

# 影像质量影响测绘卫星无控定位精度分析

王一<sup>1,3\*</sup>, 胡莘<sup>2\*\*</sup>, 杨夏芳<sup>3</sup>

<sup>1</sup>长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

<sup>2</sup>西安测绘研究所, 陕西 西安 710054;

<sup>3</sup>西安中科星图空间数据技术有限公司, 陕西 西安 710100

**摘要** 测绘相机的影像质量会影响卫星遥感的立体定位精度,与影像质量密切相关的关键因素主要有调制传递函数、信噪比和量化位数。以“天绘一号”卫星影像为背景,研究无地面控制条件下成像质量对定位精度的影响并评估影像质量与立体定位精度之间的定量关系。通过在轨仿真三种因素的降质数据,验证了实验的有效性。

**关键词** 成像系统; 定位精度; 调制传递函数; 信噪比; 量化位数; 降质数据

中图分类号 P42 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081102

## Influence of Image Quality on Uncontrolled Positioning Accuracy of Mapping Satellite

Wang Yi<sup>1,3\*</sup>, Hu Xin<sup>2\*\*</sup>, Yang Xiafang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Geological Engineering and Surveying and Mapping, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

<sup>2</sup> Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

<sup>3</sup> Xi'an Zhong Ke Xing Tu Space Date Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710100, China

**Abstract** The image quality of the surveying camera will affect the stereoscopic positioning accuracy of the satellite remote sensing. The key factors closely related to the image quality are modulation transfer function, signal to noise ratio and quantization bits. Taking Mapping Satellite-1 image as the background, we research the effect of positioning precision about the image quality in no ground controlled conditions, and evaluate the quantitative relationship between the image quality and the stereoscopic position accuracy. At last, the validity of the experimental results is verified by simulating three factors of degradation data in orbit.

**Key words** imaging systems; positioning accuracy; modulation transfer function; signal to noise ratio; quantization bits; degradation data

**OCIS codes** 110.4100; 100.2960

## 1 引言

“天绘一号”测绘相机从前、正、后三个角度摄取立体影像,通过高精度姿轨数据处理、立体量测与平差等技术实现对目标的精确定位<sup>[1-3]</sup>。影响无控定位精度的主要因素有卫星姿态和位置、相机畸变参数、相机焦距和影像匹配精度<sup>[3-6]</sup>。前三个因素可以通过在轨几何标定进行纠正,提高卫星影像的无控定位精度。影像的匹配精度理论上可达1/100 pixel等级<sup>[7]</sup>,然而,在测绘影像的实际应用中,由于模糊、

噪声、灰度偏差等降质因素影响,匹配结果通常与理论精度相差甚远,进而对定位精度造成影响。邓长城等<sup>[8]</sup>探究了卫星微振动对相机调制传递函数(MTF)的影响分析;黄哲<sup>[9]</sup>研究了光学遥感卫星在轨参数与图像质量参数的关系;杨秉新<sup>[10]</sup>研究了信噪比(SNR)对TDICCD相机的要求;陈世平<sup>[11]</sup>归纳总结遥感图像品质的影像因素;傅鹏等<sup>[12-13]</sup>分析图像MTF对立体定位精度的影响等。影像的成像质量与匹配精度密切相关,但是国内外研究普遍缺乏相关定量成果。常用来评价遥感影像质量的参数

收稿日期: 2018-01-16; 修回日期: 2018-02-27; 录用日期: 2018-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(4157012140)

\* E-mail: wangyi@geovis.com.cn; \*\* E-mail: Huxin327@163.com

主要有 MTF、SNR、量化位数(QB)等,它们在影像上产生的物理效应导致匹配精度的降低,进而对定位精度造成影响<sup>[14-15]</sup>。本文利用在轨“天绘一号”影像作为仿真影像,通过降质模型得到 MTF、SNR、QB 三种关键因素的降质数据,定量分析无地面控制条件下成像质量对定位精度的影响。

## 2 “天绘一号”三线阵影像无控定位原理与降质数据制作

“天绘一号”卫星通过在轨几何标定技术,消除星敏相机与全球定位系统(GPS)设备的系统误差,

然后利用三角测量的方法消除外方位元素的偶然误差,对影像进行匹配得到连接点,利用连接点采用平差获取有理函数模型(RPC)参数。转刺控制点文件,通过 RPC 进行前方交会,得到地面点坐标。比较外业量测地面点坐标值与实际计算地面点坐标值,求解中误差值,获取定位精度。具体思路如图 1 所示。

