

文章编号 1004-924X(2023)19-2898-12

## 垂轨环扫卫星影像有理函数模型的构建及精度评估

刘 宪, 薛 武\*, 王 鹏  
(航天工程大学, 北京 101416)

**摘要:**垂轨环扫传感器能兼顾实现超大幅宽(千公里级)与高分辨率(米级)成像,其影像数据量远超传统卫星(单景影像达几百 GB)。为了探究该成像方式下影像有理函数模型的适用性和精度,基于垂轨环扫传感器成像原理构建其严格成像模型。针对垂轨环扫影像特性,提出一种结合数字高程模型的地形相关控制点布设方案。采用星下点坐标确定初始迭代区间的方法解决大幅宽条件下反投影计算失效的问题,从而实现任意幅宽影像整景范围内物方坐标到像方坐标的求解。最后,通过生成不同幅宽的模拟影像及姿轨数据完成有理函数模型的建立,探究有理函数模型对严格成像模型的拟合精度。实验表明:3 000 km 幅宽时,一景实验影像在大地坐标系下地形无关、地形相关方案得到的有理函数模型的拟合误差分别为 3 004.25, 1 939.04 pixel;地心直角坐标系下的拟合误差为 27.50, 24.96 pixel。影像大幅宽时,主要受地球曲率影响,大地坐标系解算的 RPC 误差极大;在地心直角坐标系下解算的 RPC 具有更高的拟合精度,但二者均无法实现对严格成像模型的高精度拟合。对垂轨环扫卫星影像有理函数模型拟合精度的初步探究为卫星入轨交付后的影像处理奠定了技术基础。

**关键词:**垂轨环扫;严格成像模型;有理函数模型;反投影计算;精度评估

**中图分类号:**P236 **文献标识码:**J **doi:**10.37188/OPE.20233119.2898

## Construction and accuracy assessment of rational function model for perpendicular-orbit circular scanning satellite images

LIU Xian, XUE Wu\*, WANG Peng

(Space Engineering University, Beijing 101416, China)

\* Corresponding author, E-mail: xuewu\_81@126.com

**Abstract:** The perpendicular-orbit circular scanning sensor, a new optical imaging system, can capture images with an ultra-wide swath width (thousand-kilometer level) and high resolution (meter level) that are much larger than those obtained by traditional satellites (with a single image being up to several hundred gigabytes). A rigorous imaging model was constructed for the perpendicular-orbit circular scanning sensor based on an analysis of its imaging principles. Based on the characteristics of the perpendicular-orbit circular scanning sensor, a terrain-dependent control point layout scheme combined with DEM was developed. In addition, a method to determine the initial iteration interval was proposed using the coordinate of the sub-satellite point to solve the problem of back projection calculation failure under the condition of a wide swath, which could help obtain a solution from the object space coordinate to the image space coordinate

收稿日期:2023-03-17;修订日期:2023-04-11.

基金项目:航天工程大学青年创新基金资助项目

within the whole scene range of an arbitrary-width image. In this study, a RFM construction test was conducted by simulating images with different swath width, orbital, and altitudinal data to explore the fitting accuracy of RFM in different object square coordinate systems. When the swath width of the image reaches 3 000 km, the RFM fit error is 3 004.25 and 1 939.04 pixels in different schemes. The RFM fit error constructed by the terrain-dependent scheme is 27.5 and 24.96 pixels when a geocentric rectangular coordinate system was used. Images captured by the perpendicular-orbit circular scanning sensor can have widths of several thousand kilometers; therefore, the accuracy of RPC is significantly affected by the curvature of earth, and the accuracy of RPC solved under the condition of geocentric rectangular coordinate system is better than that of a geodetic coordinate system. The initial exploration of the RFM accuracy of perpendicular-orbit circular scanning sensor images can provide a foundation for the application of the satellite.

**Key words:** perpendicular-orbit circular scanning sensor; rigorous sensor model; rational function model; back project calculation; accuracy assessment

## 1 引 言

有理函数模型(Rational Function Model, RFM)最初作为 IKONOS 影像的成像模型由 Space Imaging 公司推出,因其精度高、适用性强、保密性好等特点而得到广泛应用<sup>[1]</sup>。很多学者对卫星影像 RFM 精度进行了研究,Naga-subramanian 等使用 IRS-P6 LISS-4 长条带多光谱影像构造 RFM 与严格成像模型进行精度对比,实验表明二者的拟合误差小于 1 像素<sup>[2]</sup>;蒋永华等对珠海一号卫星补偿镜头畸变参数后,影像 RFM 的绝对精度优于 0.5 像素<sup>[3]</sup>;唐新明等对资源三号卫星经传感器校正后的影像产品进行 RFM 构建实验,其前视、后视、正视影像 RFM 与严格成像模型的拟合误差均优于 0.001 像素<sup>[4]</sup>;张力等对 SPOT-5 不同传感器获取的全色与多光谱影像构建 RFM,RFM 与严格成像模型的拟合误差不大于 0.05 像素<sup>[5]</sup>。大量研究表明,对现有卫星而言,RFM 能够在一定程度上代替严格成像模型,满足测绘生产需求。

随着卫星技术的进步与发展,线阵垂轨环扫成像构思被提出<sup>[6]</sup>。区别于当前光学遥感卫星主要使用的三线阵、双线阵或单线阵/面阵成像体制<sup>[7]</sup>,垂轨环扫成像的线阵 CCD 传感器沿卫星飞行方向安置,在卫星飞行过程中传感器绕卫星纵轴 360°旋转扫描,视场在垂直轨道方向上不断叠加以实现环扫成像。在轨道高度 500 km、焦距

3 500 mm 的情况下,垂轨环扫传感器能实现星下点空间分辨率 1 m、影像东西跨度 3 000 km 的成像指标,兼顾高空间分辨率与大范围地物覆盖。作为一种新型成像体制,垂轨环扫成像对一些应用于卫星的成熟理论提出了挑战。

目前,在垂轨环扫成像研究中,钟灵毓构建了严格成像模型并对模型的正确性进行了验证<sup>[8]</sup>,薛武系统分析了垂轨环扫传感器几何处理的难点,提出了初步解决方案<sup>[9]</sup>,而后提出一种以匹配同名点作为约束条件的几何纠正方法<sup>[10]</sup>,但目前尚无 RFM 的相关研究。本文以生成的模拟影像及姿轨数据为基础,使用地形相关、地形无关方案构建不同幅宽影像 RFM,探究不同幅宽影像在不同控制点获得方案与物方坐标系下的 RFM 拟合精度。

