

基于点源靶标的航天遥感几何定标与定位精度提升方法

李凯^{1,2*}, 张永生², 孟伟灿³, 杨伟铭¹

¹军事科学院系统工程研究院后勤科学与技术研究所, 北京 100071;

²战略支援部队信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州 450001;

³北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要 全球测图与境外目标定位等任务对航天遥感几何定标与定位精度的要求越来越高。当前像点量测误差与地面控制点精度不匹配,影响了航天传感器定标结果的可靠性。点源靶标在航天影像中具有良好的几何形态,能够为几何定标任务提供精确的像点坐标。对模拟点源靶标影像进行了解算,得到其像点误差在 0.04 pixel 以内,均方根误差仅为 0.01 pixel,优于当前测量软件及人工选点精度。检验了不同像点测量误差对定标和定位结果的影响,结果显示,以点源靶标作为控制点时,定标参数的解算结果和定位精度均优于使用传统控制点的结果;在缺少控制点的情况下,增加两个点源靶标能够使定位误差降至分米量级。点源靶标能够有效提高几何定标与定位结果的精度,并有潜力发展成为新一代几何定标工具。

关键词 遥感; 点源靶标; 几何定标; 点源靶标影像; 像点量测误差; 定位精度

中图分类号 P236

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1828003

Point-Source-Target-Based Method for Space Remote Sensing Geometric Calibration and Positioning Accuracy Improvement

Li Kai^{1,2*}, Zhang Yongsheng², Meng Weican³, Yang Weiming¹

¹*Institute of Logistic Science and Technology, Academy of System Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China;*

²*School of Geospatial Information, SSF Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China;*

³*Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China*

Abstract Tasks such as global mapping and overseas target positioning have the higher and higher requirements for space remote sensing geometric calibration and positioning accuracy. The current measurement error of the image pixel coordinates does not match the accuracy of the ground control points (GCP), which limits the reliability of the calibration results of the space sensors. The point source target has a good geometry in the aerospace image and can provide precise pixel coordinates for the geometric calibration task. In this paper, the pixel coordinates of the simulated point source images are solved, and the errors the pixel coordinates are below 0.04 pixel and the root mean square error is only 0.01 pixel, superior to those by the current measurement software and the manual selection. In addition, the effect of pixel measurement error on the calibration and positioning results is examined. The results show that the use of point source target as GCP can make the calibration parameter and positioning accuracy better than those using the traditional GCPs. In the absence of GCPs, adding two point source targets can reduce the positioning error to the decimeter level. The point source target can effectively improve the accuracy of geometric calibration and positioning results and has the potential to develop into a new generation of geometric calibration tools.

Key words remote sensing; point source target; geometric calibration; point source image; pixel measurement error; positioning accuracy

OCIS codes 280.4788; 120.0280; 110.6150

收稿日期: 2020-04-26; 修回日期: 2020-05-17; 录用日期: 2020-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(41671409)

* E-mail: likai_rs@163.com

1 引 言

基于靶标场的几何定标主要是将地面布设的靶标点或者具有良好几何形态的地物作为控制点,然后利用控制点坐标、对应的像点坐标及卫星的轨道姿态测量数据解算传感器的内外方位元素和相机畸变参数^[1]。获取控制点对应的像点坐标一般有人工选点、量测软件、影像匹配等方法。其中人工选点方式最为普遍,误差也最大,一般为 0.5~1.0 pixel^[2-4]。利用像点量测算法可以在一定程度上提高像点量测精度,但是误差一般也在 1/3 pixel 左右^[5]。利用影像匹配的方式获取控制点^[6-8]的方法在理论上精度最高,但是由于航天影像与数字正射影像(DOM)一般属于不同源影像,成像时存在时间、尺度、旋转、图像退化等多方面的差异,实际匹配精度并不理想,一般遥感影像的匹配精度约为 0.3 pixel^[9]。SIFT 算子对不同源的影响匹配具有较强的鲁棒性,最适用于航天影像与高精度 DOM 之间的配准,该算子的理论定位精度可达 0.15 pixel,但是其对角点的定位精度较差,实际定位误差可超过 1 pixel^[10]。同时,由于 DOM 本身精度较差,即使匹配结果较好,得到的控制点精度也不够高。

随着全球测图和境外目标定位等对定标精度和定位结果的要求越来越高,需要进一步寻找能够提高遥感影像中与控制点对应的像点坐标的提取精度的方法,以增强定标与定位结果的可靠性。为了对 Landsat 4、Landsat 5 TM 卫星传感器的成像质量进行评价,亚利桑那大学使用子像素级进行采样,并将采样结果作为影像的点扩展函数(PSF)采样值^[11]。国内外学者开展了利用点源靶标测量卫星遥感影像辐射信息的实验^[12-16]。

国内外学者对点源靶标影像进行处理和分析主要是为了获取影像的辐射信息。而实际上,点源靶标影像与星相机获取的恒星影像非常相似,均具有良好的几何形态。为了提高恒星质心提取精度,已有多种算法被应用到研究中。目前,恒星质心的提取精度已达到 0.01~0.02 pixel 水平^[17-19]。文献^[16]利用二维高斯拟合算法对获取的点源靶标影像进行解算,得到了非常理想的结果,像点的最大误差优于 0.05 pixel。因此,可以考虑将点源靶标布设为高精度的地面控制点靶标,利用恒星影像质心提取算法获取其高精度像点位置,从而为航天遥感几何定标技术提供高精度的像点观测数据。

本文利用 SPOT-5 线阵影像及其辅助数据生成精确的像点坐标和点源靶标影像,通过研究不同大小像点误差情况下定标参数解算结果与定位结果的差异,验证了点源靶标作为高精度地面控制点的可行性。

2 实验数据与方法

2.1 影像数据和定位模型

本文使用的数据是由 SPOT-5 卫星搭载的多光谱传感器获取的一景影像及其辅助文件。传感器的线阵电荷耦合器件(CCD)上共有 12000 个像元,影像大小为 12000 pixel×12000 pixel,像元在地面上的分辨率约为 10 m。在影像覆盖范围内采集了 10 个控制点,精度为厘米级,并利用人工选点的方式找到其像点坐标,像点测量精度约为 1 pixel。

