

doi: 10.6046/gtzyyg.2020.02.27

引用格式: 王懿哲,刘 国,郭 莉,等. 基于高分一号 WFV 数据的正射校正与真彩色合成技术——以中巴经济走廊为例[J]. 国土资源遥感,2020,32(2):213–218. (Wang Y Z,Liu G,Guo L,et al. Research on ortho-rectification and true color synthesis technique of GF-1 WFV data in China-Pakistan Economic Corridor[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2020,32(2):213–218.)

基于高分一号 WFV 数据的正射校正与真彩色合成技术——以中巴经济走廊为例

王懿哲¹, 刘 国^{2,3}, 郭 莉¹, 赵世湖¹, 张学利⁴

(1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048; 2. 国家地理信息系统工程技术研究中心, 武汉 430074; 3. 中国地质图书馆, 北京 100083; 4. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 南京 210007)

摘要: 高分一号 (GF-1) 卫星自发射以来, 凭借其幅宽大、综合覆盖能力强以及重访周期短等优势, 已成为国土资源调查、农业林业遥感监测、国家重大工程建设等领域使用的重要数据源之一。以中巴经济走廊为研究区域, 选取 GF-1 多光谱宽幅覆盖 (wide field of view, WFV) 数据进行对比试验, 重点分析了影响遥感影像应用的 2 个关键因素: 如何提高遥感影像的几何定位精度和影像真彩色合成方式。研究结果表明, 基于有理函数模型 (rational polynomial coefficients, RPC) 的区域网平差技术和 RGB-NIR 色彩合成模型对影像快速定位和提升视觉效果分别有良好的表现。成果正射影像 X 和 Y 方向均方根误差分别为 0.79 和 0.83 个像素; 成果影像的信息熵、平均梯度、均值和标准差等数值均有不同程度的提高, 不仅确保了影像色彩真实自然, 而且兼顾了信息细节, 影像图面效果得到较好优化。该方法有助于进一步提升 GF-1 WFV 数据在实际生产中的业务化应用。

关键词: GF-1 WFV 数据; 区域网平差; 精度; 影像真彩色增强; 中巴经济走廊

中图法分类号: TP 75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2020)02-0213-06



0 引言

高分一号 (GF-1) 卫星是中国高分系列卫星第 1 颗卫星, 自 2013 年 4 月成功发射以来, 已广泛应用于国土资源调查、农业林业遥感监测、国家重大工程建设等多个领域。特别是 16 m 宽视场的多光谱宽幅覆盖 (wide field of view, WFV) 数据, 具有幅宽大 (800 km)、综合覆盖能力强、重访周期短的特点, 使国产卫星的观测能力大幅度提升, 成为了宏观动态监测的重要数据源之一。随着国产卫星和遥感数据处理技术的迅猛发展, 以及“一带一路”倡议的推进与实施, 利用国产卫星遥感数据开展“一带一路”国家和地区的地质矿产与资源环境信息调查已成为研究热点。

如何快速获得遥感影像精确定位, 同时真实体现影像视觉效果是遥感影像应用的 2 个关键因素。目前大量学者从 SPOT 和 Landsat 等卫星数据源的

角度进行研究^[1-3], 取得的研究成果可以有效提高卫星遥感对地目标定位精度, 改善影像成果质量。但基于 GF-1 WFV 卫星遥感影像的相关研究较少。本文以中巴经济走廊为研究区域, 重点分析有理函数模型 (rational polynomial coefficients, RPC) 的区域网平差技术和 RGB-NIR 色彩合成模型对 GF-1 WFV 卫星遥感影像的几何定位精度以及影像真彩色增强效果的影响。在此基础上, 制作完成中巴经济走廊卫星遥感影像图, 旨在为 GF-1 WFV 卫星遥感影像的深入应用提供方法技术支持。

1 研究区概况

中巴经济走廊位于南亚次大陆西北部, 包含巴基斯坦全境及其至我国新疆维吾尔自治区喀什的沿线区域, 南濒阿拉伯海, 东接印度, 西北与阿富汗相邻, 西与伊朗毗连。具有热带沙漠、热带季风、高山高原以及温带大陆性等 4 种气候特点, 生态系统多样, 自然资源丰富。该走廊位于特提斯成矿域欧亚

