

引文格式:张永军,王梦欣,万一,等.高分七号卫星影像融合中的全色-多光谱配准误差补偿模型[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1029-1038.DOI:10.13203/j.whugis20220714

Citation:ZHANG Yongjun, WANG Mengxin, WAN Yi, et al. Compensation Model of GF-7 Panchromatic and Multispectral Image Registration Error[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7): 1029-1038. DOI: 10.13203/j. whugis20220714

# 高分七号卫星影像融合中的全色-多光谱配准误差补偿模型

张永军<sup>1</sup> 王梦欣<sup>1</sup> 万一<sup>1</sup> 周碧莲<sup>2</sup> 丰洁<sup>2</sup> 曹炳霞<sup>2</sup> 姚永祥<sup>1</sup>

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

2 广东省国土资源技术中心,广东 广州,510062

**摘要:**高分七号是中国第一颗面向1:10 000立体测图的遥感卫星,其后视全色影像与多光谱影像通过融合可以得到最高0.65 m分辨率的多光谱融合影像。但在实际生产过程中,发现融合影像存在局部晕边现象。针对这一问题,分析了高分七号卫星影像的误差来源,并提出了全色-多光谱配准误差补偿模型,包含用于补偿线性误差的线性项、用于补偿子阵电荷耦合器件安置误差和镜头畸变的分段四次多项式以及用于补偿周期性误差的三角级数项。根据该模型设计了求解模式和复用模式两种融合方案。利用中国广东地区和青海地区的高分七号影像数据进行实验验证,结果表明所提模型可以使融合配准精度由最大0.6多光谱像素提升至约0.07多光谱像素,平面误差小于0.25倍多光谱像素的区域占比由不足50%提升到约98%,完全满足融合影像生产要求。

**关键词:**高分七号;影像配准;影像融合;畸变校正;误差补偿;多光谱影像

中图分类号:P236

文献标识码:A

收稿日期:2022-11-04

DOI:10.13203/j.whugis20220714

文章编号:1671-8860(2023)07-1029-10

## Compensation Model of GF-7 Panchromatic and Multispectral Image Registration Error

ZHANG Yongjun<sup>1</sup> WANG Mengxin<sup>1</sup> WAN Yi<sup>1</sup> ZHOU Bilian<sup>2</sup> FENG Jie<sup>2</sup>  
CAO Bingxia<sup>2</sup> YAO Yongxiang<sup>1</sup>

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Land and Resources Technical Center of Guangdong Province, Guangzhou 510062, China

**Abstract:** Objectives: Gaofen-7 (GF-7) is the first 1 : 10 000 stereo mapping satellite of China that can produce high-resolution fusion products. The fusion products are fused with the 0.65 m-panchromatic images and 2.6 m-multispectral images. However, in some fusion products, halos and shifts are existed. Methods: To deal with this problem, we analyze the cross-sensor error property of push-broom optical satellite and deduce a compensation model that induces a linear term to compensate for the internal and external orientation errors, a quartic piecewise polynomial term to rectify the lens-distortion and the sub-CCD(charge coupled device) placement error, and a trigonometric series term to correct for the errors caused by platform jitter. Results: Several scenes of GF-7 (6 in Guangdong and 3 in Qinghai) were used to demonstrate the compensation model. The results show that the registration RMSE (root mean square error) decreased from 0.6 multispectral-pixels to about 0.07 multispectral-pixels by solving and applying the compensation model, and proportion of areas which have less-than 0.25 multispectral-pixels registration error increased to about 98%, which meets the requirement of producing high-quality fusion products. Conclusions: The quantita-

**基金项目:**国家自然科学基金(42030102);湖北省自然科学基金(2020CFA003);“龙计划”五期合作项目(58817);广东省自然资源厅科技项目(GDZRZYKJ2023006)。

**第一作者:**张永军,博士,教授,主要从事航空航天摄影测量、实景三维重建、遥感解译与空间知识图谱相关研究。zhangyj@whu.edu.cn

tive results not only reveal the feasibility to improve the accuracy of GF-7 fusion products used by first-level data and achieve the theoretical limit accuracy, but also demonstrate the stability of the piecewise polynomial term allowing for its repeated application to further enhance compensation efficiency.

**Key words:** GF-7; image registration; image fusion; distortion calibration; error compensation; multispectral image

影像融合是光学遥感影像处理中的重要过程<sup>[1-2]</sup>。光学遥感卫星一般以高分辨率全色影像与低分辨率多光谱影像相组合的形式获取数据,在地面处理中进行影像融合<sup>[3]</sup>,既获得了高分辨率的多波段图像,又节约了宝贵的卫星通信带宽、星上存储空间和信号处理功耗。在影像融合之前,一般需要先进行全色影像与多光谱影像的配准,称为融合配准。这是因为受全色光学传感器与多光谱光学传感器的电荷耦合器件(charged coupled device, CCD)安置精度和镜头畸变<sup>[4-5]</sup>、外方位元素误差<sup>[6]</sup>、卫星平台颤振<sup>[7-8]</sup>等因素的影响<sup>[9]</sup>,全色影像与多光谱影像之间往往存在非线性、不连续的几何错位。如不能进行有效的几何补偿<sup>[10]</sup>,融合影像往往会出现晕边现象,导致图像锐度下降,严重影响融合影像的可检测性、可分辨性和可量测性<sup>[11-12]</sup>。

高分七号是中国首颗民用亚米级高分辨率光学传输型立体测绘卫星,其后视传感器可以获得约0.65 m分辨率的全色影像和约2.6 m分辨率的多光谱影像<sup>[13]</sup>。在实验和生产中,发现部分高分七号卫星影像产品存在全色/多光谱影像配准误差,导致了融合产品的晕边现象。影像融合是遥感领域的重要研究方向,目前常用的融合方法包括主成分变换、高通滤波、小波变换等<sup>[14-17]</sup>。这些方法都是在全色影像和多光谱影像准确配准的条件下使用的,因此实际生产中需要首先解决配准问题。目前,常用的商业软件在对一级影像产品(即通过有理多项式系数(rational polynomial coefficient, RPC)表达地理信息的卫星影像)进行融合误差补偿时,一般采用小面元方法<sup>[18]</sup>。但基于小面元校正的融合配准误差补偿模型参数过多,需要依赖均匀分布的匹配点才能稳定求解,不仅限制了运算效率,还难以应对高分七号后视全色和多光谱相机子阵CCD错位等情况。

本文以高分七号卫星影像为研究对象,基于多光谱影像和全色影像的成像几何规律,分析融合配准误差的产生机理,提出了适用于整幅影像的全色-多光谱同名像点映射误差补偿,以此进行融合配准误差的定量计算与精确补偿,最大限度地提高融合影像产品质量。利用中国广东地区