对“天绘一号”三线阵影像分别进行 MTF、SNR 和 QB 的降质处理,得到一系列降质数据。对降质数据进行无控定位计算,分析不同降质因素对定位精度的影响。

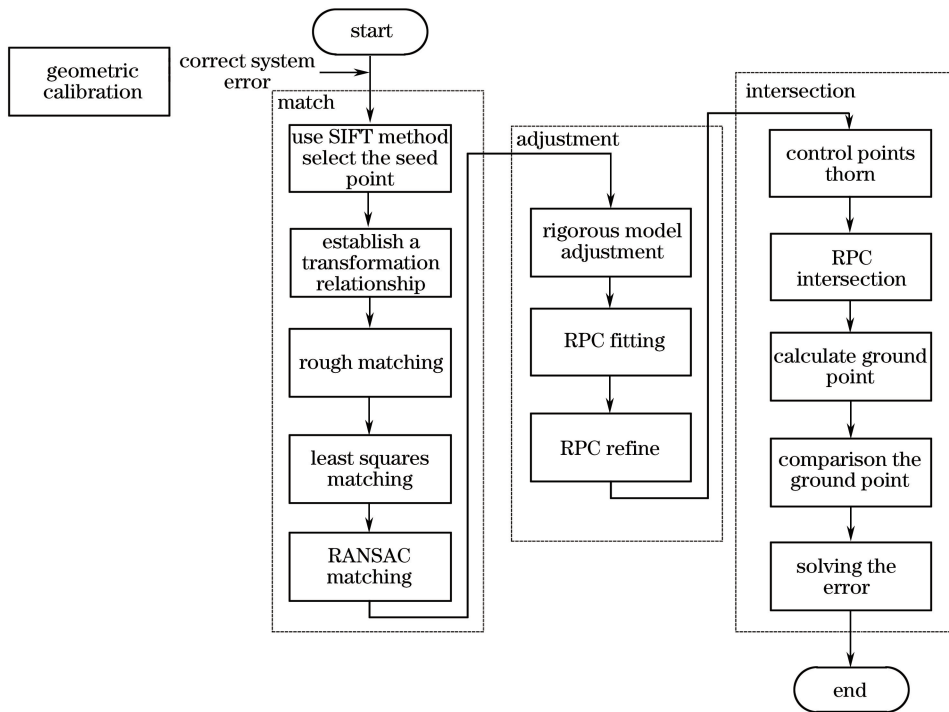


图 1 无地面控制点条件下的定位精度求解过程

Fig. 1 Solving process of positioning accuracy without ground control point

### 2.1 实验数据的选择

分别选取新疆、吉林与北京三个地区的“天绘一号”三线阵影像作为实验数据,其影像覆盖高山地、

山地与平地不同地形,最大高差达 5000 m,其中,新疆实验场可全面检测降质因素对“天绘一号”卫星的几何精度的影响,其实验区数据概况如表 1 所示。

表 1 实验区数据概况

Table 1 Test area data profiles

Test parameter	Test area		
	Xinjiang	Jilin	Beijing
Photography time	2014-01-10	2013-03-11	2013-12-11
Top left corner latitude and longitude / (°)	44.639955, 87.897672	48.263893, 124.712669	39.803053, 116.621405
Lower right corner latitude and longitude / (°)	41.983993, 87.824121	43.59594, 123.936157	39.157445, 117.147101
Height difference / m	5000	1300	50
Terrain	Alpine	Mountain	Flat

实验区影像图如图 2 所示。

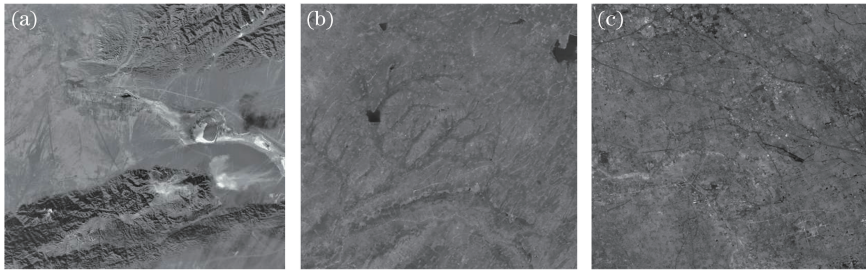


图 2 实验区“天绘一号”三线阵正视影像图。(a)新疆实验区;(b)吉林实验区;(c)北京实验区

Fig. 2 Three line array camera facing images of Mapping Satellite-1 in test area. (a) Xinjiang test area; (b) Jilin test area; (c) Beijing test area