收稿日期: 2019-07-12; 修订日期: 2019-10-10

基金项目: 国家重点研发计划课题“典型地形要素自动识别与快速提取技术”(编号 2016YFB0501403) 资助。

第一作者: 王懿哲 (1986-), 女, 工程师, 主要从事遥感影像数据处理研究。Email: wangyizhe@lasac.cn。

通信作者: 刘 国 (1985-), 男, 工程师, 主要从事地理信息科学研究。Email: liuguo@cgl.org.cn。

板块和印度板块之间,具备产出大型超大型金属矿床的良好地质条件,地质找矿前景良好。但因其穿越新构造运动活跃、变形强烈的地区,工程地质条件非常复杂,加之海拔较高、冰川发育、地形崎岖陡峻,滑坡、崩塌、雪崩等地质灾害多发,工程建设的难度很大。遥感卫星影像可以直观反映地物、地形和地貌特征,有助于快速为中巴经济走廊规划和建设提供基础影像资料,进而为开展地质矿产与资源环境信息调查提供数据保障。

2 处理方法

2.1 区域网平差模型

GF-1 WFV 数据正射校正的核心算法是基于 RPC 模型的区域网平差。直接获取的卫星传感器位置和姿态参数精度存在误差,会造成 RPC 模型存在较大的系统误差。为了消除这种系统误差带来的影响,可以通过影像之间的约束关系提高定位精度。根据 RPC 参数以及该点在多幅影像上的量测坐标计算出地面坐标的初值,构建影像间的仿射变换关系。通过已知控制点的地面坐标及在影像上的量测坐标,计算每幅影像的仿射变换参数以及所有连接点的地面坐标。将更新后的控制点和连接点输入区域网平差模型建立的误差方程,列出每个控制点和连接点的误差方程后,采用直接列改化法方程的策略,消除一类连接点地面坐标未知数,只保留像面的变换系数,然后采用和传统光束法平差一样的模式进行平差^[4-8]。

2.2 RGB-NIR 色彩合成方法

采用光谱波段融合增强方法,充分利用影像拍摄时的大气条件对光谱特征进行改正,通过把近红外(NIR)波段的光谱信息融入到红光(R)、绿光(G)、蓝光(B)波段中,重新组合成真彩色影像。

近红外波段能较好地展示地物的亮度信息,与彩色影像的亮度信息成正比,并且近红外影像具有很强的微小细节表现能力,与可见光影像相比较少受到大气影响^[9]。为了提高影像的清晰度,可以将可见光中融入近红外波段。考虑到植被对近红外波段的反射能力强,因此选择适当的线性关系模型将近红外波段加入绿光波段,使植被的绿色信息更加突出,可以有效地避免植被、水体等地物不易区分的状况,从而提高影像季节特征。

根据 GF-1 WFV 数据的波段特征,采用处理流程如图 1 所示,得到纹理清晰、地物层次丰富、符合人体视觉习惯的真彩色遥感影像。

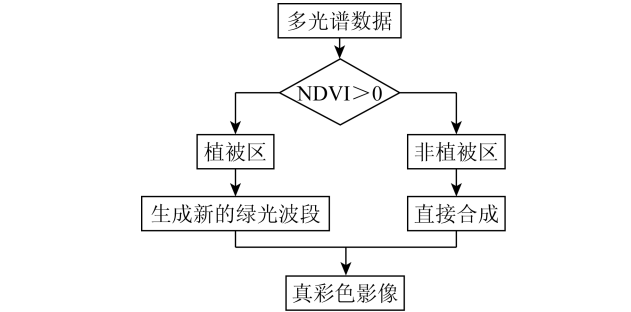


图 1 RGB-NIR 色彩合成方法流程
Fig. 1 Flowchart of RGB-NIR transformation method

其中新的绿光波段计算公式为:

$$B'_G = aB_G + (1 - a)B_{NIR} \quad (1)$$

式中: B'_G 为新的绿光波段; B_G 为原绿光波段; B_{NIR} 为原近红外波段; a 为权重值,根据研究区特点,本文权重值 $a = 0.75$ 。

3 应用实例

3.1 数据选择

本研究共选取 2017—2017 年间获取的 64 景 GF-1 WFV 影像,100% 覆盖中巴经济走廊区域,相邻影像重叠度不少于整景的 15%。经优选的 WFV2 和 WFV3 相机数据质量较好,单景云量覆盖均不大于 10%。