辅助文件包括各像元指向角、每行影像的成像时间、卫星姿轨数据等。利用 SPOT-5 卫星影像的严格定位模型求解地面点坐标:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{CTS}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{GPS}} + m \mathbf{R}_{\text{orbit}}^{\text{CTS}} \mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{orbit}} \begin{bmatrix} -\tan \phi_y \\ \tan \phi_x \\ -1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $X_{\text{GPS}}, Y_{\text{GPS}}, Z_{\text{GPS}}$ 是协议地球(CTS)坐标系下全球定位系统(GPS)测量设备相位中心的三维坐标; $X_{\text{CTS}}, Y_{\text{CTS}}, Z_{\text{CTS}}$ 是 CTS 坐标系下地面点的三维坐标; ϕ_x, ϕ_y 是 CCD 像元在本地坐标系中的指向角; $\mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{orbit}}$ 是本地坐标系至轨道坐标系的旋转矩阵,是由附属文件中记录的轨道坐标系下的俯仰角 θ_{pitch} 、滚转角 θ_{roll} 、偏航角 θ_{yaw} 组成的旋转矩阵; $\mathbf{R}_{\text{orbit}}^{\text{CTS}}$ 是轨道坐标系至 CTS 坐标系的旋转矩阵,其中基于姿态角 $\theta_{\text{pitch}}, \theta_{\text{roll}}, \theta_{\text{yaw}}$ 和轨道参数的采样记录的时间间隔与扫描行扫描的时间间隔不同,需要内插得到成像时刻的姿态、位置和速度参数; m 为比例系数。如果已知卫星传感器的内方位元素,可将指向角向量表示为

$$\begin{bmatrix} -\tan \phi_y \\ \tan \phi_x \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{f} \cdot \begin{bmatrix} x - x' \\ y - y' \\ -f \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: (x', y') 为相机的主点坐标; f 为相机的焦距。 (x, y) 为像点坐标。

2.2 在轨几何定标模型

利用 SPOT-5 严格定位模型解算地面点坐标存在误差,误差来源有相机内部畸变、卫星轨道和姿态测量误差,对应于几何定标方法中的内定标参数和

外定标参数。根据(1)、(2)式,将 SPOT-5 的严格定位模型转化为共线条件方程,即

$$\begin{cases} x - x' = -f \frac{R_{11}(X_{\text{CTS}} - X_{\text{GPS}}) + R_{12}(Y_{\text{CTS}} - Y_{\text{GPS}}) + R_{13}(Z_{\text{CTS}} - Z_{\text{GPS}})}{R_{31}(X_{\text{CTS}} - X_{\text{GPS}}) + R_{32}(Y_{\text{CTS}} - Y_{\text{GPS}}) + R_{33}(Z_{\text{CTS}} - Z_{\text{GPS}})} \\ y - y' = -f \frac{R_{21}(X_{\text{CTS}} - X_{\text{GPS}}) + R_{22}(Y_{\text{CTS}} - Y_{\text{GPS}}) + R_{23}(Z_{\text{CTS}} - Z_{\text{GPS}})}{R_{31}(X_{\text{CTS}} - X_{\text{GPS}}) + R_{32}(Y_{\text{CTS}} - Y_{\text{GPS}}) + R_{33}(Z_{\text{CTS}} - Z_{\text{GPS}})} \end{cases}, \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} = (\mathbf{R}_{\text{orbit}}^{\text{CTS}} \mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{orbit}})^{-1}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{R} 为地面点至像点的三维旋转矩阵。

利用旋转矩阵 \mathbf{R} ,可以计算得到外方位角元素 ω, φ, κ ,因此可以得到每扫描行对应的外方位元素 $X_{\text{GPS}}, Y_{\text{GPS}}, Z_{\text{GPS}}, \omega, \varphi, \kappa$ 。

航天遥感的定轨精度很高,可达到厘米级。姿态测量精度为角秒级,考虑到卫星飞行高度较高,其对定位造成的误差可达数十米,是影响定位精度最显著的因素。为了避免定标参数之间的相关性,本文将定轨参数视为真值,仅考虑姿态测量误差。姿态测量数据中的主要误差为漂移和偏移误差,对于较短的成像时间,可使用低阶多项式描述其变化。由此得到外方位元素模型为

$$\begin{cases} X_t = X_{\text{GPS}} \\ Y_t = Y_{\text{GPS}} \\ Z_t = Z_{\text{GPS}} \\ \omega_t = \omega + \omega_0 + \omega_1 \cdot (t - t_0) \\ \varphi_t = \varphi + \varphi_0 + \varphi_1 \cdot (t - t_0) \\ \kappa_t = \kappa + \kappa_0 + \kappa_1 \cdot (t - t_0) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: X_t, Y_t, Z_t 为外方位线元素在 X, Y, Z 三个坐标轴上的分量; $\omega_t, \varphi_t, \kappa_t$ 为外方位线元素在俯仰、滚动、偏航三个旋转方向上的分量; t_0 为首行影像采集时刻; $X_{\text{GPS}}, Y_{\text{GPS}}, Z_{\text{GPS}}$ 和 ω, φ, κ 分别是利用卫星辅助数据计算得到的 t 时刻外方位线元素和角元素; $\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$ 和 $\omega_1, \varphi_1, \kappa_1$ 分别是姿态参数偏移和漂移改正量。

线阵相机的系统误差主要包括像主点的偏移、径向畸变、偏心畸变、像元旋转变等。针对相机内部的畸变,可构建附加参数模型对像点坐标进行校正。线阵相机常用的相机畸变模型为

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta x_p + k_1 \bar{x} r^2 + k_2 \bar{x} r^4 + P_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x} \cdot \bar{y} + S\bar{x} \\ \Delta y = \Delta y_p + k_1 \bar{y} r^2 + k_2 \bar{y} r^4 + P_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1 \bar{x} \cdot \bar{y} + R\bar{x} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: r 为扫描行行号; $\Delta x, \Delta y$ 为像点坐标改正数; $\bar{x} = x - x_0; \bar{y} = y - y_0; \Delta x_p, \Delta y_p$ 为像主点偏移, k_1, k_2 为相机径向畸变参数; P_1, P_2 为相机的偏心畸变参数; S 为比例尺因子; R 为旋转因子。