## 2.2 降质数据的制作

1) 利用不同高斯模糊核对三线阵影像进行卷积,得到 MTF 降质数据为

$$I_{\text{MTF}} = I * G, \quad (1)$$

式中  $I_{\text{MTF}}$  为 MTF 降质影像,  $I$  为原影像,  $G$  为高斯模糊核。高斯模糊核函数公式为

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot$$

$$\exp\{-[(x - m/2)^2 + (y - n/2)^2]/2\sigma^2\}, \quad (2)$$

式中  $\sigma$  为标准差,其值越大,得到的 MTF 降质影像越模糊。

2) 对三线阵影像添加不同高斯白噪声,得到 SNR 降质数据为

$$I_{\text{SNR}} = I + N, \quad (3)$$

式中:  $I_{\text{SNR}}$  为 SNR 降质影像;  $I$  为原影像;  $N$  为一均值 0, 方差为  $\sigma$  的高斯白噪声。  $\sigma$  越大,得到的 SNR 降质影像越模糊。

3) 对三线阵影像进行线性拉伸来改变图像的量化位数,得到量化降质数据。

## 2.3 无控定位精度求解

1) 利用尺度不变特征变换(SIFT)方法选取种

子点,通过灰度相关与最小二乘进行匹配、双项约束与随机抽样一致(RANSAC)方法剔除粗差点,得到影像连接点;

2) 利用三线阵影像间的约束关系,建立严密几何模型,与连接点一起参与平差,解算精确的外方位元素,并拟合 RPC;

3) 利用前方交会的手段验证检查点的定位精度。

对降质数据进行无控定位解算,分析 MTF、SNR 和量化位数与定位精度之间的关系。

## 3 质量因素对定位精度的影响实验

### 3.1 MTF 对定位精度的影响

对建立的 MTF 降质数据分别求解 MTF 和定位精度(平面误差和高程误差)。使得影像 MTF 在 0.012~0.292 之间改变,分析 MTF 与平面误差、高程误差和可成功匹配的点数之间的关系。MTF 计算采用国际通用的刀刃法对降质数据选取刃边区域,求解影像奈奎斯特频率处的 MTF 值<sup>[13-19]</sup>。新疆实验区的正射影像典型的局部区域不同的 MTF 的降质数据如图 3 所示。

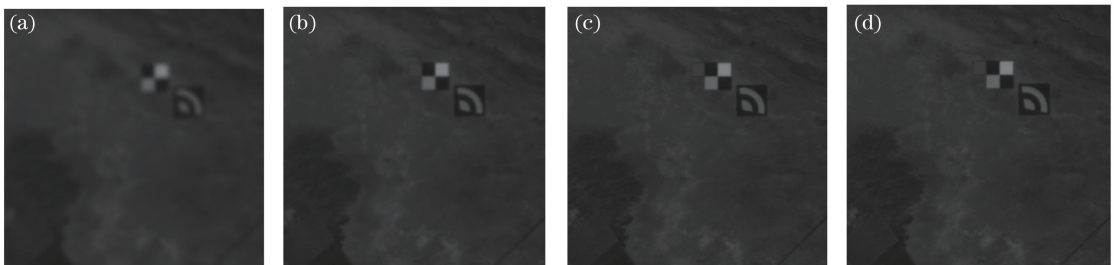


图 3 新疆实验区正射影像局部区域不同 MTF 的降质数据。(a) 0.012;(b) 0.028;(c) 0.131;(d) 0.293

Fig. 3 Degradation data of different MTF values in local area of Xinjiang test area.

