

引用格式:刘向增,范立佳,徐雪灵,等.星载 JPEG-LS 图像压缩质量评价研究[J].微电子学与计算机,2021,38(9):45-53.
[LIU X Z, FAN L J, XU X L, et al. Research on quality evaluation of spaceborne JPEG-LS Image compression algorithm[J].
Microelectronics & Computer, 2021, 38(9):45-53.]

星载 JPEG-LS 图像压缩质量评价研究

刘向增¹, 范立佳², 徐雪灵¹, 薛洁鹏¹, 苗启广¹

(1 西安电子科技大学 计算机科学与技术学院, 陕西 西安 710071;

2 中国空间技术研究院 遥感卫星总体部, 北京 100081)

摘 要: 为评价星载 JPEG-LS 压缩算法对图像质量的影响, 并为在轨压缩比的设置提供技术支撑, 以高分多模卫星的应用为背景, 从典型场景数据的压缩质量客观评价及典型任务的应用效果两方面构建图像压缩评测模型. 通过对压缩前后图像质量的二维失真度、光谱失真度、空间失真度等客观指标的分析, 以及对图像分类、目标检测、特征提取与匹配等典型应用效果的比较, 为压缩算法对图像质量的影响提供客观性指标统计数据及应用性效果对比数据支撑, 证实该算法可满足用户需求. 同时为用户具体应用需求提供了建议, 也为在轨影像数据市场的合理化分配与拓展提供了支持.

关键词: 图像压缩; 质量评价; JPEG-LS

中图分类号: TP751; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2021)09-0045-09

Research on quality evaluation of spaceborne JPEG-LS Image compression algorithm

LIU Xiangzeng¹, FAN Lijia², XU Xueling¹, XUE Jiepeng¹, MIAO Qiguang¹

(1 School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2 General Department of Remote Sensing Satellites, China Academy of Space Technology, Beijing 710071, China)

Abstract: In order to evaluate the influence of on-board JPEG-LS compression algorithm on image quality, and provide technical support for the setting of on-orbit compression ratio, with the application of high-resolution multi-mode satellites as the background, the image compression evaluation model is built from two aspects: objective evaluation of compression quality of typical scene data and application effects of typical tasks. Through the analysis of objective indicators such as two-dimensional distortion, spectral distortion, and spatial distortion of image quality before and after compression, and comparison of typical application effects such as image classification, target detection, feature extraction and matching, which provides objective index statistical data and application effect comparison data support for the impact of compression algorithms on image quality, confirming that the algorithm can meet user needs. At the same time, it provides suggestions for users' specific application needs, and supports the rational distribution and expansion of the on-orbit image data market.

Key words: image compression; quality evaluation; JPEG-LS

1 引言

遥感技术主要通过航空或航天飞行平台的光电载荷探测地面信息,并对其进行处理与分析,进而实现对地面目标与环境的全方位感知^[1-2].近年来,随着航天技术的飞速发展,卫星遥感技术得到了广泛应用,主要涵盖资源探测、环境与应急监测、测绘与规划、农林生态评估等民用领域以及军事侦察、战场态势评估等军用领域.目前,卫星遥感技术在国家的经济建设与社会发展中发挥着极其重要的作用.

随着载荷传感器像素分辨与光谱分辨率的提升,同一场景的影像数据成指数级增长,卫星与地面站间下传链路的带宽限制,成为海量数据传输的瓶颈.目前,星上数据的传输速率一般为 300~600 Mb/s,而 CCD 相机获得图像数据的速率高达几个甚至几十个 Gb/s,导致星上数据传输难以满足实时任务的需求^[3].为缓解信道传输压力,需在对传输前的图像进行压缩,以减小传输和存储的数据量.鉴于星上存储资源与信道下行带宽限制,星载图像压缩系统需具备低功耗和高可靠性等特点^[4].为保证图像压缩效率,满足硬件低功耗、小体积及设计复杂度低等要求,图像压缩算法的设计应简单有效且易于硬件实现.因此,星载图像压缩算法成为遥感领域的一个研究热点.

目前,星载图像压缩算法主要包括脉冲编码调制(DPCM)^[5]、离散余弦变换(DCT)^[6]、离散小波变换(DWT)^[7]、JPEG2000^[8]、JPEG-LS^[9]等.鉴于

JPEG-LS 算法的便捷性与高效性,该算法已被我国高分多模卫星采用.为全面评价该算法的压缩质量,本文通过分析星载 JPEG-LS 压缩算法压缩前后图像的二维失真度、光谱失真度、空间失真度客观指标,以及在图像分类、目标检测、特征提取与匹配等典型应用中的效果差异,为压缩算法对图像质量的影像提供客观性数据支撑,同时为用户的具体应用需求提供使用建议,为在轨影像数据市场的合理化分配与拓展提供思路.

2 JPEG-LS 图像压缩算法

JPEG-LS 是 ITU 基于 HP 实验室的 LOCO-I 算法提出一种无损/近无损图像压缩算法.该算法复杂度较低且可实现高性能的无损/近无损图像压缩,从而在航天、医学等诸多领域取得了广泛应用^[10].该图像压缩标准基于差分预测编码技术,采用 Golomb 编码对预测值与实际值的误差进行编码,同时建立了上下文模型对编码参数进行修正.

