

一种新的基于稀疏表示及自学习遥感图像超分重建算法^{*}

秦振涛^{1,2}, 杨 茹³, 刘小英², 杨武年¹, 陈 军²

(1. 成都理工大学 地学空间信息技术国土资源部重点实验室/遥感与GIS研究所, 成都 610059;
2. 攀枝花学院 数学与计算机学院 617000; 3. 攀枝花学院 土木与建筑工程学院, 四川 攀枝花 617000)

摘要:【目的】遥感图像重建容易引入噪声或边缘出现不规则性,而它又在遥感图像的处理中能起到非常重要的作用,提出新的算法来得到更好的处理结果。【方法】通过对遥感图像进行分块,利用K-SVD算法对遥感图像自身进行字典学习,获得能够稀疏表示高分辨率遥感图像的字典,然后进行特征提取、独立成分分析降维、高分辨率遥感图像的重建等操作。【结果】实现了对遥感图像超分辨率的重建。【结论】该方法提高了图像的峰值信噪比,通过实验验证了算法高效性。

关键词:稀疏表示;字典学习;遥感图像;超分重建

中图分类号:TN911.73

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2017)02-0081-05

遥感图像的分辨率是遥感成像系统对输出图像细节特征分辨能力的一种度量,也是遥感图像中对地物细微目标程度的辨识指标,是地物信息详细程度的一种体现,在国土资源管理中具有非常重要的意义^[1-3]。超分辨率遥感图像重建的主要目的是利用信号处理技术根据获取的单幅或者多幅低分辨率(Low-resolution, LR)遥感图像重建高分辨率(High-resolution, HR)遥感图像的过程^[4-6]。超分辨率图像重建在遥感图像的解译的过程中起到非常重要的作用,尤其是在真实图像的分辨率较低的情况下,待识别地物的大小接近最小分辨率,通过超分辨率重建获得的图像空间分辨率更高,可以更好地对地物进行细微表达与精细解译^[7]。近年来,随着电子技术的发展,遥感平台搭载的传感器分辨率越来越高,要由获取的低分辨率遥感图像重建高分辨的遥感图像需要对多个未知像素进行预测,这就要求人们对遥感图像有更深入的理解。2002年Freeman等人提出基于马尔科夫随机场的全局案例先验预测缺失像素值^[8],Yang等人于2011年用外部高分辨率图像案例求解未知像素的方法^[9],这些方法能够提高分辨率及锐化边缘。但是这些方法需要对案例遥感图像进行很好的选择,否则会引入噪声及在边缘处有不规则性,这主要是由于在案例图像的最接近块搜索中有可能产生错误。Ebrahimi和Vrscay等人于2007年提出了基于输入图像自身的学习算法^[10-12],主要用于对普通图像的去噪及普通图像的超分重建,这种方法提供了较少的图像案例,与案例图像遥感图像库字典学习相比,具有了更多的相关块。近年来,潘宗序及Han等人提出基于聚类的超分辨率重建算法,这种方法对低分辨率图像金字塔结构中的图像块进行了聚类,分别构建针对各类的多个或者单个字典,有了更好的重建效果,但是字典非常复杂^[13-14]。

本研究提出了一种新的高效的基于遥感图像案例自学习算法的遥感图像超分重建方法,与现有的方法相比,研究了在较小的超分比率下遥感图像局部相似性,此属性对遥感图像的边缘和直角处特征非常明显,实验表明,利用遥感图像自案例学习的方法能够更好地重建遥感图像,本研究提出的方法具有更高的PSNR及更小的MSE,图像的清晰度更高。

1 自学习遥感图像超分重建原理

通过观测,可以发现遥感图像在超分重建前后具有非常多的相似性。这种相似性,文中称为自相似性。这种自相似性能够保证在邻近的局部遥感图像中查找到与输入图像相对相似的案例块。这种方法与全局案例块

^{*} 收稿日期:2016-02-26 修回日期:2016-03-17 网络出版时间:2017-03-13 11:06

资助项目:国家自然科学基金(No. 41372340);国土资源部地学空间信息技术重点实验室开放基金(No. KLGSIT2016-10);重庆市教委科学技术研究项目(No. KJ1400519);2015年度攀枝花学院博士专项科研基金项目(No. 0210600038)

第一作者简介:秦振涛,男,副教授,博士研究生,研究方向为数据仓库、数据挖掘、人工智能和遥感图像处理,E-mail:309507443@qq.com;