采用全球 90 m 空间分辨率的数字高程模型作为高程参考,全球 15 m 空间分辨率经过正射纠正的 Landsat8 OLI 影像作为数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)参考,进行数据的正射校正。

3.2 检查点、控制点选取

图 2 为检查点和控制点分布图。

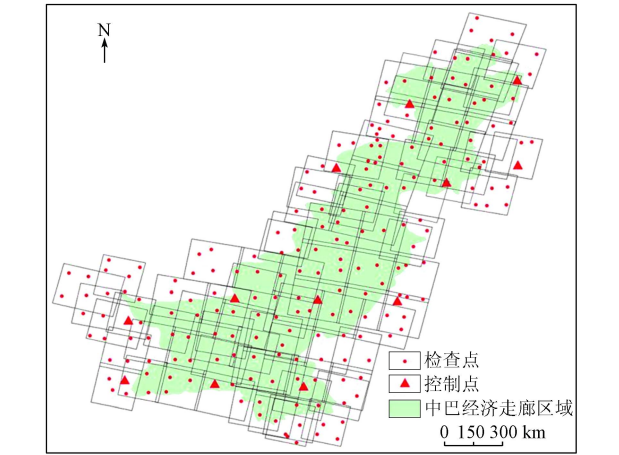


图 2 检查点和控制点分布
Fig. 2 Distribution of check points and control points

为评价 GF-1 WFV 正射影像的定位精度,在参考 DOM 上以 100 km 搜索半径均匀地随机采集物方

点 218 个。由于研究区形状不规则,又采用 500 km 网格划分的方法从 218 个物方点中选取 12 个作为控制点参与平差计算,其余点作为检查点用于精度评价。然后进行下列 4 组实验:①利用 RPC 参数进行单景影像无控制点定向;②利用选取的 12 个控制点进行绝对定向;③无控制点区域网平差;④利用 12 个控制点参与平差计算。

3.3 正射校正结果分析

4 组实验的结果如表 1 所示。由表 1 可以看出原始 RPC 计算结果 X 方向均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 2.74 像素, Y 方向 RMSE 为 5.31 像素,表明采用 RPC 计算影像位置存在较大偏差,需要加入控制点。加入控制点校正后的影像 X

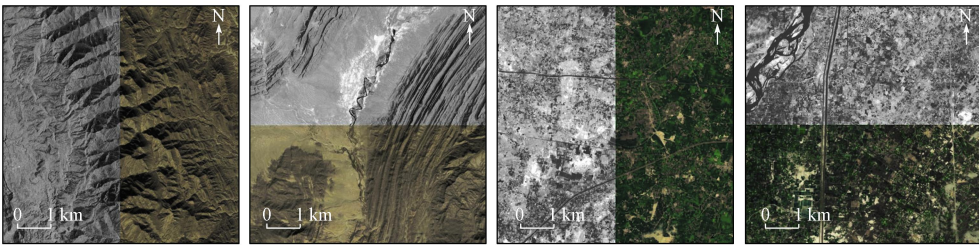
方向 RMSE 为 1 像素, Y 方向 RMSE 为 3.2 像素,精度较原始 RPC 计算结果有一定改善。为了验证区域网平差对影像精度的影响,分别采用无控制点区域网平差和有控制点区域网平差 2 种方法的计算结果与控制点正射纠正结果进行比较。无控制点区域网平差结果 X 方向 RMSE 为 1.38 像素, Y 方向 RMSE 为 3.56 像素与第 2 组有控制点的正射校正精度相差不大。加入控制点后平差结果 X 方向 RMSE 为 0.79 像素, Y 方向 RMSE 为 0.83 像素,定位精度明显提高。表明加入控制点的区域网平差可提高 GF-1 WFV 影像的绝对定位精度,有效消除影像系统误差。

表 1 各组实验结果
Tab. 1 Results of different methods

实验方案	控制点个数	检查点	X 方向/像素			Y 方向/像素		
			RMSE	最大值	均值	RMSE	最大值	均值
1	—	218	2.74	10.18	2.73	5.31	43.21	4.47
2	12	206	1.00	4.03	0.99	3.20	8.82	1.99
3	—	218	1.38	4.79	1.27	3.56	9.67	1.49
4	12	206	0.79	3.32	0.78	0.83	4.68	0.69

