

引用格式: Hu Rui, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, *et al.* Comparison of Radiometric Quality of GF-1 Satellite Image in Snow-covered Area of Manasi River Basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(1): 47-54. [胡瑞, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 玛纳斯河流域积雪区 GF-1 卫星图像辐射质量比较[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(1): 47-54.]

doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2018.1.0047

玛纳斯河流域积雪区 GF-1 卫星图像辐射质量比较

胡 瑞, 肖鹏峰, 冯学智, 张学良

(江苏省地理信息技术重点实验室, 卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室,
南京大学地理与海洋科学学院地理信息科学系, 南京 210023)

摘要: 卫星图像辐射质量与其对地观测能力息息相关, GF-1 是我国高分辨率对地观测系统的首发星, 在山区积雪监测中有着重要的应用价值。使用新疆天山玛纳斯河流域积雪区 GF-1 图像与相同区域、相近时间(2 d 内)成像的国外同类高分辨率卫星 SPOT-6 和 RapidEye 图像进行评价与比较, 衡量 GF-1 在山区积雪区域的图像辐射质量水平, 为 GF-1 的应用以及后续高分系列卫星载荷的研制提供参考。利用遥感图像辐射质量评价中常用的图像统计特征、平均梯度、信息熵和信噪比(SNR)指标对 3 种卫星图像进行比较, 结果表明: GF-1 图像与其他两种卫星的图像相比在图像统计特征和平均梯度方面表现最佳; 但由于辐射量化级数的制约, 其信息熵相比其他两种卫星还存在一定差距; GF-1 在对积雪成像时局部会出现过饱和现象, 从而导致部分区域的局部标准差值为 0, 在去除这些异常值后对 GF-1 图像的 SNR 进行重新估计, 发现其在蓝光、红光和全色波段显著优于其他卫星, 但绿光波段和近红外波段与 SPOT-6 有一定差距, 与 RapidEye 相仿。总体来说, GF-1 在山区积雪区的图像辐射质量基本达到了国际同类卫星的水平, 部分指标甚至显著优于其他卫星, 但在辐射量化级数和传感器所接受辐射能量范围方面还有一定差距, 在部分积雪区会出现过饱和现象, 后续可针对这些方面进行改善。

关键词: GF-1; SPOT-6; RapidEye; 图像辐射质量; 积雪

中图分类号: TP 75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2018)01-0047-08

1 引 言

高分辨率卫星可以更清晰地对地表状况进行监测, 是国家重要的基础性和战略性资源。GF-1 是我国高分辨率对地观测系统的首发卫星, 目的在于解决高空间分辨率、高时间分辨率、多光谱与宽覆盖相结合等一系列技术难题^[1]。积雪作为冰冻圈的重要组成部分, 在气候系统中作用显著^[2]。山区积雪是我国西北干旱与半干旱地区重要的淡水资源, 在国民经济建设和可持续发展中有着重要地位^[3-4]。遥感在气象资料不足和气候条件恶劣的山区是重要的

积雪监测手段, 而遥感图像辐射质量与其监测能力息息相关, 因此, 对 GF-1 在山区积雪区的图像辐射质量进行客观评价并与国际同类高分辨率卫星进行比较尤为重要。

目前国内外关于遥感卫星图像辐射质量评价的研究主要有以下三个方面:

第一个方面为在轨卫星图像辐射质量评价与比较, 一般用于对卫星发射后的图像进行系统评测验证并与其他卫星图像比较。SPOT 系列卫星在进行图像质量评价时分为几何质量和辐射质量两部分, 其中辐射质量评价主要集中在信噪比(Signal

收稿日期: 2017-10-15; 修订日期: 2018-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671344, 41601366)。

作者简介: 胡 瑞(1996—), 男, 山西偏关人, 硕士研究生, 主要从事积雪遥感与数字图像处理研究。E-mail: hurui@smail.nju.edu.cn。