(a) 0.012; (b) 0.028; (c) 0.131; (d) 0.293

对计算的 MTF 值、定位精度序列进行分析,可以看到 MTF 值小于 0.02 时,平面误差、高程误差较

大。当 MTF 值大于 0.02 时,MTF 值的变化对平面误差、高程误差影响很小,几乎不变,如表 2 所示。

表 2 不同 MTF 值与平面误差、高程误差和匹配点个数统计表

Table 2 Statistics table of different MTF values versus plane error, elevation error, matching points

MTF value	First simulation image			Second simulation image			Third simulation image		
	Plane	Elevation	Matching	Plane	Elevation	Matching	Plane	Elevation	Matching
	error /m	error /m	points	error /m	error /m	points	error /m	error /m	points
0.012	54.1	33.5	17	33.7	31.9	10	22.0	16.3	21
0.015	14.3	11.6	42	12.5	11.5	45	11.2	11.7	38
0.028	11.3	6.6	198	11.0	6.6	186	11.1	6.5	203
0.044	11.2	6.6	200	11.1	6.4	186	11.1	6.5	204
0.066	11.3	6.5	197	11.1	6.5	188	11.0	6.5	204
0.095	11.2	6.5	199	11.0	6.5	189	11.0	6.6	204
0.131	11.2	6.5	199	11.0	6.6	176	11.0	6.6	203
0.172	11.2	6.6	196	11.1	6.6	184	10.8	6.6	203
0.217	11.2	6.6	196	11.2	6.5	181	10.8	6.7	203
0.257	11.2	6.5	193	11.1	6.4	183	10.8	6.7	204
0.261	11.1	6.6	194	11.0	6.6	184	10.8	6.7	204
0.293	11.1	6.5	192	11.1	6.5	182	10.8	6.7	204

### 3.2 SNR 对定位精度的影响

对建立的 SNR 降质数据分别求解 SNR 和定位精度(平面误差和高程误差)。使得影像 SNR 在 10~60 之间改变,分析 SNR 与平面误差、高程误差和可成功匹配的点个数之间的关系。SNR 的计算公式为

$$R_{sn} = 10\lg(\sigma_{\max}^2/\sigma_{\min}^2), \quad (4)$$

式中: $R_{sn}$  为 SNR 值; $\sigma_{\max}^2$  为局部方差最大值; $\sigma_{\min}^2$  为局部方差最小值,局部表示 5 pixel×5 pixel 的滑动窗口内的像素值。新疆实验区的正射影像典型的局部区域不同的 SNR 的降质数据如图 4 所示。

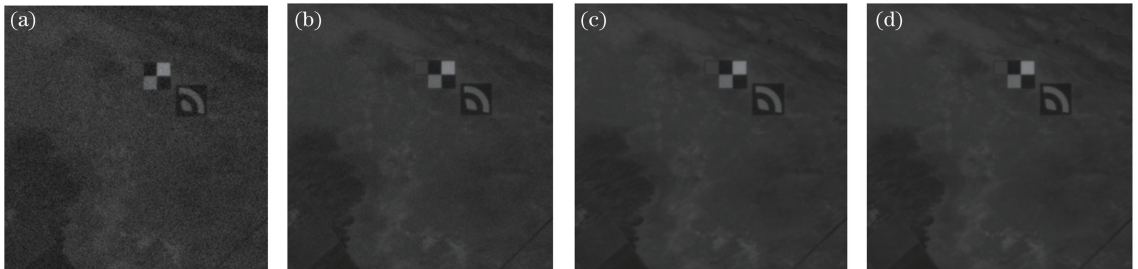


图 4 新疆实验区正射影像局部区域不同 SNR 的降质数据。(a) 10;(b) 20;(c) 30;(d) 45

Fig. 4 Degradation data of different SNR values in local area of Xinjiang test area. (a) 10; (b) 20; (c) 30; (d) 45

对计算的 SNR 值、定位精度序列进行分析,如表 3 所示,可以看到,当 SNR 小于 20 dB 时,平面误差与高程误差都较大,达到 18 m 以上,匹配点少,

甚至有匹配失败的情况。当 SNR 大于 20 dB 时,SNR 的变化对平面误差与高程误差影响很小,且匹配点数目相对稳定。

表 3 不同 SNR 与平面误差、高程误差和匹配点个数统计表

Table 3 Statistics table of different SNR values versus plane error, elevation error, matching points

SNR / dB	First simulation image			Second simulation image			Third simulation image		
	Plane	Elevation	Matching	Plane	Elevation	Matching	Plane	Elevation	Matching
	error /m	error /m	points	error /m	error /m	points	error /m	error /m	points
10	Matching error			Matching error			Matching error		
15	Matching error			12.8	16.2	5	Matching error		
18	18.1	18.4	17	11.0	18.8	22	24.7	26.0	14
20	11.1	6.8	42	11.1	6.5	56	11.4	6.0	30
25	11.1	6.9	90	11.1	6.6	166	11.3	6.6	96