通信作者:杨武年,教授,E-mail:ywn@cdu.cn

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20170313.1106.024.html

或者外部案例库相比,具有更少的搜索时间,同时,这种方法也是一种相对精确重构的方法。通过实验,进一步确定了图像块可以在输入图像中找到其超分图像(图 1)。

对低分辨率遥感图像定义为 z_l , 高分辨率图像定义为 I_{HR} , 其分辨率的提高由比例因子 l 确定。由于输入遥感图像缺少部分高频信息, 与比例因子成正比, 这部分信息通过图像块预测模型进行获取, 而不是通过外部数据库获取。基于自学习的遥感图像超分重建与传统的利用外部数据库的重建对比图 2 所示。

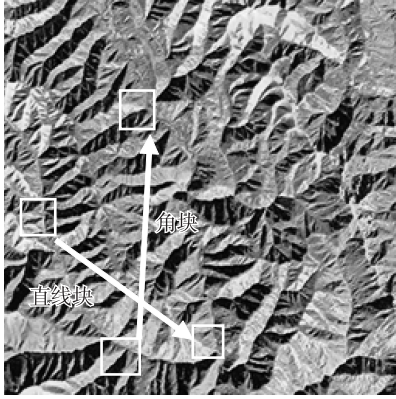


图 1 输入遥感图像的自相似性(输入图像的低分辨率直线块, 角块能够在本图像中找到其高分辨率图像块)

Fig. 1 The self-similarity of remote sensing image

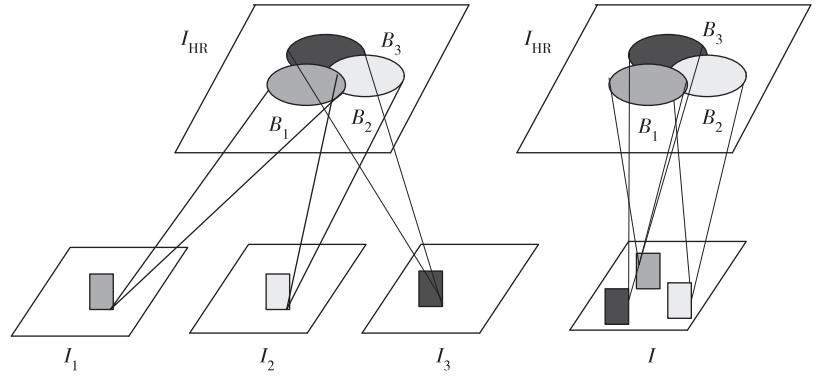


图 2 基于外部数据库的遥感图像超分重建模型与基于自学习遥感图像超分重建模型对比

Fig. 2 The comparison model of super-resolution remote sensing images restoration based on external database and self-learning

遥感图像块的重复出现是基于自学习遥感图像超分重建的基础, 超分重建在一些表现地物细节的区域表现更为明显, 如纹理、边缘和转角等。Glasner 等人经过研究发现, 对伯克利分割图像数据库中任意一个图像块, 在图像中出现对不同分辨率的图像块, 有 60%~80% 会重复出现 9 次以上^[15]。一般来说, 对空间大小较小的遥感图像仍然能够找到其重现块图像, 从而能够提供其超分重建的潜力, 其有效信息来源于遥感图像自身, 这就说明遥感图像的像素具有相关性, 从而能够对遥感图像中的每一个像素进行估算。

2 自学习遥感图像超分重建方法

为了避免低分辨率遥感图像 z_l 和高分辨率遥感图像 I_{HR} 间因不同分辨率造成问题的复杂化, 同时为了进一步简化恢复算法, 从而假设低分辨率遥感图像 z_l 通过一个插值操作 Q 放大, 且 $Q: \mathbf{R}^{N_l} \rightarrow \mathbf{R}^{N_h}$, 如 NN (最邻域插值)操作, 通过填充丢失的行和列, 返回高分辨率遥感图像 I_{HR} 。这种假设能够加快计算速度, 超分重建后的图像可以表示为 I_l , 且满足(1)式的关系:

$$I_l = Qz_l = Q(SHI_{HR} + v) = QSHI_{HR} + Qv = L_{all}I_{HR} + \bar{v}. \quad (1)$$

