

# 基于光线追迹的长线列摆扫式热像仪在轨几何成像仿真方法

李潇雁<sup>1,2,3</sup>, 胡瑋悦<sup>2,3</sup>, 江林逸<sup>2,3,4</sup>, 陈凡胜<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;

2. 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对卫星发射前在轨数据缺乏导致的无法进行成像质量评估、链路分析及几何处理算法验证等问题, 提出了一种基于光线追迹的长线列摆扫式热像仪在轨几何成像仿真方法。首先根据光学系统结构及成像特点, 构建了长线列摆扫式热像仪严格几何定位模型; 然后, 基于姿轨仿真数据、DOM 和 DEM 辅助数据, 通过光线追迹及重投影算法实现了像元视矢量的空间投影及成像仿真; 最后, 提出了基于“广义”修正矩阵的几何检校方法, 通过修正定位模型提高了仿真影像定位精度。实验结果表明, 该方法可实现长线列摆扫式热像仪任意轨道位置的几何成像仿真, 检校后仿真影像定位精度优于 2 个像元。该研究为空间光学载荷在轨几何成像仿真提供了新思路, 对成像链路误差源分析、几何定位及检校方法研究具有重要意义。

**关键词:** 成像仿真; 几何检校; 长线列摆扫; 热像仪; 光线追迹

中图分类号: P236

文献标识码: A

## In-orbit geometric imaging simulation based on ray-tracing for long-linear-array and whisk-broom thermal infrared imager

LI Xiao-Yan<sup>1,2,3</sup>, HU Zhuo-Yue<sup>2,3</sup>, JIANG Lin-Yi<sup>2,3,4</sup>, CHEN Fan-Sheng<sup>1,2,3\*</sup>

(1. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of image quality evaluation, imaging link analysis and subsequent processing algorithm verification due to the lack of in-orbit data before satellite launch, an in-orbit geometric imaging simulation method for long-linear-array and whisk-broom (LLAWB) thermal infrared imager (TIRI) based on ray tracing is proposed. Firstly, according to the structure and imaging characteristics of the optical system, the rigorous geometric imaging model of the LLAWB TIRI is constructed. Then, based on the simulation attitude and orbit parameters, auxiliary DOM and DEM data, the spatial projection and imaging simulation of pixel visual vector are realized by ray tracing and re-projection algorithm. Finally, a geometric calibration method based on "generalized" correction matrix is proposed to modify the positioning model and improve the positioning accuracy of simulation images. Experimental results show that the proposed method can be used to simulate the geometric imaging of any orbit position for the LLAWB TIRI, and the positioning accuracy of the simulation image is better than two pixels after calibration. This research provides a new idea for in-orbit geometric imaging simulation of space optical payloads, and is of great significance to the error analy-

收稿日期: 2021-10-20, 修回日期: 2021-11-19

Received date: 2021-10-20, Revised date: 2021-11-19

基金项目: 中国科学院 SDGSAT-1 小卫星红外热像仪项目 (XDA19010102)

Foundation items: Supported by the SDGSAT-1 Mini-satellite Thermal Infrared Imager Project, Chinese Academy of Sciences (XDA19010102)

作者简介 (Biography): 李潇雁 (1992—), 男, 河南洛阳人, 博士学位, 主要研究领域为空间遥感相机极限定位及智能化应用技术. E-mail: lixiaoyan@ucas.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn

sis, geometric positioning and calibration of imaging links.

**Key words:** imaging simulation, geometric calibration, long-linear-array and whisk broom (LLAWB), thermal infrared imager (TIRI), ray-tracing

## 引言

随着航天遥感技术的发展,空间光学遥感相机的时间分辨率、空间分辨率及光谱分辨率不断提高,已成为天文探测、对地观测及空间时敏目标监视等领域的主要研究手段。然而,考虑到航天载荷的研制具有周期长、成本高、风险大等特点,且通常卫星发射前难以获取载荷实际成像数据的问题,如何在地面环境下通过成像仿真实验完成载荷及平台测试、论证卫星及载荷指标体系、验证后续数据处理算法、在轨成像质量评估、突发故障的模拟及应对等任务已成为航天遥感领域重要研究内容<sup>[1-3]</sup>。

总体而言,成像系统的建模、仿真及分析方法按实际实验设备参与程度可分为物理仿真、半物理仿真及数学仿真等。20世纪中期,美国亚利桑那大学光学中心建立了第一个遥感器物理仿真系统。随着计算机技术的发展,以数学仿真为核心的光学遥感影像模拟技术因其低成本、操作便利、周期短等特点逐步成为成像仿真领域的研究重点<sup>[1,3]</sup>。当前主要的遥感相机在轨成像仿真方法有两种,即基于地面场景的成像仿真与基于遥感物理模型的成像仿真。基于地面场景的成像仿真是通过已有地面数据或构建地面场景几何建模,参照经验模型,根据假定的光照环境进行光线追踪,同时考虑传感器平台与大气辐射传输的影响,得到最终的仿真图像。该方法能够实现对多种不同地物的模拟,且可对传感器布局、成像方式以及能量传输等整个成像过程进行精细仿真,但场景建模依赖先验信息,难以应用于大场景仿真<sup>[4-5]</sup>。基于遥感物理模型的成像仿真不仅要考虑对地观测时的地形特征、大气传输模型、太阳方位角及传感器光电系统特性对光谱亮度的影响,而且要加入成像瞬时卫星飞行方向、镜头成像方式等相对运动造成的几何变形和模糊,从而得到最终的模拟影像。该仿真方法涉及遥感物理模型较多,数据量大,计算复杂度高,应用实时性差,但仿真数据精度高,可用于定量分析,已广泛应用于卫星发射前传感器成像模拟<sup>[6-7]</sup>。1980年,美国罗切斯特理工学院成功开发了数字图像和遥感图像生成模型(Digital Imaging and Remote Sensing Image Generation, DIRSIG),经过多代改良,已被

NASA应用于OrbView-4、EO-1及MISI等任务的影像模拟<sup>[8-9]</sup>。德国宇航中心研发的光学遥感仿真软件(Software Environment for the Simulation of Optical Remote Sensing System, SENSOR)通过模拟成像过程的方法实现遥感成像的全链路仿真<sup>[10]</sup>。欧空局的机载棱镜实验(Airborne PRISM Experiment, APEX)项目曾利用该软件实现了相关设计参数的优化及可行性论证<sup>[10-11]</sup>。德国Multigen-Paradigm公司研制的Vega系列仿真模块,可动态、可视化仿真成像全过程<sup>[12]</sup>。通过构造三维地表场景,法国图卢兹试验室结合地物模型开发了基于“三维体”的辐射传输模型DART,实现了不同大气条件及传感器响应条件的图像仿真<sup>[13]</sup>。此外,为了实现端到端的图像仿真,Cota<sup>[14]</sup>等人根据不同材质的反射率将输入场景转化为反射系数,然后通过MODTRAN软件得到入瞳辐亮度。最后,通过光学系统传递函数、CCD传感器传递函数和信噪比模型建立了航天成像系统仿真工具PICASSO。针对EnMAP高光谱模拟任务,Segl<sup>[15]</sup>等人对传感器成像方式、轨道机动特性、MTF、keystone效应以及smile效应进行了分析,重点讨论了在轨成像仿真中的几何关系。考虑传感器光谱响应特性和点扩散函数影像,Kavzoglu<sup>[16]</sup>利用DAIS高光谱数据对ETM+影像进行了模拟,并深入研究了传感器PSF以及空间分辨率对仿真结果的影响。近年来,国内学者围绕遥感成像仿真工作积累了大量经验。长春光机所<sup>[17]</sup>和安徽光机所<sup>[18]</sup>分别开发了遥感图像模拟软件RSIS1.0和光学遥感图像仿真软件ORSIS。此外,陈方等人<sup>[19]</sup>基于波谱数据库等先验知识的支持,利用宽光谱光学遥感图像实现细分光谱光学遥感图像模拟。江万寿等人<sup>[20]</sup>基于现有的DEM及相应的DOM影像仿真模拟了三线阵CCD卫星影像,并通过实验验证了其正确性。顾有林等人<sup>[21]</sup>提出了基于航空影像仿真航天遥感影像的方法,基于机载影像反演反射率,利用MODTRAN模拟大气传输,最后结合传感器模型仿真生成遥感图像。马晓珊等<sup>[22]</sup>从三维场景建模、入瞳辐亮度模拟、及传感器模拟三部分对光学遥感成像仿真系统进行了全链路仿真框架设计,同时对高程和位置造成的影响进行了研究。总体而言,国外