## 2 严格成像模型与有理函数模型的构建

### 2.1 成像原理

垂轨环扫成像将多条线阵 CCD 拼接成一条长线阵 CCD,沿卫星飞行方向安置,在卫星飞行过程中传感器光轴绕卫星纵轴旋转 360°,在传感器旋转至一定角度范围时进行扫描成像,视场在扫描方向不断叠加<sup>[10]</sup>,实现大视场宽幅成像。垂轨环扫成像与线阵推扫成像的对比如图 1 所示。

为满足立体测绘、三维重建等需求,卫星可

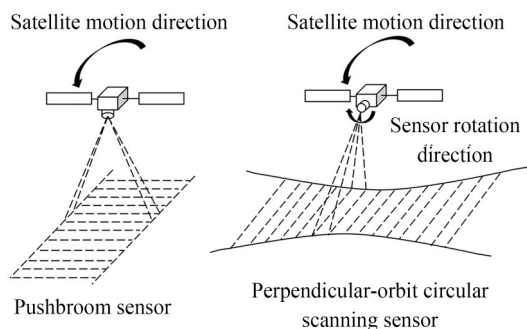


图1 线阵垂轨环扫成像与推扫成像对比

Fig. 1 Comparison of perpendicular-orbit circular scanning sensor with pushbroom sensor imaging mode

搭载双相机获取立体像对。两台相机“背靠背”反向安置,下视相机主光轴垂直轨道向下,前视相机主光轴沿轨向前倾斜一定角度,在环扫过程中双相机交替成像,获取立体影像。图2为双相机成像示意图,其中蓝色、黄色分别为下视与前视相机成像视场(彩图见期刊电子版)。

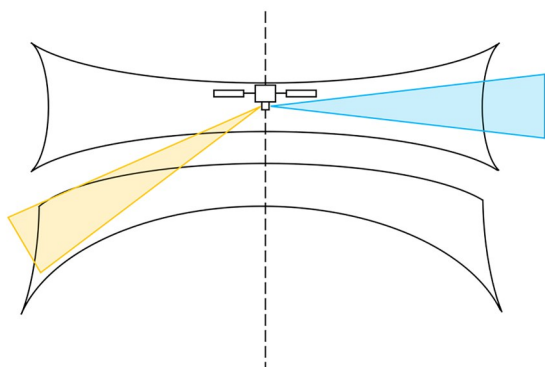


图2 双相机成像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dual-camera imaging

## 2.2 像方坐标系定义

垂轨环扫独特的成像方式使得部分像方坐标系在定义与使用上与推扫式传感器有所区别。对于瞬时影像坐标系,在推扫成像下,以影像每条扫描行主点为原点,沿扫描线方向为 $y$ 轴,沿卫星运动方向为 $x$ 轴<sup>[11]</sup>;在垂轨环扫成像下,以影像每条扫描行主点为原点,扫描线方向为 $x$ 轴,传感器环扫方向为 $y$ 轴。对于该定义下的瞬时影像坐标系,推扫成像中 $x$ 值恒等于0,而垂轨环扫成像中 $y$ 值恒等于0。两种瞬时影像坐标系如图3所示。对于传感器坐标系,推扫成像与垂轨环扫成像定义下的坐标原点均位于扫描行投影中心, $x, y$

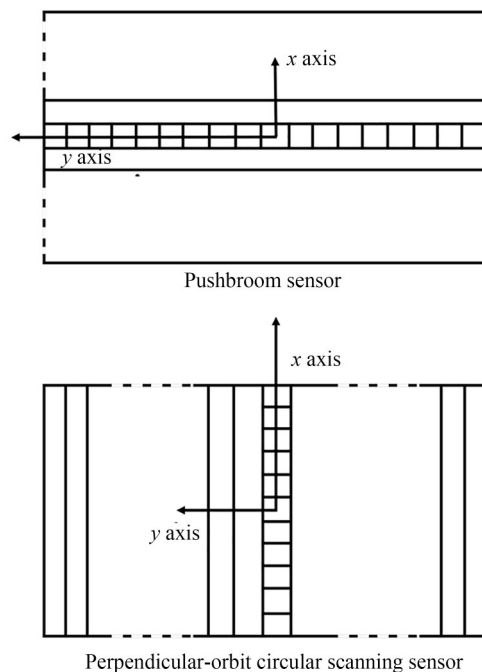


图3 垂轨环扫与线阵推扫的瞬时影像坐标系对比

Fig. 3 Comparison of instantaneous image coordinate system between vertical orbit ring scanning sensor and pushbroom sensor

轴定义同瞬时影像坐标系, $z$ 轴由右手法则确定。

## 2.3 严格成像模型构建

WGS84 坐标系下,记地面点坐标为 $[X, Y, Z]^T$ ,卫星 GNSS 天线相位中心坐标为 $[X_{\text{GNSS}}, Y_{\text{GNSS}}, Z_{\text{GNSS}}]^T$ ,则物方矢量为 $[X - X_{\text{GNSS}}, Y - Y_{\text{GNSS}}, Z - Z_{\text{GNSS}}]^T$ ,将它转换至卫星本体坐标系:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{body}} = \mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{body}} \mathbf{R}_{\text{WGS84}}^{\text{J2000}} \begin{bmatrix} X - X_{\text{GNSS}} \\ Y - Y_{\text{GNSS}} \\ Z - Z_{\text{GNSS}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $[X, Y, Z]_{\text{body}}^T$ 为物方矢量在卫星本体坐标系下的坐标, $\mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{body}}$ 表示J2000坐标系到卫星本体坐标系的转换矩阵, $\mathbf{R}_{\text{WGS84}}^{\text{J2000}}$ 表示WGS84坐标系到J2000坐标系的转换矩阵, $[d_x, d_y, d_z]^T$ 与 $[D_x, D_y, D_z]^T$ 分别表示投影中心与GPS的偏移矢量。将矢量转换到传感器坐标系:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{cam}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{body}}, \quad (2)$$

其中:  $[x, y, -f]^T$  为物方矢量在传感器坐标下的坐标,  $R_{\text{body}}^{\text{cam}}$  表示卫星本体坐标系到传感器坐标系的转换矩阵。共线条件方程实质是投影中心、像点、物点三点共线,即像方矢量与物方矢量共线,综合式(1)有:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda R_{\text{body}}^{\text{cam}} \left( R_{\text{J2000}}^{\text{body}} R_{\text{WGS84}}^{\text{J2000}} \begin{bmatrix} X - X_{\text{GNSS}} \\ Y - Y_{\text{GNSS}} \\ Z - Z_{\text{GNSS}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \right), \quad (3)$$