和青海地区的高分七号一级数据验证了融合配准误差检测与补偿的精度,同时提出了分段项复用方法,为高效率、高精度地生产融合影像提供参考。

## 1 高分七号融合映射误差分析和补偿模型

为了设计合理的融合映射误差补偿模型,从成像机理的角度分析高分七号卫星成像误差源及其对融合配准精度的影响。

### 1.1 全色-多光谱影像的双像几何关系

线阵推扫式高分辨率卫星影像的每个扫描行在同一时刻拍摄,物方点与像方点的严密共线关系为<sup>[19]</sup>:

$$P = P_s + \lambda R_1 R_2 (d + R_3 p) \quad (1)$$

式中, $P$ 是物方点在WGS-84坐标系下的坐标向量; $P_s$ 是扫描行成像时刻的卫星平台中心在WGS-84坐标系下的坐标向量; $\lambda$ 是尺度参数; $R_1 = R_{J2000}^{WGS-84}$ 是成像时刻J2000天球坐标系相对WGS-84地球坐标系的转换矩阵; $R_2 = R_{body}^{J2000}$ 是卫星本体坐标系与J2000坐标系之间的转换矩阵,一般通过定姿设备(星敏感器和陀螺仪)获取; $d$ 是卫星平台中心与相机成像中心之间的偏移线元素; $R_3 = R_{cam}^{body}$ 是卫星相机姿态与卫星本体坐标系之间的转换矩阵,一般由安装角确定,通过实验室标定获取,并通过星上在轨标定优化; $p$ 为物方点 $P$ 对应的像方坐标。

线阵卫星影像融合时需要确定全色影像与多光谱影像的位置映射关系,在产品生产中,一般采用RPC模型进行映射,但为了分析映射误差来源,本文给出了基于严格成像模型的全色-多光谱影像同名像点映射关系:

$$\begin{aligned} P &= \underbrace{P_s + \lambda R_1 R_2 (d + R_3 p)}_{\text{全色影像投影关系}} = \\ &\quad P'_s + \underbrace{\lambda' R'_1 R'_2 (d' + R'_3 p')}_{\text{多光谱影像投影关系}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $P_s$ 、 $\lambda$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 和 $d$ 为全色影像成像参数; $p$ 为全色影像像点的无畸变坐标; $P'_s$ 、 $\lambda'$ 、 $R'_1$ 、 $R'_2$ 、 $R'_3$

和  $d'$  为多光谱影像成像参数;  $p'$  为多光谱影像上的同名像点的无畸变坐标。调整式(2), 获得  $p$  与  $p'$  的函数关系为:

$$\begin{aligned} p' = & \underbrace{\frac{\lambda}{\lambda'} (R_3'^{-1} R_2'^{-1} R_1'^{-1} R_1 R_2 R_3) \cdot (p + R_3^{-1} d)}_{\text{第一项}} + \\ & \underbrace{\frac{1}{\lambda'} R_3'^{-1} R_2'^{-1} R_1'^{-1} \cdot (P_s - P'_s) - R_3'^{-1} d'}_{\text{第三项}} \quad (3) \end{aligned}$$

第二项

式中, 第二项中的  $(P_s - P'_s)$  是全色影像成像时刻和多光谱影像成像时刻的卫星位移, 误差约  $1 \times 10^{-2}$  m 水平;  $\lambda'$  是多光谱影像的尺度参数, 根据卫星航高, 其数量级在  $1 \times 10^6$  水平;  $(P_s - P'_s)/\lambda'$  的误差水平大约在  $1 \times 10^{-8}$  m 水平, 相对于一般为  $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$  m 水平的卫星相机 CCD 像元大小,  $(P_s - P'_s)/\lambda'$  可以忽略不计, 因此可以将第二项近似看作常量; 第三项均由卫星传感器安置参数组成, 也可以视为常量。因此, 误差分析主要针对第一项进行。定义式(3)中第一项的比例因子和旋转因子为:

$$\begin{cases} K = \lambda/\lambda' \\ R = R_3'^{-1} R_2'^{-1} R_1'^{-1} R_1 R_2 R_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $K$  是全色-多光谱影像成像尺度参数之比, 为常数。经测试, 高分七号全色-多光谱相机的主

光轴夹角约为  $0.5^\circ$ , 扫描线夹角约为  $0.02^\circ$ , 由于对同一位置的成像时间差异不到  $0.5$  s, 因此旋转因子  $R$  中, 地球自转差异极小,  $R_1'^{-1} R_1$  近似为单位阵, 卫星姿态变化极小,  $R_2'^{-1} R_2$  近似为单位阵。而由于主光轴夹角和扫描线夹角极小, 安置矩阵  $R_3'^{-1} R_3$  近似为单位阵。

综上所述, 旋转因子  $R \approx I$ , 近似为一个单位矩阵, 在融合配准误差分析过程中, 可以忽略  $R$  本身, 仅考虑其误差的影响。综上所述, 式(3)可简化为:

$$p' = K \cdot R \cdot (p + R_3^{-1} d) + D \quad (5)$$

式中,  $D$  是式(3)中第二项和第三项之和, 为常量。由此, 可以得到理想条件下全色像点与多光谱同名像点的空间关系, 但当卫星传感器的内外方位元素误差不可忽视时, 式(3)中的等式则不再成立, 需要通过几何补偿, 才能实现全色-多光谱影像的精确配准。

## 1.2 全色-多光谱同名像点映射误差补偿模型

根据式(5), 全色-多光谱同名像点映射误差的来源主要有(见图 1):(1)角元素误差, 包括卫星姿态矩阵  $R_2$  和  $R_2'$  的误差, 传感器安置矩阵  $R_3$  和  $R_3'$  的误差。(2)内定向误差, 即无畸变像坐标  $p$  和  $p'$  与其对应的有畸变坐标(图像实际量测坐标)的差异。