遥感仪器成像仿真技术已基本成熟,国内仍有较大差距。

长线列摆扫式热像仪采用多模块拼接技术配合一维扫描机构,在 505 Km 轨道高度实现对地 300 Km 幅宽、30 m 分辨的快速成像。由热像仪成像方式可知,轨道运动、地球自转及摆镜摆扫运动等不可避免造成在轨影像的几何变形。然而,由以上分析可知现阶段成像仿真研究大多面向传统线阵推扫式或面阵相机,且侧重能量传输过程的建模与分析,缺乏成像过程的几何定位与变形仿真研究,对长线阵大幅宽摆扫式相机成像仿真研究更少。针对以上问题,为了预先研究热像仪在轨成像质量、评估相机指标体系、验证后续处理算法,本文提出了一种基于光线追迹的长线列摆扫式热像仪在轨几何成像仿真方法,构建了成像瞬时严格几何定位模型,根据姿轨、DOM 和 DEM 等仿真数据,实现了任意轨道位置的在轨成像仿真,并基于“广义”修正矩阵进行了模型检校与几何重投影,最终实现了定位精度优于 2 个像元的几何成像仿真。

## 1 方法原理

### 1.1 长线列摆扫式热像仪严格几何定位模型

如图 1(a)和(b)所示,热红外成像仪作为可持续发展目标卫星 1 号(Sustainable Development Goals Satellite-1, SDGSAT-1)的主载荷,采用摆扫方式在 505 Km 轨道高度实现星下点 300 Km 的大幅宽成像,地面空间分辨率为 30 m,幅宽与分辨率之比高

达 10000:1,是目前国内幅宽/分辨率最高的长波红外仪器。如图 1(c)所示,为增大沿轨方向成像覆盖范围,热像仪探测器组件采用 M1、M2、M3 和 M4 共 4 个 512×4×3 的焦平面器件模块,按“品”字形拼接而成,每个探测器模块包含波段 A: 11.5~12.5  $\mu\text{m}$ 、波段 B: 10.3~11.3  $\mu\text{m}$ 、波段 C: 8~10.5  $\mu\text{m}$  三个波段,每个波段有效像元数为 512×4,像元中心距为 30  $\mu\text{m}$ 。其在轨成像示意图、光学系统成像光路图及探测器拼接示意图如图 1 所示。

如图 1 所示,热像仪严格几何成像模型以共线方程为基础,描述了成像瞬时像素坐标系下的像元  $(i, j)$  与其对应地心固定坐标系下物方点  $(X_{ECEF}^i, Y_{ECEF}^j, Z_{ECEF}^k)^T$  之间的精确映射关系,主要包括内方位模型和外方位模型两部分。如图 1(a)(b)和(c)所示,  $o_{IJ}$  为图像像素坐标系,原点为焦平面左上角像元位置,向下和向右分别为行、列的增加方向;  $o_{xy}$  为焦平面坐标系,原点为光轴与焦平面交点,  $x$  方向沿线列方向,同时也是卫星飞行轨道方向,  $y$  轴与  $x$  轴垂直构成右手系;  $o_{x_c y_c z_c}$  为相机坐标系,原点为相机光学中心,  $x_c$  轴和  $y_c$  轴与焦平面坐标系平行且方向一致并与  $z_c$  轴构成右手系;  $O_{Body\_X_{Body} Y_{Body} Z_{Body}}$  为卫星本体坐标系,原点位于卫星质心,  $X_{Body}$  轴和  $Y_{Body}$  轴分别指向卫星飞行方向和卫星横轴方向并与  $Z_{Body}$  轴构成右手系;  $O_{Orbit\_X_{Orbit} Y_{Orbit} Z_{Orbit}}$  为轨道坐标系,原点位于卫星质心,  $X_{Orbit}$  轴指向卫星飞行方向,  $Z_{Orbit}$  轴在轨道面内指向地心,  $Y_{Orbit}$  轴垂直轨道面并与  $X_{Orbit}$  和  $Z_{Orbit}$  轴构成

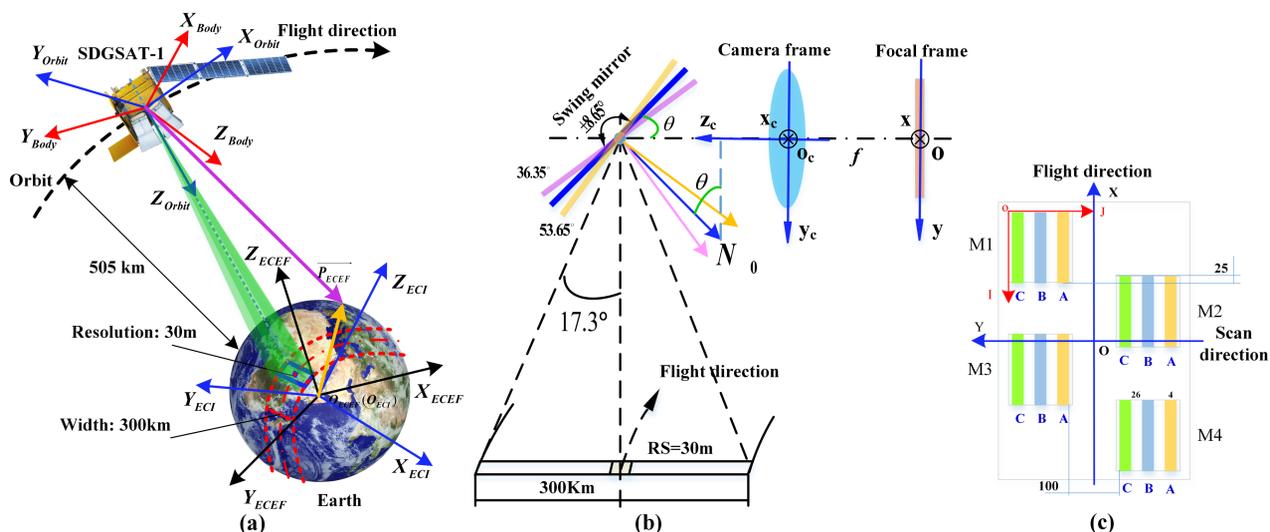


图 1 热像仪在轨成像、光路及探测器排列示意图(a)在轨成像示意图,(b)光路示意图,(c)探测器拼接示意图

Fig. 1 Diagrams of spliced detector, optical path and in-orbit imaging (a) diagram of in-orbit imaging, (b) diagram of optical path, (c) diagram of spliced detector