通讯作者: 肖鹏峰(1979—), 男, 湖南宁乡人, 副教授, 主要从事积雪遥感与数字图像处理研究。E-mail: xiaopf@nju.edu.cn。

Noise Ratio, SNR) 和调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 方面^[5-6]; 波段相关性、信息量、卫星间辐射相似性和 MTF 等指标^[7-9] 被用于 RapidEye 卫星星座在轨性能分析和图像辐射质量评估; 相关研究从辐射校正、动态范围线性响应、SNR、空间分辨率以及 MTF 等方面对我国 GF-1 全色波段图像进行辐射质量评价^[10-11]; SNR 和 MTF 等指标也被用在 IKONOS 卫星图像辐射质量评价中^[12]; 国内学者使用图像统计特征、信息量、SNR、平均梯度和地面分解力等指标对 Hyperion、HJ-1B CCD 等卫星图像进行辐射质量评价^[13-14]; QuickBird、WorldView-1 和 Cartosat-1 卫星的图像辐射质量评价与比较研究用到 SNR 和 MTF 指标^[15]; 也有学者通过视觉评价、噪声估计和 MTF 对 GeoEye-1, WorldView-2 和 Pléiades-1A 卫星进行图像辐射质量比较分析^[16]; 图像统计特征、SNR、信息熵、图像清晰度和有效瞬时视场等指标^[17] 被用来对 CBERS-02B、SPOT-5 和 P5 图像进行辐射质量比较; 此外, 地面分解力、清晰度、SNR、反差和图像统计特征等指标^[18-19] 也出现在 CBERS-01 和 IRS-P6 等卫星图像与 TM 图像的辐射质量比较研究中。

第二个方面是遥感图像融合后对融合图像进行辐射质量评价, 一系列研究使用平均梯度^[20-24] 和信息熵^[22-24] 等指标对融合前后的图像进行辐射质量评价与比较。

第三个方面是从计算机视觉领域引入一系列指标对遥感影像进行评价。主要分为主观评价和客观评价两大部分, 而客观评价又由全参考评价、半参考评价以及无参考评价 (又称盲参考图评价) 组成^[25-26]。全参考方法需要提供一个没有失真的原始图像来进行对比, 半参考方法需要失真图像的一些特征与原始图像的对应特征进行比较来评价, 无参考方法则不需要原始的未失真图像。对于本文研究而言, 图像辐射质量评价比较是没有原始未失真图像的, 所以可以归为无参考评价。在这一方面, 一些学者结合遥感影像特点从机器学习和计算机视觉领域出发提出了一系列评价方法^[27-29], 这些评价指标是通过衡量同一种传感器图像的失真程度而提出的新指标, 针对特征地物范围进行评价 (1 km² 内), 本文为多个传感器图像之间、较大范围的图像辐射质量评价比较, 因此未选用该方面的指标。

综上, 第一方面主要在于图像几何精度和图像辐射质量的评价, 图像辐射质量一般由图像统计特

征、信息熵、SNR 和 MTF 等指标来衡量; 第二个方面比较通用的指标有衡量清晰度的平均梯度和衡量信息量的信息熵等; 第三个方面主要是遥感与计算机视觉学科交叉针对一定假设提出的衡量图像失真程度的新指标, 尚未广泛使用。

本文所研究图像质量主要为辐射质量, 不涉及几何精度。研究区为高海拔山区, 未找到理想的线状目标及边缘, 无法进行 MTF 估计; 第三方面的指标不适用于本研究, 不予选取。经过综合考虑, 选取第一方面和第二方面中常用的图像统计特征、平均梯度、信息熵和 SNR 指标, 对 GF-1 与国外同类高分辨率卫星 SPOT-6 和 RapidEye 在新疆天山玛纳斯河流域积雪区的图像辐射质量进行评价与比较研究。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

新疆天山北麓的玛纳斯河是准噶尔盆地最长的内陆河, 全长约 324 km。玛纳斯河流域水汽主要来源为西风环流, 也受到来自北冰洋干冷气流的影响。远离海洋和湖泊的地理位置和高山环绕的地形条件制约了水汽的进入, 从而导致该地区气候干旱, 夏季炎热、冬季寒冷, 蒸发量大而降雨量小, 属于典型的大陆性气候。该地区冬季长达 4 个多月, 气温较低, 无大风, 积雪相对稳定, 利于冬小麦越冬, 是北疆主要的冬小麦产区。季节性积雪消融产生的径流对玛纳斯河的春季径流量起着极为重要的调节作用, 是天山北坡农业灌溉的宝贵水源^[30]。

玛纳斯河流域总面积约 5 960 km², 单幅 GF-1 PMS 影像无法覆盖整个流域, 为研究国产高分辨率卫星图像在高海拔山区的积雪识别能力以及辐射质量水平, 结合所购买的 RapidEye 和 SPOT-6 卫星图像的共同覆盖范围, 剔除有云区并尽可能包含多种自然景观类型, 最终决定在流域内选取西支源头区域作为研究区 (图 1 框线部分)。

研究区面积约 993 km², 降水充沛, 植被覆盖广。高程范围 2 572~5 250 m, 分布着山地草原带、山地森林带、高山草甸带以及冰雪带, 为典型的山区环境, 具有较好的代表性。

2.2 数据资料

2.2.1 GF-1 卫星数据

我国 GF-1 卫星于 2013 年 4 月 26 日成功发射, 搭载了两种传感器, 一是全色多光谱 (Panchromatic Multispectral, PMS) 传感器, 全色波段空间分辨率

2 m,多光谱波段空间分辨率 8 m,辐射量化级数 10 bit;二是中分辨率宽幅(Wide Field Viewer, WFV)相机,空间分辨率 16 m。4 台 WFV 相机拼

