

文章编号: 1672-8785(2018)08-0034-06

一种混合红外云图超分辨率重建算法

苏锦程^{1,2,3} 胡 勇^{2,3*} 巩彩兰^{2,3}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 红外云图具有分辨率较低、图幅大和纹理丰富等特点。针对相关研究目前在算法效率优化和局部细节分析方面仍有不足, 提出了一种混合超分辨率重建算法。该方法结合双三次插值重建方法和基于稀疏表达的重建方法在不同类型图像区域中的各自优势, 利用方差将滑动窗口中的图像块区分为平坦和边缘两种类型; 采用双三次插值方法重建平坦型图像块, 采用基于稀疏表达的方法重建边缘型图像块。利用目视、峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 以及残差图评估了算法效果。实验结果表明, 本文方法在 PSNR 指标上比插值法平均提高了 1 dB, 比稀疏法也略有提升; 经局部观察发现, 改进重建结果中平坦区域噪声减少; 该方法的重建耗时明显减少。

关键词: 超分辨率重建; 稀疏表达; 红外云图; 双三次插值

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.08.007

A Super-Resolution Reconstruction Algorithm for Hybrid Infrared Cloud Images

SU Jin-cheng^{1,2,3}, HU Yong^{2,3*}, GONG Cai-lan^{2,3}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai 200083, China)

Abstract: Infrared cloud images have the features of low resolution, large size and rich texture. The current research on super-resolution reconstruction is still inefficient in the optimization of algorithm efficiency and the analysis of local details. To deal with these problems, a hybrid super-resolution reconstruction algorithm is proposed and the effect of the algorithm is evaluated by PSNR combined with residual graph. This method combines the advantages of the bicubic interpolation method and the sparse representation-based method in the reconstruction of different types of images. Through variance, the image blocks in the sliding window are divided into two types of flat and edge. The bicubic interpolation method is used to reconstruct the flat image block, and the edge block is reconstructed by the sparse representation method. The experimental results

收稿日期: 2018-05-03

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所创新项目 (CX-108)

作者简介: 苏锦程 (1993-), 女, 海南海口人, 硕士生, 主要从事遥感图像处理方面的研究。

***通讯作者:** E-mail: huyong@mail.sitp.ac.cn

show that the PSNR index of the hybrid method is 1 dB higher than that of the interpolation method and is slightly higher than that of the sparse method. Moreover, it is found in the partial observation that the noise is reduced in the plain region after reconstruction and the reconstruction time is significantly.

Key words: super-resolution reconstruction; sparse representation; infrared cloud image; bicubic interpolation

0 引言

卫星云图是指由气象卫星观测到的用于显示地球云层覆盖和陆地表面特征的图像,它是研究天气系统的重要工具^[1]。利用卫星云图可以分析不同尺度的云系结构及其活动规律。通过识别和检测不同的天气系统,可为天气分析与预报提供依据。根据传感器观测波段的不同,卫星云图可以分为可见光云图和红外云图两种。其中,红外云图可实现对云的昼夜监测,但因受辐射波长及技术的限制,其分辨率较低。以风云二号系列卫星为例,红外云图的分辨率为 5 km,可见光云图的分辨率为 1.25 km。若考虑综合利用多通道信息,采用数据抽样则会带来一定的数据损失,因此如何提高红外云图的分辨率是一个值得研究的课题。

超分辨率重建是一种从低分辨率图像中恢复出高分辨率图像的技术,它主要可分为基于插值、基于重构、基于学习等三种方法^[2-6]。其中,基于插值的超分辨率重建方法的重建速度快,但容易产生块效应和锯齿效应;基于重构的超分辨率重建方法根据成像模型,从低分辨率图像中逆向求解出高分辨率图像,其病态性容易产生解不稳定的问题;基于学习的超分辨率重建方法可在边缘等信息量丰富的区域重建出更多细节,该方法是近年来的研究热点。在卫星云图重建研究中,金炜等人首次将基于稀疏表示的超分辨率重建方法应用于卫星云图^[7]。周颖等人利用红外云图的结构自相似性建立图像组的稀疏表示;重建时,针对每个结构组自适应选择最匹配的字典^[8]。

云的主要特征包括亮度、形状、轮廓和纹理等^[9]。一个有效的超分辨率重建算法应能在提升分辨率的同时保持上述特征。由于红外云图图幅大,在保证图像特征的基础上,还需兼