表1 SDGSAT-1小卫星轨道参数与长线条摆扫式热像仪技术指标

Table 1 Orbit parameters of SDGSAT-1 and specifications of LLAWB TIRI

SDGSAT-1		TIRI	
Items	Design indexes	Items	Design indexes
Orbit type	Sun-synchronous	Swath	300 km
Orbit	505 km	Resolution	30 m
			8-10.5 μm
Local time of descending node	09:30	Bands	10.3-11.3 μm
			11.5-12.5 μm
Orbit period	94.7 mins	Pixel size	30 μm
Inclination	97.4°	Scan period	7.48 s
Eccentricity	0.0	Field of view (FOV) along-track/ cross-track	7.0°/≥33.1°
Revisit interval	~10.5 days	F#	1.94
Life	>3 years	Focal length	505×(1±5%)mm

右手系;  $O_{ECI}X_{ECI}Y_{ECI}Z_{ECI}$  为地心惯性坐标系, 原点位于地球质心,  $X_{ECI}$  轴指向春分点,  $Z_{ECI}$  轴垂直于赤道面指向北极,  $Y_{ECI}$  轴与  $X_{ECI}$  和  $Z_{ECI}$  轴构成右手系, 常用的为 J2000 惯性坐标系;  $O_{ECEF}X_{ECEF}Y_{ECEF}Z_{ECEF}$  为地心固定坐标系, 原点位于地球质心,  $X_{ECEF}$  轴指向格林尼治子午线与赤道交点,  $Z_{ECEF}$  轴垂直于赤道面指向北极,  $Y_{ECEF}$  在赤道面内且与  $X_{ECEF}$  和  $Z_{ECEF}$  轴构成右手系, 常用的为 WGS84 大地测量坐标系; 内方位模型表征了焦平面任意像元的像素坐标与其相机坐标系下对应的出射矢量之间的映射关系; 外方位模型通过相机安装矩阵, 卫星姿态参数及星历数据 (卫星位置和速度) 建立了相机坐标系下出射矢量与地球表面物方点之间的转换关系。热像仪严格几何定位模型:

$$\begin{bmatrix} X_{ECEF}^j \\ Y_{ECEF}^j \\ Z_{ECEF}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ECEF}^s \\ Y_{ECEF}^s \\ Z_{ECEF}^s \end{bmatrix} + \lambda R_{ECI}^{ECEF}(t) \cdot R_{Orbit}^{ECI} \cdot R_{Body}^{Orbit} \cdot R_{cam}^{Body} \cdot R_{ref}(\theta) \begin{bmatrix} d_x & 0 & \Delta x \\ 0 & d_y & \Delta y \\ 0 & 0 & -f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j - j_0 + \Delta j_0 \\ i_0 - i + \Delta i_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,  $(i_0, j_0)$  为相机主点 (光轴与焦平面交点) 的像素坐标;  $\Delta i_0, \Delta j_0$  为主点行列坐标的误差量;  $\Delta x, \Delta y$  为像点在像平面坐标系  $x$  和  $y$  方向的畸变量;  $d_x, d_y$  为像元在  $x$  和  $y$  方向的尺寸, 单位 mm;  $f$  为相机主距;  $R_{ref}(\theta)$  为一维扫描镜反射矩阵,  $\theta$  为扫描镜法线与光轴之间的夹角;  $R_{cam}^{Body}, R_{Body}^{Orbit}, R_{Orbit}^{ECI}, R_{ECEF}^{ECI}$  分别为相机坐标系到卫星本体坐标系, 卫星本体坐标系到轨道坐标系, 轨道坐标系到地心惯性坐标系及地心惯性坐标系到地心固定坐标系之间的转换矩阵;  $(X_{ECEF}^s, Y_{ECEF}^s, Z_{ECEF}^s)^T$  为投影中心 (近似为卫星位置)

在地心固定坐标系下的位置矢量;  $\lambda$  为比例因子;  $(X_{ECEF}^j, Y_{ECEF}^j, Z_{ECEF}^j)^T$  为像素坐标系位置  $(i, j)$  处像元对应的地心固定坐标系下的物方位置。热像仪严格几何定位模型是严格几何成像模型的逆过程, 是进行在轨几何成像仿真的理论基础。

## 1.2 基于光线追迹的在轨几何成像仿真方法

### (1) 在轨几何成像仿真流程

如图2所示, 基于光线追迹的热像仪在轨几何成像仿真方法主要包括三个步骤: 1) 相机坐标系下物像模型标定; 考虑热像仪主点、主距误差、畸变模型及扫描镜位置误差构建严格物像模型并通过精密测角法进行标定。2) 像元视线矢量与地球椭球模型交点计算; 基于姿轨仿真数据和成像瞬时三角矢量关系, 采用光线追迹法计算每一像元的地面交点位置。3) 根据步骤2) 获取的地理信息和 DOM、DEM 辅助数据, 获取仿真影像对应位置的灰度信息, 并通过重投影方法获取最终仿真影像。

### (2) 基于光线追迹的地面交点计算

光线追迹即在成像瞬时由像素坐标系中的像点出发, 沿入射光线的反方向进行物方目标追踪的过程。基于光线追迹的直接定位是通过光线追迹的方法建立焦平面上任意像元视线矢量 (Line of Sight, LoS) 与其物方点坐标之间严格的对应关系。

由热像仪严格几何定位模型可得相机坐标系下像元出射矢量为:

$$\overrightarrow{LOS}_{ij} = R_{ref}(\theta) \cdot \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ -f \end{bmatrix} = R_{ref}(\theta) \begin{bmatrix} (j - j_0 + \Delta j_0)d_x + \Delta x \\ (i_0 - i + \Delta i_0)d_y + \Delta y \\ -f \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中,  $\overrightarrow{LOS}_{ij}$  为相机坐标系下像素坐标  $(i, j)$  处像元对视线矢量。