JPEG-LS 对图像的压缩模式主要有两种:普通模式和游程模式,如图 1 所示.首先,按照图像像素光栅扫描的相邻采样局部梯度与失真量化参数 Near 值的关系,决定进入游程编码还是常规编码.若梯度值满足 Near 值限定范围,则进行游程编码,否则进行常规编码.在常规编码模式中,利用预测器根据待编码点 x 邻域进行预测,再根据真实值和预测值以及上下文建模器计算误差,并对其进行自适应修正以及通过 Near 值对误差量化,再由编码器对量化后误差进行 Golomb 编码.

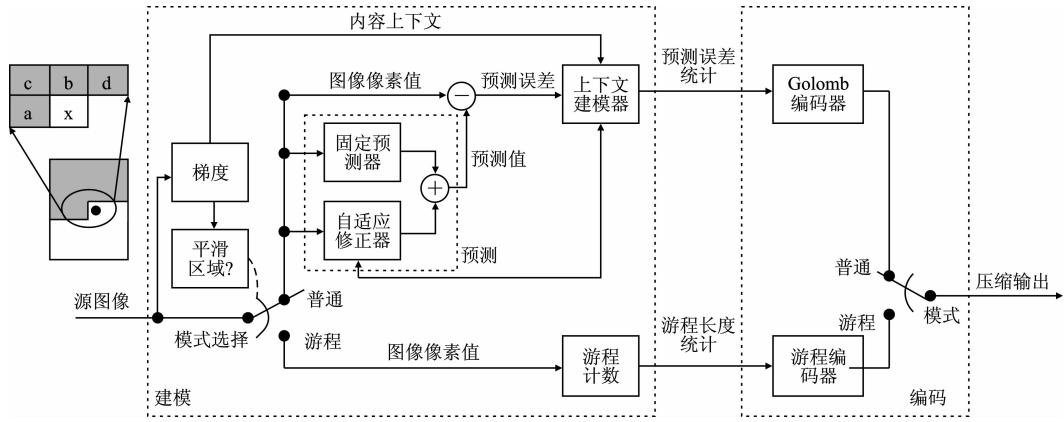


图 1 JPEG-LS 图像压缩算法流程图

该方法的主要特点:仅需上下文编码模式预测与 Golomb 编码,算法简单,易于硬件实现;在低倍

压缩下,与 JPEG2000 相比性能较好;算法实现过程中不需要外部存储器,可很大程度减少成本.

3 影像数据集构建

卫星遥感图像往往幅面较大,单幅遥感图像中经常存在多种地形地貌.传统图像质量评价指标主要针对整幅图像设计,无法对图像的局部区域进行评价.然而压缩算法的失真特性主要体现在图像局部区域,甚至在特定地形地貌.因此,评价图像压缩算法的局部失真特性,包括失真的分布均匀性、成片性、内容相关性等,可进一步完善卫星遥感图像质量评价体系,为卫星应用提供参考.

本文采用高分多模卫星拍摄的全色图像与多光谱图像作为实验数据.将图像按照地物类型可照地

物类型分为水面、湿地、海岸、农田、城市、森林、草原、山地、海洋、沙漠、薄云、厚云、混混合和路桥一共 14 个类别.将全色与多光谱原始图像按照 $2\,048 \times 2\,048$ 的大小进行切分成独立块,切分后共获得全色图像 7 369 幅,多光谱图像 485 幅.14 类图像数据类别及分块数量详细信息见表 1,全色数量每类的数量较多(>80),分辨率为 0.46 m,利用 JPEG-LS 压缩算法,分别将其在 2:1 和 4:1 压缩比下进行压缩,并进行解压缩重构.多光谱图像(8 波段)含有不同地物类型的图像数量较少(>10),分辨率为 1.85 m,将其在 2:1 的压缩比下进行压缩,并进行解压缩重构.数据样例如图 2 与图 3 所示.

表 1 图像数据类别及分块数量说明

序号	类别	说明	全色	多光谱
1	水面	陆地湖泊或河流,水面不少于 30%	89	10
2	湿地	植物与水面交织区域不少于 40%	134	11
3	海岸	海陆交界处,水面 30%~70%	118	13
4	农田	分块农田为主,规整或不规整,面积不少于 70%	791	38
5	城市	建筑为主,规整或不规整,面积不少于 70%	737	54
6	森林	平原或丘陵地带覆盖乔木区域,不少于 70%	729	39
7	草原	平原地带覆盖草本植物的非农田区域,不少于 70%	102	15
8	山地	覆盖植被或无植被的山地,不少于 70%	827	52
9	海洋	海洋水面为主,不少于 70%	80	32
10	沙漠	沙漠为主,不少于 70%	84	4
11	薄云	不少于 70%被薄云(云雾明显,地物可见)覆盖	702	37
12	厚云	不少于 70%被厚云(地物不可见)覆盖	754	40
13	混合	2 或多种地形地貌的混合	1 186	71
14	路桥	存在明显的道路或桥梁	1 036	69