顾算法效率。本文充分利用插值法在重建速度上以及学习法在复杂纹理结构重建上的优势,提出了一种混合超分辨率重建方法,即在平坦区域采用快速重建的双三次插值方法替代经典稀疏重建方法。该方法将图像分为平坦和边缘两类区块,然后对平坦图像块采用双三次重建方法,并对边缘图像块采用稀疏重建方法。一方面,保持了边缘区域的细节特征,减少了平坦区域的噪声。另一方面,由于红外云图中的平坦区域占比大,插值重建的引入使得整体处理速度大大加快。

1 相关重建方法

1.1 双三次插值

双三次插值^[10]又称双立方插值(以下简称插值法),是目前最常用的插值算法。该算法利用三次多项式来逼近理论上的最佳插值函数。待插值的像素点灰度值通过对周围 16 个点的灰度值进行加权内插得到。最常用的权值计算公式为

$$W(x) = \begin{cases} (a+2)|x|^3 + (a+3)|x|^2 + 1 & |x| < 1 \\ a|x|^3 - 5a|x|^2 + 8a|x| - 4a & 1 \leq |x| < 2 \\ 0 & |x| \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $a = -0.5$; x 为当前像素点与待求点之间的距离。基于插值的重建方法处理速度快。然而随着放大倍数的增加,该方法无法提供足够多的先验知识;容易产生块效应,导致高频细节损失。

1.2 基于稀疏表达的超分辨率重建

基于稀疏表达的超分辨率重建算法(以下简称稀疏法)是近年来的研究热点^[11]。该方法假设高低分辨率图像块对各自字典具有同样的稀疏表示。通过联合训练高低分辨率图像的稀疏字典,利用高分辨率字典 D_h 和低分辨率字典 D_l 将两者联系起来。设 X 为高分辨率图

像, Y 为低分辨率图像, S 为降采样操作, H 为模糊操作, v 为噪声, 则单帧图像降质模型可描述为

$$Y = SHX + v \quad (2)$$

利用低分辨率字典 D_l 对低分图像块进行稀疏表示。 $F=SH$ 可描述为

$$\min \|\alpha\|_0 \quad s. t. \quad \|FD_l\alpha - Fy\|_2 \leq \epsilon \quad (3)$$

式中, α 为稀疏系数; $\|\alpha\|_0$ 为 L_0 范数。式(3)的求解即为 NP-hard 问题, 因此将式(3)的优化问题转换为 L_1 范数的求解:

$$\min \|FD_l\alpha - Fy\|_2 + \lambda \|\alpha\|_1 \quad (4)$$

则高分辨率图像块的预测结果 x 可由式(5)并结合高分辨率字典 D_h 得到:

$$x = D_h\hat{\alpha} \quad (5)$$

在实际的字典训练和重建过程中, 为了保证高频信息的匹配精度, 采用横竖两个方向的一阶、二阶滤波器提取低分图像特征并对其进行稀疏分解。所采用的四个滤波器为

$$\begin{aligned} f_1 &= [1, 0, -1] & f_2 &= f_1^T \\ f_3 &= [1, 0, -2, 0, 1] & f_4 &= f_3^T \end{aligned} \quad (6)$$

在经典的稀疏重建方法中, 采用一阶、二阶梯度滤波器提取图像特征。此类梯度适合描述阶跃边缘, 而不适合描述大部分的纹理信号。基于梯度的纹理信号分解有大量拖尾的小数, 难以保证稀疏性^[12]。因此在平坦区域的重建中, 与插值法相比, 经典的稀疏重建算法并不具备优势, 还可能会带来额外噪声, 且重建耗时多。

2 混合红外云图超分辨重建算法

插值法在重建速度以及重建平坦区域上具有较大优势, 而稀疏法则可在边缘区域重建出更多细节。红外云图图幅大, 在云层较浓厚区域的亮度分布比较均匀, 而在外围轮廓区域又具有细节丰富、纹理复杂等特点。因此, 本文结合插值法和稀疏法两种方法在不同类型局域的重建特点, 提出了一种混合红外云图超分辨率重建算法(以下简称混合法), 即利用方差区

分边缘和平坦两种图像块类型。在图像重建阶段, 采用双三次插值方法对平坦图像块进行重建, 并采用基于稀疏表达的方法对边缘图像块进行重建。

假设重建时的重叠度为 O , 图像块的尺寸为 N , 方差阈值为 T , 高分辨率字典为 D_h , 低分辨率字典为 D_l 。对低分辨率图像进行 2 倍重建的具体步骤如下:

(1) 将低分辨率图像的灰度值归一化到 0 ~ 255。

(2) 利用双三次插值将低分辨率图像放大至 2 倍大小。

(3) 采用一阶和二阶算子提取图像特征。

(4) 计算特征图像窗口 ($N \times N$) 内的图像方差。若方差大于等于 T , 则求解该图像块对于 D_l 的稀疏表示系数, 并利用 D_h 重建相应的高分辨率图像块。若方差小于 T , 则将双三次插值结果作为相应的高分辨率图像块。

(5) 基于重叠度 O , 滑动窗口遍历图像, 返回执行步骤(4), 直至遍历结束。

3 实验过程与结果分析

本文采用 FY-2G 静止气象卫星的 IR1 红外通道 ($10.3 \sim 11.3 \mu\text{m}$), 选取不同时间拍摄的 12 幅红外云图。通过高斯模糊和 2 倍降采样处理得到低分数据, 并将其作为高低分辨率稀疏字典的训练数据。字典大小设为 1024, 图像块大小为 9×9 , 重叠像素为 1。采用文献[11]所述方法训练出一对高低分辨率字典 D_h 和 D_l 。另截取尺寸为 396×396 的云图作为高分测试数据。采用与低分训练数据相同的处理方式, 得到了尺寸为 198×198 的低分测试数据。分别利用双三次插值重建方法(插值法)、基于稀疏表达的方法(稀疏法)以及混合重建方法(混合法)对低分测试图像进行了 2 倍超分辨率重建, 其中方差阈值 T 根据 PSNR 最大原则而选取为 10。图 1 所示为整体实验步骤。本文采用 Matlab2014b 仿真平台、2.2 GHz CPU 以及 2 G 内存。图 2 所示为三种方法的重建结果。从目视效果上来看, 稀疏法和混合法的重

建结果较好, 图像清晰度较高; 差值法的重建结果较为模糊, 图像边缘不清晰。

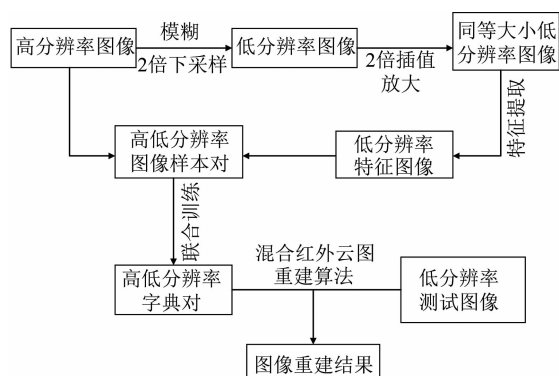


图 1 整体实验步骤

除目视评价外, 本文还利用 PSNR 对重建效果进行客观评价。PSNR 可以衡量相对于原始图像的总失真程度; 其值越大, 则失真越少, 重建效果就越好。表 1 列出了三种重建方法的 PSNR 和耗时数据。可以看出, 与双三次插值方法相比, 基于稀疏表达的重建方法在指标上提升了 1 dB 左右, 而改进方法的重建效果又提升了 0.2 dB 左右。从重建耗时上来

看, 插值法的重建时间为 0.06 s, 稀疏法的重建时间为 25.01 s; 由于采用混合重建, 混合法的重建时间压缩至 4.75 s。

表 1 重建质量评价指标及耗时

方法	PSNR (dB)	耗时 (s)
插值法	46.882	0.06
稀疏法	47.812	25.01
混合法	48.042	4.75

通过将重建结果与原始图像作差, 得到了双三次插值、基于稀疏表达的超分辨率重建以及本文方法所对应的残差图(见图 3)。从中可以明显看出总体残差, 其中插值法在边缘区域出现了方格和模糊效应, 损失了较多细节信息, 因此插值残差图中带有较多的原图信息, 可看出整体台风的涡旋形状; 稀疏法可在边缘区域重建出更多的高频细节信息, 因而残差信息较少, 总体上与高分图像更接近, 在稀疏残差图中主要表现为随机噪声; 混合法在边缘区域采用稀疏重建, 因此其残差图的总体表现与

