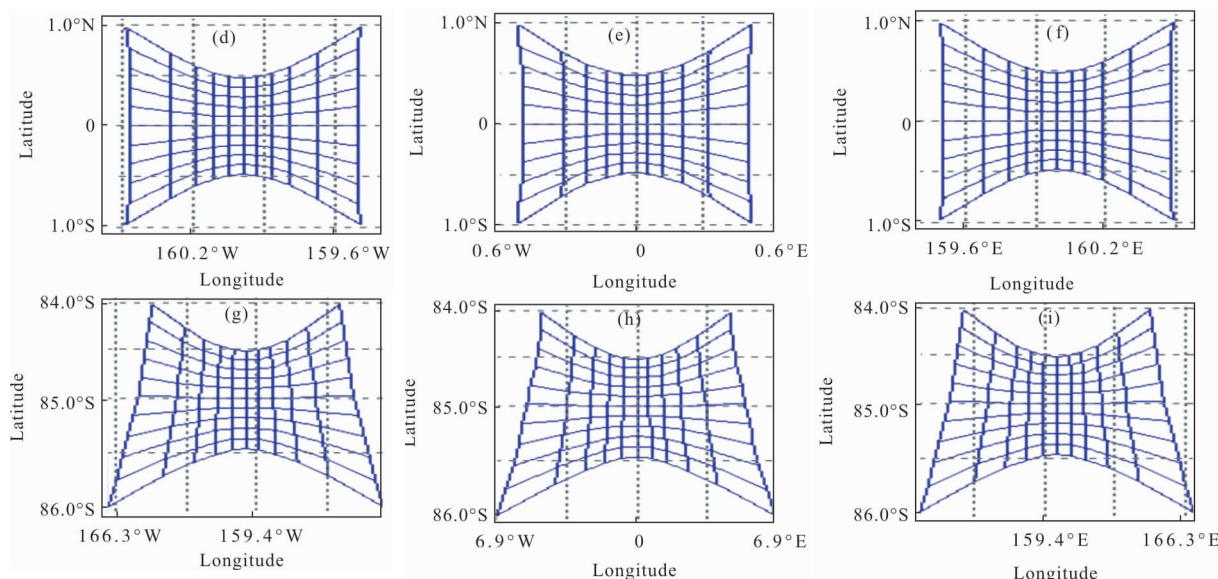


图 9 沿经线摆扫引起的几何畸变情况

Fig.9 Geometric distortion caused by sweeping along the longitude

经纬度不同会造成扫描线的非对称性弯曲及倾斜，从而造成整帧图像的非线性几何畸变。

2.8 地形起伏影响

地形起伏的影响则是由于在不同视线角度时，光线沿直线传播过程中会被相邻的高地形遮蔽造成的。在弹体固定航高静止条件下，分别对平面、球面、椭球面地表模型在不同摆扫角度下分别遮蔽 1、2、3 个像素时的地形起伏高度边界进行仿真，结果如图 10 所示。据图可知，地形起伏的造成的遮蔽是关于弹下点(0°摆扫角)对称的，越靠近弹下点，引起遮蔽的高度边界越靠近航高，即地形起伏的对相邻像元遮蔽影响越小。而随着被遮蔽像素点增多，相对遮蔽的高度边界曲线逐渐上移。图 10 中，平面模型、球面模型和椭球面模型的相对高度边界曲线基本重合而无法分辨。下图中，曲面地表模型与平面地表模型的相对高度边界差(ΔRsb)来看，曲面模型与平面模型的曲线仍存在一定差异，而圆球面和椭球