接幅宽高达 800 km,可在 4 d 内对地球进行完整覆盖,从而实现了高空间分辨率、高时间分辨率、多光谱与宽覆盖的结合。本文使用 GF-1 卫星 PMS 相

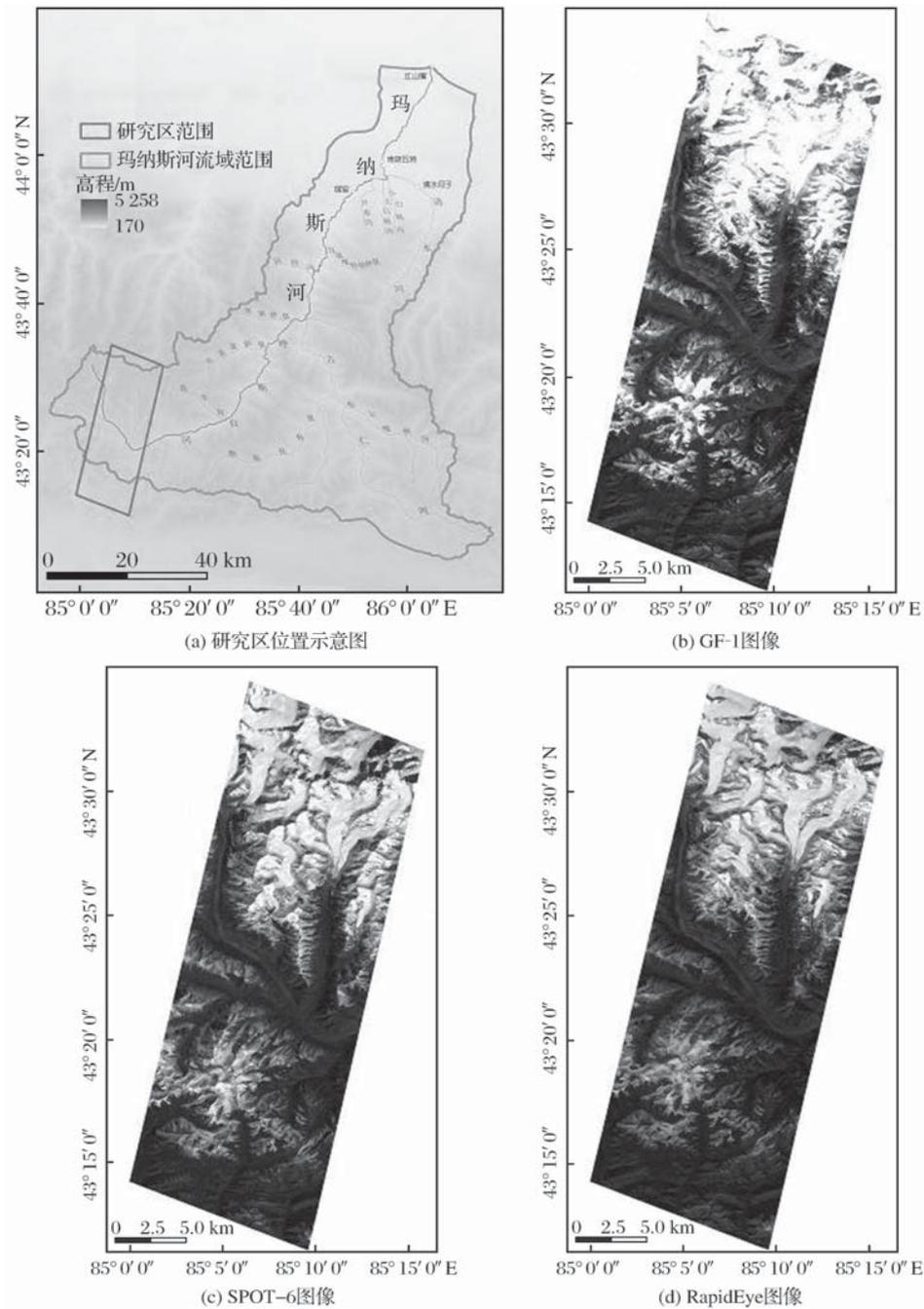


图 1 研究区位置与卫星图像
Fig.1 Study area location and satellite images

机 Level 1A 产品,成像日期为 2013 年 9 月 25 日。

2.2.2 RapidEye 卫星数据

RapidEye 为德国商用卫星,由 5 颗装有相同传感器的卫星在同一轨道平面上组成,空间分辨率为 6.5 m,辐射量化级数 12 bit。RapidEye 标准数据产

品分为 Level 1B(RapidEye Basic Product)和 Level 3A(RapidEye Ortho Product)两种级别,Level 1B 产品对原始影像进行辐射标定,并乘以 100 存储为 16 bit 无符号整形数据。本文使用 RapieEye Level 1B 产品,成像日期 2013 年 9 月 24 日。