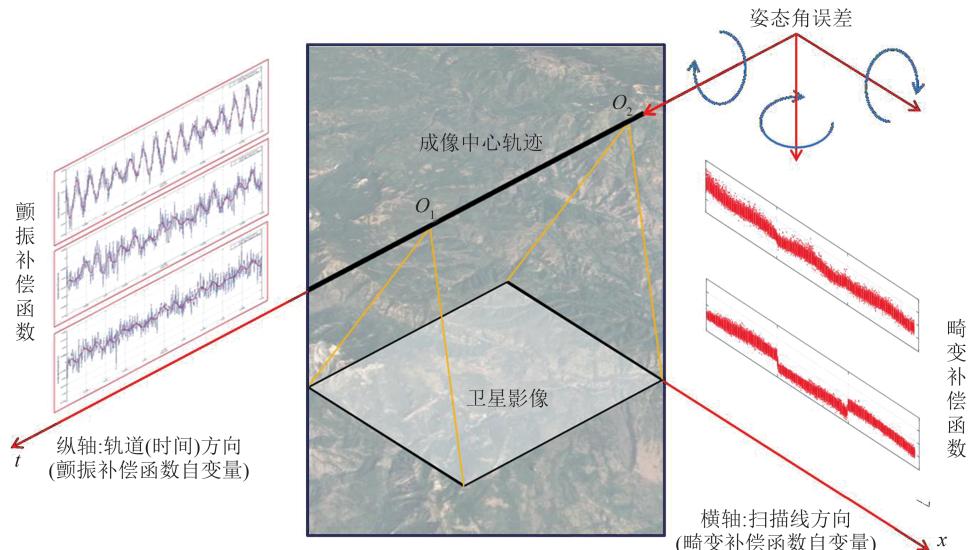


图 1 全色-多光谱影像同名点映射误差源示意图

Fig. 1 Error Sources of Panchromatic-Multispectral Corresponding Point Mapping

在卫星影像融合配准中, 构建全色-多光谱同名像点映射误差补偿模型的目标是求解其中一个传感器(一般为多光谱传感器)影像像点坐标改正值, 从而在姿态误差和内定向误差存在的情况下配平等式(3), 保证融合解算过程中获得准

确的全色-多光谱同名像点。定义多光谱影像的像点坐标改正值为  $\delta$ , 定义全色影像和多光谱影像的有畸变坐标  $p_0$  和  $p'_0$ , 内定向误差  $\nabla p$  和  $\nabla p'$ , 定义旋转因子的误差中的非颤振项为  $\nabla(R)_1$ , 颤振项为  $\nabla(R)_2$ , 根据式(5), 误差改正值为:

$$(p'_0 + \nabla p') + \delta = K \cdot (R + \nabla(R)_1 + \nabla(R)_2) \cdot (p_0 + \nabla p + R_3^{-1}d) + D \quad (6)$$

要实现全色-多光谱同名像点映射误差的补偿,则需要构建 $\delta$ 的拟合函数模型,在不依赖外部控制数据的情况下求解。

旋转因子的误差项 $\nabla(R)_1$ 包含常量误差、随时间缓慢变化的卫星定姿误差,误差项 $\nabla(R)_2$ 包含随时间周期性变化的颤振误差,因此在拟合过程中,需要将时间作为自变量。但在卫星影像融合产品生产中,一般采用RPC模型进行定向,已无法获取每个扫描行对应的时间戳。针对这一问题,考虑到卫星影像扫描周期的稳定性,采用影像的行号( $l$ )替代时间项,作为旋转因子误差的拟合自变量。

卫星影像的内定向误差主要包括内方位元素误差、镜头畸变、子线阵CCD安置错位3种误差源。其中内方位元素误差引起的像点偏移与探元指向角呈线性关系,镜头畸变引起的像点偏移与探元指向角呈多项式关系,而子线阵CCD安置错位引起的像点偏移与探元指向角构成分段线性函数的关系。由于卫星传感器线阵CCD的几何特性,探元指向角与影像列号( $s$ )近似呈线性关系,因此卫星影像的内定向误差使用影像的列号 $s$ 作为自变量进行拟合,拟合函数为一个线性函数(内方位元素误差)、一个多项式(镜头畸变)和一个分段线性函数(子线阵CCD安置错位)之和,在模型设计中,将其合并为分段多项式进行拟合,分段个数为子线阵CCD个数。

由于内定向误差一般仅为数个像元大小,为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$  m水平,因此忽略内定向误差与旋转因子误差的乘积项,考虑到旋转因子 $R \approx I$ ,式(6)可以转化为:

$$\delta = \underbrace{(K \cdot \nabla p - \nabla p')}_{\text{内定向误差}} + \underbrace{K \cdot (\nabla(R)_1 + \nabla(R)_2) \cdot (p + R_3^{-1}d)}_{\text{旋转因子误差}} + \underbrace{\text{常数项}}_{(7)}$$

内定向误差项( $K \cdot \nabla p - \nabla p'$ )由全色影像内定向误差乘以一个尺度比值,与多光谱影像内定向误差相减得到。但由于高分七号卫星的后视全色传感器和后视多光谱传感器均采用3个等长子线阵CCD构造,且扫描线方向近似平行,全色影像和多光谱影像同名像点的列号近似呈线性关系,因此内定向误差项在拟合中可以合并为一

个分段多项式,并采用多光谱影像列号 $s$ 作为唯一的自变量。定义内定向误差( $K \cdot \nabla p - \nabla p'$ )引起的高分七号多光谱影像像点坐标改正值为 $(\nabla s'_1, \nabla l'_1)$ ,其拟合方式为:

$$\begin{aligned} \nabla s'_1 &\leftarrow C_s(s) = \\ &\begin{cases} a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3 + a_4s^4 + \dots + s_1 \\ b_0 + b_1s + b_2s^2 + b_3s^3 + b_4s^4 + \dots + s_2 \\ c_0 + c_1s + c_2s^2 + c_3s^3 + c_4s^4 + \dots + s_3 \end{cases} \\ \nabla l'_1 &\leftarrow C_l(s) = \\ &\begin{cases} d_0 + d_1s + d_2s^2 + d_3s^3 + d_4s^4 + \dots + s_1 \\ e_0 + e_1s + e_2s^2 + e_3s^3 + e_4s^4 + \dots + s_2 \\ f_0 + f_1s + f_2s^2 + f_3s^3 + f_4s^4 + \dots + s_3 \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $a_0, a_1, \dots, a_4, b_0, b_1, \dots, b_4, c_0, c_1, \dots, c_4, d_0, d_1, \dots, d_4, e_0, e_1, \dots, e_4, f_0, f_1, \dots, f_4$ 为分段模型参数; $s, l$ 分别为多光谱影像列号和行号; $s_1, s_2, s_3$ 为按列号的分段区间范围; $C_s(s), C_l(s)$ 分别为影像列方向和行方向的分段模型; $\nabla s'_1, \nabla l'_1$ 分别为列方向和行方向的分段模型补偿值。

由于推扫式成像周期的稳定性,高分七号全色影像与多光谱影像同名像点行号也近似呈线性关系。旋转因子误差的非颤振项在一景影像范围内引起的像点偏移可以通过像方线性模型近似进行拟合。定义误差项 $K \cdot \nabla(R)_1 \cdot (p + R_3^{-1}d)$ 与式(7)中它的常数项引起的像点偏移为 $(\nabla s'_2, \nabla l'_2)$ ,其拟合模型为线性模型,以多光谱影像行列号 $s$ 和 $l$ 为自变量:

$$\begin{cases} \nabla s'_2 \leftarrow A_s(s, l) = A_1 + A_2s + A_3l \\ \nabla l'_2 \leftarrow A_l(s, l) = A_4 + A_5s + A_6l \end{cases} \quad (9)$$