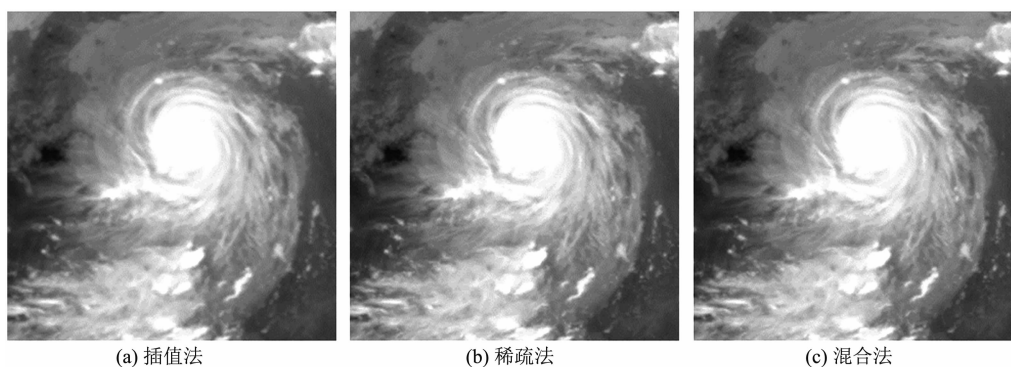


图 2 超分辨率重建的结果对比

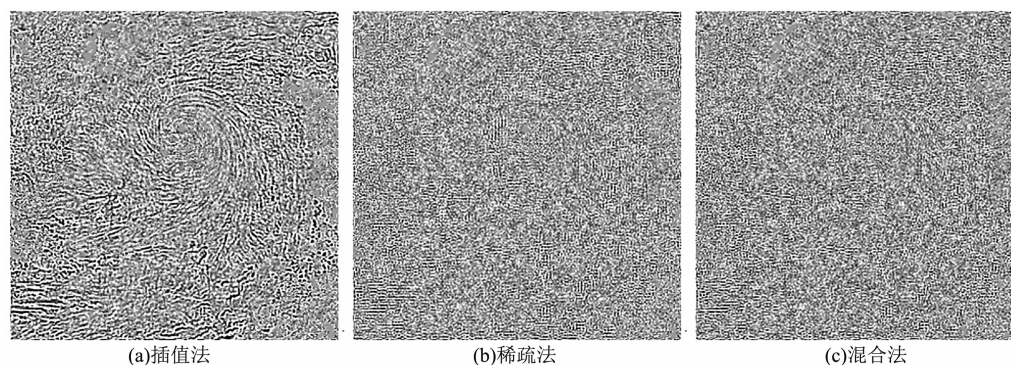


图 3 超分辨率重建的残差对比

稀疏法类似。

表 2 列出了残差图的灰度值统计数据。可以看出,与插值法及稀疏法相比,混合法的残差范围最小,即失真范围最小,且整体分布接近标准正态分布。

表 2 残差图灰度值统计表

方法	最小值	最大值	均值	标准差
插值法	-11	9	0.018	1.155
稀疏法	-8	8	0.011	1.038
混合法	-8	6	0.011	1.010

结合 PSNR、耗时及残差图分析可知,混合法在总体上与原始图像的逼近程度最高,稀疏法略逊,但以上两种方法都能较准确地重建边缘细节;而插值法对边缘区域的重建则有较大偏差,其重建速度最快但总体重建效果最差。

为了进一步分析重建效果,我们放大了图 4 所示方框处的残差局部图像。图 5(a)为局部原图,图 5(b)~图 5(d)为三种重建方法的局部残差图。其中,灰色残差值为 0,偏黑则残差值为负数,偏白则残差值为正数。通过对比三幅残差局部图可发现,插值法在边缘区域的重建效果不佳,残留较多信息,但在平坦区域的重建效果好,残差值大部分为 0,即与原图灰度一致;稀疏法虽然总体上的残余信息较少,但在平坦区域(圆圈处)产生了噪声;混合法结合了前两种方法的特点,未出现图 5(b)中在边缘区域的较多残差,亦未出现图 5(c)中在平坦区域的噪声,即在边缘区域和平坦区域都有较好的表现。