其中  $\lambda$  为比例系数。考虑到 GNSS 偏移矢量和投影中心偏移矢量的数值较小且一定程度上相互抵消<sup>[12]</sup>,式(3)可简化为:

$$p = a_0 + a_1 Y + a_2 X + a_3 Z + a_4 YX + a_5 YZ + a_6 XZ + a_7 Y^2 + a_8 X^2 + a_9 Z^2 + a_{10} YXZ + a_{11} Y^3 + a_{12} YX^2 + a_{13} YZ^2 + a_{14} Y^2 X + a_{15} X^3 + a_{16} XZ^2 + a_{17} Y^2 Z + a_{18} X^2 Z + a_{19} Z^3, \quad (6)$$

其中  $a_i$  为多项式系数。将式(5)线性化后,采用岭估计法求解有理函数模型参数(Rational Polynomial Coefficients, RPC)。

RPC 的解算需要地面控制点(Ground Control Point, GCP)的像方坐标与物方坐标,根据坐标的获取方式可分为地形相关与地形无关两种方案。地形无关方案使用严格成像模型计算得到覆盖影像物方范围的空间格网点坐标<sup>[13,15]</sup>;地形相关方案通常为实地测量、地图选点<sup>[11,14]</sup>或匹配同名点<sup>[16]</sup>的方式得到控制点坐标。其解算的 RPC 精度与控制点的数量、分布和精度密切相关<sup>[14]</sup>。由于垂轨环扫卫星影像范围远超传统卫星影像且原始影像存在较大畸变,人工选取一定数量、分布较为均匀的控制点耗时耗力;匹配同名点又难以保证其精度与空间分布。因此,本文的地形相关方案采用在影像范围内布设物方平面格网,然后由数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)内插得到高程,进而反算至像方得到控制点坐标。此方案的整体思路与地形无关方案<sup>[15]</sup>类似,但高程值由 DEM 内插得到。虽然 GCP 生成中使用严格成像模型,但由于物方坐标依照地形起伏分布,故称之为地形相关方案。

地形无关方案的步骤为:

(1)在像方按一定像素间隔布设均匀格网点,得到每个格网点的像素坐标  $(r_i, c_i)$ ;

(2)求取影像对应地面范围的最大、最小高

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda R_{\text{body}}^{\text{cam}} R_{\text{J2000}}^{\text{body}} R_{\text{WGS84}}^{\text{J2000}} \begin{bmatrix} X - X_{\text{GNSS}} \\ Y - Y_{\text{GNSS}} \\ Z - Z_{\text{GNSS}} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

## 2.4 有理函数模型构建

RFM 的表达式为<sup>[13-14]</sup>:

$$\begin{cases} r_n = \frac{p_1(X_n, Y_n, Z_n)}{p_2(X_n, Y_n, Z_n)} \\ c_n = \frac{p_3(X_n, Y_n, Z_n)}{p_4(X_n, Y_n, Z_n)} \end{cases}, \quad (5)$$

其中:  $(r_n, c_n)$ ,  $(X_n, Y_n, Z_n)$  分别为第  $n$  个控制点归一化后的像方、物方坐标;  $p_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 为物方坐标构成的多项式,多项式中各项幂次不超过 3,具体形式为:

程  $H_{\text{max}}, H_{\text{min}}$ , 并将高程范围均分为  $m$  层;

(3)将格网点像素坐标  $(r_i, c_i)$  和各个高程面的高程  $H_m$  带入共线条件方程,与椭球方程联立解算物方坐标  $(X_i, Y_i, Z_i)$ ,即得到物方空间分布的  $m$  层虚拟控制点的像方和物方坐标。

地形相关方案的步骤为:

(1)在影像第一行、最后一行和第一列、最后一列均匀选取若干像点,平均高程带入共线条件方程和椭球方程联立求得物方坐标,构成封闭多边形表示影像对应的大致地面范围。

(2)在 DEM 上布设影像范围内均匀格网点,由物方平面坐标  $(X_i, Y_i)$  内插得到高程坐标  $Z_i$ 。

(3)使用反投影计算进行物点最佳扫描行搜索,得到控制点的物方和像方坐标。

## 2.5 反投影计算分析与改进

由于线阵影像多中心投影的特性,在将坐标由物方换算至像方时,首先需确定物点对应的外方位元素,即确定对应的成像扫描行,此过程称为反投影计算。该方法用于地形相关方案中得到控制点的像方坐标,依据原理可主要分为基于像方空间特性和基于物方空间特性两种方式。由于垂轨环扫单景影像变分辨率<sup>[9]</sup>,影像投影面间不具备平行关系<sup>[10]</sup>,现有的基于传感器物方空间特性提出的反投影算法<sup>[17-20]</sup>较难直接应用于垂轨环扫影像,因此本文采用基于像方空间特性的反投影计算方法——二分法<sup>[21-22]</sup>



进行讨论。

不同于推扫成像,垂轨环扫成像时每一扫描行对应影像的一列,因此后续讨论基于此种对应关系展开。记地面点 $P$ 的物方坐标为 $(X, Y, Z)$ ,像方坐标为 $(r_p, c_p)$ ,扫描行列数与其外方位元素分别为 $c_p$ 与 $eop_{c_p}$ ,影像第 $i$ 个扫描行对应的外方位元素记为 $eop_{i0}$ 。将 $P(X, Y, Z)$ 与 $eop_{i0}$ 带入共线条件方程,可算得物点在第 $i$ 个扫描行中对应的传感器坐标系下的位置坐标,记其 $y$ 轴分量为 $y_i$ 。由2.2节所述像方坐标系定义, $P(r_p, c_p)$ 在第 $c_p$ 列影像对应的瞬时影像坐标系下的像点坐标 $y$ 轴分量不大于0.5像素。将其转换至传感器坐标系后,相应 $y$ 轴分量数值上接近0。因此,当共线条件方程中带入 $P(X, Y, Z)$ 与 $eop_{c_p}$ 时,得到传感器坐标系 $y$ 轴分量 $y_{c_p}$ 近似为0。当共线条件方程中带入 $P(X, Y, Z)$ 与 $eop_{i0}(i \neq c_p)$ 时,近似相当于求解 $P(r_p, c_p)$ 在第 $i$ 个扫描行传感器坐标系下的坐标,此时 $y_i$ 的绝对值大于 $y_{c_p}$ 。由于各扫描行传感器坐标系 $y$ 轴的定义方向相同,当扫描行号 $i$ 大于 $c_p$ 时, $y_i$ 虽然数值有所变化,但符号上保持统一,反之亦然。反投影计算原理如图4所示。