式中, $A_1, A_2, \dots, A_6$ 为线性模型参数; $A_s(s, l), A_l(s, l)$ 分别为列方向和行方向线性模型; $\nabla s'_2, \nabla l'_2$ 分别为列方向和行方向线性补偿值。

定义旋转因子的颤振项 $K \cdot (p + R_3^{-1}d) \cdot \nabla(R)_2$ 引起的像点偏移为 $(\nabla s'_3, \nabla l'_3)$ ,其拟合模型为以多光谱影像行号 $l$ 为自变量的三角级数与多光谱影像坐标列号 $s$ 线性项的乘积:

$$\begin{aligned} \nabla s'_3 &\leftarrow J_s(s, l) = \\ &(1 + B_1s) \cdot \sum_i T_i \cos(p_i \cdot 2\pi \cdot l + \varphi_i) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \nabla l'_3 &\leftarrow J_l(s, l) = \\ &(1 + B_2s) \cdot \sum_i S_i \cos(q_i \cdot 2\pi \cdot l + \psi_i) \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $B_1, B_2$ 为影像列号 $s$ 的系数; $T_i, S_i$ 为第 $i$ 个三角函数模型的幅值; $p_i, q_i$ 为第 $i$ 个三角函数模型的频率值; $\varphi_i, \psi_i$ 为第 $i$ 个三角函数模型的相位

值;  $J_s(s, l)$ 、 $J_l(s, l)$  为三角级数补偿模型;  $\nabla s'_3$ 、 $\nabla l'_3$  为颤振项补偿值。

$$\delta = \begin{bmatrix} \nabla s'_1 + \nabla s'_2 + \nabla s'_3 \\ \nabla l'_1 + \nabla l'_2 + \nabla l'_3 \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} C_s(s) + A_s(s, l) + J_s(s, l) \\ C_l(s) + A_l(s, l) + J_l(s, l) \end{bmatrix} \quad (12)$$

在实际应用中,采用四次分段多项式拟合内定向误差的影响,而颤振项的拟合则需要根据不同时期高分七号卫星影像产品的具体误差特性。

### 1.3 误差补偿模型的求解

高质量融合影像的生产需要保证全色-多光谱同名点映射精度达到 1 个全色像素以内,即 0.25 多光谱像素,因此需要获得高精度的稠密匹配点进行配准误差补偿模型的解算。定义全色、多光谱影像之间的匹配点为  $\{(p, p')\}$ , 将全色影像上的像点  $p = (s, l)$  通过“反投影-重投影”过程(即在航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)等高程数据的辅助下利用全色影像 RPC 参数模型反投影到物方空间,再通过多光谱影像 RPC 参数模型投影到其多光谱像方空间,见式(3))投影到多光谱影像像平面得到像点  $p'' = (s'', l'')$ , 从而得到映射偏差的观测值:

$$\delta = p'' - p' \quad (13)$$

在这一过程中,SRTM 数据的高程误差影响可以忽略,因为高分七号全色相机和多光谱相机的光线夹角仅为约  $0.094^\circ$ , 而 SRTM 的标称精度为 16 m, 对反投影-重投影过程的影响约为 0.01 多光谱像素。

根据式(12)即可得到观测方程,对融合配准模型进行求解。但在模型中,线性项部分和分段多项式部分存在一定的相关性,而三角级数的求解又需要在排除其他误差的干扰后,结合频率域分析等手段进行,因此本文采用分别求解的方式获得配准模型参数的估值,其步骤如下所示。

1) 求解线性项,将  $p' = (s', l')$  和  $p'' = (s'', l'')$  的坐标差异作为误差进行求解:

$$\begin{cases} s'' - s' = A_s(s, l) \\ l'' - l' = A_l(s, l) \end{cases} \quad (14)$$

2) 定义步骤 1) 中求解得到的线性项模型为  $A_s^*(s, l)$ 、 $A_l^*(s, l)$ , 从误差中减去线性项模型部分,剩余部分用于求解分段项参数:

$$\begin{cases} s'' - s' - A_s^*(s, l) = C_s(s) \\ l'' - l' - A_l^*(s, l) = C_l(s) \end{cases} \quad (15)$$

3) 定义步骤 2) 中求解的分段项模型为  $C_s^*(s)$ 、 $C_l^*(s)$ , 再从上述误差中减去分段项模型部

分,结合上述误差项,高分七号卫星影像的全色-多光谱同名像点映射误差拟合模型为:

$$\begin{cases} s'' - s' - A_s^*(s, l) - C_s^*(s) = J_s(s, l) \\ l'' - l' - A_l^*(s, l) - C_l^*(s) = J_l(s, l) \end{cases} \quad (16)$$

其中,三角级数项的求解方法参考文献[20]。

在映射误差补偿模型(12)中,分段项和颤振项具有较多的参数,需要在同名点均匀覆盖整张影像的情况下进行求解。当影像存在大量水面或云层覆盖时,无法获得均匀的同名点,则无法稳定求解分段项和颤振项。但是,分段项对应的误差源是卫星相机内参数误差、镜头畸变、子线阵 CCD 安置误差,这一类误差可以长时间保持不变,因此获取时间相近的影像可以复用同一个分段项。在复用分段项的情况下,只需要通过匹配稀疏同名点,求解线性项即可,求解时的观测值为坐标差异与分段项预测值之差:

$$\begin{cases} s'' - s' - \tilde{C}_s(s) = A_s(s, l) \\ l'' - l' - \tilde{C}_l(s) = A_l(s, l) \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $\tilde{C}_s(s)$ 、 $\tilde{C}_l(s)$  为通过相近时相的其他影像求解得到的分段项。

## 2 高分七号卫星影像融合配准补偿实验

为了验证本文融合配准模型的有效性,采用了中国广东地区 6 景和青海地区 3 景高分七号一级影像进行实验分析。广东地区影像拍摄时间为 2021 年 1 月、2 月和 4 月,位置分布如图 2(a)所示,影像文件的前缀为“GF701”。青海地区影像拍摄时间为 2022 年 1 月,位置分布如图 2(b)所示,影像文件的前缀均为“GF7\_DLC”。影像详细信息如表 1 所示。