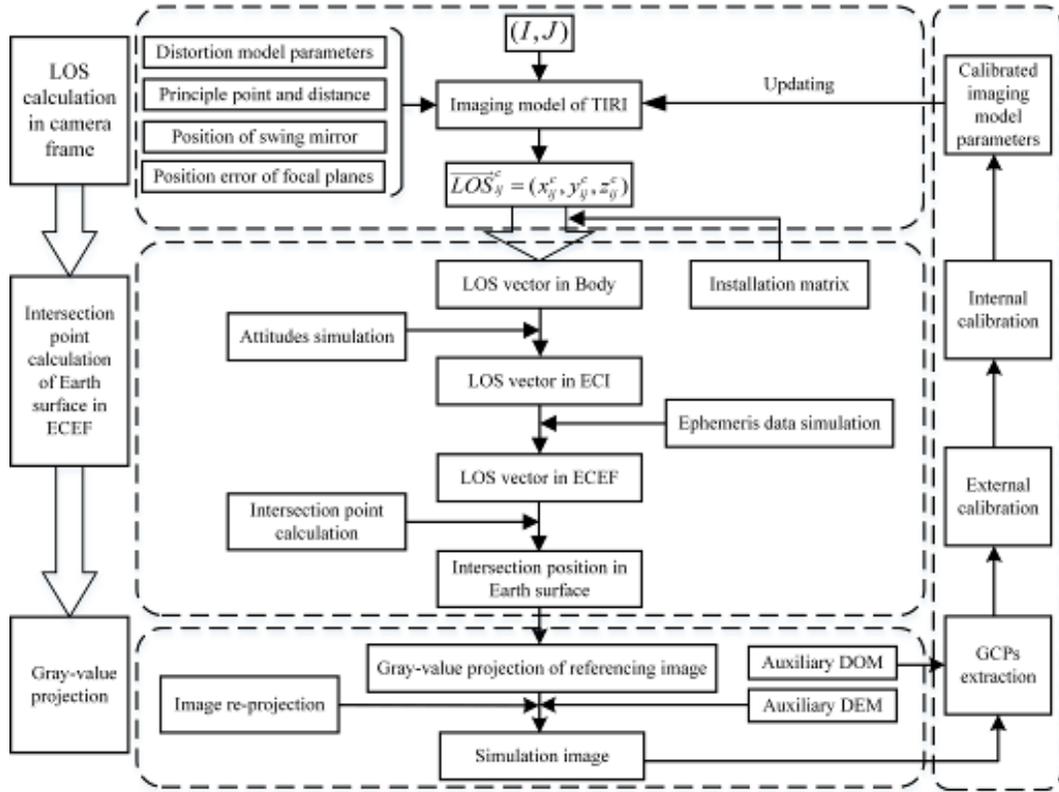


图2 热像仪在轨几何成像仿真流程

Fig. 2 Flowchart of on-orbit geometric imaging simulation of TIRI

则热像仪严格几何定位模型可简化为:

$$\vec{LoS}_{ECEF} = R_{ECI}^{ECEF} \cdot R_{Orbit}^{ECI} \cdot R_{Body}^{Orbit} \cdot R_{TIRI}^{Body} \cdot \vec{LoS}_{TIRI}, \quad (3)$$

如图1(a)所示,对地观测时,相机投影中心、物方点及地球质心构成三角形,则由向量几何关系可得:

$$\vec{P}_{ECEF} = \vec{S}_{ECEF} + \lambda \cdot \vec{LoS}_{ECEF}, \quad (4)$$

其中,  $\vec{P}_{ECEF} = (X_p, Y_p, Z_p)^T$  为地固系下地表观测点位置向量,  $\vec{LoS}_{ECEF} = (x, y, z)^T$  为地面点对应的地固系下视线矢量,  $\vec{S}_{ECEF} = (X_s, Y_s, Z_s)^T$  为相机投影中心在地固系下的位置矢量,可近似用地固系下卫星位置矢量表示。考虑地球观测时像元视线矢量必与地球椭球模型相交,因此  $\vec{P}_{ECEF} = (X_s + \lambda \cdot x, Y_s + \lambda \cdot y, Z_s + \lambda \cdot z)^T$  满足椭球方程:

$$\frac{(X_p)^2 + (Y_p)^2}{A^2} + \frac{(Z_p)^2}{B^2} = 1, \quad (5)$$

$$A = a + h$$

$$B = b + h$$

其中,  $a, b$  分别为地球椭球长半轴和短半轴,  $h$  为点  $P$  相对于椭球基准面的高程,  $A$  和  $B$  为高程  $h$  下的椭球长半轴和短半轴。由式(5)可得关于  $\lambda$  的一元二次方程,实际成像过程中,热像仪的视场范围远小于

相对地球的张角,因此热像仪视线始终与椭球相交,上述方程有两个不相等的实数解,这里取较小的解作为  $\lambda$  的取值(较大的  $\lambda$  值表示与地球背面相交)。然后,基于所求比例因子  $\lambda$ 、地固系下像点视线矢量及卫星位置矢量计算物方点在地固系下的坐标值。最后,通过大地测量坐标转换关系及 UTM 投影法<sup>[23]</sup>求得物方点的大地测量坐标及地图投影坐标。

### (3) 影像灰度重投影

根据所获取的仿真影像位置坐标对应关系,提取相应参考 DOM 影像上的灰度值,最后进行重投影生成最终的仿真影像。具体步骤如下:

1) 计算像元视线矢量与椭球交点的大地测量坐标  $(lon, lat, h)$ ;

2) 首先,对参考影像进行重采样,使其与仿真影像具有相同的空间分辨率。然后,根据步骤1)所得  $(lon, lat, h)$  及 UTM 投影法<sup>[23]</sup>计算对应的地图投影坐标  $(X_{UTM}, Y_{UTM})$ ;

3) 根据投影信息计算参考影像位置  $(X_{UTM}, Y_{UTM})$  对应的行列号如下

$$\begin{aligned} I &= (X_{UTM} - X_{UpLeft})/s \\ J &= (Y_{UpLeft} - Y_{UTM})/s \end{aligned}, \quad (6)$$

其中,  $X_{UpLeft}, Y_{UpLeft}$  分别为参考影像左上角地理投影坐标,  $s$  为影像空间分辨率; 然后, 提取参考影像  $(I, J)$  处的灰度值, 并将其赋给仿真影像对应位置;

4) 遍历所有位置坐标, 重复步骤1)~步骤3), 生成初步仿真影像;

5) 采用双线性插值法对仿真影像进行重投影补充信息丢失位置处的灰度值, 初步生成长线列摆扫式热像仪仿真影像。

### 1.3 基于“广义”修正矩阵的几何检校方法

#### (1) 几何检校模型

由图1(b)可知, 采样瞬间热像仪探测器像元标号具有面阵探测器特点, 本文采用三阶多项式模型表征焦平面每一像元在相机坐标系下的指向角, 可得两维指向角模型:

$$\begin{cases} \tan(\varphi_x) = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot j + a_3 \cdot i \cdot j + a_4 \cdot i^2 + a_5 \cdot j^2 \\ \quad + a_6 \cdot i^2 \cdot j + a_7 \cdot i \cdot j^2 + a_8 \cdot i^3 + a_9 \cdot j^3 \\ \tan(\varphi_y) = b_0 + b_1 \cdot i + b_2 \cdot j + b_3 \cdot i \cdot j + b_4 \cdot i^2 + b_5 \cdot j^2 \\ \quad + b_6 \cdot i^2 \cdot j + b_7 \cdot i \cdot j^2 + b_8 \cdot i^3 + b_9 \cdot j^3 \end{cases}, \quad (7)$$