2.3 点源靶标影像生成与解算

任意图像系统在采集真实世界景物的信息时,图像都会出现不同程度的退化。假设输入的原始图像为 $f(x, y)$, $f(x, y)$ 经退化系统的 H 作用后,与环境噪声 $n(x, y)$ 相加,就得到退化图像

$g(x, y)$ 。这个过程可表示为

$$g(x, y) = H[f(x, y)] + n(x, y), \quad (7)$$

式中:退化系统的作用 H 是除环境噪声之外其他所有退化因素的作用之和。这个作用可表示为原始图像 $f(x, y)$ 与函数 $h(x, y)$ 的卷积,即

$$H[f(x, y)] = f(x, y) * h(x, y), \quad (8)$$

式中:函数 $h(x, y)$ 通常被称为成像系统的空间响应函数;*表示卷积。图像退化(7)、(8)式可以进一步用积分的形式表示为

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\mu, \nu) \cdot h(x - \mu, y - \nu) d\mu d\nu + n(x, y), \quad (9)$$

式中: μ, ν 为积分变量。

图1是国内实验采用的反射点源,该设备配备

了高精度的电动经纬仪,能够根据星载或机载设备位姿参数实时调整反射镜的观测角度,实现相机、点

源和太阳三者间光路的自动配准,确保获取高质量的点源靶标影像^[16]。对于航天传感器而言,该反射点源可等效为理想的点光源。

考虑原始图像中只包含一个理想的点光源的情

况,此时该点光源可视为单位冲激函数 $\delta(x, y)$,其在原点处的辐射能量为无穷大,在原点之外的区域为零,且函数的积分为 1,于是有

$$\delta(x, y) * h(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\mu, \nu) \cdot h(x - \mu, y - \nu) d\mu d\nu = h(x, y)。 \quad (10)$$



图 1 反射式点源

Fig. 1 Reflective point source

由(10)式可以看出, $h(x, y)$ 就是空间内一个理想光点经退化系统作用后生成的退化图像,因此 $h(x, y)$ 也被称为点扩展函数 PSF。对于能够进行清晰成像的航测相机,忽略成像时光学系统的离焦

作用后,可使用二维高斯函数模拟 PSF^[20-24],这也是光学相机系统最常采用的退化函数:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma\xi} \exp \left[-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2} - \frac{(y - y_0)^2}{2\xi^2} \right], \quad (11)$$

式中: (x_0, y_0) 分别是点扩展函数的峰值位置; σ 和 ξ 分别是点扩展函数在 X、Y 轴上的标准差,在通常情况下, σ 和 ξ 的数值非常接近,可认为 $\sigma = \xi$ 。 (x_0, y_0) 即为反射点源中心在退化图像上的像点坐标。(9)式中的图像退化公式适用于能量连续的景物,在实际情况下,图像是离散化的,因此对(9)式中的 (x, y) 以像素为间隔进行采样,就得到离散形式的图像退化模型

$$g(i, j) = \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} f(p, q) \cdot h(i - p, j - q) + n(i, j), \quad (12)$$

式中: p, q 分别为图像中任意像点所在的行号和列号; i, j 分别为点光源在图像中的行坐标和列坐标; M 为图像行数; N 为图像列数。

利用(12)式可以得到点源的退化影像,由于实际采集的影像是过退化的图像,因此将所有点源退化影像替代实际图像对应像元处的像素值,就得到模拟点源靶标影像。

本文使用精度较高的二维高斯拟合质心法提取点源靶标影像的像点坐标,该方法的理论基础是:对于理想点源靶标,认为点源成像窗口内的像素值即为点扩展函数的离散采样值,大致服从二维高斯分布。从点源的退化图像中提取各个点源退化后的成像区域,即选择点源成像范围中像素值最大的点 (x_{ini}, y_{ini}) 作为点源中心初始位置,并以此为中心开一个大小为 $\omega \times \omega$ (ω 为奇数)个像素的窗口,该窗口即为退化后

的点源影像的大致成像范围。利用二维高斯拟合质心法对点源成像区域的像素值进行拟合,即

$$g(i_m, j_n) = K \exp \left[-\frac{(i_m - x_0)^2}{2\sigma^2} - \frac{(j_n - y_0)^2}{2\xi^2} \right] + b, \quad (13)$$

式中: $x_{ini} - (\omega - 1)/2 \leq i_m \leq x_{ini} + (\omega - 1)/2$; $y_{ini} - (\omega - 1)/2 \leq j_n \leq y_{ini} + (\omega - 1)/2$; (x_0, y_0) 为点源的质心位置; (i_m, j_n) 为窗口内各像素点的坐标; m 为行坐标的索引; n 为列坐标的索引; $g(i_m, j_n)$ 为 (i_m, j_n) 点处的像素值; K 为二维高斯函数的振幅; σ 和 ξ 为构建 PSF 二维高斯函数的标准差参数; b 为背景区域的像素值,为常数。当 $\omega = 5$ 时,可根据(13)式列出 25 个方程,待求参数共 5 个。根据(13)式,采用 Levenberg-Marquardt 非线性最小二乘算法直接求出

$$\epsilon_{\min} = \sum_{m=1}^{\omega} \sum_{n=1}^{\omega} \left\{ g(i_m, j_n) - K \exp \left[-\frac{(i_m - x_0)^2 + (j_n - y_0)^2}{2\sigma^2} \right] - b \right\}^2。 \quad (14)$$

3 实验与分析

3.1 模拟数据生成实验

3.1.1 模拟数据生成实验

利用 SPOT-5 严格定位模型进行直接定位,得到影像水平定位均方根误差为 29.52 m,垂直定位均方根误差为 42.35 m,各点位在 X、Y、Z 方向的误差较为集中,表明数据中存在较大的系统误差。使用本文定标模型解算得到影像的内外定标参数,利用定标结果重新定位,得到控制点水平定位误差为 3.85 m,垂直定位误差为 2.25 m,各点位在 X、Y、Z 方向的误差均值都接近于 0,系统误差被消除。从实验结果可以看出,本文采用的定标模型较好地提高了最终的定位精度,证明了本文定标模型的有效性。如果在成像区域生成虚拟控制点,并将解算得到的定标参数视为真实值,则利用卫星影像的辅助文件可得到虚拟控制点理想的像点坐标。具体实现步骤如下。