### 2.1 融合配准精度及评价指标

首先对高分七号全色影像与多光谱影像进行匹配,采用§1.3 所述的过程对补偿模型参数进行求解。本文在实验中采用了局部图像特征匹配(local feature transformer, LoFTR)算法进行匹配,LoFTR 算法首先在粗粒度上建立图像特征的检测、描述和匹配,然后在精粒度上细化亚像素级别的密集匹配<sup>[21]</sup>,采用预训练的室外场景匹配模型参数,具有极强的弱纹理影像匹配能力。

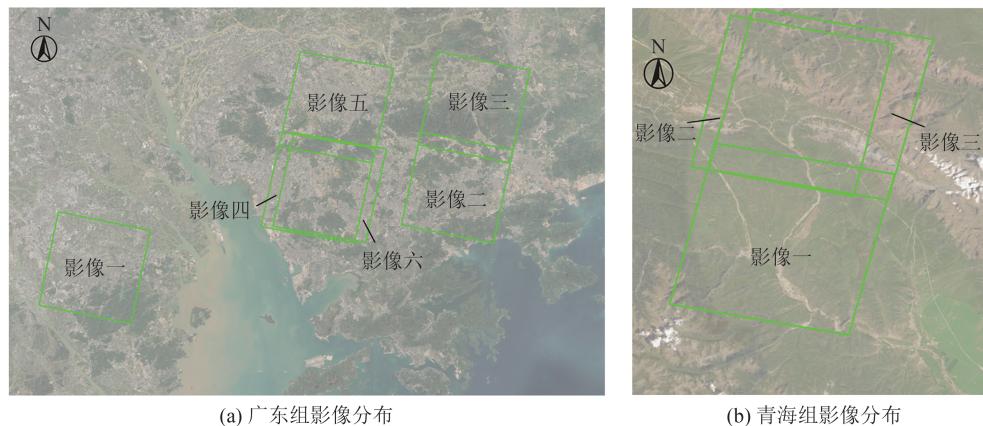


图2 实验影像分布  
Fig. 2 Distribution of Test Images

表1 实验影像信息说明

Tab. 1 Detail Information of Test Images

组别	影像	命名	覆盖地区	应用模式
广东组	影像一	GF701_006650_E113.3_N22.5_20210113111729	广东深圳	求解
	影像二	GF701_006807_E114.2_N22.7_20210123111416	广东中山	求解
	影像三	GF701_006807_E114.3_N22.9_20210123111413	广东深圳	求解
	影像四	GF701_007241_E113.9_N22.7_20210221112456	广东东莞	复用
	影像五	GF701_007241_E113.9_N22.9_20210221112453	广东惠州	复用
	影像六	GF701_008136_E113.9_N22.7_20210421112548	广东深圳	复用
青海组	影像一	GF7_DLC_E101.2_N37.6_20220108_L1A0000677449	青海门源	求解
	影像二	GF7_DLC_E101.2_N37.8_20211130_L1A0000639036	青海门源	求解
	影像三	GF7_DLC_E101.3_N37.8_20220108_L1A0000677448	青海海北	复用

在高分七号全色/多光谱影像进行匹配任务中,匹配点密度可以达到每100像素至少一个匹配点,且分布均匀。

融合配准的精度目标一般是达到全色影像的1像素水平(针对高分七号,相当于0.25多光谱像素),从而消除可见的晕边,而匹配算法往往只能达到0.3~0.5多光谱像素的精度水平。因此实验通过将影像划分为规则格网,对其中匹配点对应的配准误差用鲁棒性递增求解方法进行加权平均,得到更高精度的配准误差值。为了验证格网配准误差的估算精度,本文将多光谱影像进行亚像素平移(如沿行方向和列方向平移0.2~3.8像素)和重采样后,考察平移对格网配准误差估算的影响,发现格网误差的变化(观测值)与实际平移的大小(真值)差异保持在0.1像素以内,这一结果间接证明格网配准误差的量测精度达到了0.1像素水平,能满足融合配准要求。

定义格网中心和配准偏差组成的一组观测值为 $(s', l', \nabla s, \nabla l)$ ,其中 $s', l'$ 为格网中心坐标, $\nabla s, \nabla l$ 为格网中匹配点配准误差平均值。为了评价配准模型中3个子项对融合配准的影响,§2.2统计了对式(14)和式(15)对应的线性项和分段

项先后进行拟合以后,垂轨方向和沿轨方向的配准残差中误差和 $P_{\nabla xy \leq 0.25}$ (格网配准误差小于0.25倍多光谱像素的比例),同时为了定量评价融合配准操作对融合影像质量的影响,还统计了求解两组误差后得到的融合影像的无参考图像质量参数(quality with no reference, QNR)评价指标。QNR指标是影像融合中的一种无参考数据的质量评价指标,它包含两项,一项是光谱偏差参考值,一项是几何偏差参考值,通过计算和整合两种参考值,得到融合质量的客观评价指标。§2.3分析了两组影像映射偏差在 $l$ 方向上的分布情况,发现广州组影像可能存在颤振误差,对这些影像经过线性项和分段项拟合后的残差进行了三角级数拟合(参考式(16)),并统计分析。§2.4测试了利用求解出来的分段项校正同一轨道其他影像映射误差的效果(参考式(17))。

## 2.2 基于线性项和分段项的融合配准补偿

选取广东地区1~3号影像和青海地区1~2号影像进行融合配准模型求解实验。上述影像的匹配点数均达到1000万个以上。表2给出了两组影像的格网偏移值的初值、线性项补偿残差、分段项补偿残差的统计结果。图3和图4分

别给出了广东组影像 1 和青海组影像 1 的补偿残差图。

表 2 实验影像不同模型残差补偿精度

Tab. 2 Compensation Accuracy of Test Images with Different Strategies

组别	影像	统计项	中误差/像素	$P_{\nabla xy \leq 0.25}$	QNR
			$x$ (垂轨)	$y$ (沿轨)	
		初始	0.622	0.329	0.4
广东组	影像 1	求解线性项后	0.119	0.202	65.8
		求解分段项后	0.077	0.081	97.7
		初始	0.627	0.327	0.2
广东组	影像 2	求解线性项后	0.113	0.201	67.1
		求解分段项后	0.067	0.071	98.6
		初始	0.628	0.323	0.2
青海组	影像 3	求解线性项后	0.116	0.200	66.3
		求解分段项后	0.075	0.068	98.6
		初始	0.345	0.170	44.5
青海组	影像 1	求解线性项后	0.097	0.131	91.6
		求解分段项后	0.038	0.099	97.9
		初始	0.356	0.347	38.4
青海组	影像 2	求解线性项后	0.121	0.307	75.7
		求解分段项后	0.095	0.278	83.8
		求解分段项后	0.095	0.278	0.979