其中,  $a_0 \cdots a_9, b_0 \cdots b_9$  为两维指向角模型标定参数,  $(i, j)$  为像元行列号。则几何定位模型可表示为:

$$\begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix} = \lambda \cdot R_U(\varphi, \omega, \kappa) \cdot R_{ECEF}^{ECEF} \cdot R_{Body}^{ECEF} \cdot R_{cam}^{Body} \cdot \begin{bmatrix} \tan \varphi_x \\ \tan \varphi_y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中,  $(X, Y, Z)^T, (X_s, Y_s, Z_s)^T$  分别为成像时刻物方点及卫星在地固系下的位置矢量;  $X_E = R_U(\varphi, \omega, \kappa)$  为“广义”偏置修正矩阵, 也是几何检校过程的外检校参数, 主要用于直接修正由于大气折射、卫星定轨、姿态测量以及GPS系统、陀螺、星敏感器和成像载荷等仪器的安装误差等因素导致的成像光线与实际光线之间的指向偏差;  $X_I = (a_0 \cdots a_9, b_0 \cdots b_9)$  为内检校参数。

#### (2) 基于“广义”修正矩阵的几何检校方法

几何检校即是通过控制信息解算内外检校参数以修正定位误差的过程。长线列摆扫式热像仪几何检校采用先外后内的检校方案。几何检校时, 首先将内检校参数初始值作为真值, 利用控制信息解算外检校参数; 然后将所获取的外检校参数作为真值, 同样基于控制信息进行内检校参数解算; 重复迭代, 直到内外检校参数的改正数均小于给定阈值, 检校完成。具体方法如下:

根据热像仪几何定位模型式(8)(由像方到物

方)可得其几何成像模型(由物方到像方):

$$\begin{bmatrix} \tan \varphi_x \\ \tan \varphi_y \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda^{-1} \cdot R_U(\varphi, \omega, \kappa)^{-1} \cdot R_{Body}^{cam} \cdot R_{Body}^{Body} \cdot R_{ECEF}^{ECEF} \cdot \begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix}$$

其中,  $R_{Body}^{cam}, R_{Body}^{Body}, R_{Orbit}^{Orbit}, R_{ECEF}^{ECEF}, R_{ECEF}^{ECEF}$  分别表示式(1)中  $R_{cam}^{Body}, R_{Body}^{Orbit}, R_{Orbit}^{ECEF}, R_{ECEF}^{ECEF}$  的逆矩阵;  $R_U(\varphi, \omega, \kappa)^{-1}$  表示待求单位旋转矩阵的逆矩阵。

$$\text{令: } \begin{cases} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} = R_{Body}^{cam} \cdot R_{Body}^{Body} \cdot R_{ECEF}^{ECEF} \cdot \begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix} \\ R_U(\varphi, \omega, \kappa)^{-1} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \end{cases}, \text{ 则消掉}$$

比例系数  $\lambda$  可得:

$$\begin{cases} F(X_E, X_I) = \frac{r_{11}U_x + r_{12}U_y + r_{13}U_z}{r_{31}U_x + r_{32}U_y + r_{33}U_z} - \tan \varphi_x \\ G(X_E, X_I) = \frac{r_{21}U_x + r_{22}U_y + r_{23}U_z}{r_{31}U_x + r_{32}U_y + r_{33}U_z} - \tan \varphi_y \end{cases}, \quad (9)$$

其中,  $(U_x, U_y, U_z)^T$  为相机投影中心与物方点之间方向矢量在相机坐标系下的坐标;  $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33}$  为“广义”偏置修正矩阵的元素;  $F(X_E, X_I), G(X_E, X_I)$  分别为卫星沿轨和垂轨方向的指向角残差。

基于地面标定结果对内外定标参数赋初值, 首先将内方位参数视为真值, 外方位参数视为待求量, 对每一个控制点可得误差方程:

$$V_i = A_i \Delta X - L_i - P_i, \quad (10)$$

其中,  $A_i$  为误差方程系数矩阵,  $\Delta X$  为外定标参数改正数;  $L_i$  为误差向量;  $P_i$  为控制点定位精度对应权值。

根据最小二乘法可得外定标系数改正数为:

$$\Delta X = (A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (11)$$

基于以上结果更新外方位元素, 重复以上步骤, 直到外定标参数改正数小于设定阈值, 停止迭代。

同理, 将所求的外方位参数视为真值, 内方位参数视为待求量, 对每一个控制点可得误差方程:

$$V_i = B_i \Delta Y - L_i - P_i, \quad (12)$$

其中,  $A_i$  为误差方程系数矩阵,  $\Delta Y$  为内定标参数改正数;  $L_i$  为误差向量;  $P_i$  为控制点定位精度对应权值。

根据最小二乘法可得外定标系数改正数为:

$$\Delta Y = (B^T P B)^{-1} (B^T P L) \quad (13)$$

更新内方位元素,重复以上步骤,直到内定标参数改正数小于设定阈值,停止迭代。最后,根据检校后的定位模型重新进行定位及重采样,生成最终长线列摆扫式热像仪在轨仿真影像。

综上,本文所提基于光线追迹的长线类摆扫式热像仪在轨几何成像仿真算法流程如表2所示。

表2 基于光线追迹的长线列摆扫式热像仪在轨几何成像仿真方法

Table 2 In-orbit geometric imaging simulation based on ray tracing for LLAWB TIRI

Input: Sensor model, Referencing DOM & DEM, simulated attitudes and ephemeris, GCPs
Output: Simulating images

1. Construct the rigorous positioning model:

$$[X, Y, Z]^T = g((i, j, 1)^T)$$

2. Ray-tracing-based intersection calculation and gray-value projec-

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 实验数据

为了生成300 Km幅宽、30 m分辨率的热像仪在轨几何仿真影像,本文以印度IRS-P6资源卫星AWiFS载荷的短波红外737 Km幅宽56 m分辨率的升采样影像(采样到30 m)为平面参考数据,同时,以相应区域30 m分辨率ASTER GDEM数据为高程参考进行仿真实验。仿真影像几何精度验证时采用Landsat 8短波红外30 m标准正射影像作为参考,验证控制点数据采用控制点提取算法,从仿真影像和参考影像提取。相关实验参考数据如图3所示。

为获取热像仪在轨几何成像仿真的姿态和轨道数据,首先,按表1参数在STK软件中构建SDG-SAT-1卫星模型,然后通过Analysis模块Report & Graph Manager工具生成姿轨仿真参数,结果如表3所示。另外,仿真成像过程探测器的采样频率远大于姿轨数据的输出频率,因此,其他行采样时刻的姿轨参数则通过四阶拉格朗日插值法获得。通过改变姿轨参数的生成时间可实现任意轨道位置的几何成像仿真。

### 2.2 评价指标

为了验证在轨仿真影像的几何精度,本文引入影像绝对定位精度指标进行评价。采用基于参考影像物方坐标的方法,首先采用控制点提取算法,

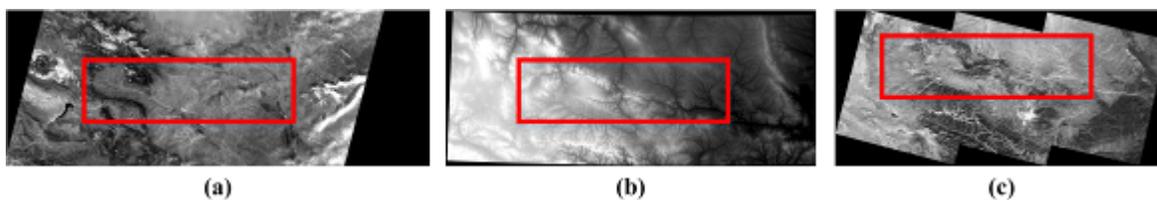


图3 参考数据 (a) 升采样30 m分辨率AwiFS影像, (b) 30 m ASTER DEM数据, (c) 30 m Landsat8正射影像

Fig. 3 Referencing data (a) upsampled AwiFS images with 30 m resolution, (b) 30 m ASTER GDEM, (c) 30 m Landsat8 ortho-image