1) 扫描行初始搜索窗口设置为整幅影像,即 $[1, N']$ (本文中影像总行数 $N' = 12000$), 设 $l_{start}^{(0)} = 1, l_{end}^{(0)} = N', l_{mid}^{(0)} = N'/2$, 其中, $l_{start}^{(0)}$ 为初始扫描行范围起点, $l_{end}^{(0)}$ 为初始扫描行范围终点, $l_{mid}^{(0)}$ 为初始扫描行范围中心点。

2) 将定标参数、辅助文件数据代入几何定标模型, 计算得到对应的像点坐标 $(\hat{x}_{start}, \hat{y}_{start})$ 、 $(\hat{x}_{end}, \hat{y}_{end})$ 、 $(\hat{x}_{mid}, \hat{y}_{mid})$; 利用(2)式和 \hat{x}_{start} 、 \hat{x}_{end} 、 \hat{x}_{mid} 得到像元处实际的像点纵坐标 y_{start} 、 y_{end} 、 y_{mid} 。

3) 如果 $(y_{start} - \hat{y}_{start}) \cdot (y_{mid} - \hat{y}_{mid}) \leq 0$, 则令 $l_{start}^{(1)} = l_{start}^{(0)}, l_{end}^{(1)} = l_{mid}^{(0)}, l_{mid}^{(1)} = (l_{start}^{(1)} + l_{end}^{(1)})/2$; 否则, 令 $l_{start}^{(1)} = l_{mid}^{(0)}, l_{end}^{(1)} = l_{end}^{(0)}, l_{mid}^{(1)} = (l_{start}^{(1)} + l_{end}^{(1)})/2$ 。

4) 迭代步骤 3)、4), 直至 $l_{end}^{(i')}$ 与 $l_{start}^{(i')}$ 之差小于给定阈值, 其中 i' 为扫描行的索引。

5) 将最终的搜索窗口内每条扫描行的外方位数据代入几何定标模型和(2)式中, 计算出每个扫描行的纵坐标 \hat{y} 和 y 。 \hat{y} 与 y 之差最接近 0 时所对应的扫描行即为最佳扫描行, 此时得到的 (\hat{x}, \hat{y}) 即为精确像点坐标。

为了检验像点误差和控制点分布对几何定位精度的影响, 本文在成像区域均匀设置了 17×17 个虚拟控制点, 控制点的高程从国内某山地区域数字高程模型 (DEM) 中提取, 保证控制点有较好的高程分

布。控制点的平面分布如图 2 所示。计算这 289 个控制点地面三维坐标的精确像点坐标。将像点坐标反算至地面得到地面点坐标, 反算结果与控制点模拟坐标之间的平面与高程误差均小于 0.5 cm。

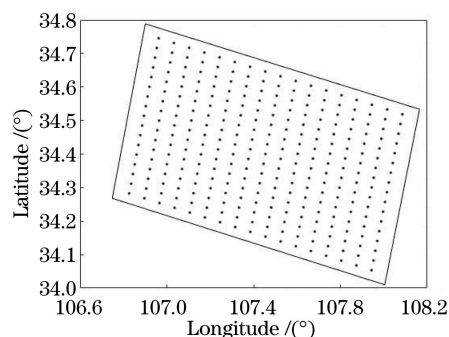


图 2 模拟控制点平面分布

Fig. 2 Plane distribution of analog control points

3.1.2 点源靶标影像的质心提取

利用模拟控制点的精确像点坐标, 可在影像对应像点位置处生成点源靶标影像。遥感卫星传感器点扩展函数在 X、Y 轴上的标准差一般为 0.5 ~ 1.0 pixel^[22, 25-27], 为了不失一般性, 本文取 σ 和 ξ 均为 0.8 pixel。在点源影像中同时加入了 40 dB 高斯噪声以模拟暗电流和背景噪声的影响。图 3(a) 是从模拟结果中裁剪的 1000 pixel \times 1000 pixel 影像, 在该区域中有 4 个控制点的对应点源影像。放大显示左上角点源靶标影像, 结果如图 3(b) 所示。从图 3(b) 可以看出, 当点源中心成像位置在像元的不同位置时, 点源成像范围的像素取值也不相同。根据 2.3 节所述, 点源成像的像素值可看作离散的 PSF, 利用二维高斯函数对其进行拟合, 从而解算得到像元的中心位置。

对模拟影像上 289 个点源靶标影像进行质心提取, 得到影像上各点源的中心坐标位置 (\hat{x}_0, \hat{y}_0) , 计算 (\hat{x}_0, \hat{y}_0) 与精确像点行、列坐标之间误差, 误差随点位的变化如图 4 所示。计算得到的前后视影像在 X、Y 方向的均方根误差 R_x 、 R_y 和最大误差 R_{MX} 、 R_{MY} 如表 1 所示。从图 4 和表 1 可以看出, 点源靶标影像的质心提取误差为 $-0.04 \sim 0.04$ pixel, 均方根误差约为 0.01 pixel。模拟解算结果与利用实际点源影像的解算结果非常接近^[16], 也与实际应用中星点质心的提取误差相当^[17-19]。

3.2 像点误差对直接定位结果的影响

为了说明使用高精度像点坐标的必要性, 本文首先计算了像点误差对直接定位结果的影响。给精

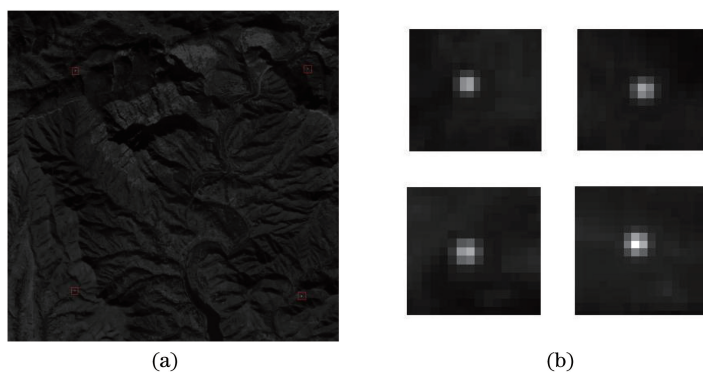


图 3 点源影像数据。(a) 1000 pixel×1000 pixel 影像;(b)放大显示的 4 个控制点对应的点源影像
Fig. 3 Point source image data. (a) Image of 1000 pixel × 1000 pixel; (b) enlarged point source images corresponding to 4 control points