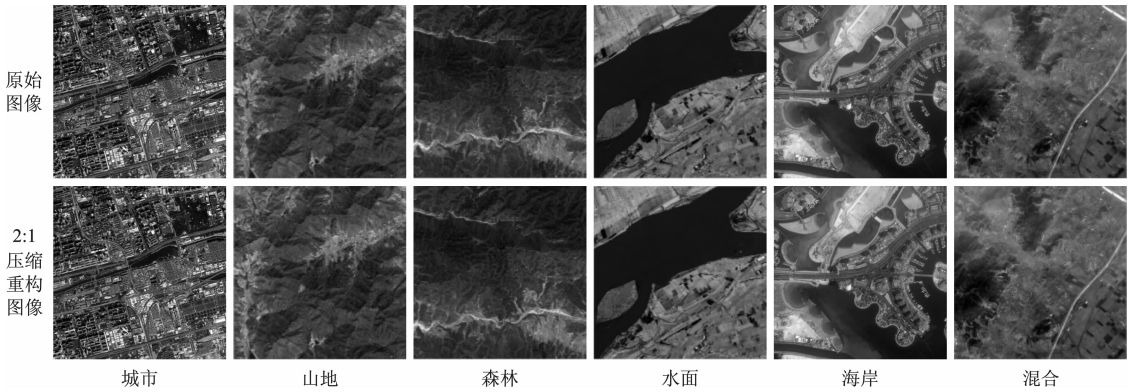


图 2 多光谱图像原始数据及压缩后重构样例

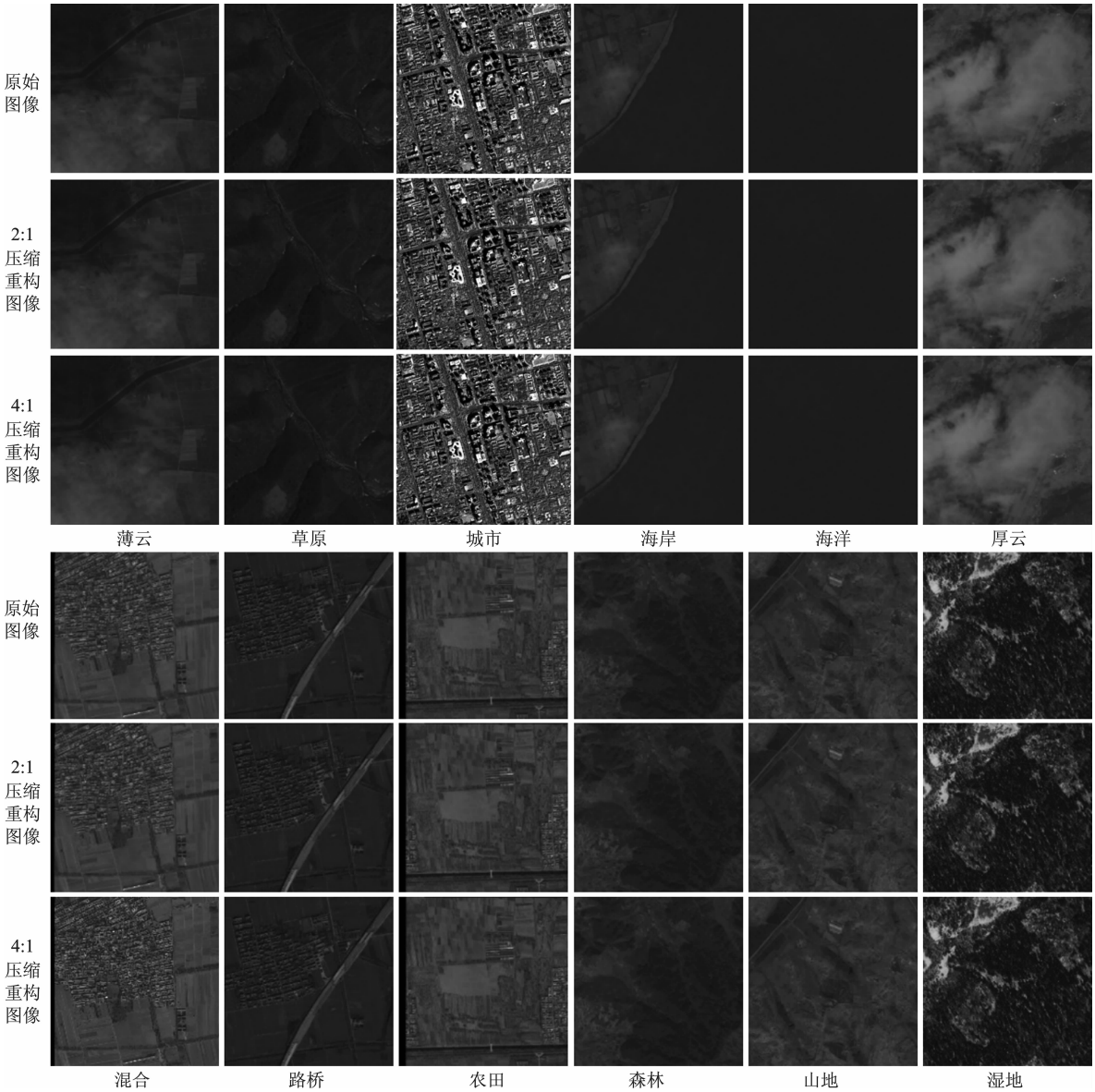


图 3 总体评价方案框图

4 评价模型设计

为综合评价压缩算法对图像质量的影响,本文从典型客观指标评价与典型应用任务的效果评价两方面进行统计数据分析,总体评价方案如图 4 所示.

