

引用格式:Wang Jinliang, Zeng Hao, Wang Yanying, *et al.* Super Resolution Reconstruction of TM Remote Sensing Image based on Wavelet Analysis[J].Remote Sensing Technology and Application,2016,31(3):476-480.[王金亮,曾浩,王艳英,等.基于小波分析的 TM 遥感图像超分辨率重建[J].遥感技术与应用,2016,31(3):476-480.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.3.0476

基于小波分析的 TM 遥感图像超分辨率重建

王金亮¹,曾 浩²,王艳英¹,刘广杰¹
(1.云南师范大学旅游与地理科学学院,云南 昆明 650500;
2.上海航天电子技术研究所,上海 201109)

摘要:基于图像算法的超分辨率重建技术可以提高光学遥感图像的空间分辨率,能够更加有效地利用现有数据并降低成本。以滇西北香格里拉市小中甸坝为实验区,以 2009 年的 TM 影像为数据源,开展遥感图像超分辨率重建实验研究。首先分析其中造成图像退化的各项因素并经过双线性插值、维纳逆滤波、卷积等处理;然后通过小波分解得到描述各个方向上不同尺度的高低频信息的小波系数,并多次试验推导出满足预期条件的加权因子。再将多时段的低分辨率图像小波系数以小波重构的方式重建。通过实验可以看出,重建图像能提供更多的细节信息,图像质量有了明显提高。
关 键 词:超分辨率重建;TM 图像;小波分析;香格里拉
中图分类号:TP 75 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2016)03-0476-05

1 引 言

遥感图像是获取较大尺度地表分布的重要数据来源。目前,国内外已有可以获取的遥感影像越来越多,如 SPOT 全色影像、TM 多光谱影像、合成孔径雷达影像(SAR)等。然而,由于受大气的振动、目标地与成像卫星之间的相对运动、离散采样以及系统噪声等方面的影响,人们只能得到分辨率较低、存在模糊变形的成像质量较差的遥感图像。高分辨率图像相对于低分辨率图像能够提供更多的细节信息,而很多高精度的实际应用中恰恰需要利用到这些细节信息。因此,现实中人们期望得到高分辨率图像。提高低空间分辨率遥感影像的空间分辨率主要有两种途径,一种是基于硬件的提高成像系统的精度与稳定性的实现方式,另一种是基于软件的超分辨率重建技术。改善硬件,即提升整个成像系统的设计水平及工艺水平,可以有效提高图像的空间分辨率,但往往需要耗费数年的时间及

大量的资源,且不容易实现。超分辨率重建技术可以有效解决这一问题。

图像超分辨率重建技术一般利用同一场景的多幅低分辨率影像重建出一幅超分辨率重建图像,而遥感卫星对同一目标区域多次重复观察得到的多帧序列图像之间,因为时相不同、角度不同和成像系统的变化等因素,存在互补信息,所以可以利用超分辨率影像重建技术生成一幅拥有更多边缘信息和细节信息的影像,提高目标地物的识别能力^[1]。图像退化—重建原理如图 1 所示。

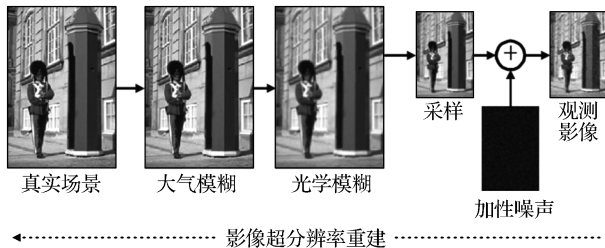


图 1 图像退化—重建机理

Fig.1 Image degradation-reconstruction mechanism

收稿日期:2015-05-02;修订日期:2015-07-23
基金项目:国家自然科学基金项目(41271230、40861009),云南省中青年学术技术带头人培养项目(2008PY056)资助。
作者简介:王金亮(1963—),男,云南武定人,教授,博士,主要从事资源环境遥感应用研究。E-mail:wang_jinliang@hotmail.com。