SNR / dB	First simulation image			Second simulation image			Third simulation image		
	Plane error / m	Elevation error / m	Matching points	Plane error / m	Elevation error / m	Matching points	Plane error / m	Elevation error / m	Matching points
30	11.1	6.7	133	11.0	6.7	197	11.4	6.8	126
33	11.2	6.6	140	10.8	6.8	200	11.1	6.7	151
36	11.1	6.8	147	11.0	6.5	201	11.2	6.7	156
39	11.2	6.7	123	10.9	6.6	198	11.1	6.8	155
42	11.1	6.8	157	10.7	6.8	199	11.3	6.8	153
45	11.1	6.8	155	10.7	6.7	198	11.3	6.8	155
48	11.2	6.9	149	10.7	6.8	197	11.2	6.7	156

### 3.3 量化位数对定位精度的影响

“天绘一号”卫星三线阵影像的量化位数为 10 bit,在不影响几何精度的情况下对量化位数降质,可以提升处理的效率,因此,对三线阵影像进行线性拉伸来改变图像的量化位数,区间为 3~15

bit,然后对建立的量化位数降质数据求解定位精度(平面误差和高程误差)。新疆实验区的正射影像典型的局部区域不同量化位数的降质数据如图 5 所示。

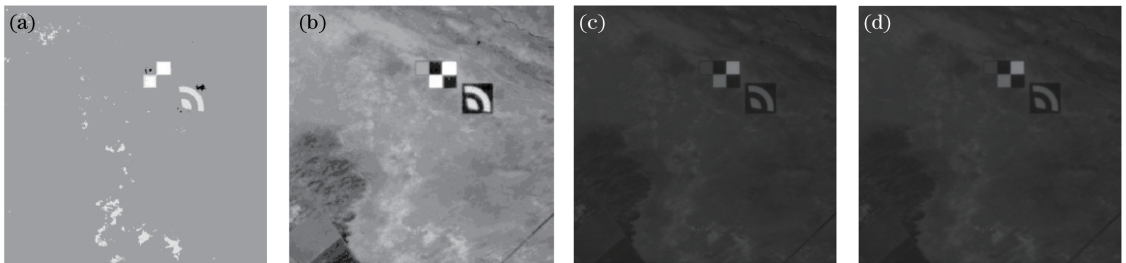


图 5 新疆实验区正射影像局部区域不同量化位数的降质数据。(a) 3;(b) 6;(c) 8;(d) 15

Fig. 5 Degradation data of different quantization bits in local area of Xinjiang test area. (a) 3; (b) 6; (c) 8; (d) 15

当量化位数为 3、4 bit 时,一般匹配失败;当量化位数为 5、6 bit 时,匹配点数目较少,平面误差、高程误差也较大;当量化位数大于 6 bit 时,平面误差、高程误差较小,也相对稳定,匹配点数目也达到一个稳定值。

质量特别差的情况下,定位精度才会变差,其他情况下,尽管影像质量不一样,但对定位精度影响很小。这样的结论是否正确,是否有据可循,对仿真影像 1 的中间结果举例进行详细分析。

## 4 实验结果分析

计算影像定位精度的过程主要分为自动匹配、平差迭代和剔除匹配误点。定位精度是平差之后的结果。分别统计影像 1 的误匹配率、匹配残差和剔除误匹配点后匹配残差的结果,如表 4 所示。

通过上述仿真实验,可以得出结论:只有在影像

表 4 不同量化位数与平面误差、高程误差和匹配点个数统计表

Table 4 Statistics table of different quantization bits versus plane error, elevation error, matching points

Image / bit	First simulation image			Second simulation image			Third simulation image		
	Plane error / m	Elevation error / m	Matching points	Plane error / m	Elevation error / m	Matching points	Plane error / m	Elevation error / m	Matching points
3	Matching error			Matching error			Matching error		
4	Matching error			Matching error			Matching error		
5	64.1	34.5	5	51.4	32.6	5	112.1	78.2	5
6	20.1	11.4	17	16.1	26.3	22	64.1	26.0	14
7	11.4	6.3	156	11.4	6.0	153	10.8	7.0	174
8	11.4	6.5	164	11.6	5.9	162	10.6	6.6	180
9	11.2	6.5	172	11.7	5.9	167	10.6	6.6	180
10	11.2	6.5	175	11.7	6.0	168	10.6	6.6	183
11	11.2	6.6	175	11.7	6.0	168	10.6	6.6	182
12	11.2	6.6	175	11.6	6.0	168	10.6	6.6	180
13	11.2	6.6	175	11.7	6.0	168	10.6	6.6	182

