

EMD 与小波分析结合的特征保持图像去噪方法

王卫红^{1,2} 程时伟¹ 张素琼¹ 秦绪佳¹

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310032)¹

(北京航空航天大学软件开发环境国家重点实验室 北京 100083)²

摘 要 图像在获取和传输等过程中伴有各种噪声,而细节与边缘是表征图像信息的重要特征,提出一种经验模式分解(EMD)与小波阈值结合的图像特征保持去噪方法。该方法首先将图像进行 EMD 分解,分解出内蕴模式分量与剩余分量;然后将内蕴模式分量进行小波分解,采用小波阈值去噪进行滤波、去噪和细节特征保留;最后将小波去噪后的内蕴模式分量图像叠加到剩余分量中,得到最后的去噪图像。实验结果表明,该方法克服了单独使用 EMD 或小波阈值去噪的不足,在有效去噪的同时还保持了图像的边缘细节信息。

关键词 图像去噪,经验模式分解,小波,特征保持

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Feature-Preserving Image Denoising Method Combining EMD and Wavelet Analysis

WANG Wei-hong^{1,2} CHENG Shi-wei¹ ZHANG Su-qiong¹ QIN Xu-jia¹

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)¹

(State Key Laboratory of Software Development Environment, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)²

Abstract In the process of obtaining and transmission, image will be degraded by all kinds of noise. Since the detail and edge are essential for describing the features of image, a novel denoising method, which combines empirical mode decomposition(EMD) and wavelet analysis with the aim to keep the detail features, was proposed in this paper. Firstly, the method decomposes the image by EMD, obtains the intrinsic mode function(IMF) and the remaining component(R). Secondary, it decomposes the IMF by wavelet, filters obtained the IMF to remove the noise and keep the detail features. Finally, it adds the IMF filtered by wavelet and the remaining component decomposed by EMD, and then obtains the denoised image. Experiments show that the proposed method can remove noise well while keeping the detail feature which can't be achieved only by EMD or wavelet method.

Keywords Image denoising, EMD, Wavelet, Feature preserving

1 引言

图像在获取以及传输等过程中会受到外界因素的干扰,使其普遍都带有噪声,并会导致图像中的细节丢失,如遥感图像中的地形地貌等细节特征^[1]。此外,噪声的存在也不利于真实信息的提取,对图像的下一步分析带来很大的影响。为了改善图像质量,使之能够更加准确地反映实际物体的特征信息,需要对图像进行有效的去噪。这也是后续工作如图像分割、特征提取和模式识别的基础。

目前,常用的去噪方法不管是线性还是非线性平滑算法,都会在去噪的同时造成边缘的模糊以及细节特征的丢失^[2]。近年来小波理论得到了广泛的研究,小波变换由于其具备良好的时频特性,能够将图像的结构和纹理分别表现在不同分辨率层次上^[3]。基于小波方法,不少学者对去噪方法进行了

改进,提出了一些保持边缘信息的新方法^[4,5]。侯波等^[6]提出了一种基于小波变换去除遥感图像噪声的方法,获得了较好的效果。为了解决 SAR 图像中的斑点噪声的去除和细节保留的矛盾,王贞俭等^[7]提出了一种方向小波域的选择性阈值 SAR 图像去噪方法。

1998 年,美国科学家 Huang 等人^[8]提出了内蕴模式函数(Intrinsic Mode Function, IMF)概念和经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法。EMD 方法利用信号的局部特征时间尺度,从原信号中提取出若干个内蕴模式函数(IMF)和一个剩余分量,分解出的各 IMF 分量突出了数据的局部特征,剩余分量则体现了信号中的缓慢变化量^[9,10]。由于边缘特征是图像最为有用的高频信息,因此先对原始图像进行二维经验模式分解,得到剩余分量和高频分量;接着对分离得到的包含噪声与细节的高频信息进行小波分解;最后

到稿日期:2013-01-07 返修日期:2013-07-31 本文受国家自然科学基金(61075118,61005056),北京航空航天大学软件开发环境国家重点实验室开放课题(SKLSDE-2012KF-05)资助。

王卫红(1969—),男,硕士,教授,主要研究方向为地理信息系统、遥感图像处理,E-mail:wwh@zjut.edu.cn;程时伟(1981—),男,博士,副教授,主要研究方向为人机交互;张素琼(1984—),女,硕士生,主要研究方向为图像处理;秦绪佳(1968—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机图形学。