建立比较精确的降晰模型来描述原始高分辨率图像退化为低分辨率观测图像是超分辨率重建技术中的关键问题。假设成像系统为线性空间移不变成像系统,可以用下式来描述其成像过程:

$$g_k = M_k D_k B + n_0 \quad (1)$$

其中: M_k 表示运动函数, D_k 为图像的降采样模型, B 为模糊函数, n_0 是噪声参数。成像过程实际上是信号与各类影响因子的卷积并附加各种噪声的过程。这里的噪声一般是加性的。因此图像的超分辨率重建需要对成像系统的噪声参数进行模拟、点扩散函数进行识别。

超分辨率重建过程即是图像退化模型的逆过程,重建结果由于其病态性存在以下 3 个问题:①很有可能计算求解最后的结果无法估出重建图像;②没有足够的先验信息作为限制条件来保证解的唯一性,可能存在多个解,实际表现为重建图像的效果不一;③逆过程中噪声的干扰因素较大,即使是很小的噪声干扰,经过逆运算,就可能把误差放大,使重建失去意义。

相对于普通图像,遥感图像包含空间坐标信息、数据量大,图像间配准问题复杂是遥感图像超分辨率重建存在的问题。近年来,小波分析已成为图像处理的新的有利工具。越来越多的研究人员开始应用小波分析来进行图像处理,而将普通图像的超分辨率重建方法引入到遥感图像的超分辨率重建,这类研究在国内的实践较少。本文引入普通图像重建的方法,通过遥感图像的分解、高频信息的恢复及 Matlab 平台下成熟的小波工具应用等对遥感图像超分辨率重建进行研究,旨在为遥感应用研究提供质量更高的影像数据。

2 小波超分辨率图像重构

研究以滇西北香格里拉市小中甸坝为实验区,以 1989 年、1999 年、2003 年获取的 TM 影像数据(轨道号:132/041),建立小中甸地区的时间序列数据源,基于 Matlab 平台,通过傅立叶分析与小波分析相结合的方式开展基于小波分解的遥感图像超分辨率重建实验研究。遥感图像超分辨率重建流程图见图 2。

模糊函数描述了图像形成过程中受到模糊退化影响的程度大小。因此模糊识别是超分辨率图像重建技术的关键因子,模糊函数的精度直接影响着超分辨率重建图像的成像质量;直接体现为图像的降噪去模糊程度。图像的缩放、平移和旋转、图像复原

等过程中均需要用到插值处理,在实际应用中选用效果较好的双线性插值法和最小二乘滤波来实现降噪和去除模糊。因遥感图像与普通图像不同,包含了空间坐标信息,因此本研究中的插值图像不进行尺寸上的调整。

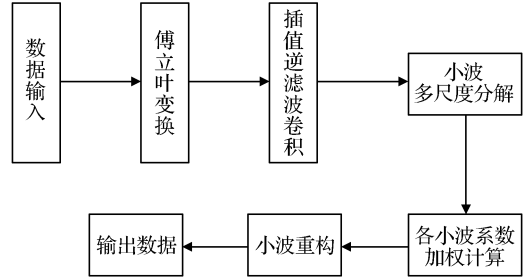


图 2 遥感图像超分辨率重建流程图

Fig.2 Flowchart of remote sensing imagereconstruction

小波变换中使用母小波(Mother Wavelet)为模板,整个变换通过伸缩和平移这个母小波来得到。在低频域中,母小波被压缩,时域分辨率高,高频域中,母小波被拉伸,频率分辨率高^[2]。

在 Matlab 中,将图像输入为二维矩阵的形式分别对其进行 X 轴、Y 轴方向上的小波分解,得到小波变化和逆变换公式。在只考虑二维离散正交小波的情况下,由一维小波推广得到^[3]:

$$\phi(x, y) = \phi(x)\phi(y) \quad (2)$$

由此构造出 3 个二维基本小波函数:

$$\phi^1(x, y) = \mu(x)\varphi(y) \quad (3)$$

$$\varphi^2(x, y) = \varphi(x)\mu(y) \quad (4)$$

$$\varphi^3(x, y) = \varphi(x)\varphi(y) \quad (5)$$

式中 $\varphi(x)$ 、 $\varphi(y)$ 分别为 $\mu(x)$ 、 $\mu(y)$ 对应的正交小波函数。它们的平移伸缩系数为:

$$\varphi_{h,m,n}^1(x, y) = 2^{-h}\varphi^1(2^{-h}x - m, 2^{-h}y - n) \quad (6)$$

$$\varphi_{h,m,n}^2(x, y) = 2^{-h}\varphi^2(2^{-h}x - m, 2^{-h}y - n) \quad (7)$$

$$\varphi_{h,m,n}^3(x, y) = 2^{-h}\varphi^3(2^{-h}x - m, 2^{-h}y - n) \quad (8)$$

其中: $h, m, n \in \mathbb{Z}$, 对于二维矩阵 $f(x)$, 其二维正交小波展开式为:

$$f(x, y) = \sum_{h=1}^H \sum_{m,n} [\alpha_{m,n}^h \mu_{h,n}(x) \varphi_{h,n}(y) + \beta_{m,n}^h \varphi_{h,m}(y) \mu_{h,n}(x) + \gamma_{m,n}^h \mu_{h,m}(x) \mu_{h,n}(y)] + \sum_{m,n} S_{m,n}^h \varphi_{h,m}(x) \varphi_{h,n}(y) \quad (9)$$

这里,

$$\alpha_{m,n}^h = \iint_{R^2} f(x, y) \overline{\varphi_{h,m}(x) \mu_{h,n}(y)} dx dy \quad (10)$$

$$\beta_{m,n}^h = \iint_{R^2} f(x, y) \overline{\mu_{h,m}(x) \varphi_{h,n}(y)} dx dy \quad (11)$$

$$\gamma_{m,n}^h = \iint_{R^2} f(x,y) \overline{\varphi_{h,m}(x)\varphi_{h,n}(y)} dx dy \tag{12}$$

$$S_{m,n}^h = \iint_{R^2} f(x,y) \overline{\mu_{h,m}(x)\mu_{h,n}(y)} dx dy \tag{13}$$

假设 t_1 和 t_2 分别为该小波的高通和低通滤波器,则分解和重构公式如下:

$$\alpha_i^j = \sum_{k,m} t_2(k-2i)t_1(m-2l)S_{k,m}^{j-1} \tag{14}$$

$$\beta_i^j = \sum_{k,m} t_1(k-2i)t_2(m-2l)S_{k,m}^{j-1} \tag{15}$$

$$\gamma_i^j = \sum_{k,m} t_2(k-2i)t_1(m-2l)S_{k,m}^{j-1} \tag{16}$$

$$S_i^j = \sum_{k,m} t_1(k-2i)t_2(m-2l)S_{k,m}^{j-1} \tag{17}$$

借助上述算法,将图像二维矩阵 $f(x,y)$ 分解为一个逼近信号 S ,和 3 个细节信号 α,β,γ 。这样在小波分解的过程中,信号不断地分解,在每个分解层次上获得的逼近信息和细节信息就越来越多。小波重构则将获取的各部分信息通过加权的方式附加到原始图像中进行重构生成新的图像。

3 实验结果与分析

由于超分辨率重建的结果是用低分辨率图像得到的,具有跨尺度的特殊性,至今尚无公认的精度评价方法^[4],重建结果的误差来源于以下几个方面:遥感影像本身的不确定性(点扩散函数、几何校正误差的影像)、超分辨率重建过程中产生的误差、软分类的误差。图像质量评价的研究是图像结果分析的基础部分^[5],重建影像的质量是评价重建结果的重要指标。重建影像的质量评价可以采用主观评价方法和客观评价方法,其中主观评价方法以目视判读为主,缺点在于没有可提供的定量评价参数,同时比较依赖于判读人员的经验;客观评价法主要包含以下 3 种方式:

(1)通过误差矩阵、标准差(RMSE)^[6]、相关系数等一些列指标评价将超分辨率重建结果与参考影

像进行逐像素比较。较适用于可以衡量空间纹理、结构等特性的统计指标。

(2)侧重比较结果图像与参考图像的空间纹理、结构是否一致^[7]。常用变异函数图。

(3)采用基于对象的算法来描述对象形状、大小等参数^[8],例如通过对比超分辨率重建结果图与参考图像中的斑块数、斑块面积等指标评价制图结果。

峰值信噪比是最常见的信号评价指标,均值反映了图像的能量,标准差反映图像信号的离散程度,边缘信息的比较说明边缘信息较原始图像的比较情况,结构相似性则说明的是重建前后两图的结构相似度。本研究选用了评判通用图片质量常见的客观评价指标:均值、标准差、峰值信噪比、边缘信息保持指数和结构相似性指数(表 1)。通过计算,重建结果如下:边缘信息保持指数的值在 1.9~2.3 之间,说明了重建结果在边缘信息的增量上平均提高了两倍;结构相似性指数变化范围在 0.97~0.98 之间,非常逼近于 1,说明重建结果与原始图像的结构相关性程度高;比较常用的 PSNR 指数均值为 28.31 dB。综合主、客观评价结果得出结论:重建结果优于原始图像。实验结果如图 3 和图 4 所示。

表 1 重建结果评价指标及结果
Table 1 Evaluation index of reconstructed image

波段	均值	标准差	评价指标		
			边缘信息保持指数	结构信息相似性指数	峰值信噪比
B1	60.582	42.700	2.332	0.983	26.762
B2	51.261	44.125	2.124	0.980	27.186
B3	57.073	55.243	2.058	0.976	25.810
B4	53.845	29.169	1.950	0.973	30.933
B5	55.117	40.931	1.972	0.974	29.055
B7	43.083	34.004	2.058	0.979	30.126

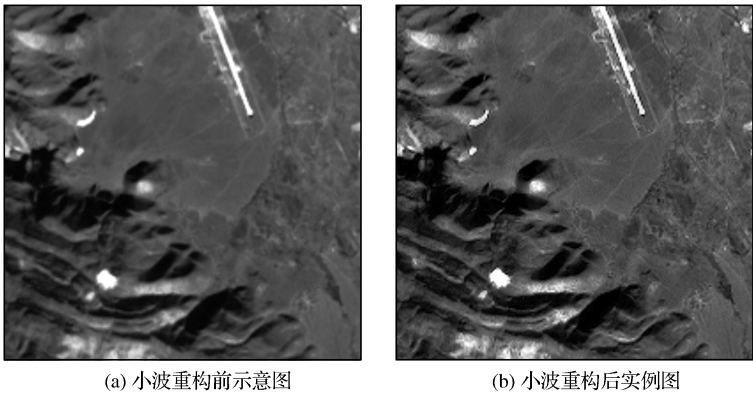
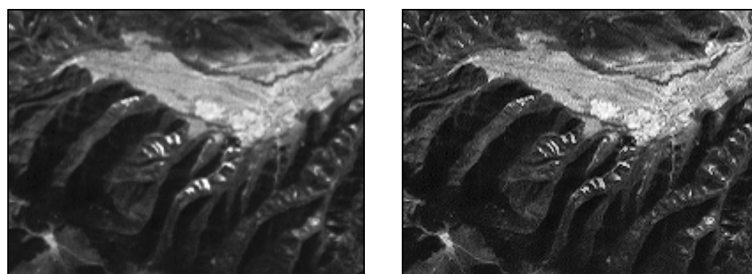


图 3 遥感图像小波重构前后实例图(1)
Fig.3 Example of remote sensing image before and after wavelet reconstruction(1)



(a) 小波重构前示意图

(b) 小波重构后实例图

图4 遥感图像小波重构前后实例图(2)

Fig.4 Example of remote sensing image before and after wavelet reconstruction (2)