超分重建的目标就是通过处理 $I_l \in \mathbf{R}^{N_h}$, 输出图像 $\bar{I}_{HR}$, 能够使得 $\bar{I}_{HR}$ 非常接近于原始的高分辨率图像 $I_{HR} \in \mathbf{R}^{N_h}$ 。基于自学习的遥感图像超分重建算法通过从输入遥感图像自身进行训练和重建, 为了获得训练字典对 $\{A_l, A_h\}$, 需要获取高分辨率遥感图像和低分辨遥感图像对, 令测试图像 I_l 为“高分辨遥感图像”, 其下采样图像 I_u , I_u 通过选择适当的 S 和 H 获得。

通过对遥感图像 I_u 进行图像块提取, 目标是估计图像 I_l 中的相应块, 令 $p_h^k = R_k I_l \in \mathbf{R}^{N_h}$ 为一个大小为 $\sqrt{n} \times \sqrt{n}$ 的高分辨率图像块, 从图像 I_l 的位置 k 由操作 R_k 实现 $R_k: \mathbf{R}^{N_l} \rightarrow \mathbf{R}^{N_h}$ 。假设位置 $\{k\}$ 是那些位于真实像素周围的低分辨率像素集, 主要是为了区分大量的插值像素, 这些样本集表示为 Ω 。则基于自学习遥感图像超分重建算法可以表示为对图像块 $p_h^k \in \mathbf{R}^n$ 利用字典 $A_h \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 稀疏表示为 $q^k \in \mathbf{R}^m$, 如(2)式所示。

$$p_h^k = A_h q^k, \quad (2)$$

其中 $\|q^k\|_0 \ll n, \ell_0$ 伪范表示向量 q^k 中的非零个数, 矩阵 A_h 为字典, 表示高分辨率块的特征。低分辨率相关块 $p_l^k = R_k y_l$, 由 y_l 从相同位置提取, 块 p_l^k 和 p_h^k 围绕着相同的中心像素 k , 其大小为 $\sqrt{n} \times \sqrt{n}$ 。由于操作 $L_{all} = QSH$, 将完整的高分辨率图像 I_l 转化为低分辨率图像 I_u , 假设 $p_l^k = L p_h^k + \tilde{v}_k$, 其中 L 为 L_{all} 的一局部操作, $\tilde{v}_k$ 为块中的加性噪声。同时 L 为空间独立操作, 则对 I_u 中的位置 $k \in \Omega$ 进行研究。

由于假设 $p_h^k = A_h q^k$, 对方程乘以 L 能够获得(3)式:

$$L p_h^k = L A_h q^k. \quad (3)$$

利用高分辨率图像和低分辨率图像块间的关系: $p_l^k = L p_h^k + \tilde{v}_k$, 能够获得:

$$L A_h q^k = L p_h^k = p_l^k - \tilde{v}_k, \quad (4)$$

该式可转化为(5)式:

$$\|p_l^k - L A_h q^k\|_2 \leq \epsilon, \quad (5)$$

其中 ϵ 表示噪声的大小。

低分辨率块 p_l^k 通过高效的字典 $A_l = L A_h$ 表示为相同的稀疏向量 q^k , 误差 ϵ 可控, 这表明对任意一个给定低分辨率图像块 p_l^k , 其稀疏表示向量为 q^k , 然后 p_h^k 能够通过字典 A_h 乘以其稀疏表示获得, 具体如下。

初始的字典学习阶段主要处理低分辨率图像块 $\{p_l^k\}_k \subseteq \mathbf{R}^{n_l}$, K-SVD 字典学习应用于这些块, 从而获得字典 $A_l \in \mathbf{R}^{n_l \times m}$, 即:

$$A_l, \{q^k\} = \arg \min_{A_l, \{q^k\}} \sum_k \|p_l^k - A_l q^k\|_2^2, \text{ s. t. } \forall K, q^k_0 \leq L. \quad (6)$$

同时能够获得的还有训练块 $\{p_l^k\}_k$ 的稀疏表示系数 $\{q^k\}_k$ 。

下一步即高分辨率字典的构建, 通过 $p_h^k \approx A_h q^k$ 来逼近块 p_h^k , 即利用获取的稀疏表示向量乘以高分辨率字典从而恢复 p_h^k , 从而获得相对精确的字典 A_h 。因此, 字典通过最小化其均值逼近来获得, 即:

$$A_h = \arg \min_{A_h} \sum_k \|p_h^k - A_h q^k\|_2^2 = \arg \min \|P_h - A_h Q\|_F^2, \quad (7)$$