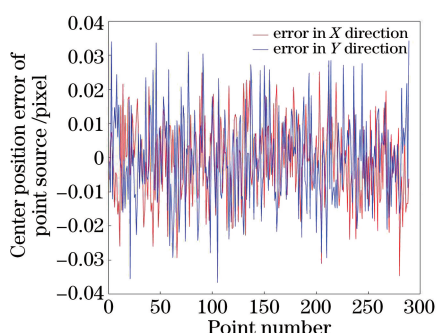


图 4 影像上各点源的中心位置解算值与实际值之间的误差
Fig. 4 Error between calculated and actual value of center position of each point source image

确的像点坐标加入 0.33 pixel 的随机误差,利用图像

表 1 点源的中心位置的解算值与实际值之间的均方根误差和最大误差

Table 1 Root-mean-square error and maximum error between calculated and actual value of center position of point source

| Image | R_x /pixel | R_y /pixel | R_{MX} /pixel | R_{MY} /pixel |
|------------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| Front view image | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.04 |
| Rear view image | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.03 |

表 2 不同像点误差下前后视影像的单像定位和立体定位误差

Table 2 Single image positioning and stereo positioning errors of front and rear view images under different image point errors

| Target type | Coordinate error of image point / m | R_{XY} /m | R_z /m | R_{MX} /m | R_{MZ} /m |
|---------------------|-------------------------------------|-------------|----------|-------------|-------------|
| Point source target | 0.01 | 0.14 | 0.10 | 0.38 | 0.35 |
| Traditional target | 0.33 | 3.75 | 2.46 | 9.82 | 5.78 |
| Traditional target | 1 | 10.07 | 3.36 | 26.77 | 8.09 |

从实验结果可以看出,影像的定位结果与模拟卫星影像的地面像元分辨率(GSD)基本一致,即当像点随机误差分别为 0.01,0.33,1 pixel 时,解算的平面位置坐标与实际控制点的平面坐标的均方根误差分别约为 0.01,0.33,1 GSD。高程方向解算结果的误差与像点误差不存在明显的数量关系,但是从表 2 中仍可以看出,随着像点坐标误差的减小,高程方向的误差也明显减小。本实验结果表明,在地面控制点坐标

处理等方法获取的像点坐标,加入 1 pixel 的随机误差,以模拟人工选点获取的像点坐标。利用模拟影像的内外定标参数,分别对基于点源影像质心提取得到的像点位置(可认为该像点位置坐标中含有标准差为 0.01 pixel 的随机误差)、加入了标准差为 0.33 pixel 和 1 pixel 的随机误差的像点位置进行重新定位,计算定位结果与实际控制点位置在平面和高程方向上的均方根误差和最大误差,结果如表 2 所示,其中 R_{XY} 为影像坐标在 XY 平面的均方根误差, R_z 为影像坐标在 Z 方向的均方根误差, R_{MX} 为影像坐标在 XY 平面的最大误差, R_{MZ} 为影像坐标在 Z 方向的最大误差。

和卫星定轨数据的精度较高的情况下,像点坐标误差会对最终的定位结果带来较大的不确定性。

3.3 基于点源靶标的定标与定位精度提升

较低的像点坐标精度会给定标结果的解算带来较大的影响,从而影响最终的定位精度。利用点源靶标能够有效提高与控制点对应的像点坐标的解算精度,因此本节研究不同数量的点源靶标替代控制点后对定标和定位精度的提升效果。

3.3.1 基于点源靶标的定标参数解算实验

本节利用辅助文件提供的 SPOT-5 卫星影像的姿态和轨道参数、所有的虚拟控制点及其对应的影像像点坐标进行定标实验,研究不同大小的像点误差对定标参数解算和定标后的定位结果的影响。为了检验定标后的定位结果,本文从虚拟控制点中选择均匀分布的 145 个控制点进行定标实验,其余控制点作为检查点。在定标实验中,控制点对应的像点坐标仍为 3.2 节中提供的三组标准差分别为 0.01,0.33,1 pixel 的像点位置。定标实验后,利用解算的定标参数对检查点分别进行定位,需要注意的是,为了检验定标参数的解算结果对定位的影响,检查点的像坐标采用的均是不含有像点误差的精

确值。

对三组数据进行定标实验,影像的外、内定标参数的变化分别如表 3、4 所示,表中真值为定标参数的模拟值。从表 3 和表 4 中可以看出,当像点误差较小时,定标参数的解算值与设置的真值非常接近,参数的解算误差很小。当像点误差较大时,外方位角元素解算值的误差明显增大,尤其是常数改正项存在明显的变化。在航天摄影测量中,角元素是对定位精度影响最大的因素,因此角元素解算的误差会对最终定位结果带来较大影响。此外,像点误差增大也导致内定标参数的解算结果发生变化,表 4 中像点误差增加后,内定标参数的解算值均明显增大。

表 3 不同像点误差下的外定标参数解算值

Table 3 Calculated values of external calibration parameters under different image point errors

| Coordinate errors of image point | ω_0/rad | ω_1/rad | φ_0/rad | φ_1/rad | κ_0/rad | κ_1/rad |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1 pixel | -4.4814×10^{-5} | 5.0200×10^{-11} | 5.7318×10^{-5} | 7.3143×10^{-11} | 1.8368×10^{-4} | -2.6546×10^{-11} |
| 0.33 pixel | -4.4819×10^{-5} | 7.2451×10^{-12} | 5.5107×10^{-5} | 2.6148×10^{-11} | 1.7851×10^{-4} | -7.9764×10^{-12} |
| 0.01 pixel | -4.4819×10^{-5} | 1.4032×10^{-12} | 5.5941×10^{-5} | 1.5816×10^{-12} | 1.8125×10^{-4} | -6.9553×10^{-12} |
| True value | -4.4811×10^{-5} | 8.3272×10^{-13} | 5.5929×10^{-5} | 8.0215×10^{-13} | 1.8123×10^{-4} | -3.1229×10^{-13} |