4.1 客观指标评价

本文采用国际通用的二维失真度、光谱失真度、空间失真度等 3 个维度 9 个客观指标(表 2)对图像进行评价,保证了从图像的辐射变化、光谱变化、空间变化等方面对压缩算法进行有效评估,客观指标的主要分类如下:

- (1) 失真度评价:均方误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)、失真百分比(MAD);
- (2) 光谱失真度评价:最大谱相似度(MSS)、最

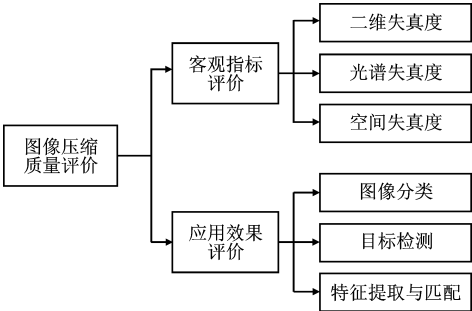


图 4 总体评价方案框图

- 大谱向角(MSA)、谱信息散度(MSID);
- (3) 空间失真度评价:空间失真度(SPDP)、全局保真度(GFP)、空间保真度(SFP).

表 2 客观评价指标

指标分类	计算公式	物理含义及说明
二维失真度	$\text{MSE} = \frac{1}{n_x n_y n_\lambda} \sum_{x,y,\lambda} (e_I(x,y,\lambda))^2$	图像的像素值的平均差异,其中 x,y,λ 分别表示行、列和波段序号, n_x, n_y, n_λ 表示行、列和波段数, $I, \tilde{I}, I(x,y,\lambda)$, 分别表示原始图像, 重构后图像, λ 波段 (x,y) 处的值, $e_I(x,y,\lambda) = I(x,y,\lambda) - \tilde{I}(x,y,\lambda)$ 为 λ 波段 (x,y) 处的误差.
	$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{I^2_{\max}}{\text{MSE}}$	峰值信噪比,用于衡量图像质量的重要指标,主要评价与原始图像的信息量差异.
	$\text{MAD} = L_\infty(I - \tilde{I}) = \max_{x,y,\lambda} \{ e_I(x,y,\lambda) \}$	最大绝对误差,主要衡量图像差异最大的程度
光谱失真度	$\text{MSS} = \max_{x,y} \{ \sqrt{\text{RMSE}^2_{x,y} + (1 - \text{corr}^2_{x,y})^2} \}$	图像谱段方向的谱相似性, $\text{RMSE} = \frac{1}{C \times 2^{2b}} \sum_{x,y,\lambda} (e_I(x,y,\lambda))^2$ 为谱段方向的归一化均方差, $\text{corr}_{x,y}$ 为谱段方向相关系数.
	$\text{MSA} = \max_{x,y} (\text{SA}_{x,y})$	最大谱向角 $\text{SA}_{x,y} = \arccos(\frac{\sum_\lambda I(x,y,\lambda) \times \tilde{I}(x,y,\lambda)}{\sum_\lambda I^2(x,y,\lambda) \times \sum_\lambda \tilde{I}^2(x,y,\lambda)})$
	$\text{MSID} = \max_{x,y} \{ \sum_\lambda (p_\lambda - \tilde{p}_\lambda) \ln(p_\lambda / \tilde{p}_\lambda) \}$	最大谱信息散度,其中, $p_\lambda = I(x,y,\lambda) / \ I(x,y,\lambda)\ _1, \tilde{p}_\lambda = \tilde{I}(x,y,\lambda) / \ \tilde{I}(x,y,\lambda)\ _1$
空间失真度	$\text{SPDP} = \min_\lambda \{ Q(I(x,y,\lambda), \tilde{I}(x,y,\lambda)) \}$	空间失真度,谱段方向的最小失真度,其中 $Q(\cdot, \cdot)$ 为谱结构相似度, SPDP 的值越大失真度越小
	$\text{GFP} = 1 - \frac{\sum_{x,y,\lambda} (I(x,y,\lambda) - \tilde{I}(x,y,\lambda))^2}{\sum_{x,y,\lambda} (I(x,y,\lambda))^2}$	全保真度,为归一化 MSE
	$\text{SFP} = \min_\lambda \{ F(I(x,y,\lambda), \tilde{I}(x,y,\lambda)) \}$	空间保真度,先在空间方向计算图像的保真度,再在谱段方向计算图像的保真度

4.2 应用效果评价

面向卫星遥感应领域中特定任务的图像压缩质量评价需求,本文主要针对图像分类、目标检测、特征提取与匹配等具体任务,评价图像压缩对处理结果的影响,依据任务的完成效果对图像质量进行评价,为用户具体应用需求提供指导. 具体评价方案如图 5 所示. 首先,将特定任务的算法分别应用原始图像与压缩后重构图像,然后将两者效果的差异进行比较分析. 文中对 3 种特定任务采取的具体算法如下:

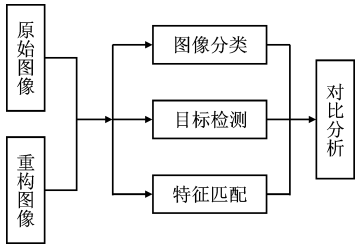


图 5 应用效果评价方案框图

(1) 图像分类: 基于深度学习的特征提取与 SVM 分类相结合的方法, 首先 AlexNet^[11] 对图像进行特征提取, 然后利用 SVM 训练分类器对图像进行分类.