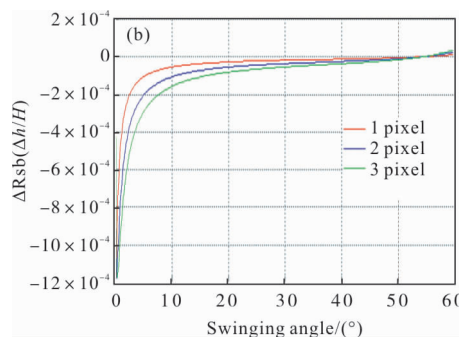


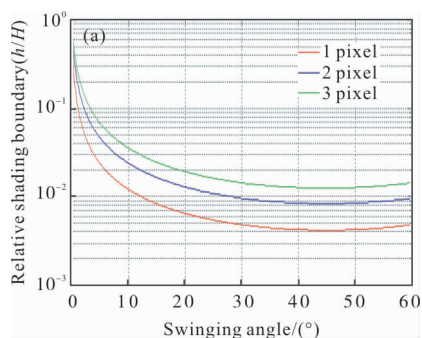
图 10 地形起伏的影响

Fig.10 Impact of topographical fluctuations

面模型的边界曲线则基本重合，且曲面模型的曲线在小角度摆扫时略低于与平面模型的曲线，但随摆扫角度增加会快速上移，且最后会往上越过平面模型的边界曲线。

3 结论

仿真结果表明：探测器 TDI 像元分布引起的几何畸变基本可忽略，而摆扫角度、航高、地表曲率、经纬度、地形起伏等因素会造成显著的几何畸变，其中摆扫角度和航高是最主要的影响因素，其他因素则与二者存在强相关性。综合来看，该相机的几何畸变的主要表现形式为各向异性的非线性缩放变形、位置偏离和遮挡变形等，畸变强度与其工作状态密切相关。在低航高、小角度、地形平坦的工作条件下，几何畸变很小；随着航高、姿态角和地形的恶化，几何



畸变显著增大。根据该系统的性能参数(表 1),实际工作时的摆扫角度和航高变化必然会引入显著的几何畸变。

因此,在弹载大视场线扫红外相机的后端图像处理过程中,必须对摆扫角等因素引入的几何畸变进行校正,文中的研究为其几何畸变校正算法的工程优化提供了依据。

参考文献:

- [1] Xu Weiming, Wang Jianyu, Shu Rong, et al. Theoretic analysis of geometrical rectification accuracy for linear pushbroom imaging spectrometer [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, 25(2): 109–112. (in Chinese)
徐卫明, 王建宇, 舒嵘, 等. 线阵推扫成像光谱仪几何校正误差的理论分析 [J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2): 109–112.
- [2] Wang Shumin, Zhang Aiwu, Hu Shaoxing, et al. Geometric correction of linear push-broom hyperspectral camera side-scan imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 579–585. (in Chinese)
王书民, 张爱武, 胡少兴, 等. 线推扫式高光谱相机侧扫成像几何校正[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 579–585.
- [3] Yang Fei, Jin Guang, Qu Hongsong, et al. Design and analysis about rapid geometric correction of space whiskbroom time delayed and integration CCD camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0111001. (in Chinese)
杨飞, 金光, 曲宏松, 等. 航天时间延迟积分 CCD 相机摆扫成像快速几何校正设计与分析[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0111001.
- [4] Song Mingzhu, Qu Hongsong, Zhang Guixiang, et al. Design of aerospace camera circular scanning imaging model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0718001. (in Chinese)
宋明珠, 曲宏松, 张贵祥, 等. 航天相机环扫成像模式设计 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 0718001.
- [5] Liu Jun, Zhang Yongsheng, Wang Donghong, et al. Geometric rectification of airborne linear array pushbroom imagery supported by INS/DGPS system [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(1): 21–26. (in Chinese)
刘军, 张永生, 王冬红, 等. INS/DGPS 支持的机载线阵推扫影像几何校正[J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 21–26.
- [6] Zhou Qianfei, Liu Jinghong, Wang Xuan, et al. Automatic correction of geometric distortion in aerial zoom squint imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 2927–2942. (in Chinese)
周前飞, 刘晶红, 王宣, 等. 航空变焦距斜视成像几何畸变的自动校正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2927–2942.
- [7] Xian Guang, Yan Changxiang. Analysis of attitude change impact on aerial push-broom imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2478–2473. (in Chinese)
贤光, 颜昌翔. 姿态变化对航空推扫式成像的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2478–2473.
- [8] Li Yuxia, Tong Ling, Liu Yi, et al. Geometric correction algorithm for unmanned aerial vehicle remote sensing image without ground control points[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, 42(3): 394–399. (in Chinese)
李玉霞, 童玲, 刘异, 等. 缺少控制点的无人机遥感影像几何畸变校正算法 [J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(3): 394–399.
- [9] Jiang Yu, Li Na, Meng Lingjie, et al. Geometric correction method of core hyperspectral data based on error analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0526004. (in Chinese)
姜宇, 李娜, 孟令杰, 等. 基于误差分析的岩芯高光谱数据几何校正方法 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(5): 0526004.
- [10] Zhou Linghong, Li Hanwei, Xu Yuan, et al. Geometry calibration for circular trajectory scanning cone-beam CT[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2847–2854. (in Chinese)
周凌宏, 李翰威, 徐圆, 等. 锥束 CT 圆轨道扫描的几何校正[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2847–2854.