表 4 不同像点误差下的内定标参数解算值

Table 4 Calculated values of internal calibration parameters under different image point errors

| Coordinate error of image point | $\Delta x_p/\text{mm}$ | $\Delta y_p/\text{mm}$ | k_1 | k_2 | P_1 | P_2 | S | R |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 1 pixel | 1.780×10^{-5} | 1.18×10^{-4} | -5.76×10^{-5} | -1.99×10^{-7} | 1.30×10^{-4} | 2.90×10^{-4} | 2.18×10^{-4} | -9.49×10^{-5} |
| 0.33 pixel | 6.486×10^{-6} | 7.40×10^{-5} | -6.05×10^{-5} | -1.86×10^{-7} | 4.75×10^{-5} | 1.79×10^{-4} | 1.11×10^{-4} | 3.46×10^{-5} |
| 0.01 pixel | 2.661×10^{-8} | 6.95×10^{-6} | -3.32×10^{-6} | -4.45×10^{-9} | 1.92×10^{-7} | 1.70×10^{-5} | -2.7×10^{-5} | -1.25×10^{-7} |
| True value | 3.556×10^{-8} | 6.94×10^{-6} | -3.34×10^{-6} | -4.51×10^{-9} | 2.58×10^{-7} | 1.70×10^{-5} | -2.72×10^{-5} | -1.65×10^{-7} |

利用定标参数对控制点的像点坐标及检查点对应的精确像点坐标进行定位,定位结果与控制点、检查点实际坐标之间的平面、高程方向的均方根误差及误差最大值如表 5 所示。定标后,利用解算出来的定标参数补偿系统误差,而像点坐标中存在的偶然误差无法通过定标消除,因此表 5 中控制点误差与表 2 中利用实际的定标参数解算出来的结果相似。且当像点误差较大(0.33 pixel 和 1 pixel)时,经过迭代平差,定标参数偏离实际值,导致解算得到的控制点坐标结果甚至要稍好于利用原始定标参数的解算结果。将未用于定标参数解算的控制点当作

检查点,利用检查点对应的精确像点坐标计算其地面坐标,并与实际的检查点坐标进行比较。检查点的定位结果与实际坐标之间的均方根误差及最大误差列于表 5 右半部分。可以看出,当像点误差为 1 pixel 时,平面均方根误差为 1.43 m,高程均方根误差为 0.25 m,而使用点源靶标,理论上可以将误差分别减小至 0.03 m 和 0.04 m。该实验结果说明使用点源靶标能够提高定标参数的解算精度,从而有效提高定位精度。因此,可考虑在航天遥感业务化定标任务中布设点源靶标,点源靶标为航天遥感定位应用提供了具有较高精度的控制点。

表 5 不同像点误差下控制点和检查点的定位误差

Table 5 Positioning errors of control points and check points under different image point errors

| Coordinate error of image point /pixel | Control point | | | | Check point | | | |
|---|---------------|---------|-------------|------------|-------------|---------|-------------|------------|
| | R_{XY}/m | R_Z/m | R_{MXY}/m | R_{MZ}/m | R_{XY}/m | R_Z/m | R_{MXY}/m | R_{MZ}/m |
| 0.01 | 0.14 | 0.11 | 0.40 | 0.35 | 0.03 | 0.01 | 0.04 | 0.02 |
| 0.33 | 3.53 | 2.38 | 10.27 | 5.68 | 0.47 | 0.22 | 0.85 | 0.60 |
| 1 | 9.36 | 3.32 | 28.07 | 7.82 | 1.43 | 0.25 | 2.25 | 0.67 |









3.3.2 基于点源靶标的定位精度提升实验

点源靶标具有便携、可移动布设等特点,因此除了将大量点源靶标用于几何定标任务外,还可以考虑在缺少控制点的情况下布设少量点源靶标,以提高最终的定位精度。本节通过对比实验检验利用少量点源靶标提升定位精度的效果。首先,从 289 个控制点

中分别选取 0(无控)、1、2、3、4、5、9、25 个控制点对传感器进行几何检校,控制点对应的像点坐标为 3.2 节中的三组标准差分别为 0.01,0.33,1 pixel 的像点位置。然后使用剩余的控制点作为检查点,检查点的像点坐标均为精确像点坐标,检查点的定位结果与实际坐标之间的均方根误差和最大误差列于表 6 中。

表 6 不同像点误差和控制点分布下检查点的定位误差

Table 6 Positioning errors of check points under different image point errors and control point distributions

| Point distribution | Error of 0.01 pixel | | | | Error of 0.33 pixel | | | | Error of 1 pixel | | | |
|---|---------------------|---------|-------------|------------|---------------------|---------|-------------|------------|------------------|---------|-------------|------------|
| | R_{XY}/m | R_Z/m | R_{MXY}/m | R_{MZ}/m | R_{XY}/m | R_Z/m | R_{MXY}/m | R_{MZ}/m | R_{XY}/m | R_Z/m | R_{MXY}/m | R_{MZ}/m |
|  | 27.8 | 40.4 | 33.8 | 49.5 | 27.8 | 40.4 | 33.8 | 49.5 | 27.8 | 40.4 | 33.8 | 49.5 |
|  | 3.81 | 5.54 | 6.33 | 9.11 | 4.79 | 6.98 | 9.09 | 13.3 | 5.3 | 7.2 | 9.4 | 13.7 |
|  | 0.14 | 0.04 | 0.22 | 0.08 | 3.17 | 1.69 | 5.72 | 3.21 | 9.93 | 1.05 | 18.37 | 1.79 |
|  | 0.12 | 0.04 | 0.19 | 0.08 | 3.08 | 1.42 | 5.65 | 2.20 | 9.70 | 2.29 | 17.80 | 3.03 |
|  | 0.09 | 0.04 | 0.12 | 0.06 | 1.98 | 0.76 | 3.95 | 1.29 | 6.17 | 2.62 | 11.87 | 3.73 |
|  | 0.07 | 0.03 | 0.10 | 0.04 | 2.10 | 1.38 | 3.99 | 2.04 | 6.39 | 3.14 | 11.94 | 4.06 |
|  | 0.08 | 0.05 | 0.10 | 0.07 | 2.38 | 1.39 | 3.88 | 1.93 | 7.35 | 2.60 | 12.03 | 3.09 |
|  | 0.05 | 0.02 | 0.08 | 0.04 | 1.35 | 0.41 | 2.48 | 1.04 | 4.02 | 0.71 | 7.18 | 1.37 |