(2) 目标检测: 采用 D-LinkNet^[12] 路网检测模型, 该模型在传统的编解码中融入了膨胀卷积模块, 提升了检测准确率.

(3) 特征提取与匹配: 采用稳健的相位一致性结构特征提取与匹配方法^[13], 实现了全色与多光谱图像的稳健匹配.

5 质量评价分析

5.1 客观指标质量分析

5.1.1 二维失真度分析

首先对全色与多光谱数据集压缩前后的最大绝对误差(MAD)进行统计分析. 由图 6 可见, 最大绝对值误差为 9, 对于 12 位图像数据仅像素差异大于 16 时, 具有目视区别. 因此, 通过常规目视的方式无法判断压缩图像和原始图像的差异, 压缩图像不存在视觉可察觉失真.

图像平均失真评价主要从 PSNR 和 MSE 进行分析. 由于全局平均失真难以反映图像局部性能, 本文按照图像类别进行分析. 如图 7 所示, 全色图像 2:1 压缩时各类别的 PSNR(图 7 上)指标整体约在 73~82 之间, 总体差异较小, 没有实质性差异. 4:1 压缩时 PSNR(图 7 中)各类图像 PSNR 平均指标值约

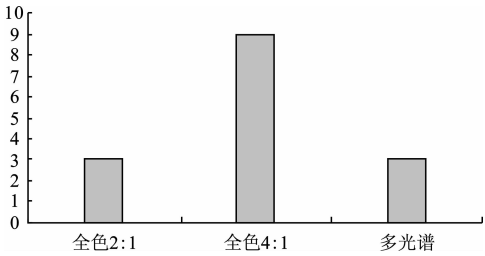


图 6 全色与多光谱图像 MAD 指标统计图

在 56~63 之间,且仅森林类别的平均 PSNR 在 60 以下,图像的质量良好.多光谱图像 2:1 压缩时各类别的 PSNR(图 7 下)的均值在 71~79 之间,厚云、城市、水面、沙漠、海岸、混合、薄云、路桥等多个类别数据达到 75 以上,仅海洋略低于 70,表明压缩前后信息量变化较小.

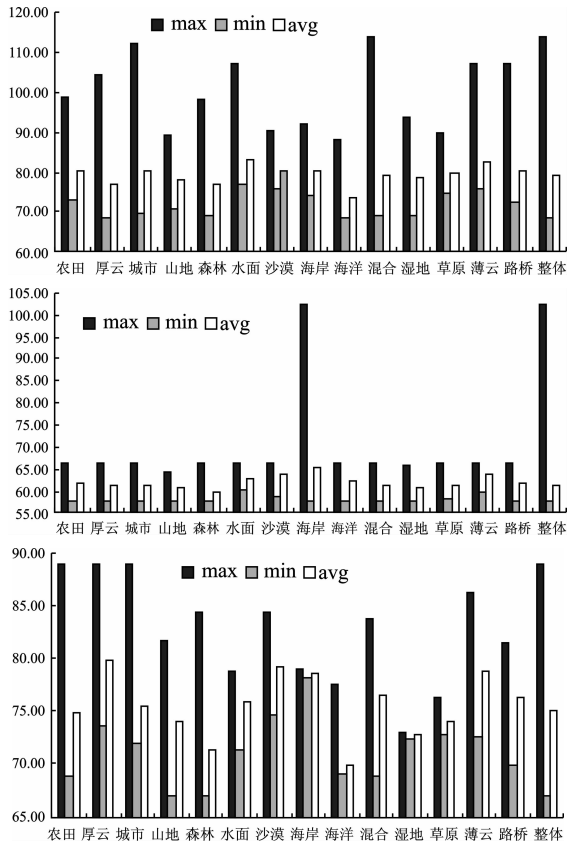


图 7 全色与多光谱图像 PSNR 统计

图 8 给出了全色与多光谱图像的 MSE 指标统计,全色图像 2:1 压缩(图 8 上)各类别最大值小于 2.5,与原始图像差别几乎可忽略.全色图像 4:1 压缩(图 8 中)MSE 指标各类图像平均值在 9~20 之间,其中厚云、山地、森林、海洋、湿地指标大于 15,其他类型平均差异小于 15,处于视觉不敏感的区域.多光谱图像 2:1 压缩各类别 MSE(图 8 下)的均

值小于 2,表明压缩前后图像几乎无差异.