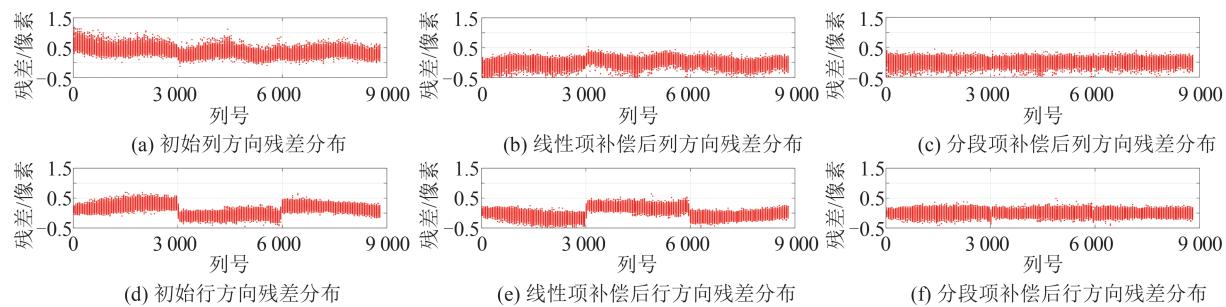


图 3 广东组影像 1 残差图

Fig. 3 Residual Plots of Image 1 in Guangdong Group

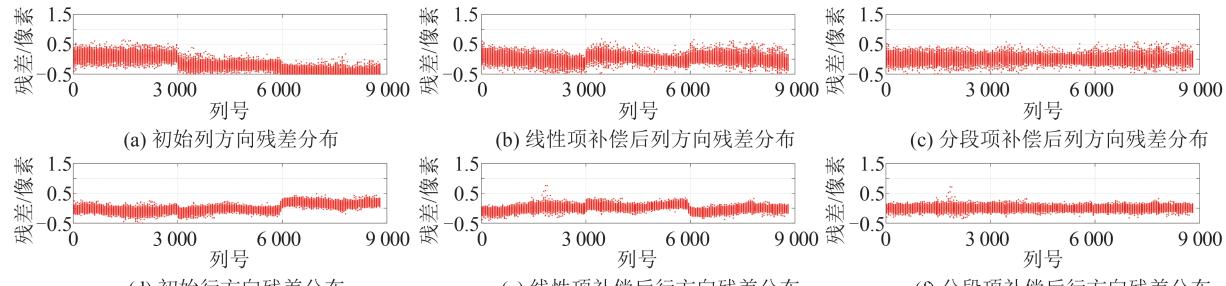


图 4 青海组影像 1 残差图

Fig. 4 Residual Plots of Image 1 in Qinghai Group

线性项和分段项补偿前后的融合影像的部分截图如图 5 所示, 补偿前的融合影像图 5(a)~5(d) 中, 在地物颜色突变的位置, 往往存在可见的晕边现象, 其中图 5(a)、5(b) 为补偿前融合影像建筑物区域显示效果, 补偿前影像的建筑物边缘呈现多彩颜色, 以致无法准确判断地物边缘;

广东组的 3 景影像在线性项补偿之前,普遍具有列方向约 0.60 像素、行方向约 0.30 像素的融合配准中误差,  $P_{\nabla xy \leq 0.25}$  低于 1%。经过线性项补偿后, 精度提升明显, 列方向中误差均低于 0.12 像素, 行方向中误差均达到约 0.20 像素, 一定程度上消除了系统性偏移, 使得  $P_{\nabla xy \leq 0.25}$  大幅提升到约 70% 水平, 但是, 结合图 3(b)、3(e)给出的线性项补偿后残差分布, 可以发现仍然存在明显的非线性断裂误差。经过分段项补偿后, 有效消除了非线性误差, 中误差均达到 0.06~0.08 像素,  $P_{\nabla xy \leq 0.25}$  提升到 97% 以上水平, 满足高质量融合的要求。青海组的影像 1 在通过线性项和分段项进行补偿后, 有效消除了非线性误差, 列方向和行方向的中误差均达到 0.1 像素以内,  $P_{\nabla xy \leq 0.25}$  提升到 97% 以上, 满足高质量融合的要求。而影像 2 含有一定的云覆盖, 校正后  $P_{\nabla xy \leq 0.25}$  仅提升到 83.8%, 这一结果并不能反映实际的精度, 要得到准确的评价结果需要先排除含云区域。经检查, 去除云雪覆盖率为 50% 以上的区块后,  $P_{\nabla xy \leq 0.25}$  达到 90% 以上。

图 5(c)、5(d) 为在补偿前融合影像水域的显示效果, 补偿前, 影像的水体边缘不明确, 产生了明显的位移。而在补偿后的融合影像 5(e)~5(h) 中, 晕边现象得到显著的缓解, 建筑物、水域不再存在模糊的多重边缘, 提高了影像可解释性和可量测性。

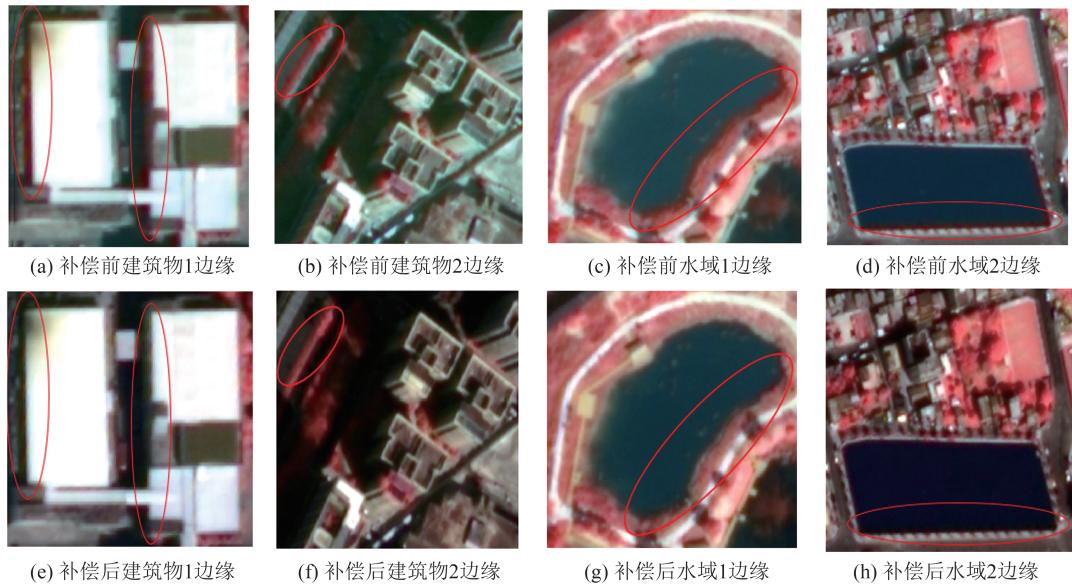


图 5 广东组影像 2 补偿前后的假彩色融合影像细节对比

Fig. 5 Detail Comparison in False Color of Fused Image 2 in Guangdong Group Before and After Compensation