如表 6 所示,在无控情况下,检查点平面坐标的均方根误差为 27.79 m,检查点高程坐标的均方根误差为 40.35 m。在成像区域中心布设一个控制点后,不同像点误差情况下检查点的误差都得到了很大改善。其中,使用点源靶标后平面均方根误差减小至 3.81 m,高程均方根误差减小至 5.54 m。当像点误差为 0.33 pixel 和 1 pixel 时,相比无控情况,定位误差有了较大改善,但效果比点源靶标定位结果差。此外,使用一个控制点时,在三种像点误差情况下,总的定位误差均为 5~10 m 量级。实际上布设 1 个控制点仅可消除水平和垂直偏移,此时并


未解算所有定标参数,因此定标后的定位误差仍然较大。

当在成像范围对角位置处布设两个控制点时,在使用点源靶标和像点误差为 0.33 pixel 的情况下,定位误差有了较大改善。其中,使用点源靶标后定位精度的提升效果尤为显著,平面均方根误差减小至 0.14 m,高程方向均方根误差减小至 0.04 m,总的定位误差降至分米级。像点误差为 0.33 pixel 时,总定位误差也由原来的 9 m 左右降至 3 m 左右。像点误差为 1 pixel 时,与使用 1 个控制点时相比,最终总的定位精度几乎没有得到改善。这种现

象在文献[28]及本文后续实验中仍有发生,如表 5 所示,在三种像点误差情况下,使用 9 个控制点时定位误差均大于使用 5 个控制点时的定位误差。产生这种现象的主要原因是增加控制点的同时引入了像点误差,在控制点数量较少的情况下,像点误差对系统误差的解算产生较大影响,使引入的控制点不能得到有效利用。为了验证这一点,将增加的控制点

表 7 在 9 点布设方案中,新增的 4 个控制点使用精确像点坐标时的检查点定位误差

Table 7 Positioning errors of check points when 4 new control points added to 9-point layout plan using precise image point coordinates

| Point distribution | Error of 0.01 pixel | | | | Error of 0.33 pixel | | | | Error of 1 pixel | | | |
|---|---------------------|---------|-------------|------------|---------------------|---------|-------------|------------|------------------|---------|-------------|------------|
| | R_{XY}/m | R_Z/m | R_{MXY}/m | R_{MZ}/m | R_{XY}/m | R_Z/m | R_{MXY}/m | R_{MZ}/m | R_{XY}/m | R_Z/m | R_{MXY}/m | R_{MZ}/m |
|  | 0.05 | 0.01 | 0.07 | 0.03 | 1.33 | 0.81 | 2.68 | 1.22 | 4.04 | 1.69 | 8.02 | 2.42 |

随着控制点数量的增加,在同样的像点误差情况下,检查点的定位误差一般是减小的。较为明显的控制点数量的增加有利于定位精度的提高。如当控制点数量从 9 个增加至 25 个时,在不同的像点误差情况下,最终检查点的定位精度都有了很大提高。同时,由于点源靶标提供的像点坐标精度高于其他控制点,在成像区域中有人工布设的控制点靶标或有明显的已知坐标的自然地物标志点的情况下,还可考虑联合利用点源靶标和其他类型的控制点坐标来提高定位精度。需要说明的是,由于本文采用的模拟数据中的定标参数和类型是已知的,且可用函数精确表达,因此在利用点源靶标或传统控制点解算时得到的结果均较为理想,但对比实验结果仍能说明点源靶标用于几何定标的优势。

4 结 论

点源靶标在卫星影像上的成像具有良好的几何形状,因此可从中提取靶标的精确像点坐标。根据图像退化原理模拟生成点源靶标影像并解算其像点坐标,所得结果与利用实际点源影像的解算结果非常接近,且优于当前人工选点及商业测量软件获取的像点坐标的精度。然后,利用模拟影像数据检验了不同像点误差对几何定标和定位精度的影响。当像点误差较大时,内外定标参数的解算值均与模拟值之间产生了较大偏差,而使用点源靶标的参数解算结果均接近模拟值。基于定标参数的定位实验结果也说明点源靶标能够有效提高定位精度。研究了布设少量点源靶标对定位精度的提升效果。当在成像区域中心布设两个及以上控制点时,点源靶标可将检查点的定位精度提升至分米量级。

像点坐标替换为精确像点坐标,重新计算控制点从 5 个增加至 9 个时的定位结果,如表 7 所示。将表 6 中 5 点布设定位结果与表 7 进行对比,发现新增的控制点使用精确像点坐标后,定位精度均得到了较大改善,与表 5 中 25 点布设精度相当。该实验结果也说明了几何定标中减小控制点对应的像点误差的必要性。

点源靶标最初是用于遥感影像的辐射量测量,因此它也是一种辐射定标工具,并已被成功用于航天传感器的辐射定标实验^[29]。将点源靶标作为高精度的地面控制点并进行合理布设,将有望成为遥感影像几何和辐射联合定标的理想工具,这也是下一步的研究内容。

参 考 文 献

- [1] Pi Y D, Xie B R, Yang B, et al. On-orbit geometric calibration of linear push-broom optical satellite only using sparse GCPs [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(2): 216-225.
皮英冬, 谢宝蓉, 杨博, 等. 利用稀少控制点的线阵推扫式光学卫星在轨几何定标方法[J]. 测绘学报, 2019, 48(2): 216-225.
- [2] Cao J S, Yuan X X, Gong J Y. In-orbit geometric calibration and validation of ZY-3 three-line cameras based on CCD-detector look angles [J]. Photogrammetric Record, 2015, 30(150): 211-226.
- [3] Yuan X X. Calibration of angular systematic errors for high resolution satellite imagery [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(3): 385-392.
袁修孝, 余翔. 高分辨率卫星遥感影像姿态角系统误差检校[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 385-392.
- [4] Li K, Zhang Y S, Yu Y, et al. Pixel extraction accuracy of point source image and its impact on geometric calibration[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(1): 213-220.
李凯, 张永生, 于英, 等. 点源像点提取精度及其对几何定标影响分析[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 213-220.
- [5] Fan D Z, Liu C B, Wang T, et al. Building and validation of rigorous geometric model of ALOS