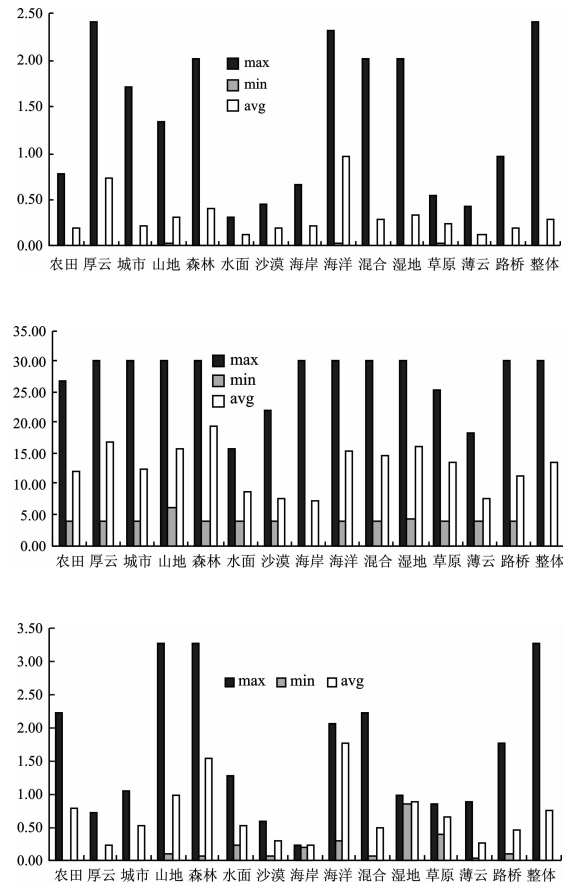


图 8 全色与多光谱图像 MSE 统计

5.1.2 谱失真度分析

光谱失真度评价指标(MSS、MSA、MSID)均非常小,本文对三个指标的均值进行详细分析.图 9 展示了不同类别图像的指标均值.从类别分析,沙漠和海岸整体失真度比其它类稍小,其他类别最大值小于 0.1,由此可看出多光谱图像压缩后的失真度较小,几乎与原始图像无差别.

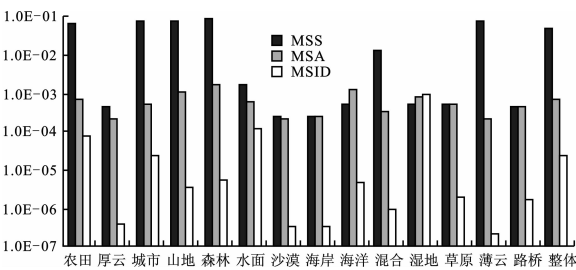


图 9 多光谱图像光谱失真度统计.

5.1.3 空间失真度分析

全色与多光谱图像的 GFP 的指标统计如图 10 所示,全色图像 2:1 压缩(图 10 上)的全保真度均接近于 1,表明压缩后图像与原始图像几乎无差别.全

色图像 4:1 压缩(图 10 中)的全保真度均大于 0.996,压缩后图像的质量失真度非常微小. 同样多光谱图像的 2:1 压缩后的全保真度均接近 1,可忽略与原图像的差异.

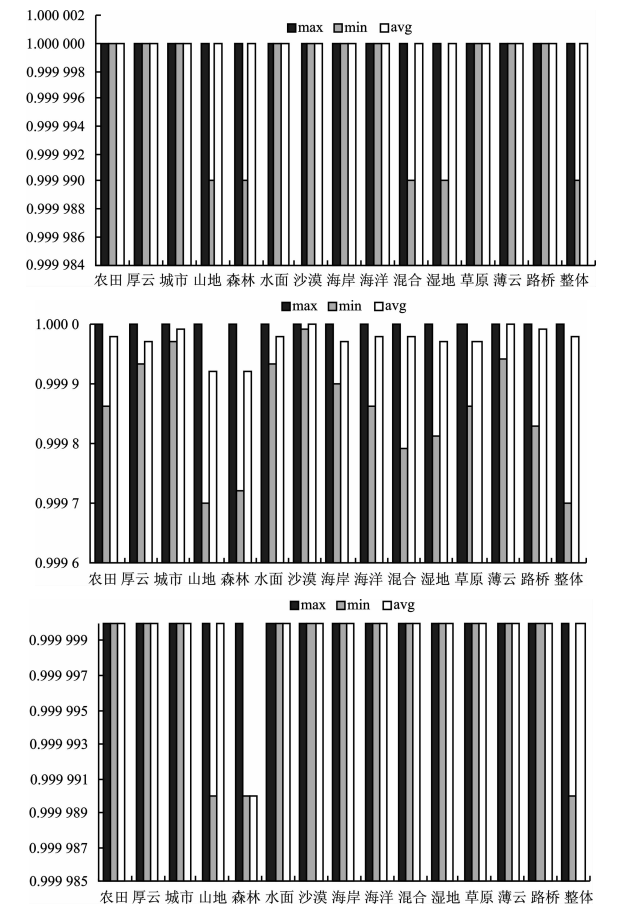


图 10 全色与多光谱图像 GFP 统计

多光谱图像的 SPDP 与 SFP 指标统计如图 11 所示,由图示可得,山地、水面、海岸、湿地等几个类别的 SPDP 值较高(图 11 上),一致性较好,其它类别稍小,但均值最小都在 0.95 以上,说明空间失真度都很小,类间差异并不明显. SFP 指标如图 11 下所示,其值均接近于 1,说明多光谱图像压缩的失真非常小. 因此,虽然 GFP 和 SFP 数值在部分类别上有所差异,但差异过小,各类别质量可以认为在 GFP 和 SFP 评价体系下无差异.

综上,通过对全色及多光谱图像压缩前后的 3 个维度的客观指标统计分析,可看出全色图像 4:1 压缩质量稍微有些差异,但无视觉差别,其它图像几乎与原图像无差异.