有控制点区域网平差生产的正射影像 X 和 Y 方向 RMSE 均控制在 1 像素以内,检查点的相对定向精度的一致性良好。为进一步验证有控制点区域网平差解算后的正射影像与控制影像精度的一致性。使用遥感软件利用卷帘模式显示,选取多处正射影像与控制影像进行比较,发现无论在山区还是

平原,中误差保持在 1 像素以内,对比结果如图 3 所示。正射影像精度结果能够满足 1:25 万以下比例尺自然地理、资源环境遥感解译要求,不仅有助于根据以往资料进行对比解译及成果图件的补充和修编,而且便于利用多期影像开展遥感动态监测,精准圈定矿业活动、城市扩展、荒漠化、岛礁等变化信息。



(a) 山区 Y 方向精度对比 (b) 山区 X 方向精度对比 (c) 平原 Y 方向精度对比 (d) 平原 X 方向精度对比

图 3 影像精度目视检查情况示例
Fig. 3 Example of accuracy shown in vision

3.4 影像增强

为验证前文提到的真彩色合成方法的有效性,选取含有水系、植被、居民点、道路等要素的典型区域进行试验。通过主观定性评价和客观定量评价,比较 3 种常用的色彩合成模型对 GF-1 WFV 数据的影响:①模型 1,用影像本身的红光、绿光和蓝光波段按照 RGB 通道进行组合;②模型 2,通过加权运算把近红外波段的光谱信息融入到绿光波段中,并和原始的红光、蓝光波段重新组合;③模型 3,将

真彩色增强的操作对象固定在植被区^[10-11],首先利用基于归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 区分植被区和非植被区,仅在植被区对绿光波段和近红外波段进行加权计算后替换原来的绿光波段,然后进行波段合成。3 种模型的效果对比如图 4 所示。从图 4 中可以看出:模型 1 合成影像整体亮度偏暗、色调偏紫,建筑用地、耕地、河流水面、植被等重要信息边界不易分辨;模型 2 将近红外波段融入到绿光波段,这种方法得到的影

像层次感增强,植被区域效果较好,整体效果有明显改善,但由于合成时是对整幅图像进行统一处理,在改善植被区域的同时,水域会产生新的色差;模型3

将植被区与非植被区分别合成,在不影响水体和其他地类色调的情况下,使植被区域颜色得到改善,接近自然色。

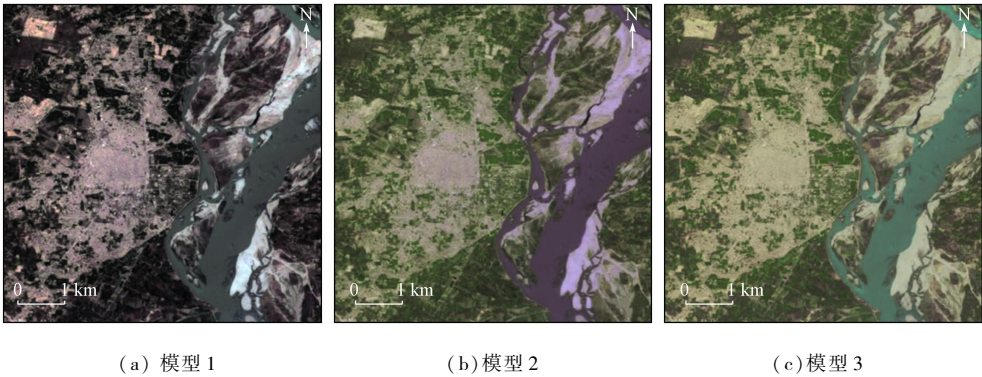


图 4 GF-1 WFV 影像真彩色合成效果对比

Fig. 4 Effect comparison of different natural color simulating methods of GF-1 WFV

本文统计了增强前后绿光波段的信息熵、平均梯度、均值和标准差。信息熵可有效衡量影像整体信息量,信息熵越大,信息越丰富^[12];平均梯度表示了影像中细节信息丰富程度,进而反映影像空间与纹理信息,平均梯度越大,则影像越清晰;均值反映影像中地物的平均反射强度;标准差反映了灰度相对于灰度均值的离散情况,标准差越大,灰度级分布越分散,图像的反差越大,有利于各类信息的提取^[13]。从表2可以发现,模型3增强后的绿光波段信息熵更接近模型1中原始影像绿光波段的信息熵,均值、标准差、平均梯度均优于模型2。说明采用模型3的方法处理后,影像信息丰富,细节清晰,地物可分性较好。