2.2.3 SPOT-6 卫星数据

SPOT-6 卫星于 2012 年 9 月 9 日发射,是法国 Astrium Services 公司的卫星,幅宽 60 km,轨道高度 694 km,全色波段空间分辨率 1.5 m,多光谱波段空间分辨率 6 m。SPOT-6 与 SPOT-7 为双子星,处于同一轨道高度,彼此相隔 180°,同时与分辨率高达 0.5 m 的 Pleiades 1A & 1B 卫星处于同一轨道平面,4 颗卫星彼此相隔 90°构成星座,从而增强了数据获取能力。本文使用 SPOT-6 的 Bundle Primary Product,辐射量化级数 12 bit,成像时间为 2013 年 9 月 23 日。

2.2.4 数据预处理

由于 RapidEye Level 1B 产品已经进行辐射标定且乘以 100 存储为无符号 16 bit 整形数据,因此需对 GF-1 和 SPOT-6 图像进行同样的标定处理。

由于各个卫星的轨道高度、图像获取时太阳角度以及卫星角度、天气情况以及传感器波谱响应等各不相同,因此从辐亮度的物理意义上来说是不相等的,无法直接进行比较,故将 3 种卫星的数据进行最小—最大值拉伸,统一到 0~100 区间。

3 评价方法

3.1 图像统计特征

图像统计特征主要根据一系列的统计指标来对图像辐射质量进行定量描述,主要选取均值、标准差、偏斜以及陡度 4 个统计特征。

$$G = \frac{1}{(m-1)(n-1)} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} \sqrt{\frac{(L(i,j) - L(i+1,j))^2 + (L(i,j) - L(i,j+1))^2}{2}} \quad (5)$$

其中: m 和 n 分别为图像行、列数, $L(i,j)$ 表示第 i 行第 j 列的亮度值。

3.3 信息熵计算

信息熵是评价图像信息量涵盖程度的重要指标,信息熵越大说明图像涵盖的信息量越大,总体分布的不确定性越大,根据香农信息理论,信息熵公式如下所示:

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} P_i \log_2 P_i \quad (6)$$

其中: P_i 为像元亮度值 i 的概率, L 为图像的亮度级数。

3.4 SNR

通过局部平均值和局部标准差法来估计 3 种卫星传感器的 SNR^[31],相比于均匀区域法和地统计法估计 SNR,本方法可利用整幅图的像元信息并可实现自动化计算,计算公式如下:

均值 M 是图像所有像元值的和与像元总数的比值,反映了图像总体的亮度特征;标准差 STD 反映了亮度相对于亮度均值的离散度,在某种程度上可以评价图像对比度的大小,标准差越大,则说明图像亮度分布越分散,从图像可以得出更多的信息,标准差小说明图像对比度小,色调单一;偏斜 S 用于表示图像直方图分布形状偏离均值分布的程度,偏斜度越大,偏离程度越大,值为正表示向大于均值一侧偏斜,值为负表示向小于均值的一侧偏斜;陡度 K 用于评价图像直方图分布的集中程度,值越大,图像直方图越集中,分布越窄。4 个指标的计算公式如下:

$$M = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T L(i) \quad (1)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (L_2(i) - M)^2} \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (L(i) - M)^3 / STD^3 \quad (3)$$

$$K = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (L(i) - M)^4 / STD^4 \quad (4)$$

其中: T 为图像像元总数, $L(i)$ 为图像第 i 个像元的亮度值。

3.2 平均梯度

平均梯度 G 反映图像对细节反差表达的能力,是衡量图像清晰度的指标,其值越大表明图像越清晰,公式如下:

$$LM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L \quad (7)$$

$$LSD = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (L - LM)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$SNR = \frac{LM_{\text{mean}}}{LSD_{\text{max}}} \quad (9)$$

其中: N 为局部像元数, LM 为局部平均值, LSD 为局部标准差, LM_{mean} 为所有 LM 的均值, LSD_{max} 为 LSD 频率分布直方图中峰值所对应的 LSD 。

4 图像质量评价结果

对 GF-1、SPOT-6 和 RapidEye 卫星图像分别计算图像统计特征、平均梯度、信息熵和 SNR 指标,结果如表 1 所示。

4.1 图像统计特征

总体来说 GF-1 均值在除近红外波段之外的各

个波段都显著高于其他两个卫星, RapidEye 最低。多光谱波段的均值随着波长的增加, GF-1 表现出下降趋势, 在近红外波段显著下降, SPOT-6 总体变化不大, RapidEye 却出现了小幅的上升趋势。