5.2 应用效果分析

本节主要从图像分类、目标检测、特征提取与特征匹配等 3 种应用比较广泛的特定任务进行压缩前

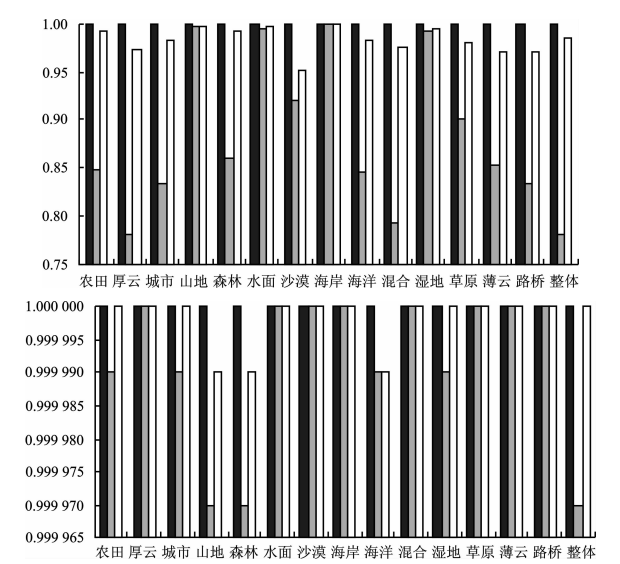


图 11 多光谱图像 SPDP 与 SFP 统计

后的效果评价,并对结果进行分析,为用户的具体应用任务提供建议.

5.2.1 图像分类

本文采用 AlexNet 深度学习模型提取图像特征,再训练 SVM 分类器进行分类. 训练 SVM 分类器的数据集为 UCMerced_LandUse,其中有 agriculture 等 21 个类,每个类 100 张图片共 2 100 张图片,每张图片的大小为 256×256 . 评价使用的影像为遥感图像的原图像和分别按 2:1 和 4:1 压缩信息量后的图像. 共选取相对应的 300 组图像,且都截取为 256×256 的大小,图像样例如图 12 所示. 以原始图像正确分类的图像作为压缩后分类的输入,则分类精度为结果一致的数量与输入图像数量之比. 图像压缩后对分类结果的影响统计结果如表 3 所示,2:1 压缩图像的分类精度下降 1%,4:1 压缩图像的分类精度下降 3%,因此,分类精度影响不大,若用户对分类精度有严格要求,建议选择低压缩比的图像.

表 3 图像压缩对图像分类的影响

	原始图像	2:1压缩	4:1压缩
准确率	100%	99%	97%

5.2.2 目标检测

本文采用 D-LinkNet 深度学习模型对抽取的 300 组图像进行道路检测效果比较,尺寸为 $2\ 048 \times 2\ 048$ 的全色图像,图像处理效果样例如图 13 所示,效果差异性统计如表 4 所示. 为评估压缩算法对道路提取的影响将 2:1、4:1 压缩图像与原图像的道路提取的 300 组结果图进行差分,求得压缩图像道路提取结果图与原图像结果图的差异比值 $R=T/S$,T 为压缩后结差



图 12 图像分类样例图像

分结果不为 0 的像素数, S 为原图像结果的像素点总数. 由表 4 看出 2:1 压缩后与原图像效果平均差异小于 0.05%, 几乎无差异, 4:1 压缩比条件下道路检测的平均差异为 0.67%, 差异可忽略.

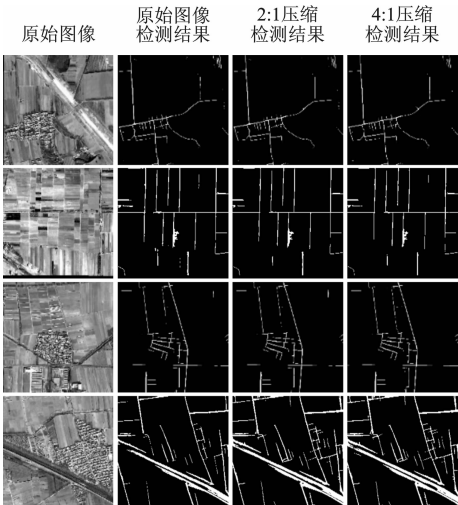


图 13 图像道路检测结果样例

表 4 图像压缩对道路检测的影响

压缩比	图像 1	图像 2	图像 3	图像 4	300 组平均
2:1	0.04%	0.03%	0.02%	0.05%	0.04%
4:1	0.68%	0.96%	0.57%	0.62%	0.67%

5.2.3 特征提取与匹配

本文测试压缩算法对特征匹配的影响, 采用相位一致性特征提取与 KCF 相关性匹配的方法. 选取 200 组多光谱影像与全色图像进行匹配, 每组影像

包含多光谱原始影像、2:1 压缩后多光谱影像、全色图像原始影像, 通过计算 2 幅多光谱图像与全色图像正确匹配点对的差异评价压缩效果的影响. 匹配图像样例如图 14 所示, 匹配结果的分析如表 5 所示, 组 1 图像原始多光谱与全色图像匹配对为 219 对, 2:1 压缩后的多光谱与全色图像匹配对为 198 对, 减少 10% 左右, 200 组压缩后图像的正确匹配对下降率小于 5%, 基本不会对图像的配准结果造成影响.