### 2.3 基于三角级数项的融合配准补偿

实验结果表明,补偿线性项和分段项后,高分七号影像的配准精度已基本满足不出现融合晕边这一要求,但是由图 6 和图 7 中分段项补偿后残差与行方向的误差分布曲线可知,广东组影像的融合配准误差呈现一定的周期性。通过 8 个三角函数组成的三角级数进行拟合,发现颤振引

起的周期性误差振幅均不到 0.1 像素,拟合后的配准精度有一定提升,列方向的残差中误差由 0.07 像素下降为 0.06 像素,行方向的残差中误差由 0.08 像素下降为 0.07 像素。而青海组影像的残差没有沿行方向呈现出周期性。实验结果表明高分七号的颤振误差基本没有对融合质量造成明显影响,可以在生产中忽略不计。

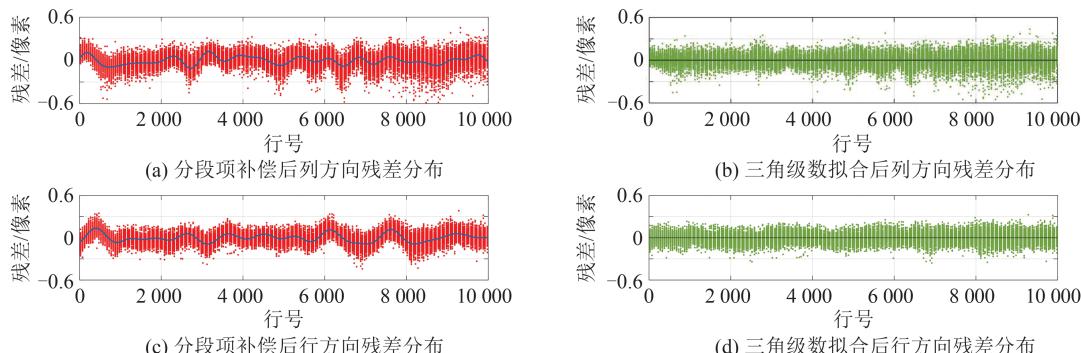


图 6 广东组影像 1 三角级数项补偿残差图

Fig. 6 Residual Plots of Image 1 in Guangdong Group Before and After Trigonometric Series Term Compensation

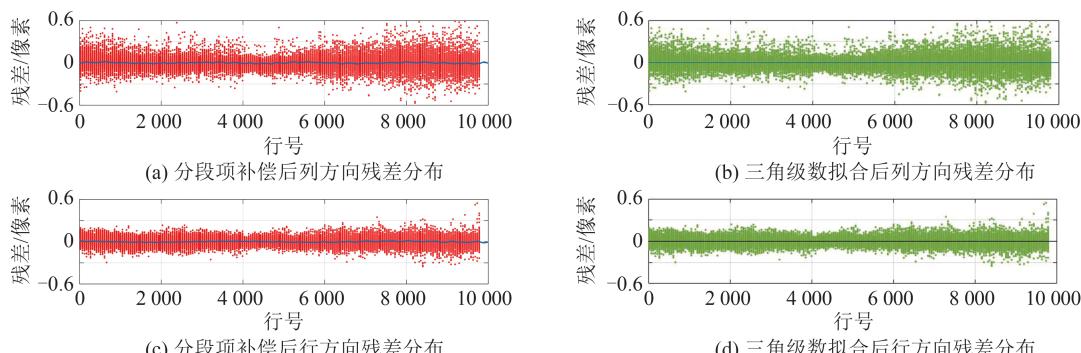


图 7 青海组影像 1 三角级数项补偿残差图

Fig. 7 Residual Plots of Image 1 in Qinghai Group Before and After Trigonometric Series Term Compensation

## 2.4 分段项的复用性验证

融合补偿模型中分段项的主要作用是补偿由于线阵 CCD 安置误差和镜头畸变引起的配准误差,由于 CCD 安置误差和镜头畸变误差可以在较长时期内保持不变,因此分段项参数理论上在一段时间内具有复用性。为验证补偿模型分段项参数的复用性,将广东组影像 1 的分段项参数直接对影像 4、影像 5、影像 6 进行补偿,将青海组影像 1 的分段参数对影像 3 进行补偿。补偿的方法是先用分段项参数进行补偿,然后利用分段项的残差求解线性项,最终得到补偿模型。分段项参数复用模式下的补偿精度如表 3 所示,补偿后的广东组影像中误差基本达到 0.07 像素水平,青海组影像 3 中误差达到 0.1 像素以内,4 组影像的  $P_{\nabla xy \leq 0.25}$  均提升到 98% 水平,能满足融合要求。这一实验结果表明分段项参数在一定时间内具有较好的复用性,可以在影像含云、水等不利于匹配的情况下进行复用。

表 3 复用模式下分段项前后的配准精度

Tab. 3 Registration Accuracy of Test Images Before and After Piecewise Polynomial Term Compensation

组别	影像	纠正前后	中误差/像素		$P_{\nabla xy \leq 0.25}$ /%
			x(垂轨)	y(沿轨)	
广东组	影像 4	复用纠正前	0.619	0.335	0.2
		复用纠正后	0.073	0.073	98.3
	影像 5	复用纠正前	0.612	0.328	0.4
		复用纠正后	0.078	0.072	97.8
青海组	影像 6	复用纠正前	0.604	0.343	0.5
		复用纠正后	0.082	0.075	98.3
	影像 7	复用纠正前	0.347	0.288	4.2
		复用纠正后	0.044	0.098	98.5

## 3 结语

本文从高分七号卫星影像的成像机理出发,对影像融合过程中内外方位元素误差和影像内部畸变对配准精度的影响进行分析和建模,提出了由线性模型、四次分段多项式模型、三角级数模型组成的融合映射误差补偿模型。本文对两个地区的高分七号影像进行融合配准模型拟合,实验结果表明:线性模型可以有效消除内外方位元素误差引起的线性像方误差,将垂轨方向的中误差降至 0.1 像素左右,沿轨方向中误差降至 0.2 像素以下;四次分段多项式模型可明显消除子线阵 CCD 安置误差引起的像方配准残差不连续性,将垂轨方向中误差降至 0.1 像素以下,沿轨方向的中误差从约 0.2 像素降至 0.1 像素以内。通过

线性项和分段项的结合,使得  $P_{\nabla xy \leq 0.25}$  提升至约 98% 水平,基本达到“不出现融合晕边”的要求。而颤振模型的求解和补偿有效抑制了周期性的配准误差,达到采用高分七号一级数据生产融合影像的理论极限精度。