其中矩阵 P_h 通过高分辨率训练块 $\{p_h^k\}_k$ 作为其列进行构建, 同时, Q 包含了 $\{q^k\}_k$ 作为其列, 上式的解通过其伪逆表达式获得, 即:

$$A_h = P_h Q^+ = P_h Q^T (Q Q^T)^{-1}. \quad (8)$$

重建阶段:

重建从低分辨图像 $\{I_l^i\}_i$ 开始, 重建阶段主要的工作是超分重建低分辨率图像 I_l , 假定遥感图像由一副图像 I_l 通过模糊和下采样处理获得, 然后通过如下 7 个步骤进行重建。

- 1) 根据超分比例因子 s 对图遥感像进行双三次插值操作 Q , 获得低分辨率遥感图像 $I_l \in \mathbf{R}^{n_l}$ 。
- 2) 通过 R 高通滤波器对遥感图像 y_l 进行滤波, 通过训练进行特征提取, 从而获得 $f_k \times I_l$ 。
- 3) 从 R 个图像中进行块提取, 从位置 $k \in \Omega$ 提取大小为 $\sqrt{n} \times \sqrt{n}$ 的块, 每一个这样的块根据原位置形成块向量 $\tilde{p}_l^k$, 所有的块形成了块集 $\{\tilde{p}_l^k\}_k$ 。
- 4) 通过对块 $\{\tilde{p}_l^k\}_k$ 乘以其投影操作 B 进行降维, 从而获得 $\{p_l^k\}_k$, 每一个块的长度为 n_l 。
- 5) 通过对 $\{p_l^k\}_k$ 执行 OMP 算法, 分配 L 个原子用于稀疏表示, 从而获得其稀疏表示向量 $\{q^k\}_k$ 。
- 6) 通过对稀疏表示向量 $\{q^k\}_k$ 乘以高分辨率字典 A_h , 从而获得逼近高分辨率块 $\{A_h q^k\}_k = \{\bar{p}_h^k\}_k$ 。
- 7) 最终的高分辨率图像根据 $\bar{I}_l$ 通过求解如下最小化问题获得:

$$\bar{I}_{hr} = \arg \min_{\bar{I}_h} \sum_k \|R_k (\bar{I}_h - \bar{I}_l) - \bar{p}_h^k\|_2^2. \quad (9)$$

该式说明提取的块来源于差异图像, $\bar{I}_h - \bar{I}_l$, 差异应该最大化逼近块 $\bar{p}_h^k$, 该式具有封闭最小二乘解, 即

$$\bar{I}_{hr} = \bar{I}_l + \left[\sum_k R_k^T R_k \right]^{-1} \sum_k R_k^T \bar{p}_h^k. \quad (10)$$

该式通过将 $\bar{p}_h^k$ 放置于合适的位置处, 平均其重叠区域, 叠加 $\bar{I}_l$, 从而得到最终的高分辨率遥感图像 $\bar{I}_{hr}$ 。

3 实验验证

本实验所用的图像来源于成都理工大学地学空间信息技术国土资源部重点实验室, 实验中只处理了单波段图像, 多波段图像的处理类似, 只需要将各个图像按照波段顺序输出即可。实验针对岷江上游毛尔盖地区的遥感图像分别进行了超分倍数为 2 的实验, 实验中对每种算法进行 5 次实验, 结果取 5 次实验的平均值。根据不同的分类方法所获得的不同的结果如表 1 所示, 通过与双三次插值重建、基于案例数据库的稀疏超分重建及本研究提出的基于自学习稀疏超分重等方法相比较。

通过实验可见,本研究提出的算法具有更高的峰值信噪比和更小的均方误差。基于自学习的超分重建算法获得的图像信息熵比双三次插值重建图像的更大,虽然比基于案例块的超分重建图像的信息熵少^[16],但是基于案例块的超分重建的均方误差更大,说明基于案例块的超分重建图像误差信息比较多,同时本研究提出的算法具有更大的平均梯度,进一步说明其具有更强的图像细节反差能力,可以更好地对地物进行解译。