在除近红外波段之外的各个波段, 总体上 GF-1 标准差最高, SPOT-6 次之、RapidEye 最低; 随着波长的增加, 多光谱波段 GF-1 和 SPOT-6 先增加后降低, RapidEye 则呈现不断降低趋势。

表 1 图像辐射质量评价结果

Table 1 Evaluation results of image radiometric quality

卫星	波段	波长范围/nm	图像统计特征				平均梯度	信息熵	SNR
			均值	标准差	偏斜(10^{-5})	陡度(10^{-6})			
GF-1	蓝	450~520	47.47	31.82	1.49	1.56	1.90	8.81	545.51
	绿	520~590	47.52	34.44	1.21	1.14	2.52	8.25	79.97
	红	630~690	46.11	29.93	2.33	2.27	2.12	8.95	497.66
	近红外	770~890	34.62	25.84	6.76	7.10	1.76	9.25	67.47
	全色	450~900	43.60	29.41	3.61	3.03	1.76	5.81	144.69
SPOT-6	蓝	450~520	30.89	29.13	3.24	3.12	1.89	11.25	197.07
	绿	530~590	32.70	29.65	3.12	2.91	1.98	11.33	142.08
	红	625~695	32.48	28.29	3.74	3.65	1.93	11.33	144.21
	近红外	760~890	32.30	25.26	5.29	5.99	1.80	11.41	77.59
	全色	450~745	33.92	28.89	3.67	3.34	1.18	7.34	104.03
RapidEye	蓝	440~510	24.53	23.82	7.14	8.11	1.71	14.71	104.37
	绿	520~590	25.01	23.05	8.22	9.58	1.65	14.66	85.90
	红	630~685	26.37	22.38	9.21	11.03	1.72	14.45	76.42
	红边	690~730	27.86	22.56	8.83	10.51	1.46	14.18	70.50
	近红外	760~850	30.26	21.88	9.83	12.19	1.59	13.93	68.35

RapidEye 在多光谱波段的偏斜都显著高于其他两个卫星; GF-1 在可见光波段偏斜最低; 多光谱波段随着波长的增加, 偏斜都在不断上升; 全色波段 GF-1 与 SPOT-6 基本相同。偏斜都为正值, 说明各卫星各波段相对于平均值其频数分布直方图都偏向于右边分布。

RapidEye 在多光谱波段的陡度都显著高于其他两个卫星; GF-1 在可见光波段陡度最低; 多光谱波段随着波长的增加, 陡度不断上升; 全色波段 GF-1 与 SPOT-6 基本相同。

总体来说, GF-1 图像统计特征相比 SPOT-6 和 RapidEye 都有较为明显优势, 均值大, 标准差大, 偏斜程度低且陡度较低, 说明 GF-1 传感器的感光器件更灵敏, 从而使亮度值分布范围广, 标准差大, 陡度低; 且传感器对积雪区的成像适应能力较好, 总体均值较大, 图像偏斜小。

4.2 平均梯度

多光谱波段除近红外波段外, GF-1 平均梯度均为最高, RapidEye 最低, 绿光波段 GF-1 显著高于其他波段, 说明 GF-1 传感器对于地物细节变化的探测能力更强; 全色波段 GF-1 平均梯度显著高于

SPOT-6 波段, 这可能是由于 GF-1 全色波段的波长范围更宽, 与 SPOT-6 相比多覆盖了近红外波段范围, 由于波段变宽所记录不同地物细节之间的亮度差变大, 使得图像清晰度上升。

4.3 信息熵

在多光谱波段, RapidEye 信息熵最高, GF-1 最低; 各波段整体相差不大; 全色波段显著低于多光谱波段, 这可能与全色波段相比多光谱波段来说波长范围更宽, 所以像元值之间变化相对来说比较平缓, 总体分布的不确定性越小, 所以信息熵值相应较低; 全色波段 GF-1 信息熵值低于 SPOT-6, 主要原因在于 SPOT-6 辐射量化级数为 12bit 而 GF-1 为 10bit, 所以 SPOT-6 所含信息量明显大于 GF-1 数据。同理, 这也是多光谱波段 GF-1 信息熵最低的主要原因。

4.4 SNR

GF-1 图像在进行 SNR 计算时由于过饱和效应会导致 LSD 频率分布直方图值在 0 时出现一个峰值(图 2(a)), 直接由该峰值计算 SNR 将导致结果趋于无穷大, 因此将去除 LSD 为 0 区域后的图像重新进行直方图统计(图 2(b))。

在蓝光波段和红光波段,GF-1 的 SNR 显著优于 SPOT-6 和 RapidEye,在绿光和近红外波段 SPOT-6 的 SNR 最大,GF-1 和 RapidEye 相近;多光谱波段 SPOT-6 总体上优于 RapidEye,且随着波长的增加,SPOT-6 和 RapidEye 的 SNR 总体呈现下降趋势,这可能由于波长增加导致信号在传输过程中更容易受到干扰从而存在更多的噪声;全色波段 GF-1 的 SNR 优于 SPOT-6。