14	11.2	6.6	175	11.7	6.1	168	10.6	6.6	179
15	11.2	6.6	175	11.6	5.9	168	10.6	6.6	181

### 1) 误匹配率

误匹配率为误匹配点个数与匹配点个数相除而得,其中,匹配点个数为正确匹配点和误匹配点个数之和。

### 2) 匹配残差

匹配残差为在匹配结果的基础上,直接进行平差后的像方残差。单点残差计算公式为

$$\Delta x = x - x', \Delta y = y - y', \quad (5)$$

式中:  $(x, y)$  为平差前的点坐标;  $(x', y')$  为平差后的点坐标。影像的匹配残差为

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n [(\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2] / n}, \quad (6)$$

式中  $n$  为匹配点的个数。

### 3) 剔除误匹配点方法

采用 3 倍中误差的方式剔除误匹配点:即求所有匹配点的中误差,记为  $m_0$ ,单点残差大于  $3m_0$  的

匹配点为误匹配点,则剔除。

从表 5 可以看出,当 MTF 值大于等于 0.0282 时,影像 1 的误匹配率保持在 30% 以内,并无明显的随质量的变化而规律性地变化,而是当 MTF 值小于 0.0282 时,误匹配率急剧上升,分别达到 62.98% 和 83.85%。影像的匹配残差都远大于 1 pixel 时,和误匹配率一样,也是当 MTF 值小于 0.0282 时,匹配残差急剧上升。在匹配结果的基础上,剔除误匹配点,匹配残差明显降低。当 MTF 值大于等于 0.0282 时,剔除误匹配点后的匹配残差都小于 1 pixel,但当 MTF 值小于 0.0282 时,剔除误匹配点后的匹配残差仍然较大。分析其原因,当 MTF 值小于 0.0282 时,影像质量过差,匹配结果中的误匹配点太多,以至于无法有效剔除误匹配点,导致后续平差所用匹配输入严重错误,从而影响定位精度。

表 5 仿真数据 1 不同 MTF 值与误匹配率、匹配残差和剔除误匹配点后匹配残差统计

Table 5 Statistics in first simulation image of different MTF values versus error rate, match residual error, and match residual error after crude subtraction

MTF value	Error rate /%	Match residual error /pixel	Match residual error after crude subtraction /pixel
0.0121	83.85	36.07	24.25
0.0019	62.98	14.23	13.16
0.0282	26.85	10.93	0.40
0.0443	15.79	8.89	0.40
0.0666	18.06	9.83	0.37
0.0955	22.58	8.11	0.39
0.1313	26.34	11.51	0.36
0.1729	14.89	7.33	0.36
0.2178	22.22	10.23	0.34
0.2575	17.61	7.92	0.35
0.2614	15.76	5.90	0.34
0.2930	27.07	11.39	0.30

总之,随着影像质量的下降,会出现误匹配。但在影像还不是很差的情况下,误匹配和影像质量无明显关系,也不会对定位精度产生影响,原因是在后续的平差过程中会将误匹配点剔除掉。只有在影像特别差的情况下,匹配的误匹配率过大,致使平差无法剔除误匹配点,才会导致定位精度变差。

## 5 结 论

从测绘角度出发,分析了影响测绘定位精度的因素。通过三组在轨仿真影像,建立了 MTF、SNR 和 QB 降质模型。重点研究了三个因素对定位精度的影响。得出结论:MTF 小于 0.02 或 SNR 小于

50 dB 或 QB 小于 6 时,影像平面误差、高程误差较大;MTF 大于 0.02 且 SNR 大于 50 dB 且量化位数大于 6 时,平面误差、高程误差可以达到理想效果,且保持稳定。此结论明确了成像质量(MTF、SNR、QB)对定位精度的具体影响情况,对后续的测绘卫星影像无控定位研究具有重要的指导作用。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Z, Zhang L P, Li Z H. Imaging and error model of three-linear tridimensional mapping camera [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(1): 95-100.