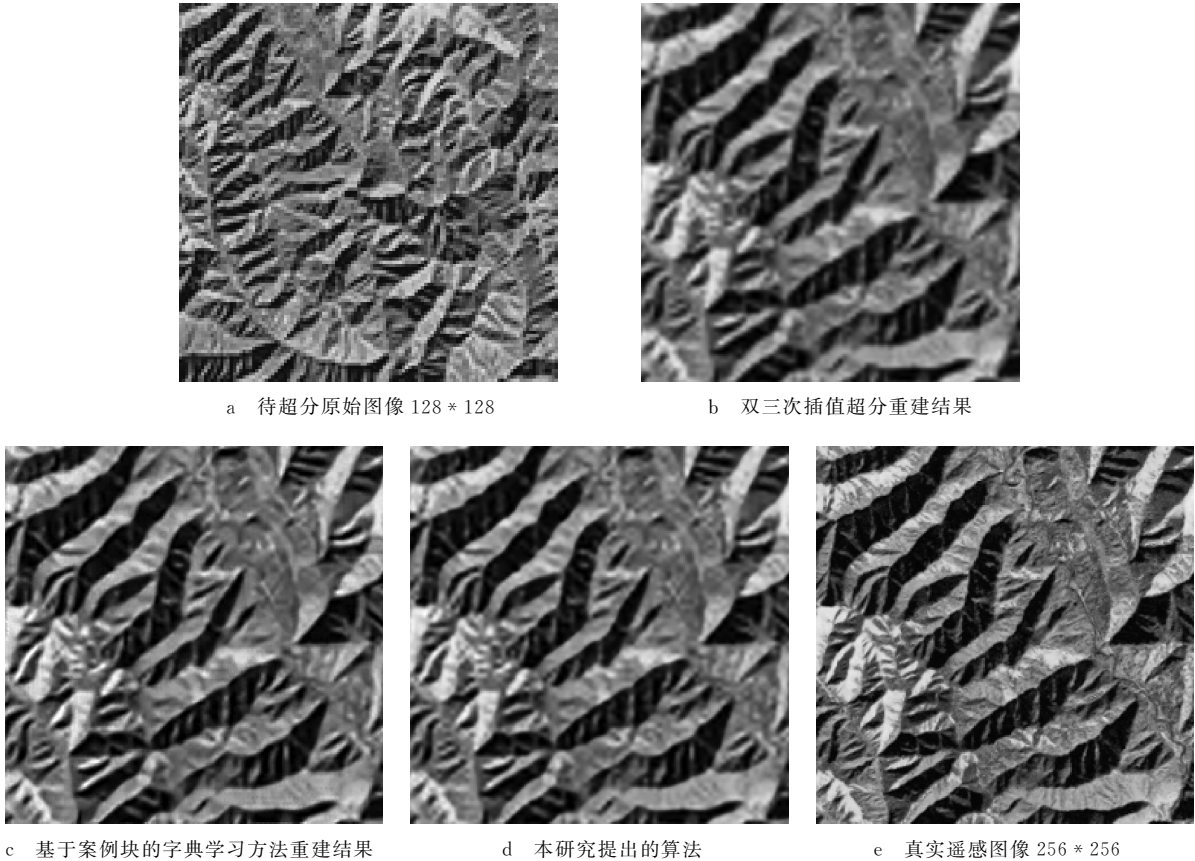


图 3 基于自学习的超分重建结果及对比图

Fig. 3 The results and comparison map of super-resolution restoration

4 结语

研究了基于自学习的遥感图像超分重建算法,该算法基于稀疏表示及字典学习,研究了基于稀疏表示和遥感图像字典自学习算法的原理,通过对单幅遥感图像进行学习,获得了高分辨遥感图像和低分辨率遥感图像的字典对及系数,利用 K-SVD 算法对高分辨率遥感图像进行字典学习,获得能够稀疏表示高分辨率遥感图像的字典,通过特征提取、独立成分分析降维和高分辨率遥感图像的重建等操作后实现了对遥感图像超分辨率的重建,该方法提高了图像的峰值性噪比,降低了均方误差,比其他超分辨重建算法具有更好的性能。

参考文献:

[1] PLAZA A,BENEDIKTSSON J A,BOARDMAN J. Recent advances in techniques for hyperspectral image processing [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113 (9): 110-122.

[2] ROBINSON R K,JENNINGS S A. Hyperspectral imaging on the international space station:an innovative approach to

表 1 重建遥感图像对比
Tab. 1 The comparison of restoration image

采用方法	PSNR/dB	MSE	信息熵	平均梯度
双三次插值重建	22. 7	18. 78	7. 117 2	0. 115 5
基于案例块的超分重建	23. 8	16. 43	7. 493 5	0. 184 1
基于自学习的超分重建	24. 2	15. 78	7. 381 4	0. 375 8

commercial development of space[C]//42nd AIAA aero-space sciences meeting and exhibit. Reno, NV: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

[3] 周宇谷,王平,高颖慧. 基于视觉词袋模型的遥感图像分类方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015 (5): 71-77.