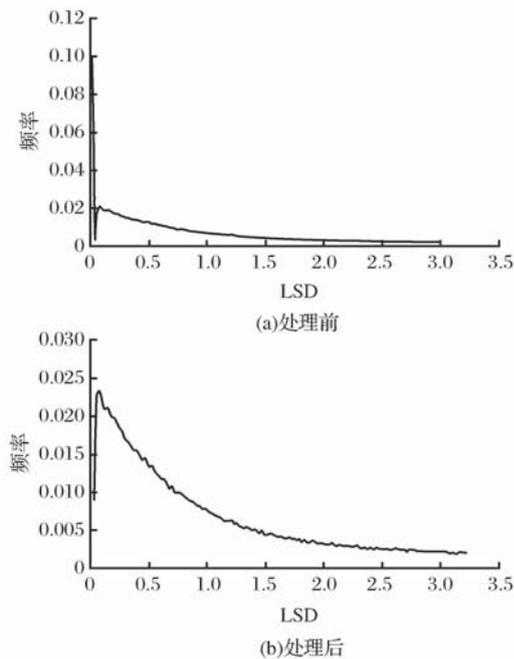


图2 处理前后直方图对比(GF-1 蓝光波段)

Fig.2 Histogram comparison before and after treatment(GF-1 blue band)

总体来说,GF-1 在蓝光、红光和全色波段的 SNR 表现最佳,说明 GF-1 传感器的这几个波段在山区积雪区成像时的抗噪声干扰能力最强,但近红外和绿光波段抗噪声干扰能力与 SPOT-6 还有一定差距,与 RapidEye 相近。多光谱波段随着波长的不断增加,SPOT-6 和 RapidEye 的 SNR 不断降低。

5 结 语

通过对 GF-1、SPOT-6 和 RapidEye 卫星图像辐射质量的评价和比较得出以下结论:

(1)图像统计特征方面,总体来说 GF-1 图像均值和标准差方面都高于其他两颗卫星,RapidEye 最低;图像偏斜和陡度方面 GF-1 也明显优于其他两个卫星,所以 GF-1 在图像统计特征方面总体来说优于 SPOT-6 和 RapidEye。

(2)平均梯度方面,GF-1 在近红外波段平均梯度稍弱于 SPOT-6,但其他波段平均梯度均最高,意

味着图像最清晰,RapidEye 总体上平均梯度最小;这表明 GF-1 在图像细节反差方面具有独到的优势,但近红外波段与 SPOT-6 相比还有一些差距。

(3)信息熵方面,GF-1 各波段信息熵与另外两颗卫星差距较为明显,这主要是由于 GF-1 相比其他两颗卫星辐射量化级数更小造成的。

(4)SNR 方面,由于 GF-1 传感器对部分积雪区成像存在过饱和现象,需要将过饱和像元去除才可估计图像 SNR。GF-1 的 SNR 指标在蓝光、红光和全色波段有着明显的优势,在绿光波段和近红外 SPOT-6 有一定差距,RapidEye 差别不大;总体而言 GF-1 的绿光波段 SNR 还有较大的提升空间。

总体来说,GF-1 在山区积雪区的图像辐射质量已经基本达到了国际同类卫星的水平,在部分指标甚至显著高于其他卫星图像,有着较强的竞争力和显著的战略价值,但在辐射量化级数和传感器所接受辐射能量范围方面还有一定的提升空间。

本研究还存在一些不足,后续研究可以从以下方面改进:①GF-1 对于积雪成像存在过饱和现象,从而对 SNR 评估有一定影响,在非积雪区开展 SNR 评价可提供更多具有参考价值的评估结果;②在相同辐射量化级数下,RapidEye 在信息熵方面优于 SPOT-6,其原因还有待研究,这对于国产卫星如何提升图像信息熵具有重要的借鉴意义;③GF-1 在绿光波段和近红外波段的 SNR 明显较低,除与本身成像能力有关外,还可能与研究区植被情况以及窗口大小等因素有关,后续工作可根据研究区地物分布特征以及更多不同大小的窗口进行研究;④由于未寻得较为理想的线状地物,MTF 估计不理想,未能作为本文的评价指标,后续研究可寻找一种适合山区 MTF 估计的方法。

参考文献(References):

- [1] Bai Zhaoguang. Technical Characteristics of GF-1 Satellite[J]. Aerospace China, 2013(8): 5-9. [白照广. 高分一号卫星的技术特点[J]. 中国航天, 2013(8): 5-9.]
- [2] Che Tao. Scientific Issues of Snow Remote Sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(1): 3-4. [车涛. 积雪遥感的科学问题[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(1): 3-4.]
- [3] Zhang Wenbo, Xiao Pengfeng, Feng Xuezh. A Study of Snow Cover Variability Using MODIS in the Typical Area of Tianshan Mountains, China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(5): 746-753. [张文博, 肖鹏峰, 冯雪智. 基于 MODIS 数据的天山典型区域积雪特征研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(5): 746-753.]