将 $P(X, Y, Z)$ 与 $eop_{i0}(i = 1, 2, \dots, n)$ 依次带入共线条件方程,做出 $y_i$ 值随列数变化的散点图像,离散点分布应符合单调单零点曲线走势,如图5(a)所示,曲线中近似零点处对应列数即为所求。以扫描行范围 $(s, s+1, \dots, n)$ 作为搜索区间,分别选取 $eop_s, eop_m, eop_n(m = n/2)$ 带入共线条件方程,将 $(y_s * y_m)$ 与 $(y_m * y_n)$ 分别作为判别式,若某一判别式小于零,则此区间内包含零点,即最佳扫描行位于此区间内,并按照此区间起止更

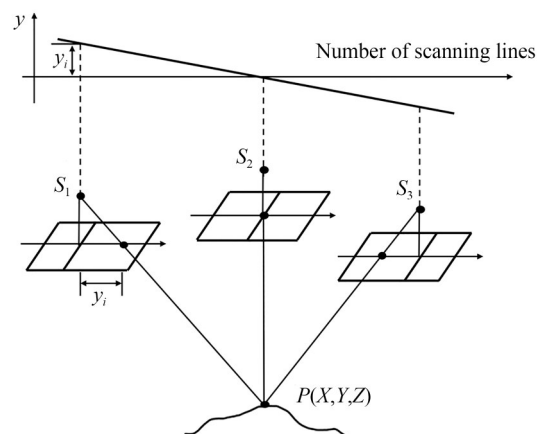


图4 反投影计算原理

Fig. 4 Schematic principle for back project calculation

新扫描行搜索范围。如此迭代,将搜索区间逐次对半缩减直至区间长度小于给定阈值。而后在区间内逐行计算 $y_i$ ,数值最小者即为所求。此即二分法的实现过程。

但是严格来讲,对于多中心投影,共线条件方程只在带入物点 $P(X, Y, Z)$ 与对应 $eop_{c_p}$ 时严格成立。带入 $eop_{i0}(i \neq c_p)$ 时,得到的结果仅能进行符号上的定性判断,且其可靠程度随扫描行号 $i$ 与扫描行号 $c_p$ 间距离的增大而减小。垂轨环扫单景影像的投影中心数量最多超过100万,当扫描行 $i$ 与 $c_p$ 各自对应的物点相距过大时,将导致 $eop_{i0}$ 带入共线条件方程后分母位置数值变化经过零点,从而使所求 $y_i$ 值出现类似无穷间断点的跃变现象(如图5(b)和图5(c)所示),改变零点两端 $y_i$ 值符号的一致性,使两个迭代判别式均小于零,从而导致二分法无法判断物点所在区间。

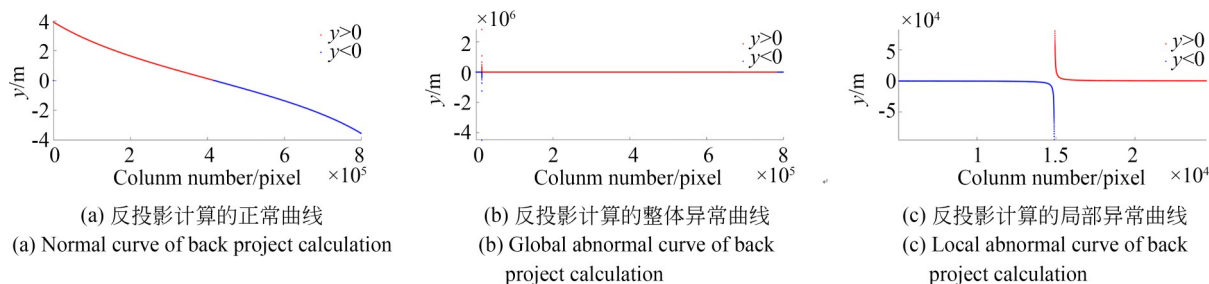
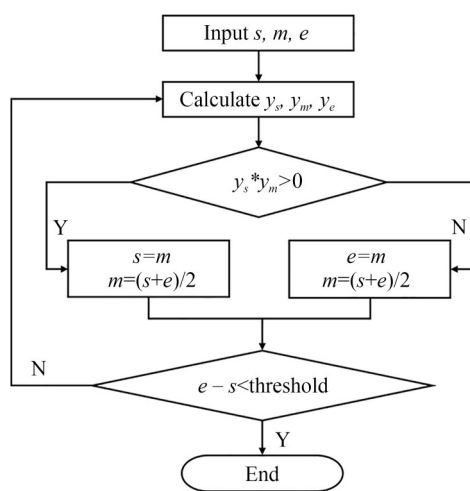


图5 像方反投影计算曲线

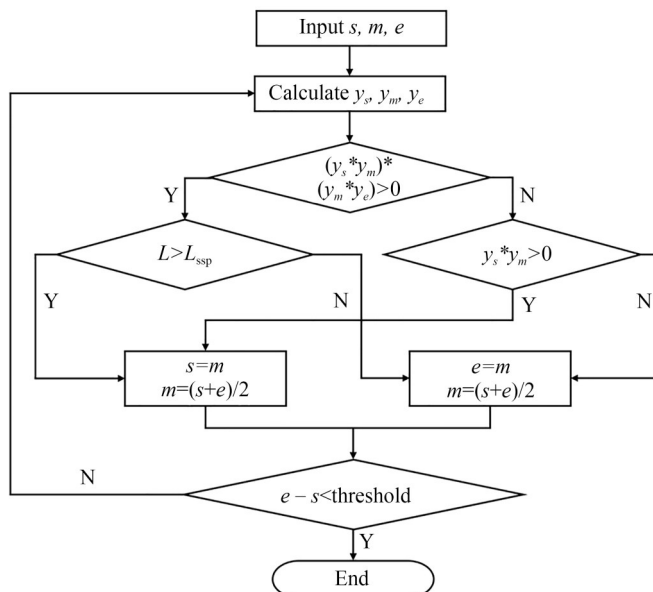
Fig. 5 Curves of back project calculation

对二分法迭代判断规则进行改进。当无法由判别式符号关系判断物点所在区间时,由影像中心位置的像素坐标及平均高程算得星下点概略坐标(记为 $L_{ssp}$ ),通过比较物点与星下点经度的坐标关系得到物点所在的初始区间,以此避免因 $y$ 值跃变导致二分法计算失效。二分