- ZHOU Y G, WANG P, GAO Y H. Remote sensing image classification with bag-of-visual-words model[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2015(5): 71-77.
- [4] 张良培, 沈焕峰, 张洪艳, 等. 图像超分辨率重建[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- ZHANG L P, SHEN H F, ZHANG H Y. Image super-resolution reconstruction[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [5] 张晓燕, 秦龙, 钱渊, 等. 一种改进的稀疏表示超分辨率重建算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2016, 28(3): 400-405.
- ZHANG X Y, QIN L L, QIAN Y, et al. An improved sparse representation of super resolution reconstruction algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2016, 28(3): 400-405.
- [6] 向海燕. 超分辨率图像恢复方法综述[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2014(9): 72-76.
- XIANG H Y. Review of super-resolution image restoration method[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2014(9): 72-76.
- [7] HUANG T S, TSAI R Y. Multi-frame image restoration and registration[J]. Advances in Computer Vision and Image Processing, 1984(1): 317-339.
- [8] FREEMAN W T, JONES T R, Pasztor E C. Example based super-resolution[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2002, 22(2): 56-65.
- [9] YANG S, SUN F, WANG M, et al. Novel super resolution restoration of remote sensing images based on compressive sensing and example patches-aided dictionary learning [C]//Multi-sensor remote sensing and mapping (M2RSM). New York: IEEE, 2011.
- [10] EBRAHIMI M, VRSCAY E. Solving the inverse problem of image zooming using "self-examples"[C]//Image analysis and recognition, 4th international conference, Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- [11] YANG J, LIN Z, COHEN S. Fast image super-resolution based on in-place example regression[J]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2013, 9(4): 1059-1066.
- [12] SHAW G, MANOLAKIS D. Signal processing for hyperspectral image exploitation[J]. Signal Processing Magazine, IEEE, 2002, 19(1): 12-16.
- [13] 潘宗序, 禹晶, 肖创柏, 等. 基于自适应多字典学习的单幅图像超分辨率算法[J]. 电子学报, 2015(2): 209-216.
- PAN Z X, YU J, XIAO C B. Single image super resolution based on adaptive multi-dictionary learning[J]. Acta Electronica Sinica, 2015(2): 209-216.
- [14] HAN N, SONG Z, LI Y. Cluster-based image super-resolution via jointly low-rank and sparse representation[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 38: 175-185.
- [15] GLASNER D, BAGON S, Irani M. Super-resolution from a single image[C]//12th international conference on computer vision, New York: IEEE, 2009.
- [16] 唐道发, 李展, 林晓兵, 等. 雾霾图像恢复增强系统研究[J]. 广东科技, 2016(2): 50-53.
- TANG D F, LI Z, LIN X B. The restoration and enhance system study of haze image[J]. Guangdong Science and Technology, 2016(2): 50-53.

A Novel Super-resolution Remote Sensing Images Restoration Algorithm Based on Sparse Representation and Self-learning

QIN Zhentao^{1,2}, YANG Ru², LIU Xiaoying², YANG Wunian¹, CHEN Jun²

(1. Key Laboratory of Geoscience Spatial Information Technology of Ministry of Land and Resources/
The Institution of Remote Sensing & GIS, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;

2. The College of Mathematics and Computers, Panzhihua University;

3. The College of Civil and Architectural Engineering, Panzhihua University, Panzhihua Sichuan 617000, China)

Abstract: [Purposes] Super-resolution image reconstruction plays an important role in remote sensing image processing. [Methods] Through blocking the remote sensing image, then the K-SVD algorithm is used to dictionary learning through analyzing the remote sensing image itself, and obtains the dictionary which can sparsely represent the high resolution remote sensing image. Then feature extraction, dimension reduction from independent component analysis and reconstruction. [Findings] High resolution remote sensing image is implementation. [Conclusions] Simulation results show that the method improves higher peak-signal to noise ratio and the efficiency the algorithm.

Keywords: sparse representation; dictionary learning; remote sensing image; super-resolution restoration

(责任编辑 游中胜)