- [4] Tang Zhiguang, Wang Jian, Wang Xin, *et al.* Spatio-temporal Variation of Snow-cover in Tianshan Mountains based on MODIS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(3): 556-563.[唐志光, 王建, 王欣, 等. 近 15 年天山地区积雪时空变化遥感研究[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(3): 556-563.]
- [5] Begni G, Henry P. The SPOT Image Quality: Three Years of Results with SPOT 1 the Anticipated SPOT 2 Performances [C]// Malaga International Astronautical Federation Congress. 1989.
- [6] Meygret A, Fratter C, Breton E, *et al.* In-flight Assessment of SPOT5 Image Quality [C]// International Symposium on Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2003: 179-188.
- [7] Beckett K, Rampersad C, Putih R, *et al.* RapidEye Product Quality Assessment [C]// SPIE Europe Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2009: 74741L-74741L-10.
- [8] Schulten D, Tyc G, Brown Y, *et al.* RapidEye System Commissioning and On-orbit Performance [C]// 23rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2009: SSC09-IV-8, 2009.
- [9] Yu Z, Jixian Z, Guangliang W, *et al.* RapidEye Satellite Image Quality Analysis and Solutions for Its True Color Composition [C]// Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping (M2RSM), 2011 International Workshop on IEEE, 2011: 1-4.
- [10] Li C, Ma L, Gao C, *et al.* Permanent Target for Optical Payload Performance and Data Quality Assessment; Spectral Characterization and a Case Study for Calibration[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 083498. doi: 10.117/IJRS.8.083498.
- [11] Li C R, Tang L L, Ma L L, *et al.* Comprehensive Calibration and Validation Site for Information Remote Sensing[J]. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, 40(7): 1233.
- [12] Cook M K, Peterson B A, Dial G, *et al.* IKONOS Technical Performance Assessment [C]// Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls. International Society for Optics and Photonics, 2001: 94-108.
- [13] Zhou Yuji, Tian Qingjiu. Image Quality Evaluation of EO-1 Hyperion Sensor [J]. Journal of Geo-Information Science, 2008, 10(5): 678-683.[周雨霁, 田庆久. EO-1 Hyperion 高光谱数据的质量评价[J]. 地球信息科学, 2008, 10(5): 678-683.]
- [14] Wei Hongwei, Tian Qingjiu. Quality Evaluation and Analysis of HJ1B-CCD Images[J]. Remote Sensing Information, 2012(5): 31-36.[魏宏伟, 田庆久. HJ1B-CCD 影像的质量评估及分析[J]. 遥感信息, 2012(5): 31-36.]
- [15] Crespi M, De Vendictis L. A Procedure for High Resolution Satellite Imagery Quality Assessment [J]. Sensors, 2009, 9(5): 3289-3313.
- [16] Poli D, Remondino F, Angiuli E, *et al.* Radiometric and Geometric Evaluation of GeoEye-1, WorldView-2 and Pléiades-1A Stereo Images for 3D Information Extraction[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 100: 35-47.
- [17] Ke S, Shen X, Lei Y. Quality Evaluation of the CBERS-02B High Spatial Resolution Image [C]// 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012: 2312-2315.
- [18] Zhang Xia, Zhang Bing, Zhao Yongchao, *et al.* Image Quality Assessment for the Infrared Multi-spectral Scanner of the Chinese-Brazil Earth Resources Satellite[J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(6): 581-586.[张霞, 张兵, 赵永超, 等. 中巴地球资源一号卫星多光谱扫描图象质量评价[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(6): 581-586.]
- [19] Wang Qinjun, Tian Qingjiu. Quality Evaluation of LISS3 Image from IRS-P6 Satellite[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(3): 11-14.[王钦军, 田庆久. IRS-P6 卫星 LISS3 图像数据质量评价[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(3): 11-14.]
- [20] Li Z, Jing Z, Yang X, *et al.* Color Transfer based Remote Sensing Image Fusion Using Non-separable Wavelet Frame Transform [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(13): 2006-2014.
- [21] Li Jun, Zhou Yueqin, Li Deren. A New Fusion Approach based on Local Histogram Matching Filtering Technique [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(3): 226-232.[李军, 周月琴, 李德仁. 影像局部直方图匹配滤波技术用于遥感影像数据融合[J]. 测绘学报, 1999, 28(3): 226-232.]
- [22] Jia Yonghong, Li Deren, Sun Jiabing, *et al.* Comparison of IHS Transformation for Integrating SAR and TM image [J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(2): 103-106.[贾永红, 李德仁, 孙家柄, 等. 四种 IHS 变换用于 SAR 与 TM 影像复合的比较[J]. 遥感学报, 1998, 2(2): 103-106.]
- [23] Chen Caifen, Shu Ning. The Fusion Approaches for SAR and TM Images [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1999, 4(42): 53-57.[陈彩芬, 舒宁. SAR 影像与 TM 影像的几种融合处理方法[J]. 国土资源遥感, 1999, 4(42): 53-57.]
- [24] Fallah M, Azizi A. Quality Assessment of Image Fusion Techniques for Multisensor High Resolution Satellite Images (Case Study: IRS-P5 and IRS-P6 Satellite Images) [J]. Years ISPRS Advancing Remote Sensing Pt, 2010, 38(1): 204-209.
- [25] Jiang Gangyi, Huang Dajiang, Wang Xu, *et al.* Overview on Image Quality Assessment Methods [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(1): 219-226.[蒋刚毅, 黄大江, 王旭, 等. 图像质量评价方法研究进展[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1): 219-226.]
- [26] Wang Zhiming. Review of No-reference Image Quality Assessment [J]. Acta Automatica Sinica, 2015(6): 1062-1079.[王志明. 无参考图像质量评价综述[J]. 自动化学报, 2015(6): 1062-1079.]
- [27] Shao Yu, Sun Funchun, Li Hongbo. No-reference Remote Sensing Image Quality Assessment Method Using Visual