法与改进二分法的迭代流程如图 6 所示。图中, $s, m, e$  分别为搜索区间内第一条、中间条、最后一条扫描行影像列数,初始搜索区间为整景影像列数范围; $y_s, y_m, y_e$  为上述三列扫描行外方位元素与物点带入共线条件方程算得的 $y$ 值。



(a) 一般反投影计算  
(a) Regular back projection calculation



(b) 改进的反投影计算  
(b) Improved back projection calculation

图 6 反投影计算与改进算法流程

Fig. 6 Flow chart of back project calculation and improved algorithm

### 3 实验及分析

由于目前尚无公开资料显示有搭载线阵垂轨环扫传感器的卫星在轨运行,因此本研究使用课题组开发的卫星影像模拟软件生成模拟影像与姿轨数据开展实验,软件界面如图 7 所示。实验环境为 Microsoft Win11 64 位操作系统, CPU 型号 Inter(R) i7-12700H 2.70 GHz, 内存容量为 32 GB, 相关程序基于 MATLAB 2022a 编写实现。

#### 3.1 实验数据准备

实验分别以青海省天峻县(97.7°E, 38.7°N)、青海省格尔木市(94°E, 36°N)为原始影像的中心位置,生成前视、下视一景完整 3 000

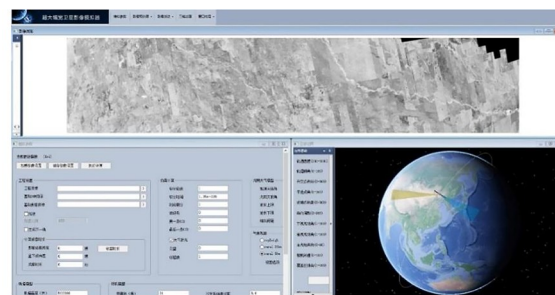


图 7 模拟影像仿真软件界面

Fig. 7 Interface of simulation image software

km 影像的姿轨数据,通过计算得到不同幅宽下对应扫描行外方位元素用以解算 RPC。影像范围跨度广、地势起伏大,包括高原、山地、平原在内等多种地形。前视、下视影像对应的范围分别如图 8(a)和 8(b)所示。

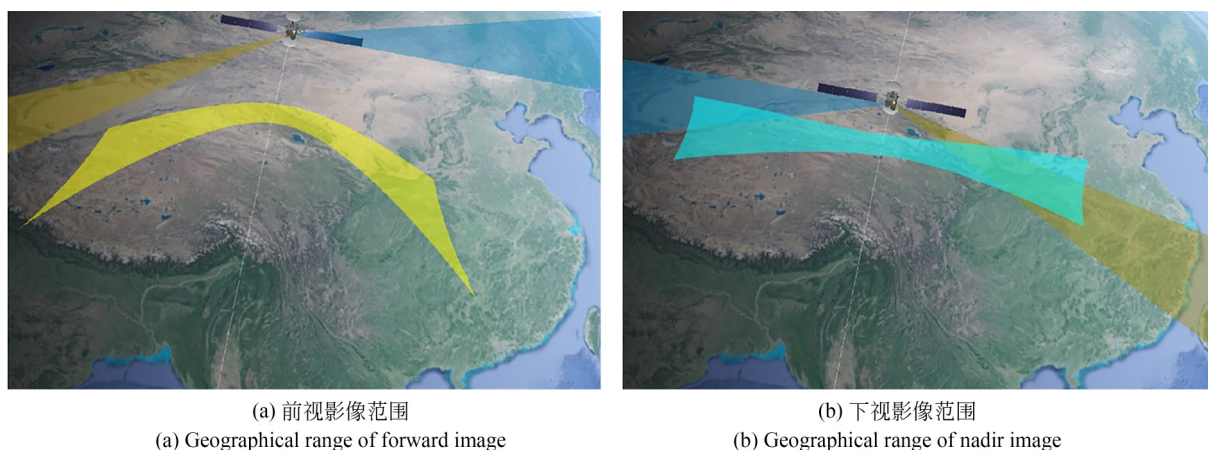


图 8 影像范围示意图

Fig. 8 Schematic diagram of image range

### 3.2 改进反投影计算验证

在两景 3 000 km 幅宽影像行列范围内生成 10 万个随机像方点  $(r_i, c_i)$ , 对每个像点赋予平均高程附近的随机高程值  $Z_i$ , 由共线条件方程计算得到 10 万个虚拟物方点  $(X_i, Y_i, Z_i)$ 。将虚拟物方点代入改进算法, 将计算得到的像点坐标  $(r'_i, c'_i)$  与原始像方坐标  $(r_i, c_i)$  作差得到反投影计算误差, 并标记直接使用二分法时无法计算的点位。计算无效点位 (标红) 如图 9 所示 (彩图见期刊电子版), 行方向上均匀分布, 列

方向上分布在影像两侧一定范围内, 分布与 2.5 节中所述互为印证。

图 10 表示两景影像反投影计算的误差直方统计结果。由图可见, 下视影像行方向误差呈现零均值正态分布, 符合偶然误差特性<sup>[23]</sup>; 前视影像行方向误差则存在整体偏移。二者列方向的误差分布趋势相同, 集中分布在关于 0 值近似对称的两处位置, 呈现出明显的规律性。图 11 为反投影计算误差的矢量方向, 前视影像误差矢量整体沿行方向; 下视影像误差矢量指向影像中心,