叠加 EMD 剩余分量和小波阈值去噪图,得到最终的图像。

本文首先分析了经验模式分解原理,接着将一维 EMD 分解的方法引申到二维的图像分解中,提出了经验模式分解与小波分析结合的图像特征保持的去噪方法。最后通过实验表明,本文方法在对图像进行去噪的同时能够保持其真实的边缘细节信息。

2 EMD 分析原理

EMD 作为一种新的信号处理方法,可以将一个复杂的非线性、非平稳信号序列逐级分解成若干个平稳的数据层与最终趋势项的叠加。其中内蕴模式函数就是每一个平稳数据层,代表了信号不同尺度的特性。

EMD 方法能够将复杂数据集分解为有限的、小数量的内蕴模式函数(IMF)。Huang 等人提出的 EMD 方法中,一个 IMF 通常要满足以下两个条件^[11]:①在整个数据集上,极值点的数目以及过零点的数目必须相等或者至多相差一个;②在任何一点上,由局部最大值和局部最小值形成包络的平均值必须等于零。综上,每个内蕴模式函数 IMF 只包含单模态的振动。设原始数据为 $x(t)$,一维 EMD 的具体分解过程如下:

(1)初始化使 $r_0(t)=x(t)$, $i=1$;

(2)抽取第 i 个 IMF:①初始化使 $h_0=r_i(t)$, $k=1$;②对 $h_{k-1}(t)$ 抽取局部的极大值和极小值;③对 $h_{k-1}(t)$ 极大值点和极小值点分别通过样条插值连接起来,形成上包络和下包络;④计算上下包络的均值 $m_{k-1}(t)$;⑤计算 $h_k(t)=h_{k-1}(t)-m_{k-1}(t)$;⑥计算结束准则函数:

$$SD_i = \sum_{k=0}^K \frac{|h_{i-1} - h_i(k)|^2}{h_{i-1}(k)^2} \quad (1)$$

如果满足结束准则函数,则 $h_k(t)=c_i(t)$,否则转到②,并且 $k=k+1$ 。

(3)定义 $r_i(t)=r_{i-1}(t)-c_i(t)$;

(4)如果在 $r_i(t)$ 中存在的极点数多于 2 个,则转到(2)并且 $i=i+1$,否则分解结束, $r_i(t)$ 是原始数据的剩余分量。最后,得到的分解结果为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n \quad (2)$$

这样,获得了 n 个 IMF 模式分量和一个剩余分量信息。IMF 模式分量代表了原始信号中包含的不同时间尺度的特征信号,剩余分量代表了原始数据中的趋势量信息^[12]。

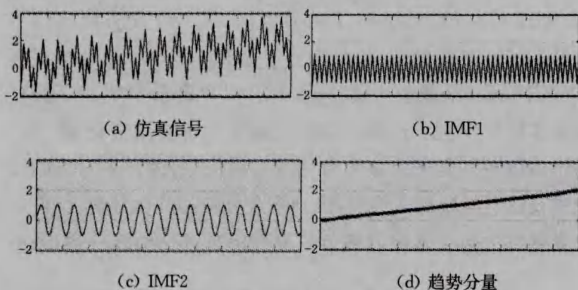


图 1 EMD 分解各内蕴模式分量时域波形及趋势分量

用一个仿真信号来描述 EMD 分析方法,仿真信号是由三角波、正弦波和趋势分量叠加而成的,如图 1(a)所示,对其进行 EMD 分解,内蕴模式分量的时域波形及趋势分量如图 1

(b)~(d)所示,图 1(b)和(c)分别表示组成原始信号的两个分量,图(d)为信号 EMD 的趋势分量。

3 EMD 图像分析方法

将一维 EMD 分解方法扩展到二维信号处理上,在处理二维图像信号时,首先求得待处理图像的局部极大值点和局部极小值点,然后构造极大、极小值插值曲面^[13]。记 $I(x,y)$ 为待处理的数字图像,将其极大插值曲面和极小插值曲面的代数均值标记为 $m(x,y)$ 。二维经验模式分解方法描述如下:

设图像 $I(x,y)$ 与 $m(x,y)$ 的差为 $h(x,y)$,即

$$h(x,y) = I(x,y) - m(x,y) \quad (3)$$

式中, $h(x,y)$ 是 $I(x,y)$ 的一个中间过程值,重复上述过程 k 次,直到 $h(x,y)$ 是一个内蕴模式函数:

$$h_{1(k-1)}(x,y) - m_{1k}(x,y) = h_{1k}(x,y) \quad (4)$$

设 $imf_1(x,y)$ 为分离出来的第一个内蕴模式,则

$$imf_1(x,y) = h_{1k}(x,y) \quad (5)$$

然后把 $imf_1(x,y)$ 从原数据中分离出来,

$$I(x,y) - imf_1(x,y) = R_1(x,y) \quad (6)$$

将 $R_1(x,y)$ 作为新的数据,重复上述过程 n 次,有迭代关系:

$$R_1(x,y) - imf_2(x,y) = R_2(x,y)$$

...

$$R_{n-1}(x,y) - imf_n(x,y) = R_n(x,y)$$

最终可以得到的表达式为:

$$I(x,y) = \sum_{i=1}^n imf_i(x,y) + R_n(x,y) \quad (8)$$

式中, $I(x,y)$ 是原图像数据, $imf_i(x,y)$ 是尺度分离后得到的尺度由大到小的小尺度细节信息, $R_n(x,y)$ 是得到的最终大尺度趋势项。

图 2 为 lena 图的 EMD 二维分解,图 2(b)、(c) 为图 Lena 分解出的两个内蕴模式分量,图 2(d) 为经过两次 EMD 分解后的剩余分量。

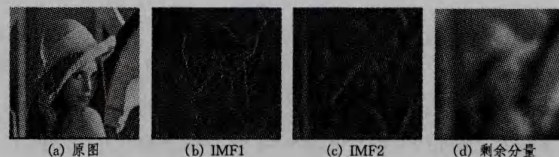


图 2 lena 图的 EMD 分解

4 特征保持的图像去噪

4.1 小波阈值去噪

图像信号的能量主要集中在低频区域,而噪声和图像的边缘、细节等主要分布在高频区域。传统的去噪方法往往在去除噪声的同时破坏了图像的细节和边缘信息,小波阈值去噪提供了一种既降低噪声又保持边缘的方法^[14]。从能量聚集的角度来看,在小波域上所有的小波系数都对噪声有所贡献,而只有一小部分的小波系数对图像信号的能量有贡献。

设原图像为 $f(x,y)$,带噪声图像为 $g(x,y)$,并设

$$g(x,y) = f(x,y) + e(x,y) \quad (9)$$

式中, $e(x,y)$ 是噪声分量,它独立分布于 $N(0, \sigma^2)$,且与 $f(x,$

y)独立。 δ 为噪声方差。在小波域上进行正交变换,式(9)经变换后得:

$$G(x, y) = F(x, y) + E(x, y) \quad (10)$$

式中, $G(x, y)$ 是有噪声小波系数, $F(x, y)$ 是无噪声小波系数。通常对噪声的讨论仅限于加性的高斯白噪声,即 $e(x, y)$ 互为独立。

对于小波系数 $G(x, y)$,若它大于给定阈值,就认为此系数含有图像信息分量,是信号与噪声共同作用的结果,予以保留;若它小于该阈值,则认为此系数不含图像信息,是噪声作用的结果,滤除这些系数达到去噪的目的。去掉噪声小波系数后,进行小波逆变换,得到去噪后的图像。小波阈值的选择取 $\lambda = \delta \sqrt{2 \log 10^N}$, N 是图像像素点数。图3为加入高斯噪声图像的小波阈值去噪结果。



图3 小波阈值去噪

4.2 特征保持的图像去噪原理与算法

由于EMD分解是自适应的,分解出的第一级内蕴模式分量IMF1在包含噪声的同时也含有图像信号的边缘信息,即边缘信息也作为高频分量被分解在IMF1中。而小波阈值去噪方法中,阈值选择适当,噪声可得到较好去除,但依然存在少量噪声。另一方面,部分细节信息也被当作噪声而被去除,从而带来边缘的模糊,如图3(b)所示。在遥感图像去噪中,边缘信息往往是后续处理如分割、目标识别的重要依据,应该得到很好的保留。