本文测试了分段多项式参数的复用,即采用从其他(同轨或异轨)影像中求解的分段多项式模型参数和本影像中求解的线性项参数进行补偿。实验结果表明,复用模式下融合配准的精度和  $P_{\nabla xy \leq 0.25}$  基本达到求解模式的同一水平,证明了分段多项式主要补偿内部镜头畸变和子线阵 CCD 安置误差,在不改变零级数据生产相关参数的情况下,基本保持不变。因此,可考虑通过如下流程进行高分七号影像融合生产:(1)从整轨或同一批次获取的所有高分七号影像中,选出含云、水较少且纹理清晰(即沙漠、冰雪等不利于匹配的区域较少)的影像,通过 LoFTR 等先进的匹配算法进行全影像稠密匹配,然后求解本文提出的融合配准模型;(2)对其他影像,复用已求解的融合配准模型的分段项参数,然后仅匹配少量同名点求解线性项,通过复用模式进行补偿。这一方案可以灵活调整,兼顾精度和效率。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Yongjun, Zhang Zuxun, Gong Jianya. Generalized Photogrammetry of Spaceborne, Airborne and Terrestrial Multi-source Remote Sensing Datasets [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(1): 1-11. (张永军, 张祖勋, 龚健雅. 天空地多源遥感数据的广义摄影测量学[J]. 测绘学报, 2021, 50(1): 1-11.)
- [2] Zhang Yongjun, Wan Yi, Shi Wenzhong, et al. Technical Framework and Preliminary Practices of Photogrammetric Remote Sensing Intelligent Processing of Multi-source Satellite Images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1068-1083. (张永军, 万一, 史文中, 等. 多源卫星影像的摄影测量遥感能智能处理技术框架与初步实践[J]. 测绘学报, 2021, 50(8): 1068-1083.)
- [3] Weng Yongling, Tian Qingjiu. Analysis and Evaluation of Method on Remote Sensing Data Fusion [J]. *Remote Sensing Information*, 2003, 18(3): 49-54. (翁永玲, 田庆久. 遥感数据融合方法分析与评价综述[J]. 遥感信息, 2003, 18(3): 49-54.)
- [4] Tang Zhiqiang. Analysis and Validation for Rigorous Geometric Model of Space Linear Array CCD Sensors [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011. (汤志强. 航天线阵 CCD 传感器严格

- 几何模型的分析与验证[D]. 郑州:信息工程大学, 2011.)
- [5] Lei Rong. Study on Theory and Algorithm of the In-flight Geometric Calibration of Spaceborne Linear Array Sensor [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011. (雷蓉. 星载线阵传感器在轨几何定标的理论与算法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2011.)
- [6] Zheng M T, Zhang Y J, Zhu J F, et al. Self-calibration Adjustment of CBERS-02B Long-Strip Imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(7): 3847-3854.
- [7] Sun Tao, Long Hui, Zhao Dong, et al. Detection and Compensation of Satellite flutter Based on Image from Multispectral Camera with Five Spectral Combinations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (7) : 284-290. (孙韬, 龙辉, 赵冬, 等. 基于五谱段合一多光谱相机影像的卫星颤振检测和补偿[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 284-290.)
- [8] Wang Mi, Zhu Ying, Fan Chengcheng. Development of Platform Jitter Geometric Analysis and Processing for High-Resolution Optical Satellite Imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1899-1908. (王密, 朱映, 范城城. 高分辨率光学卫星影像平台震颤几何精度影响分析与处理研究综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1899-1908.)
- [9] Grodecki J, Dial G. Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69(1): 59-68.
- [10] Tadono T. Initial Results of Calibration and Validation for PRISM and AVNIR-2[J]. *Asian Journal of Geoinformatics*, 2006, 6(4): 11-20.
- [11] Xu Lina, Xiao Qi, He Luxiao. Fused Image Quality Assessment Based on Human Visual Characteristics [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(4): 546-554. (许丽娜, 肖奇, 何鲁晓. 考虑人类视觉特征的融合图像评价方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(4): 546-554.)
- [12] Liang Lijuan, Huang Wanli, Zhang Rongyan, et al. Sentinel-2 Satellite Image Fusion Method and Quality Evaluation Analysis[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(3): 612-621. (梁丽娟, 黄万里, 张容焱, 等. Sentinel-2卫星影像融合方法与质量评价分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(3): 612-621.)
- [13] Cao Haiyi, Zhang Xinwei, Zhao Chenguang, et al. System Design and Key Technolongies of the GF-7 Satellite [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2020, 40(5): 1-9. (曹海翊, 张新伟, 赵晨光, 等. 高分七号卫星总体设计与技术创新[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(5): 1-9.)
- [14] Wang Zhijun, Li Deren, Li Qingquan. Image Fusion with Wavelets Analysis[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, 25(2): 137-142. (王智均, 李德仁, 李清泉. 利用小波变换对影像进行融合的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(2): 137-142.)
- [15] Li Pingxiang, Wang Zhijun. Investigation of Image Fusion Between High Resolution Image and Multi-spectral Image[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(1): 14-17. (李平湘, 王智均. 高空间分辨率影像和多光谱影像融合的研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(1): 14-17.)
- [16] Li Junli, Jia Yonghong. A New Fusion Method Based on Resolution Degradation Model for Panchromatic and Multi-spectral Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(4): 302-306. (李均力, 贾永红. 基于分辨率退化模型的全色和多光谱遥感影像融合方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(4): 302-306.)
- [17] Chen Xueyang, Yuan Chao. Data Fusion Evaluation of ZY-1 02C Satellite Images [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2013, 36(2): 50-53. (陈雪洋, 袁超. ZY-102C卫星影像融合方法评价[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(2): 50-53.)
- [18] Xie G Q, Wang M, Zhang Z Q, et al. Near Real-Time Automatic Sub-pixel Registration of Panchromatic and Multispectral Images for Pan-Sharpening [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): 3674.
- [19] Li Deren. China's First Civilian Three-Line-Array Stereo Mapping Satellite: ZY-3[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 317-322. (李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星:资源三号测绘卫星[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 317-322.)
- [20] Tong Xiaohua, Ye Zhen, Liu Shijie. Essential Technology and Application of Jitter Detection and Compensation for High Resolution Satellites[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1500-1508. (童小华, 叶真, 刘世杰. 高分辨率卫星颤振探测补偿的关键技术方法与应用[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1500-1508.)
- [21] Sun J M, Shen Z H, Wang Y A, et al. LoFTR: Detector-Free Local Feature Matching with Transformers[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Nashville, USA, 2021.