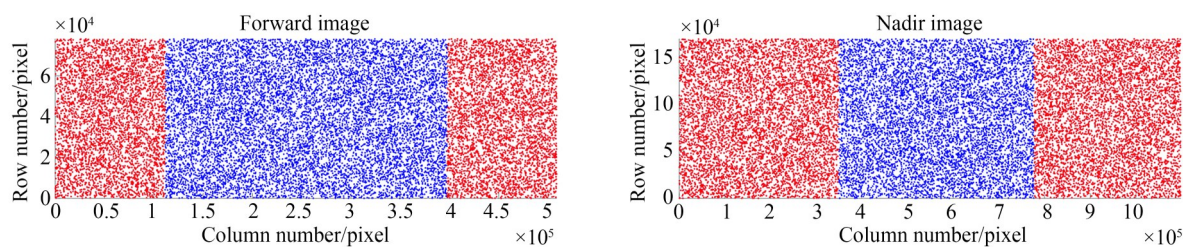


图 9 反投影计算无效点位

Fig. 9 Invalid points of back project calculation

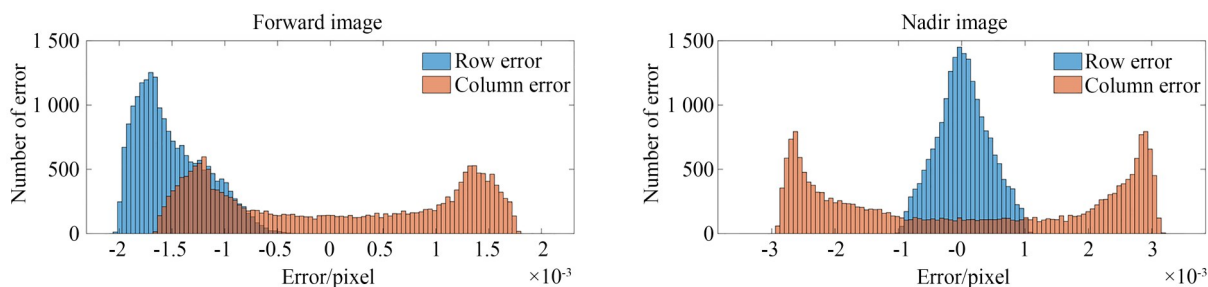


图 10 反投影计算误差直方统计图

Fig. 10 Histogram of back project calculation error



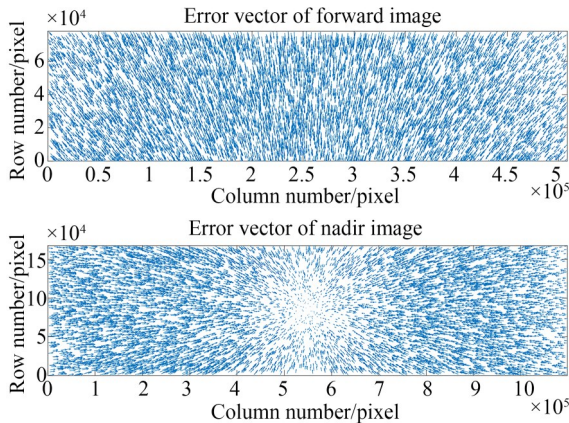


图 11 反投影计算误差矢量图

Fig. 11 Vector diagram of back project calculation error

且误差随着距影像中心距离的增大而增大。即对于像方反投影计算,造成前视影像误差的主要因素为传感器沿轨的安装角度;造成下视影像误差的主要因素为扫描行成像时的环扫角度。

### 3.3 有理函数模型精度评价

实验以 100 km 跨度为间隔,采用 2.4 节所述方案构建不同幅宽 RFM。生成双倍密度的格网点作为检查点坐标,将其物方坐标带入 RFM 中计算得到像方坐标  $(r_{Ri}, c_{Ri})$ ,与原始像方坐标  $(r_i, c_i)$  作差并统计其均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE),作为拟合能力评价指标。为探究不同物方坐标系对 RFM 拟合能力的影响,所有 RPC 均在 WGS-84 地心直角坐标系与大地坐标系下进行解算。不同条件下得到的 RFM 拟合误差如图 12 所示,图中 GCP 为控制点,CP 为检查点。图 12(a) 和 12(b) 分别为地形无关、地形相关方案的结果。经对比分析可知,不同方案下 RFM 的拟合误差均随影像幅宽的增加而增加,但在地心直角坐标系下解算的 RPC 精度明显更优。对于下视影像,在大地坐标系与地心直角坐标系下拟合误差达到 1 像素的幅宽分别为 300 km, 1 100 km;对于前视影像,达到 1 像素误差的幅宽分别为 400 km, 1 900 km。虽然地心直角坐标系下解算的 RPC 在 2 000~3 000 km 幅宽内误差呈明显增加的趋势,但其误差数值远小于同幅宽大地坐标系下构建的 RFM 拟合误差。

若采用大地坐标系解算垂轨环扫卫星影像

RPC,则地球曲率是影响 RFM 精度的主要因素。对于定义在大地坐标的控制点  $(B, L, H)$ ,其实质表示分布在球面上的点,但在计算机求解过程中,大地坐标被认为是一组三维笛卡尔坐标系下定义的直角坐标。即具有相同高程的控制点所表示的曲面被认为是空间平面,使得大地坐标下控制点的物方坐标并不能反映真实的物方空间关系,进而导致误差较大。

考虑到地球半径较大 (6 371 km),且一般卫星影像幅宽较小 (十几至几十公里),而 RFM 二阶项又能够拟合一定的地球曲率误差,因此对于传统卫星影像而言,在大地坐标系仍能够得到很好的拟合精度。而垂轨环扫卫星影像单景影像的最大幅宽达 3 000 km,地球曲率带来的影响不可忽视。随着影像幅宽的增加,地球曲率的影响逐渐明显,导致拟合误差急剧上升。3 000 km 幅宽影像在大地坐标系下的拟合误差在 132.33~3 004.25 像素,改用地心直角坐标系后,拟合误差降至 7.67~27.50 像素。

本文所用地形相关方案解算得到的 RPC 精度优于地形无关方案。RFM 是通过数学表达式构建像方坐标与物方坐标间的投影关系。地形相关方案的格网点严格依据地形起伏分布,能够反映真实的物方空间。地形无关方案的格网点分布则由物方坐标的平面与高程范围确定,是包含真实物方空间在内的、对物方空间范围的延伸与拓展,在控制点分布上,可认为地形无关方案覆盖了地形相关方案。从数学拟合角度考虑,地形无关方案是对物方空间范围内分布的全部控制点进行全局最优拟合,而地形相关方案只对反映真实地表起伏的部分控制点进行局部最优拟合。在构建像方、物方坐标间拟合关系时,若全局最优解能得到高精度结果,则局部最优解必然也能得到高精度结果;若解算的局部最优解已存在较大的拟合误差,则考虑全局最优解的结果误差必然更大。

虽然前视影像 RFM 拟合误差整体小于下视影像,但并不能仅以像素误差作为对比两景影像几何精度的依据。由于传感器参数不同,下视影像分辨率约为前视影像的 2 倍,在单个像元对应地面范围不同的情况下仅以像素误差对两景影