表3 J2000坐标系下SDGSAT-1小卫星星历和姿态仿真数据

Table 3 Simulating ephemeris and attitudes of SDGSAT-1 minisatellite in J2000

Time (UTCG)	X (Km)	Y (Km)	Z (Km)	Vx (km/sec)	Vy (km/sec)	Vz (km/sec)	Yaw (°)	Pitch (°)	Roll (°)
02:44:00.000	-2 033.847 02	-5 244.471 93	3 967.558 30	-2.702 40	-3.595 56	-6.138 05	111.822	17.186	-127.108
02:44:00.100	-2 034.116 79	-5 244.831 03	3 966.945 27	-2.702 15	-3.594 92	-6.138 54	111.820	17.188	-127.102
02:44:00.200	-2 034.386 53	-5 245.190 06	3 966.332 19	-2.701 90	-3.594 28	-6.139 02	111.818	17.190	-127.096
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
02:44:15.800	-2 076.161 07	-5 300.413 66	3 870.104 48	-2.662 76	-3.493 89	-6.213 63	111.531	17.555	-126.135
02:44:15.900	-2 076.426 88	-5 300.762 60	3 869.483 90	-2.662 50	-3.493 24	-6.214 10	111.529	17.557	-126.129
02:44:16.000	-2 076.692 67	-5 301.111 48	3 868.863 27	-2.662 25	-3.492 60	-6.214 57	111.528	17.559	-126.123

从仿真影像和参考影像中获取匹配点对作为验证数据集,每一对特征点有像点和物方两种坐标,则可计算:

$$\begin{aligned} e_X &= |X_S - X_R| & \sigma_X &= \sqrt{\frac{\sum (X_S - X_R)^2}{N}} \\ e_Y &= |Y_S - Y_R| & \sigma_Y &= \sqrt{\frac{\sum (Y_S - Y_R)^2}{N}}, \quad (14) \\ e_Z &= |Z_S - Z_R| & \sigma_Z &= \sqrt{\frac{\sum (Z_S - Z_R)^2}{N}} \end{aligned}$$

其中,  $(X_S, Y_S, Z_S)$  和  $(X_R, Y_R, Z_R)$  分别为仿真影像和参考影像验证点物方坐标,  $e_X, e_Y, e_Z$  表示 X, Y, Z 三个方向的绝对定位误差,  $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$  为相应的均方根误差,即定位精度。

### 2.3 实验结果与讨论

图 4(a) 所示为长线列摆扫式热像仪连续两个扫描周期在轨几何仿真影像按地理位置坐标的拼接结果。由图 4(a) 可知,受 SDGSAT-1 小卫星轨道倾角的影响,摆镜沿垂轨方向的摆扫影像相对经纬度方向有一定倾斜角度。如图 4(b) 所示,为验证仿真影像几何精度,采用基于几何纹理模式的控制点提取算法<sup>[24]</sup>,从仿真影像和 Landsat 8 正射参考影像中提取了 4062 个控制点对,并按式(13)计算定位误差,分析误差分布规律。

图 5(a), (b), (c) 所示为校正前仿真影像 X 方向, Y 方向和 Z 方向的直接定位误差,由图 5(a) 可知沿扫描方向(地图投影 X 方向)仿真影像直接定位误差先减小后增大,其原因为星下点成像时扫描镜摆扫角度较小,由摆镜位置测量误差引入的定位误差较小,当摆镜扫描角度增加时,定位误差相应增大。图 5(b) 为 Y 方向直接定位误差在沿轨方向(地图投影 Y 方向)的分布,相对于 X 方向而言,该方向定位误差不受扫描镜误差的影响,其误差近似随机分布。图 5(c) 为仿真影像在 Z 方向误差分布,表征影像数据高程精度,同时,有 X 方向和 Y 方向定位误差可得影像平面定位误差,如图 6 所示。由直接定位误差分布图可知,受仿真过程初始参数设定的影响,仿真影像直接定位误差较大, X 方向, Y 方向和 Z 方向均有较大的系统误差,需结合控制点进行几何检校,以消除系统误差的影响。

表 4 所示为仿真影像几何定位误差统计结果,可见直接定位过程由于未考虑摆镜安装位置误差、相机安装矩阵变化及相机畸变模型变化等的影响,仿真影像在 X 方向, Y 方向以及 Z 方向的直接定位

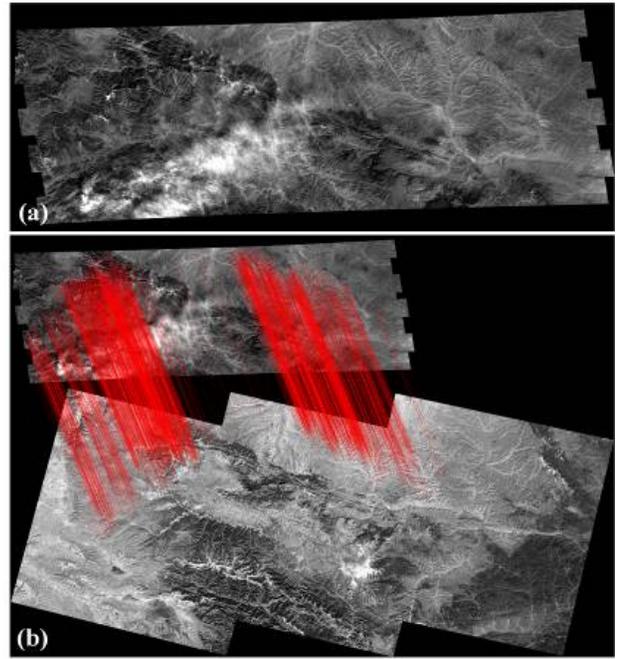


图 4 仿真数据及控制点匹配结果 (a) 两个周期仿真影像, (b) 仿真影像与参考影像控制点匹配结果

Fig. 4 The simulation image and GCPs matching results (a) the simulation images of two scan periods, (b) GCPs matching results of the simulation image and reference image

误差均值均为 250 m 左右,具有明显的系统性。同时, X 方向的均方根误差较大,为 153.061 m,表明其相较于 Y 方向和 Z 方向误差波动较大,主要为 X 方向与摆镜扫描方向一致,较大的摆扫角使得姿态误差对定位精度的影响增大,后续检校过程应对摆镜参数、相机安装矩阵及畸变模型等参数进行修正。