4 结 语

本文围绕序列遥感图像的超分辨率重建所涉及的关键问题,在认识图像退化机理的基础上研究了基于小波分解/重构的图像超分辨率重建算法。从研究结果中可以知,重建图像优于原始图像,包含的信息内容更丰富。图像傅立叶变换是超分辨率重建算法中将二维矩阵从空间域转换到频率域处理的基础。通过试验的手段从拉普拉斯模型、高斯模型、椒盐噪声模型等不同的模型中确定了图像退化的图像噪声参数、图像模糊参数的数学模型和加权系数。图像间相对亚像素位移则通过遥感图像几何校正的处理方法进行匹配。重建过程是将序列图像通过单幅、单波段、分块化进行了双线性插值,逆滤波、卷积等处理后再进行多幅图像的小波重构。重建过程中尝试用不同的母小波对图像进行分解重构,综合考虑时间和工作量的关系选取实际可行的小波变换函数。

在图像处理中,研究选用了 Matlab 平台,该平台的优点是计算精度高,计算数据量大;缺点是对于遥感图像的格式兼容性不好,需要转换图像格式,因此同时需要在重建过程中加入更符合实际的运动估计模型,提高重建结果的精度。

参考文献(References):

[1] Zhang Yan, Xu Kun, Li Yong. Remote Sensing Image Super-resolution based on POCS and Out-of-Core[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2010, 50(10): 1743-

1746.[张砚,徐昆,李勇.基于外存和凸集投影法的遥感图像超分辨率方法[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(10): 1743-1746.]

- [2] Liu Ting. Super Resolution Reconstruction of Remote Sensing Image based on Wavelet Transform[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2009.[刘挺.基于小波的遥感图像超分辨率重建[D].成都:电子科技大学,2009.]
- [3] Li Lifan. Super Resolution Algorithm for Image Interpolation based on Wavelet Domain[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2009.[李丽芬.基于插值的小波域图像超分辨率算法研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2009.]
- [4] Mertens. Using Genetic Algorithms in Sub-pixel Mapping[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(21): 4241-4247.
- [5] Zhou Cui, Duan Guangzhong. Super Resolution Reconstruction Technology and Method of Remote Sensing Image[J]. Technology Innovation and Application, 2012, (30): 67.[周璀,段光中.遥感影像超分辨率重建技术与方法[J].科技创新与应用, 2012, (30): 67.]
- [6] Zhou Lijing. Study on Image Super Resolution Reconstruction Method based on Wavelet[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.[周丽静.基于小波的全景图像超分辨率重建方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.]
- [7] Lin Haobo, Bo Yanche, Wang Jindi, et al. Research Progress in Super-resolution Mapping from Remotely Sensed Imagery[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(4): 495-502.[林皓波,柏延臣,王锦地,等.遥感影像超分辨率制图研究进展[J].中国图像图形学报, 2011, 16(4): 495-502.]
- [8] Li Xi, Chen Fengrui, Yu Zhifeng. Spectral Unmixing of Remote Sensing Images Using Interpolation of Wavelet Coefficients[J]. Journal of Applied Sciences, 2012, 30(6): 613-618.[李熙,陈锋锐,于之锋.小波系数插值支持下的遥感影像混合像元分解[J].应用科学报, 2012, 30(6): 613-618.]

Super Resolution Reconstruction of TM Remote Sensing Image based on Wavelet Analysis

Wang Jinliang¹, Zeng Hao², Wang Yanying¹, Liu Guangjie¹

(1.Yunnan Normal University, School of Tourism and Geography Science, Kunming 650500, China ;

2.Shanghai Institute of Aerospace Electronics Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Super resolution reconstruction algorithm can improve the spatial resolution of optical remote sensing images, which can effectively utilize existing data and reduce costs. Take Xiaozhongdian basin of Shangri-La City in northwest Yunnan as experimental areas and Landsat TM image(2009) as data source, super resolution reconstruction algorithm has been studied in the research. First, we analyzed the various factors of image degradation and processed the image by using bilinear interpolation, Wiener inverse filter, convolution and other treatment. Then got wavelet coefficients on different scales of high/low frequency information by using wavelet decomposition, and derived weighted factor that can meet the expected conditions through many tests. And wavelet coefficient of multi-period low-resolution images has been rebuilt by means of wavelet reconstruction. Experimental results show that the reconstructed image can provide much more detail information and the image quality has been improved significantly than unreconstructed image.

Key words: Super resolution reconstruction; TM image; wavelet transform; Shangri-La