均能得到体现。通过自动提取镶嵌线,调整影像亮度、对比度、色彩、色调、色相和饱和度等方式,确保相邻景影像的色彩、亮度和对比度等保持一致,镶嵌后影像纹理颜色自然过渡,无明显的色差,制作完成了中巴经济走廊区域1:25万GF-1WFV遥感影像镶嵌图(图5),该图可视性强,应用展示效果较好。

表 2 定量评价参数统计

Tab. 2 Statistics of quantitative evaluation parameters

模型	信息熵	平均梯度	均值	标准差
模型 1	6.104	3.469	81.870	59.875
模型 2	5.958	3.308	88.154	60.891
模型 3	5.979	3.578	106.940	71.723

综合以上主观评价和定量分析结果,可以看出模型3增强后的真彩色影像在地物类型可分性、图像整体信息量和局部细节等方面均有较好的效果,影像色彩饱和度适中,地物层次分明、光谱特征有效增强,可以帮助解译者初步建立地理、生态地质环境等要素遥感解译标志,配合人机交互解译,提取相关要素的信息。

3.5 影像镶嵌图制作

在完成正射校正、影像色彩增强的基础上,根据地理坐标对影像进行镶嵌拼接。镶嵌时根据研究区内地形、地貌、时相等因素的不同,以色彩过渡自然,还原原始色调,影像纹理清晰为原则,确保不同地貌

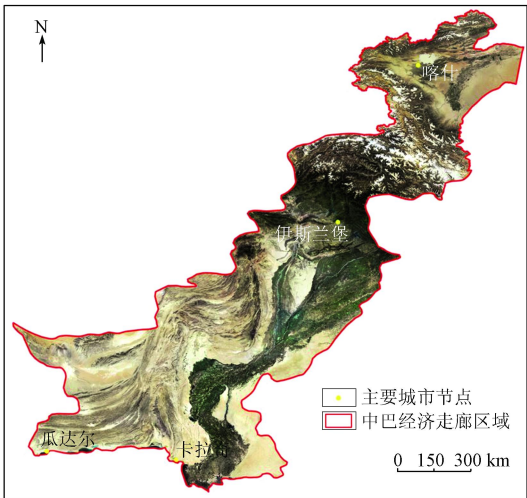


图 5 中巴经济走廊遥感影像

Fig. 5 Remote sensing image of China - Pakistan Economic Corridor

利用GF-1WFV影像图可将研究区的港口、发电站、机场、水库等大型项目周边自然资源分布状况以及工程建设施工的进展概况进行直观展示,为工程建设提供服务。图6展示了部分重大项目工程和重要典型区域的影像局部放大效果。图6(a)中瓜达尔港位于巴基斯坦俾路支省西南沿岸,是“一带”和“一路”的地理交汇点,也是中巴经济走廊建设的枢纽,紧扼多条海上重要航线的咽喉,战略意义重大。从影像上可清晰看到工程实施情况。图6(b)

中 Quaid - E - Azam 太阳能园以巴基斯坦国父穆罕默德·阿里·真纳命名,位于旁遮普省 200 余 hm^2 的平坦沙漠中,建成后将成为全球单体规模最大的光伏项目,也是中巴两国领导人亲自见证签署的中巴经济走廊第一个实施项目,影像图上纹理规则,边界清晰。图 6(c) 中塔贝拉水电站位于巴基斯坦印度河干流上,是印度河西水东调的关键工程,是巴基斯坦最大的水电站,它横穿了喜马拉雅大断裂带,地质条件极为复杂,影像清晰地反映了其周围的地形

地貌。图 6(d) 中卡西姆港燃煤发电站位于卡拉奇东南部市郊的沿海地区,是中巴经济走廊首个落地能源项目,较大缓解了巴基斯坦电力短缺现状,从影像上可大致判断电站污染物排放状况。图 6(e) 中盐岭地区位于巴基斯坦博德瓦尔高原南部山脉,因大量岩盐沉积而得名,该地区的新生代演化与印度—欧亚板块的俯冲—碰撞活动息息相关,对我国青藏高原的隆升意义重大。