- 王智, 张立平, 李朝辉. 三线阵立体测绘相机机构想及误差模型的建立[J]. 光电工程, 2010, 37(1): 95-100.
- [2] Hu X, Cao X B. Analysis on precision of stereo mapping microsatellite using three-line array CCD images [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(5): 695-699.  
胡莘, 曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测绘精度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(5): 695-699.
- [3] Wang R S, Hu X. The difficult problem about satellite photogrammetry without control points[J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(3): 3-5.  
王任享, 胡莘. 无地面控制点卫星摄影测量的技术难点[J]. 测绘科学, 2004, 29(3): 3-5.
- [4] Wang Z, Zhang L P, Yao H. Design on optical lens of three-linear tridimensional mapping camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(2): 228-231.  
王智, 张立平, 姚惠. 三线阵立体测绘相机光学镜头的设计[J]. 光子学报, 2010, 39(2): 228-231.
- [5] Tao J S, Wang S T. Analysis on large-scale space three-linear array camera precision sensitive factors [J]. Optical Technique, 2006, 32(1): 89-91.  
陶家生, 王世涛. 大型航天三线阵立体测绘相机精度敏感因素的分析[J]. 光学技术, 2006, 32(1): 89-91.
- [6] Wang J R, Wang R X, Hu X, *et al.* The precision estimation in forward intersection of three-line array CCD imagey[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(4): 9-11.  
王建荣, 王任享, 胡莘, 等. 三线阵 CCD 影像直接前方交会精度估算[J]. 测绘科学, 2009, 34(4): 9-11.
- [7] Deng C C. Effects of the flywheel micro-vibration on the image quality of a integration satellite [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.  
邓长城. 飞轮微振动对星载一体化卫星成像质量影响研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [8] Deng C C, An Y, Mu D Q, *et al.* Effect of flywheel micro-vibration on modulation transfer function of space camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(1): 111001-111008.  
邓长城, 安源, 母德强, 等. 飞轮微振动对空间相机调制传递函数的影响[J]. 光子学报, 2016, 45(1): 111001-111008.
- [9] Huang Z. Study on relationship between optical remote sensing satellite orbit parameters and optical image quality parameters [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014: 63-81.  
黄哲. 光学遥感卫星在轨参数与图像质量参数关系研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 63-81.
- [10] Yang B X. Study on the SNR of TDICCD camera [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2005, 26(2): 22-24.  
杨秉新. TDICCD 相机的信噪比的研究[J]. 航天返回与遥感, 2005, 26(2): 22-24.
- [11] Chen S P. Some issues about the remote sensing image quality [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009, 30(2): 10-17.  
陈世平. 关于遥感图像品质的若干问题[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(2): 10-17.
- [12] Fu P, Sun Q S, Ji Z X, *et al.* A method of SNR estimation and comparison for remote sensing images [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(4): 559-567.  
傅鹏, 孙权森, 纪则轩, 等. 一种遥感图像信噪比评估和度量准则[J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 559-567.
- [13] Zhang G M, Yu J C, Fang Z H, *et al.* Pixel-quantization and its influence for remote sensing image [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(11): 2172-2176.  
张光明, 俞建成, 方中华, 等. 卫星遥感图像的量化等级确定及影响因素分析[J]. 光子学报, 2007, 36(11): 2172-2176.
- [14] Wang Z Z. Photogrammetry principle [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1979.  
王之卓. 摄影测量原理 [M]. 北京: 测绘出版社, 1979.
- [15] Li H, Yan C X, Shao J B, *et al.* High accuracy measurement of the MTF of electro-optical imaging system based on modified slanted-edge method [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(12): 1211002.  
李航, 颜昌翔, 邵建兵, 等. 基于改进倾斜刃边法的光电成像系统 MTF 高准确度测试[J]. 光子学报, 2016, 45(12): 1211002.
- [16] Yuan H F, Guo Y F, Si G L, *et al.* MTF measurement method based on slanted-edge image simulated by normal distribution [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0712001.  
袁航飞, 郭永飞, 司国良, 等. 正态分布模拟倾斜刃边图像的 MTF 测量方法[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0712001.
- [17] Helder D L, Choi T. IKONOS satellite in orbit modulation transfer function (MTF) measurement using edge and pulse method [M]. South Dakota: South Dakota University, 2001.

- [18] Leger D, Viallefont F, Hillairet E, *et al.* In-flight refocusing and MTF assessment of SPOT5 HRG and HRS cameras[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4881: 224-231.