由于EMD分解的IMF1中包含了噪声与边缘信息这些高频分量,在IMF1中,噪声分量往往比边缘细节分量的频率更高,因此我们提出了基于EMD与小波去噪结合的遥感图像去噪方法。在对遥感图像去噪时,首先应用二维EMD分解原理,从图像中分离出表示图像内容的低频信息和表示图像噪声与细节的高频信息;然后对图像的高频信息进行小波分解,去除噪声小波系数,得到EMD高频部分的去噪图;最后将EMD剩余分量与小波阈值去噪图进行叠加,得到最终的去噪结果。对图像进行EMD与小波去噪结合的去噪算法的步骤描述如下:

(1)对带噪声图像进行EMD分解,分解后得到高频分量IMF1和剩余分量 $R1$;

(2)对EMD分解得到高频分量IMF1进行小波阈值去噪,得到小波去噪结果 $R2$;

(3)将EMD分解剩余分量 $R1$ 和小波去噪结果 $R2$ 进行叠加,得到最终去噪结果: $F = R1 + R2$ 。

图4(a)为加入高斯噪声的测试图像,图4(b)为EMD分解得到的内蕴模式分量IMF1(即高频分量),图4(c)为一次EMD分解的剩余分量。

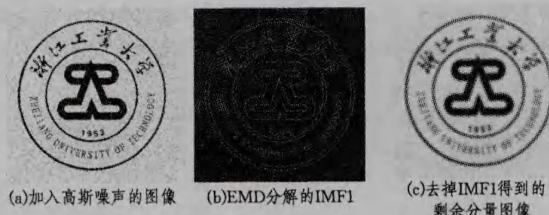


图4 EMD方法去噪

图5(a)为图4(b)中IMF1进行小波阈值去噪中要滤除的高频分量(即噪声分量);图5(b)为图4(b)中IMF1进行小波阈值去噪后的结果;图5(c)为图4(c)与图5(b)进行叠加后的结果,即本文提出的EMD与小波结合的去噪结果。



图5 EMD与小波结合的去噪

5 实验结果与分析

基于上文的理论分析,下文分别以lena图和遥感图像为例,应用MATLAB软件对本文算法进行验证。

5.1 Lena图实验与性能分析

如图6所示,选取 256×256 的lena图进行去噪实验。其中,图6(a)加入了10%高斯白噪声,图6(b)是采用EMD去噪后的结果,图6(c)是采用小波去噪后的结果,图6(d)是用EMD和小波分析结合的方法,即本文方法的去噪效果。



图6 带噪声lena图不同方法的去噪比较

为进一步验证法噪效果,采用图像峰值信噪比(PSNR)进行分析。PSNR的定义如下:

$$PSNR = 10 \lg \left[\frac{255^2}{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f(x, y) - f'(x, y))^2} \right] \quad (11)$$

式中, $f(x, y)$ 为理想图像, $f'(x, y)$ 为去噪后的图像。

经过不同去噪方法处理后,图像在边缘处可能会有部分信息的丢失。下面从边缘保持的角度对上述lena图的去噪结果进行比较。为了表达去噪处理后图像的边缘保持能力,本文采用了边缘保持指数^[15],其定义如下:

$$ESI = \frac{\sum_{i=1}^m |DN_{R1} - DN_{R2}|_{\text{Filtered image}}}{\sum_{i=1}^m |DN_{R1} - DN_{R2}|_{\text{Original image}}} \quad (12)$$

式中, m 是样本个数, DN_{R1} 、 DN_{R2} 表示的是边缘交接处左右、上下相邻像素的灰度值。ESI值越高,表明边缘保持能力越强。选取lena图水平方向上的第15到第30列、垂直方向上的第150到第190行,分别计算其水平和垂直边缘保持指数。

采用 ESI 能够有效地表达去噪后图像的边缘保持能力。表 1 给出了不同方法对 lena 图处理后的评价指数值。

表 1 模板图像的性质示例

	EMD 去噪	小波去噪	本文方法
峰值信噪比 PNSR	17.645	17.827	17.691
水平边缘保持指数	1.031	1.293	1.791
垂直边缘保持指数	2.061	1.950	2.202

从表中可以看到,经过 3 种方法去噪后的图像的峰值信噪比都很接近。尽管表中显示小波去噪后的 PNSR 值较大,但其边缘指数不高。而本文方法在水平和垂直方向上的边缘保持指数的值都较高。综合来看,本文将 EMD 和小波分析结合的去噪方法,与其他的单一去噪方法相比,在滤除噪声和边缘细节的保持效果方面具有明显的优势。