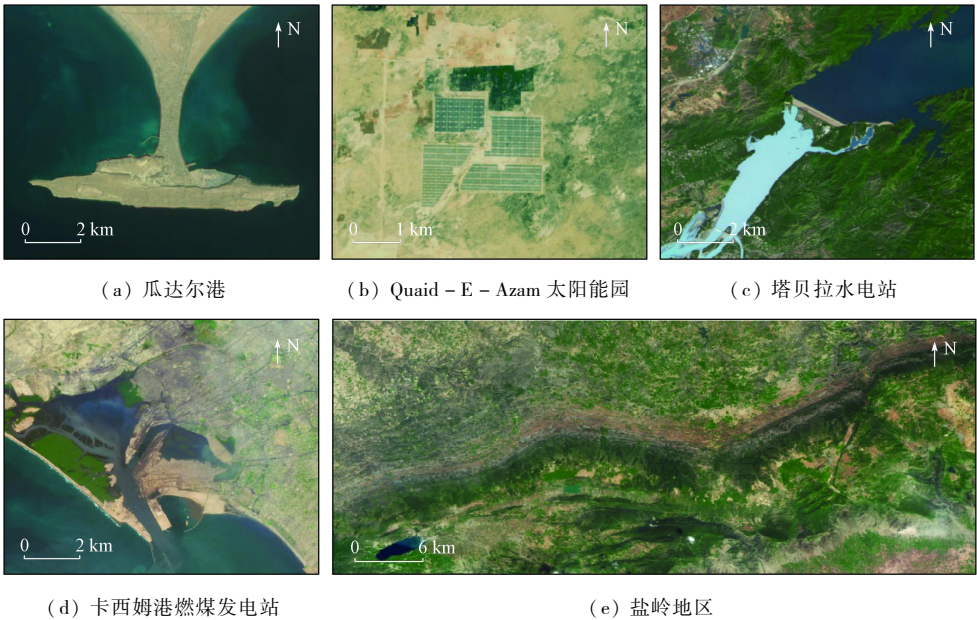


图 6 GF - 1 WFV 影像局部效果
Fig. 6 Local effects of GF - 1 WFV image

4 结论

本文以中巴经济走廊为研究区域,通过选取 64 景 GF - 1 WFV 数据进行测试,得出以下结论:

- 1)综合评价了基于 RPC 模型的区域网平差技术对 GF - 1 WFV 影像定位精度的影响,结果表明校正精度满足 1: 25 万以下比例尺自然地理、资源环境遥感解译要求。
 - 2)针对 GF - 1 WFV 数据影像亮度对比度偏低的问题,提出以 RGB - NIR 色彩合成模型增强光谱信息,增强后的真彩色影像在光谱保真度和空间细节上均有较好表现,可以帮助解译者快速准确识别地理、生态地质环境等要素信息。
 - 3)完成了中巴经济走廊遥感影像镶嵌图,可为中巴经济走廊的工程规划、选线、设计、施工和运营管理提供高质量卫星遥感图像数据和科学依据。
- 此外,基于 RPC 模型的区域网平差技术以及 RGB - NIR 色彩合成模型对 GF - 1 WFV 卫星遥感影像的几何定位精度以及影像真彩色增强效果技术

的成熟应用,将有助于建立基于国产卫星数据的境外遥感调查技术体系,同时增强遥感调查成果的境外推广服务力度,提升我国卫星遥感技术的影响力,促进我国国产卫星数据和遥感应用技术的输出。

参考文献(References):

[1] 邵永社,李 晶,张绍明,等. 基于线特征的 SPOT 影像几何纠正方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010,38(8):1249 - 1254.
Shao Y S,Li J,Zhang S M,et al. Rectification methods based on line features for SPOT imagery [J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2010,38(8):1249 - 1254.

[2] Fraser C S,Dial G,Grodecki J. Sensor orientation via RPCs[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2006,60(3):182 - 194.

[3] Fontana F M A,Trishchenko A P,Khlopenkov K V,et al. Impact of orthorectification and spatial sampling on maximum NDVI composite data in mountain regions[J]. Remote Sensing of Environment,2009,113(12):2701 - 2712.

[4] 张 过,李德仁,袁修孝,等. 卫星遥感影像的区域网平差成图精度[J]. 测绘科学技术学报,2006,23(4):239 - 242.
Zhang G,Li D R,Yuan X X,et al. The mapping accuracy of satel-

lite imagery block adjustment [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2006, 23 (4) : 239 – 242.