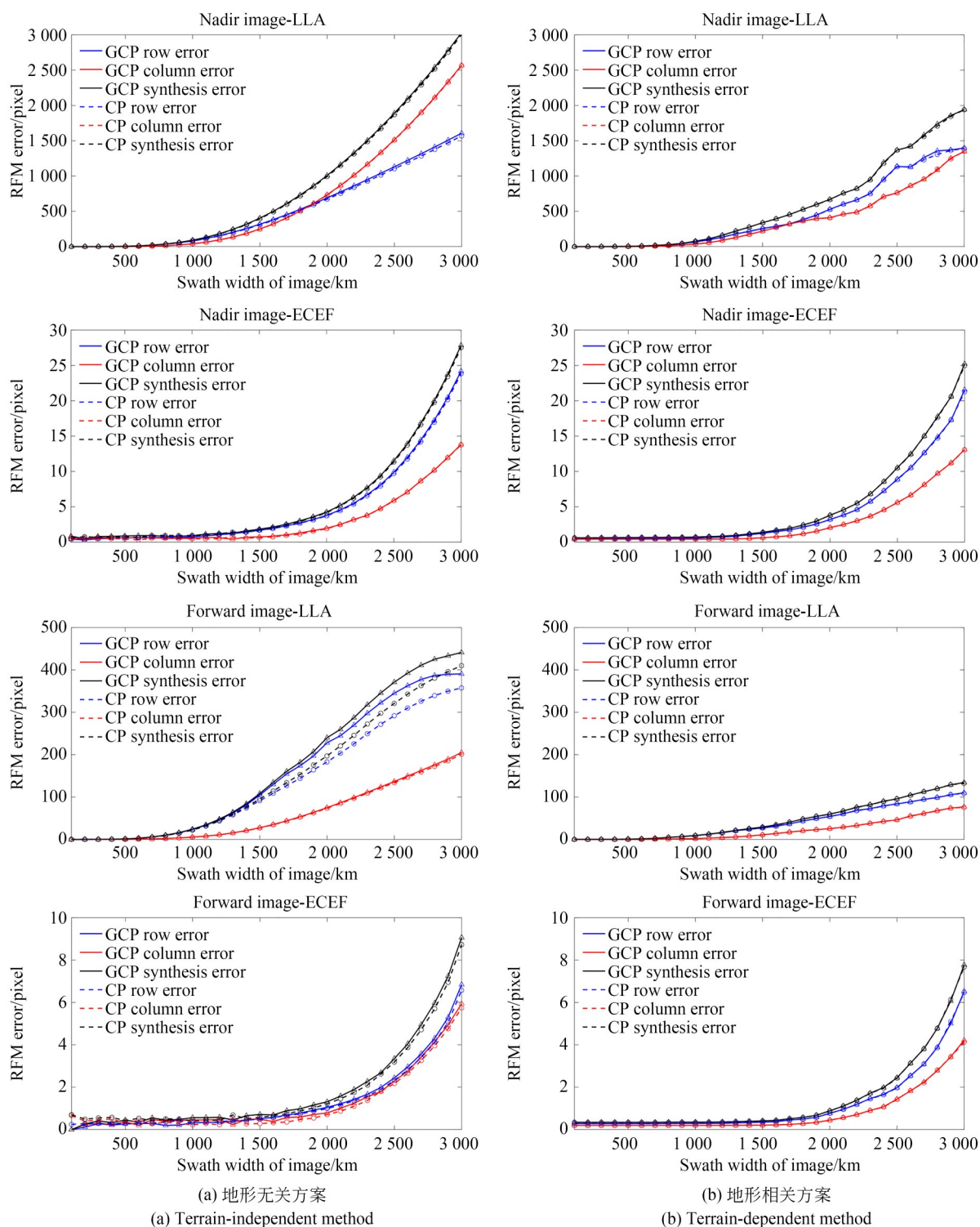


图 12 不同幅宽RFM的拟合误差

Fig. 12 Error of RFM in different widths

像质量进行评价是不可靠的。事实上,下视影像不仅空间分辨率优于前视影像,且由于下视相机主光轴垂直轨道向下,沿轨方向的安装角度为

$0^\circ$ ,原始影像上地物畸变的程度也明显低于前视影像,在未来的测绘生产中,下视影像具有更好的应用潜力。

## 4 结 论

本文介绍了垂轨环扫传感器的成像原理,构建了其严格成像模型与有理函数模型。在使用地形相关方案构建RFM的过程中,针对垂轨环扫卫星影像超大幅宽的特点提出一种结合DEM的控制点布设方案;并提出以星下点概略坐标判断扫描行搜索区间的改进方案,解决了反投影计算失效的问题。在此基础上开展不同方案、幅宽和坐标下的RFM构建实验,实验结果表明:对基于像方空间关系的反投影计算,本文提出的改进方案能够有效解决二分法在垂轨环扫卫星影像大幅宽条件下的搜索失效问题,实现3 000 km幅宽整景影像范围内任意物方坐标到像方的求解。在大地坐标系与地心直角坐标系下构建的RFM,下视、前视两景影像的幅宽分别不大于300 km,400 km与1 100 km,1 900 km时,拟合误差小于1像素。在满足上述条件时,RFM能够近似替代严格成像模型;而对于一景3 000 km幅宽的影像,RPC难以实现高精度拟合。在大地坐标系下,受地球曲率的影响,大幅宽影像解算的RPC精度极差(3 000 km最小误差为132.33像素),采用地心直角坐标系能得到较高的拟合精度(3 000 km最小误差为7.67像素)。对比地形

相关与地形无关2种方案解算的RPC拟合误差,影像幅宽较小时,二者精度相当;在大幅宽条件下,前者高于后者。以3 000 km幅宽影像为例,相较于后者,前者在大地坐标系与地心直角坐标系下解算的两景影像RPC的拟合误差分别降低了35.4%,67.8%与9.2%,12.1%。

后续的工作重点如下:首先,反投影计算是本文所用地形相关方案的基础,虽然基于像方的反投影计算原理简单、直观,但每次迭代求解像点坐标都涉及到十数次共线条件方程运算,计算量大、效率低下,如何利用物方空间关系实现高效率反投影计算有待进一步探究。其次,传统卫星影像的RPC精度可达亚像素水平,而垂轨环扫影像仅在部分条件下能够满足该精度水平。对于一景3 000 km影像而言,无论何种方案下解算的RPC都难以满足高精度拟合的要求。因此,有必要探究不同的RPC参数优化方案与误差补偿模型对RFM拟合精度的提升。最后,虽然RFM在构建时具有物方坐标形式灵活的特点,但目前基于RFM的各项影像处理与生产工作均在大地坐标系下进行。对于垂轨环扫卫星影像,虽然在地心直角坐标系下能够获高精度的RPC,但由于2种坐标系的定义有本质区别,其能否直接带入现有技术流程进行处理有待探究。