采用先外后内的检校方法对热像仪仿真影像进行几何检校。为了验证检校方法的有效性,利用检校后的内外方位参数修正定位模型,然后再对仿真影像进行重新定位。如图 5(d), (e), (f) 及图 6 (b) 所示为校正后仿真影像 X 方向, Y 方向, Z 方向及平面的定位误差。表 4 为仿真影像相应几何定位误差统计结果。可知,检校后影像在 X 方向的定位精度(均方根误差)由 153.061 m 提升至 34.145 m,且由 5(d) 可知,检校后摆镜系统误差得到了较好的补偿; Y 方向和 Z 方向的定位精度分别由检校前的 47.074 m、78.831 m 提高至检校后 40.471 m 和 30.366 m。Y 方向覆盖范围较小且不受摆镜运动影响,检校前后变化不大。可知,检校后 X、Y、Z 方向的定位精度均优于 2 个像元,相比校正前有较大提升,因此,所提检校方法有助于提高在轨仿真影像几何精度。

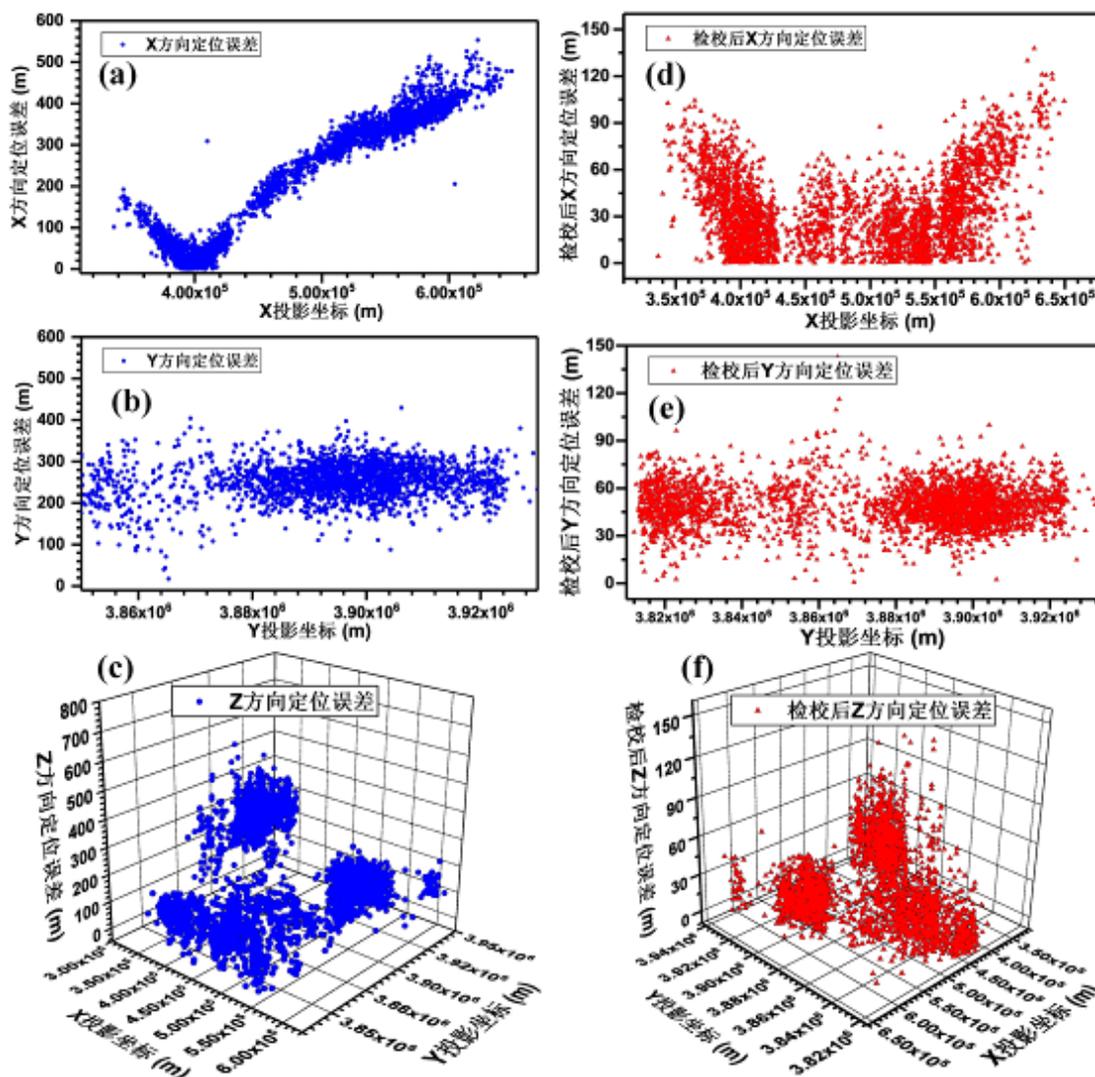


图5 校正前后仿真影像几何定位误差分布对比:(a)校正前X方向定位误差,(b)校正前Y方向定位误差,(c)校正前Z方向定位误差,(d)校正后X方向定位误差,(e)校正后Y方向定位误差,(f)校正后Z方向定位误差

Fig. 5 Distribution comparison of geometric positioning errors of simulation images: (a) positioning errors in X before calibration, (b) positioning errors in Y before calibration, (c) positioning errors in Z before calibration, (d) positioning errors in X after calibration, (e) positioning errors in Y after calibration, (f) positioning errors in Z after calibration

表4 校正前后仿真影像几何定位精度对比

Table 4 Geometric positioning accuracy comparison of simulation images before and after calibration

Items	Positioning error before calibration				Positioning error after calibration			
	X(m)	Y(m)	Z(m)	XY-plane(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	XY-plane(m)
Maximum	656.543	567.579	821.984	784.353	186.959	293.231	231.615	473.753
Minimum	0.115	17.808	43.964	34.601	0.051	17.808	0.069	2.782
Mean	216.651	245.243	261.516	350.416	34.234	49.563	31.511	63.875
Median	257.013	247.215	241.014	349.778	30.270	49.283	29.533	61.733
RMSE	153.061	47.074	78.831	181.837	34.145	40.471	30.366	39.876

由以上实验结果可知,该研究可在卫星发射前,通过DOM、DEM参考数据生成仿真影像,结合地面控制点可对所构建的载荷严格几何定位模型及

在轨几何检校方法的正确性及有效性进行验证。实际在轨成像时可将仿真结果获取的相关参数值作为在轨几何定位模型的初始值,可为解决初始值

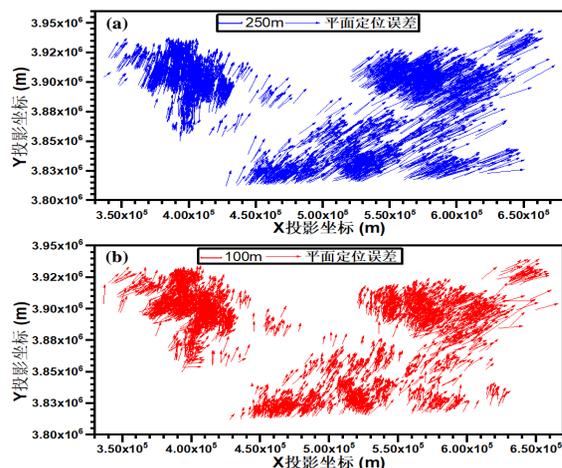


图6 校正前后仿真影像平面几何定位误差分布对比:(a)校正前平面定位误差,(b)校正后平面定位误差

Fig. 6 Distribution comparison of planar geometric positioning errors of simulation images: (a) planar positioning errors before calibration, (b) planar positioning errors after calibration