[5] 张红英. 卫星遥感影像视觉效果增强模型及方法研究 [D]. 武汉: 中国地质大学 (武汉), 2018.

Zhang H Y. The research on models and methods for the visual effect enhancement of satellite remote sensing imagery [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.

[6] 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. Triple linear – array imaging geometry model of “ZY – 3” surveying satellite and its validation [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41 (2) : 191 – 198.

[7] 李德仁, 张 过, 江万寿, 等. 缺少控制点的 SPOT – 5 HRS 影像 RPC 模型区域网平差 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2006, 31 (5) : 377 – 381.

Li D R, Zhang G, Jiang W S, et al. SPOT – 5 HRS satellite imagery block adjustment without GCPS or with single GCP [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31 (5) : 377 – 381.

[8] 李德仁, 郑肇葆. 解析摄影测量学 [M]. 北京: 测绘出版社, 1992: 174 – 184.

Li D R, Zheng Z B. Analytical photogrammetry [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1992: 174 – 184.

[9] 丁慧梅. 利用近红外提高多光谱遥感图像颜色自然性研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2016.

Ding H M. Using near infrared to improve color naturalness of multi – spectral images [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2016.

[10] 张 伟, 郑旭霞. 基于植被指数的多光谱影像真彩色合成方法 [J]. 测绘与空间地理信息, 2010, 33 (6) : 110 – 113.

Zhang W, Zheng X X. A method of true color synthesis of multi – spectral images based on vegetation index [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2010, 33 (6) : 110 – 113.

[11] 孙家波, 杨建宇, 张 超, 等. 应用“资源一号”02C 卫星数据的模拟真彩色技术 [J]. 国土资源遥感, 2013, 25 (4) : 33 – 39. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2013. 04. 06.

Sun J B, Yang J Y, Zhang C, et al. Simulating true color technology applied to “ZY – 1” 02C satellite [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25 (4) : 33 – 39. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2013. 04. 06.

[12] 孙 攀, 董玉森, 陈伟涛, 等. 高分二号卫星影像融合及质量评价 [J]. 国土资源遥感, 2016, 28 (4) : 108 – 113. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2016. 04. 17.

Sun P, Dong Y S, Chen W T, et al. Research on fusion of GF – 2 imagery and quality evaluation [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28 (4) : 108 – 113. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2016. 04. 17.

[13] 孙 文, 尤红建, 傅兴玉, 等. 基于非线性 MASK 的遥感影像匀光算法 [J]. 测绘科学, 2014, 39 (9) : 130 – 134.

Sun W, You H J, Fu X Y, et al. A non – linear MASK dodging algorithm for remote sensing images [J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39 (9) : 130 – 134.

Research on ortho – rectification and true color synthesis technique of GF – 1 WFV data in China – Pakistan Economic Corridor

WANG Yizhe¹, LIU Guo^{2,3}, GUO Li¹, ZHAO Shihu¹, ZHANG Xueli⁴

(1. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China; 2. National Engineering Research Center for Geographic Information System, Wuhan 430074, China; 3. The National Geological Library of China, Beijing 100083, China; 4. East China Mineral Exploration and Development Bureau, Nanjing 210007, China)

Abstract: With its advantages of wide breadth, strong comprehensive coverage and short revisit period, GF – 1 satellite has become one of the important data sources used in land and resources survey, remote sensing monitoring of agriculture and forestry, and major national engineering construction. In this study, the authors took the China – Pakistan Economic Corridor as an example, selected the GF – 1 WFV data for comparative experiments, and analyzed two key factors that affect the application of remote sensing images, i. e., how to improve the geometric positioning accuracy of remote sensing images and the true color image synthesis method. The experimental results indicate that the block adjustment model based on rational function model technology and RGB – NIR color synthesis model have good performance in image accuracy and visual effect of imagery respectively. The X – direction residual and Y – direction residual of ortho – image were improved to 0.79 pixels and 0.83 pixels. The information entropy, average gradient, mean and standard deviation of the resulting images were improved in varying degrees. This method could not only ensure the true and natural color of the image but also keep the information details, with the image surface effect better optimized. This test method is a better strategy for large scale data application in actual production.

Keywords: GF – 1 WFV data; block adjustment; accuracy; true color image enhancement; China – Pakistan Economic Corridor