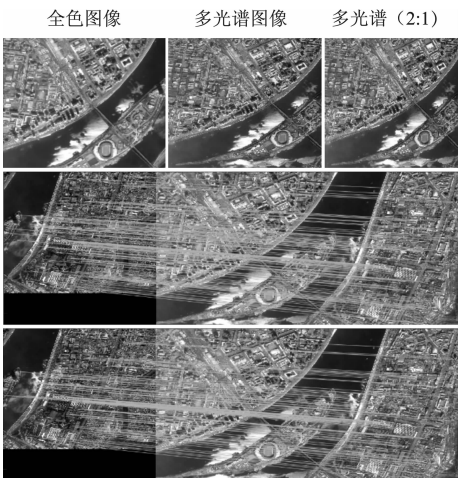


图 14 图像特征匹配结果样例

表 5 图像压缩对特征提取的影响

影响程度	2:1 压缩效果	4:1 压缩效果
Diff_F	0.01%	0.12%

综上, 通过对图像分类、目标检测、特征提取与匹配等 3 种典型应用任务效果影响评价, 其基本不会影响用户的应用. 当用户的处理任务为 10 米以下的目标识别时, 建议选用压缩比较小(2:1)的压缩图像为数据源.

6 结束语

为评价星载 JPEG-LS 压缩算法对图像质量的影响, 本文从客观指标与典型应用两方面对其进行综合评价. 首先从二维失真度、光谱失真度、空间失真度 3 个维度 9 个客观评价指标统计数据对全色和多光谱压缩前后图像进行评价, 根据评价指标反映 2:1 压缩前后的图像质量几乎没有差异, 4:1 压缩条件下略有差异, 但不影响观察. 另外, 从图像分类、目标检测、特征提取与匹配等典型任务对压缩前后的处理效果的进行了比较分析, 统计数据反映压缩算法对于图像分类、大目标检测、特征提取的差异均小于 1%, 特征匹配对的差异小于 5%, 基本不影响用

户的应用.

参考文献:

- [1] ZHANG L, ZHANG J Y, WEI W, et al. Learning discriminative compact representation for hyperspectral imagery classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(10): 8276-8289. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2919938.
- [2] LI J, LIU Z L, TIAN S F. An efficient onboard compression method for multispectral images using distributed post-transform in the wavelet domain in conjunction with a fast spectral decorrelator[J]. Optical Review, 2019, 26(2): 247-261. DOI: 10.1007/s10043-019-00492-9.
- [3] LI L, WANG Z S. Compression quality prediction model for JPEG2000[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(2): 384-398. DOI: 10.1109/TIP.2009.2034706.
- [4] YU G X, VLADIMIROVA T, SWEETING M N. Image compression systems on board satellites[J]. Acta Astronautica, 2009, 64(9/10): 988-1005. DOI: 10.1016/j.actaastro.2008.12.006.
- [5] MIELIKAINEN J, TOIVANEN P. Clustered DPCM for the lossless compression of hyperspectral Images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(12): 2943-2946. DOI: 10.1109/TGRS.2003.820885.
- [6] PICKERING M R, RYAN M J. Efficient spatial-spectral compression of hyperspectral data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(7): 1536-1539. DOI: 10.1109/36.934084.
- [7] PENNA B, TILLO T, MAGLI E, et al. Transform coding techniques for lossy hyperspectral data compression[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(5): 1408-1421. DOI: 10.1109/TGRS.2007.894565.
- [8] RABBANI M, JOSHI R. An overview of the JPEG 2000 still image compression standard[J]. Signal Processing: Image Communication, 2002, 17(1): 3-48. DOI: 10.1016/S0923-5965(01)00024-8.
- [9] MIELIKAINEN J S, TOIVANEN P J, KAARNA A. Linear prediction in lossless compression of hyperspectral images[J]. Optical Engineering, 2003, 42(4): 1013-1017. DOI: 10.1117/1.1557174.
- [10] FILHO A L, DAMORE R. A tolerant JPEG-LS image compressor foreseeing COTS FPGA implementation[J]. Microprocessors and Microsystems, 2017(49): 54-63. DOI: 10.1016/j.micpro.2017.01.008.
- [11] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[C]//Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems. Lake Tahoe: Curran Associates Inc., 2012: 1097-1105. DOI: 10.5555/2999134.2999257.
- [12] ZHOU L C, ZHANG C, WU M. D-LinkNet: LinkNet with pretrained encoder and dilated convolution for high resolution satellite imagery road extraction[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Salt Lake City: IEEE, 2018: 192-196. DOI: 10.1109/CVPRW.2018.00034.
- [13] LIU X Z, AI Y F, TIAN B, et al. Robust and fast registration of infrared and visible images for Electro-Optical pod[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1335-1344. DOI: 10.1109/TIE.2018.2833051.

作者简介:

刘向增 男,(1981-),博士,副教授,硕士生导师.研究方向为计算机视觉与图像处理.

E-mail: xzliu@xidian.edu.cn.com

范立佳 男,(1982-),博士,高级工程师.研究方向为遥感卫星系统设计与影像处理.

徐雪灵 女,(1997-),硕士研究生.研究方向为计算机视觉与图像处理.

薛洁鹏 男,(1997-),硕士研究生.研究方向为计算机视觉与图像处理.

苗启广 男,(1972-),博士,教授,博士生导师.研究方向为计算机视觉、机器学习、大数据分析.