偏离较大导致解算方程病态的问题提供新的思路。同时,仿真影像可以为实际在轨影像的几何定位分析及数据处理算法验证提供数据支持。

### 3 结论

卫星发射前,通过仿真数据预先研究搭载载荷的成像性能,验证后续处理算法对改进载荷设计指标,提升数据预处理能力至关重要。为实现光学载荷成像链路几何误差源追踪与分析,本文针对SDG-SAT-1小卫星热像仪发射前数据缺乏的问题,提出了一种基于光线追迹的光学载荷在轨几何成像仿真方法。根据热像仪成像方式,考虑了主点主距误差、畸变模型、摆镜误差及安装矩阵误差等,构建了长线列摆扫式热像仪严格几何定位模型,实现了像点到物方的严密几何映射。根据姿轨、DOM和DEM等仿真数据,采用光线追迹法实现了在轨成像链路的几何仿真,生成了相应区域的在轨仿真影像。并通过控制点对仿真影像几何定位精度进行了分析,发现受摆镜运动的影响沿扫描方向仿真影像直接定位误差先减小后增大,主要原因是较大的摆扫角使得姿态误差对定位精度的影响增大。为提升在轨影像几何仿真精度,基于“广义”修正矩阵方法对定位模型进行了检校,修正了定位模型,尤其是摆镜系统误差,最终实现了优于2个像元的几何定位精度。此外,该研究主要针对在轨成像过程几何链路的仿真分析,未考虑成像的物理机理及地面目标

在相机入瞳处的辐亮度,后续将开展大气辐射传输模型、光学系统成像、辐射响应及卫星平台运动等因素探究,实现光学载荷在轨全链路仿真分析。

### References

- [1] YANG Fei, JIN Guang, XIE Jin-Hua, *et al.* Stereo mapping camera modeling and simulation based on the physical mechanism of on-orbit imaging [J]. *Chinese Optics*, (杨飞,金光,谢金华,等.基于在轨成像物理机理的立体测绘相机建模与仿真.中国光学) 2015, **8**(06): 971-979.
- [2] YE Si-Rong, JIANG Wan-Shou, LI Jin-Long, *et al.* Imaging simulation and error analysis of large field of view airborne infrared scanner [J]. *Infrared and Laser Engineering*, (叶思熔,江万寿,李金龙,等.某大视场机载摆扫红外扫描仪几何成像仿真与误差分析.中国光学) 2017, **46**(04): 134-139.
- [3] LIU Xiong-Fei, WANG Shi-Xin, ZHOU Yi, *et al.* Review of optical remote sensing image simulation technology [J]. *Remote Sensing Information*, (刘雄飞,王世新,周艺,等.光学遥感影像成像模拟研究综述.遥感信息) 2013, **28**(05): 118-123.
- [4] Zakeri F, Mariethoz G. A review of geostatistical simulation models applied to satellite remote sensing: Methods and applications [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, **259**: 112381.
- [5] Goodenough A A, Brown S D. DIRSIG5: Next-Generation Remote Sensing Data and Image Simulation Framework [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2017, **10**(11): 4818-4833.
- [6] Guanter L, Segl K, Kaufmann H. Simulation of Optical Remote-Sensing Scenes With Application to the EnMAP Hyperspectral Mission [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, **47**(7): 2340-2351.
- [7] Parente M, Clark J T, Brown A J, *et al.* End-to-End Simulation and Analytical Model of Remote-Sensing Systems: Application to CRISM [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, **48**(11): 3877-3888.
- [8] Sanders J S, Brown S D. Utilization of DIRSIG in support of real-time infrared scene generation [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2000:
- [9] Arnold P S, Brown S D, Schott J R. Hyperspectral simulation of chemical weapon dispersal patterns using DIRSIG [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2000, **4029**: 288-299.
- [10] Brner A, Wiest L, Keller P, *et al.* SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2001, **55**(5): 299-312.
- [11] Schaepman M E, Vos L D, Itten K I. APEX-airborne PRISM experiment: hyperspectral radiometric performance analysis for the simulation of the future ESA land surface processes earth explorer mission [J]. *International Society for Optics and Photonics*, 1998.
- [12] Anding D C, Szabo A. Real-time image visualization for sensors [J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, **2741**: 232-241.
- [13] Gastellu-Etchegorry J P, Martin E, Gascon F. DART: a

- 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(1):73-96.
- [14] Prosser C D. PICASSO: an end-to-end image simulation tool for space and airborne imaging systems[J]. *Proc Spie*, 2010, **4**(4):2840-2849.
- [15] Segl K, Guanter L, Kaufmann H, et al. Simulation of Spatial Sensor Characteristics in the Context of the EnMAP Hyperspectral Mission [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(7):3046-3054.
- [16] Kavzoglu T. Simulating Landsat ETM+ imagery using DAIS 7915 hyperspectral scanner data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(22):5049-5067.
- [17] Wang Gang, YU Bing-Xi. Study on Scientific Visualization of Earth Remote Sensing Based on Imagery Simulation [J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, (王刚,禹秉熙. 基于图像仿真的对地遥感过程科学可视化研究. *系统仿真学报*) 2002, **06**:756-760.
- [18] YI Wei-Ning, GU You-lin, DU Li-Li, et al. Introduction of optical remote sensing imaging simulation system [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, (易维宁,顾有林,杜丽丽,等. 光学遥感图像仿真软件 ORSIS 介绍. *大气与环境光学学报*) 2007, **06**:459-463.
- [19] CHEN Fang, NIU Zheng, SUN Gen-Yun, et al. Using low-spectral-resolution images to acquire simulated hyperspectral images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**(10):2963-2980.
- [20] JIANG Wan-Shou, ZHANG Jian-Qing, ZHANG Zu-Xun. Simulation of three-line CCD satellite images from given orthoimage and DEM [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, (江万寿,张剑清,张祖勋. 三线阵 CCD 卫星影像的模拟研究. *武汉大学学报(信息科学版)*) 2002, **04**:414-419.
- [21] GU You-Lin, ZHANG Dong-Ying, YI Wei-Ning. Simulation of Space Optical Remote Sensor Imaging Based on Aviation Image [J]. *Journal of System Simulation*, (顾有林,张冬英,易维宁,等. 基于航空图像的航天光学遥感器成像的仿真. *系统仿真学报*) 2008, **14**: 3730-3732.
- [22] MA Xiao-Shan, MENG Xin, YANG Zhen, et al. Framework of entire image chains simulation for optical remote sensing images system [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, (马晓珊,孟新,杨震,等. 光学遥感成像系统全链路仿真框架研究. *量子电子学报*) 2012, **29**(04):392-399.
- [23] ZHOU Chao-Xian, FANG Zhi-Feng, YU Cai-Hong, et al. UTM projection and Gauss-Krüger projection and their conversion [J]. *Geology and Exploration*, (周朝宪,房志峰,于彩虹,等. UTM 投影和 Gauss-Krüger 投影及其变换实现. *地质与勘探*) 2013, **49**(5) :0882-0889.
- [24] LI Xiao-Yan, HU Zhuo-Yue, JIANG Lin-Yi, et al. GCPs Extraction With Geometric Texture Pattern for Thermal Infrared Remote Sensing Images [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, doi: 10.1109/LGRS.2020.3030303.