4 结束语

红外云图具有图幅大,云系内部均匀、外

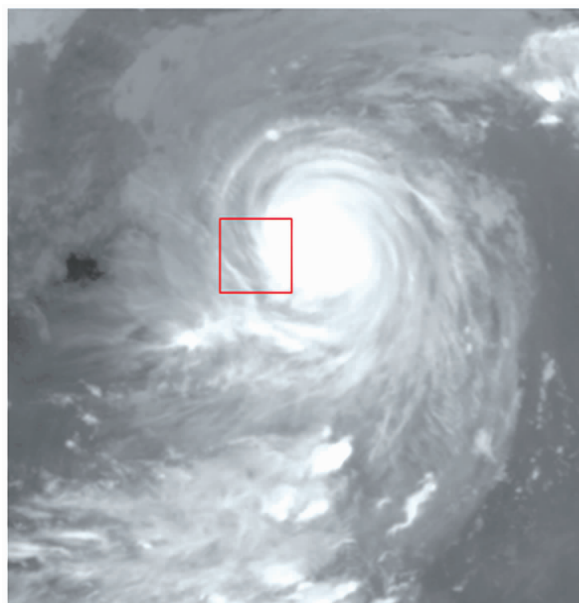


图 4 局部区域的示意图

部纹理复杂的特点。基于稀疏表达的经典重建方法在对红外云图的平坦区域进行重建时,由于图像灰度不是阶跃性分布,信号分解时难以保证稀疏性,在结果上则表现为噪声。双三次插值法虽然容易在边缘区域产生模糊和锯齿效应,但在平坦区域的重建中则不容易产生额外噪声,且在重建速度方面具有很大优势。

基于上述分析,本文提出了一种混合红外云图超分辨率重建算法。该方法利用方差区分边缘区域和平坦区域,并分别采用基于稀疏表达的超分辨率重建方法和双三次插值重建方法对两者进行重建。除了采用目视和 PSNR 评价结果之外,本文还进行了残差图分析,进一步突显了改进效果。实验结果表明,混合红外云图超分辨率算法有效结合了插值法和稀疏法各自的优点,对全图区域进行了有效重建,保持了边缘区域丰富的纹理和边缘信息,减少了平

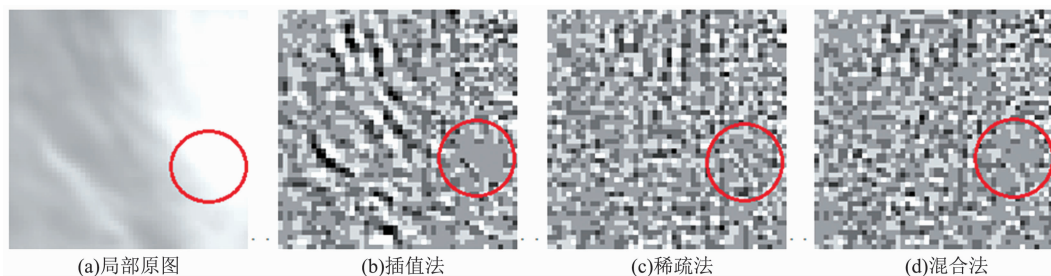


图 5 残差局部对比

坦区域的噪声, 大大缩短了整体处理时间。该算法在重建效果和效率方面具有综合优势, 适用于红外云图的重建处理。

参考文献

- [1] 李秀馨, 王敬东, 徐烨晔, 等. 基于改进 FCM 算法的卫星云图聚类方法研究 [J]. *红外技术*, 2013, **35**(3): 150–154.
- [2] 符祥, 郭宝龙. 图像插值技术综述 [J]. *计算机工程与设计*, 2009, **30**(1): 141–144.
- [3] 符冉迪, 周颖, 颜文, 等. 基于 TV-L1 分解的红外云图超分辨率算法 [J]. *光学精密工程*, 2016, **24**(4): 937–944.
- [4] 闫华. 基于重构的超分辨率技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [5] Freeman W T, Jones T R, Pasztor E C. Example-based Super-resolution [J]. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 2002, **22**(2): 56–65.
- [6] 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, **43**(2): 209–216.
- [7] 练秋生, 石保顺, 陈书贞. 字典学习模型、算法及其应用研究进展 [J]. *自动化学报*, 2015, **41**(2): 240–260.
- [8] 周颖, 符冉迪, 颜文, 等. 基于结构组稀疏表示的红外云图超分辨率方法 [J]. *光电工程*, 2016, **43**(12): 126–132.
- [9] 徐晔晔. 基于多特征的红外云图检索技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [10] Zhao X Y, Yun S U, Dong Y Q, et al. Kind of Super-resolution Method of CCD Image Based on Wavelet and Bicubic Interpolation [J]. *Application Research of Computers*, 2009, **26**(6): 2365–2367.
- [11] Yang J, Wright J, Huang T S, et al. Image Super-resolution via Sparse Representation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, **19**(11): 2861–2873.
- [12] 马丽红, 黄茵, 黎剑晖. 基于灵活 LBP 纹理双三次字典构造及多特征描述的改进 SCSR 算法 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2015, **43**(3): 57–65.