- Proport[J].Journal of Tsinghua University:Science and Technology,2013(4):550-555.[邵宇,孙富春,李洪波.基于视觉特性的无参考型遥感图像质量评价方法[J].清华大学学报:自然科学版,2013(4):550-555.]
- [28] Zhu Xiaoling,Xu Miaozhong,Cong Ming.Research on No-reference Remote Sensing Image Quality Assessment based on Contourlet-GSSIM[J].Spacecraft Recovery & Remote Sensing 2014,35(6):83-90.[朱晓玲,许妙忠,丛铭.基于支持向量机的无参考遥感图像质量评价方法[J].航天返回与遥感,2014,35(6):83-90.]
- [29] Xie Tianpeng,Xu Miaozhong,Cong Ming,*et al.*Research on No-reference Remote Sensing Image Quality Assessment based on Contourlet-GSSIM[J].2015(1):59-62.[解天鹏,许妙忠,丛铭,等.基于 Contourlet-GSSIM 的无参考遥感图像质量评价研究[J].测绘通报,2015(1):59-62.]
- [30] He Guangjun.Snow Recognition in Mountain Areas based on SAR and Optical Remote Sensing Data[D].Nanjing:Nanjing University,2015.[贺广均.联合 SAR 与光学遥感数据的山区积雪识别研究[D].南京:南京大学,2015.]
- [31] Gao B C.An Operational Method for Estimating Signal to Noise Ratios from Data Acquired with Imaging Spectrometers [J].Remote Sensing of Environment,1993,43(1):23-33.

Comparison of Radiometric Quality of GF-1 Satellite Image in Snow-covered Area of Manasi River Basin

Hu Rui,Xiao Pengfeng,Feng Xuezhi,Zhang Xueliang

(*Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Key Laboratory for Satellite Mapping Technology and Applications of State Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation of China, Department of Geographic Information Science, School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China*)

Abstract: Radiometric quality of satellite's image is closely related to its monitoring capability. GF-1 is the first satellite of China's high-resolution earth observation system and has an important application value in monitoring mountain snow. In this paper, we compare the radiometric quality of GF-1 satellite image to the similar overseas high-resolution satellite SPOT-6 and RapidEye in snow-covered area of Manasi River Basin. The results could provide some advices for future GF series satellites' development in China. Using the image statistical features, average gradient, information entropy, and SNR, the radiometric quality of the three satellite images is compared. The results show that the GF-1's image statistical features and average gradient has the best performance. However, the information entropy has a certain gap compared with the other two satellites due to the depth of radiation. GF-1 partially supersaturated during snow imaging, resulting in part of region having zero value. After removing these outliers, GF-1 image's SNR is re-estimated and found to be significantly superior to other satellites in the blue, red, and panchromatic bands, whereas, the green and near-infrared bands still have a certain gap compared to SPOT-6, but similar to RapidEye. Overall, the radiometric quality of GF-1 image in the mountainous snow-covered area has basically reached the level of similar satellites in the world and some indicators are even better than other satellite images. Limited to the depth of radiation and the range of radiation energy accepted by the sensor, an over-saturation phenomenon will appear in some snow-covered regions, the follow-up can be further improved in this regard.

Key words: GF-1; SPOT-6; RapidEye; Radiometric quality; Snow