- PRISM imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(5): 569-574.
- 范大昭, 刘楚斌, 王涛, 等. ALOS 卫星 PRISM 影像严格几何模型的构建与验证[J]. *测绘学报*, 2011, 40(5): 569-574.
- [6] Wang M, Cheng Y F, Chang X L, et al. On-orbit geometric calibration and geometric quality assessment for the high-resolution geostationary optical satellite GaoFen4 [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 125: 63-77.
- [7] Zhang Y J, Zheng M T, Xiong J X, et al. On-orbit geometric calibration of ZY-3 three-line array imagery with multistrip data sets [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 224-234.
- [8] Li D R, Wang M. On-orbit geometric calibration and accuracy assessment of ZY-3 [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(3): 1-6.
- 李德仁, 王密. “资源三号”卫星在轨几何定标及精度评估[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(3): 1-6.
- [9] Pan H B, Zhang G, Tang X M, et al. Accuracy analysis and verification of ZY-3 products [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(5): 738-744, 751.
- 潘红播, 张过, 唐新明, 等. 资源三号测绘卫星影像产品精度分析与验证[J]. *测绘学报*, 2013, 42(5): 738-744, 751.
- [10] Zhang C M, Gong Z H, Huang Y. Performance evaluation and improvement of several feature point detectors [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2008, 25(3): 231-234.
- 张春美, 龚志辉, 黄艳. 几种特征点提取算法的性能评估及改进[J]. *测绘科学技术学报*, 2008, 25(3): 231-234.
- [11] Rauchmiller R F Jr, Schowengerdt R A. Measurement of the landsat thematic mapper modulation transfer function using an array of point sources [J]. *Optical Engineering*, 1988, 27(4): 334-343.
- [12] Leger D, Duffaut J, Robinet F. MTF measurement using spotlight [C] // *Proceedings of IGARSS'94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, August 8-12, 1994, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE, 1994: 2010-2012.
- [13] Rangaswamy M K. Quickbird II: two-dimensional on-orbit modulation transfer function analysis using convex mirror array [D]. South Dakota: South Dakota State University, 2003: 72-90.
- [14] Schiller S J, Silny J. The specular array radiometric calibration (SPARC) method: a new approach for absolute vicarious calibration in the solar reflective spectrum [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7813: 78130E.
- [15] Jemec J, Pernuš F, Likar B, et al. 2D sub-pixel point spread function measurement using a virtual point-like source [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2017, 121(3): 391-402.
- [16] Xu W W, Zhang L M, Si X L, et al. On-orbit modulation transfer function detection of high resolution optical satellite sensor based on reflected point sources [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0728001.
- 徐伟伟, 张黎明, 司孝龙, 等. 基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器在轨调制传递函数检测[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0728001.
- [17] Tang S J, Guo X S, Zhou Z F, et al. Modified systematic error compensation algorithm for star centroid sub-pixel detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1502-1507.
- 唐圣金, 郭晓松, 周召发, 等. 星点亚像元定位中系统误差的改进补偿方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1502-1507.
- [18] Cao Y, Li B Q, Li H T, et al. High-accuracy star sensor centroid algorithm based on star image resampling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0712003.
- 曹阳, 李保权, 李海涛, 等. 基于星点像重采样的星敏感器高精度质心算法[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0712003.
- [19] Li Y L, He H Y, Zhang F, et al. Space multi-target star extraction algorithm based on line data scanning [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2019, 40(2): 79-88.
- 李寅龙, 何海燕, 张凤, 等. 基于行数据扫描的星空多目标星点提取方法[J]. *航天返回与遥感*, 2019, 40(2): 79-88.
- [20] Zhang B, Zerubia J, Olivomarin J. Gaussian approximations of fluorescence microscope point-spread function models [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(10): 1819-1829.
- [21] Qin F Q, Min J, Guo H R. A blind image restoration method based on PSF estimation [C] // *2009 WRI World Congress on Software Engineering*, May 19-21, 2009, Xiamen, China. New York: IEEE, 2009, 2: 10982158.
- [22] Yang L H, Ren J Y. Remote sensing image restoration using estimated point spread function [C] // *2010 International Conference on Information, Networking and Automation (ICINA)*, October 18-19, 2010, Kunming, China. New York: IEEE, 2010: 11654942.

- [23] Silny J F, Schiller S J. Method and system for vicarious spatial characterization of a remote image sensor: US20130027553[P]. 2013-01-31.
- [24] Xu C, Liu Z L, Hou G L. Simulation of the impact of a sensor's PSF on mixed pixel decomposition: 1. nonuniformity effect [J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 437.
- [25] Storey J C. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4540: 50-61.
- [26] Fan C, Li G D, Wu C Y, et al. High accurate estimation of point spread function based on improved reconstruction of slant edge[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44 (11): 1219-1226, 1254.
范冲, 李冠达, 伍超云, 等. 点扩散函数的改进倾斜刃边重建的高精度估计[J]. 测绘学报, 2015, 44 (11): 1219-1226, 1254.
- [27] Gao H T, Liu W, He H Y, et al. Static PSF of TDI-CCD measurement with multi-phase-knife method [J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(6): 13-18.
高慧婷, 刘薇, 何红艳, 等. TDI-CCD 静态点扩散函数多相位刃边测量[J]. 光电工程, 2016, 43(6): 13-18.
- [28] Liu C B. Positioning accuracy optimization and reliability improvement of surveying satellite [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2015: 55-61.
刘楚斌. 测绘卫星定位精度优化与可靠性提升技术[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2015: 55-61.
- [29] Xu W W, Zhang L M, Chen H Y, et al. In-flight radiometric calibration of high resolution optical satellite sensor using reflected point sources[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0328001.
徐伟伟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器在轨辐射定标方法[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0328001.