## 参考文献:

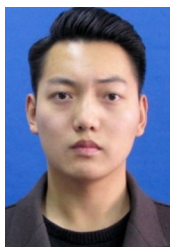
- [1] 张永生,刘军. 高分辨率遥感卫星应用:成像模型、处理算法及应用技术[M]. 3版. 北京:科学出版社,2020.  
ZHANG Y SH, LIU J. *Application of High Resolution Remote Sensing Satellite: Imaging Model, Processing Algorithm And Application Technology*[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [2] NAGASUBRAMANIAN V, RADHADEVI P V, RAMACHANDRAN R, *et al.* Rational function model for sensor orientation of IRS-P6 LISS-4 imagery [J]. *The Photogrammetric Record*, 2007, 22 (120): 309-320.
- [3] JIANG Y H, WANG J Y, ZHANG L, *et al.* Geometric processing and accuracy verification of Zhuhai-1 hyperspectral satellites [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 996.
- [4] 唐新明,张过,祝小勇,等. 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型构建与精度初步验证[J]. 测绘学报, 2012, 41(2): 191-198.  
TANG X M, ZHANG G, ZHU X Y, *et al.* Geometric model construction and accuracy preliminary verification of three-line array imaging of Ziyuan-3 surveying and mapping satellite [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(2): 191-198. (in Chinese)
- [5] 张力,张继贤,陈向阳,等. 基于有理多项式模型RFM的稀少控制SPOT-5卫星影像区域网平差[J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 302-310.  
ZHANG L, ZHANG J X, CHEN X Y, *et al.* Block-adjustment with SPOT-5 imagery and sparse GCPs based on RFM [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(4): 302-310. (in Chinese)
- [6] 曹喜滨,金光,王峰,等. 一种卫星快速旋转超大幅宽摆扫成像方法: CN107152926B [P]. 2018-08-24.  
CAO X B, JIN G, WANG F, *et al.* Quick rotary

- ultra-width pendular satellite imaging method: CN107152926B[P]. 2018-08-24. (in Chinese)
- [7] 李德仁, 王密, 杨芳. 新一代智能测绘遥感科学试验卫星珞珈三号 01 星[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 789-796.
- LID R, WANG M, YANG F. A new generation of intelligent mapping and remote sensing scientific test satellite LuoJia-301[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 789-796. (in Chinese)
- [8] ZHONG L Y, WU X, WANG P. Construction and verification of rigorous imaging model of space-borne linear array vertical orbit ring scanning sensor [C]. *Proceedings of the 2020 4th International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering*. November 6 - 8, 2020, Xiamen, China. New York: ACM, 2020: 94-98.
- [9] 薛武, 王鹏, 钟灵毓. 新型超宽幅光学遥感卫星影像几何处理[J]. 遥感信息, 2021, 36(6): 60-65.
- XUE W, WANG P, ZHONG L Y. Geometric processing of new ultra-large swath optical remote sensing satellite images [J]. *Remote Sensing Information*, 2021, 36(6): 60-65. (in Chinese)
- [10] 薛武, 王鹏, 钟灵毓. 线阵垂轨环扫式光学遥感卫星影像几何纠正[J]. 光学精密工程, 2021, 29(12): 2924-2934.
- XUE W, WANG P, ZHONG L Y. Geometric correction of optical remote sensing satellite images captured by linear array sensors circular scanning perpendicular to the orbit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(12): 2924-2934. (in Chinese)
- [11] 胡莘, 王仁礼, 王建荣. 航天线阵影像摄影测量定位理论与方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2018.
- HU X, WANG R L, WANG J R. *Principle and Methods of Photogrammetric Positioning for Space Linear Imagery* [M]. Beijing: Sino Maps Press, 2018. (in Chinese)
- [12] 王密, 杨博, 潘俊. 高分辨率光学卫星遥感影像高精度几何处理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- WANG M, YANG B, PAN J. *High Precision Geometric Processing and Application of High Resolution Optical Satellite Remote Sensing Image* [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [13] TAO C, HU Y. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, 67(12): 1347-1358.
- [14] 巩丹超, 张永生. 有理函数模型的解算与应用[J]. 测绘学院学报, 2003, 20(1): 39-42, 46.
- GONG D CH, ZHANG Y SH. The solving and application of rational function model[J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2003, 20(1): 39-42, 46. (in Chinese)
- [15] 张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- ZHANG G. *Geometric Correction of High-Resolution Satellite Remote Sensing Images Lacking Control Points* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese)
- [16] 戴海涛. 高分辨率遥感卫星影像定位精度控制方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2014.
- DAI H T. *Research on Positioning Accuracy Control Method of High Resolution Remote Sensing Satellite Image* [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2014. (in Chinese)
- [17] 王密, 胡芬, 王海涛. 一种基于物方几何约束的线阵推扫式影像坐标反投影计算的快速算法[J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 384-390.
- WANG M, HU F, WANG H T. A fast algorithm for back project calculation of linear array pushbroom imageries based on object-space geometric constraints [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3): 384-390. (in Chinese)
- [18] WANG M, HU F, LI J, et al. A fast approach to best scanline search of airborne linear pushbroom images [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2009, 75(9): 1059-1067.
- [19] SHEN X, WU G, SUN K, et al. A fast and robust scan-line search algorithm for object-to-image projection of airborne pushbroom images [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015, 81(7): 565-572.
- [20] 耿迅, 徐青, 邢帅, 等. 基于最佳扫描行快速搜索策略的线阵推扫式影像微分纠正算法[J]. 测绘学报, 2013, 42(6): 861-868.
- GENG X, XU Q, XING SH, et al. Differential rectification of linear pushbroom imagery based on the fast algorithm for best scan line searching [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(6): 861-868. (in Chinese)
- [21] 刘军, 王冬红. 基于 Level 0 产品的 ADS40 正射影像快速生成[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 247-251.
- LIU J, WANG D H. Efficient OrthoImage genera-



- tion from ADS40 level 0 products[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(2):247-251. (in Chinese)
- [22] 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.
- LIU J, ZHANG Y SH, WANG D H, *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)
- [23] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2003.
- Measurement adjustment subject group of Wuhan University. *Error Theory and Foundation of Surveying Adjustment* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. (in Chinese)

## 作者简介:



刘 宪(1998—),男,辽宁锦州人,硕士研究生,2020年于辽宁工程技术大学获得学士学位,主要从事航天遥感与摄影测量方面的研究。E-mail: sj201003@foxmail.com

## 通讯作者:



薛 武(1988—),男,山东宁阳人,博士,助理研究员,2011年、2014年、2017年于信息工程大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事光学遥感信息处理方面的研究。E-mail: xuewu\_81@126.com