5.2 遥感图像实验与分析

遥感图像在处理过程中对噪声去除和细节保持都有较高的要求。为此,选取了机场、山区、港口遥感图像进行实验。

图 7 和图 8 分别是某机场和山区公路的遥感图像,实验中同样采用 EMD 方法、小波去噪以及本文方法对其进行去噪处理。从图中可以看出,单独的 EMD 和小波去噪方法能够有效地去除遥感图像中的噪声,但是在一些细节信息的保持上面略显不足。例如图 7 中,机场中的白线失真或者产生了变化;在图 8 中,公路旁山脉的纹理细节信息被模糊掉了。而本文提出的将 EMD 和小波分析结合起来的去噪方法,较好地保持了遥感图像中的细节特征信息,并且处理后的视觉效果较好。

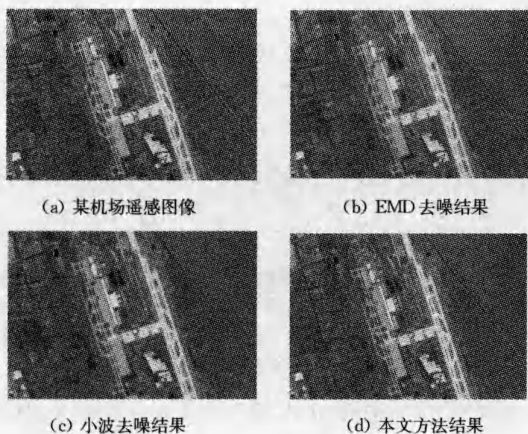


图 7 某机场遥感图像不同去噪方法比较

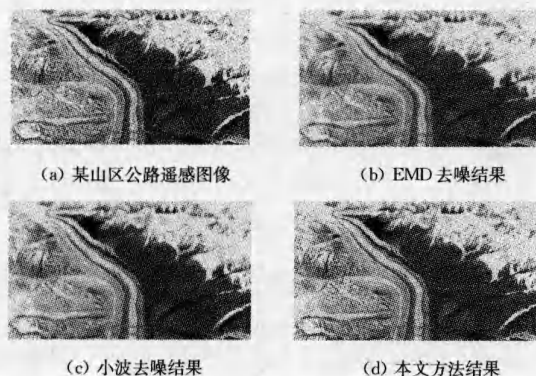


图 8 某山区公路遥感图像不同去噪方法比较

结束语 传统的去噪方法总是在去噪和边缘保留上存在矛盾,往往在去除噪声的同时模糊了边缘信息,而在很多图像处理等应用领域,边缘等细节信息是分割和目标识别等的重要依据。为此,本文提出了一种将经验模分解和小波分析结合的去噪方法。该方法先用二维 EMD 分解;再将分解得到的高频分量进行小波分解;最后将小波分解所得到的与 EMD 分解的剩余分量进行重构。实验结果表明,该方法在去除噪声的同时,有效地保持了图像的特征细节信息。

参考文献

- [1] 李冰,王艳,耿则勋.一种改进的遥感图像自适应加权滤波算法[J].测绘学院学报,2005,22(2):148-150
- [2] 张红英.全变分自适应图像去噪模型[J].光电工程,2006,33(3):50-53
- [3] 刘钢,修吉宏,刘明,等.航空图像的小波去噪[J].光学精密工程,2004,12(4):140-142
- [4] 石洪波,马骊良,韩笑.一种基于小波变换图像去噪的新方法[J].吉林大学学报:理学版,2007,45(4):607-610
- [5] 张春梅,张太猛,陆从德.一种能保留图像边缘信息的去噪新方法[J].中国图像图形学报,2006,11(10):1464-1467
- [6] 侯波,迟耀斌,朱重光,等.一种基于小波变换去除遥感图像噪声的方法[J].遥感学报,2003,7(5):379-384
- [7] 王贞俭,曲长文.方向小波域的选择性阈值 SAR 图像去噪[J].中国图像图形学报,2009,14(1):65-70
- [8] Huang N E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [C]// Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, London, 1998, A454: 903-995
- [9] Huang N E, Wu M L, Long S R. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis [C]// Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, London, 2003, A459: 2317-2345
- [10] Flandrin P, Rilling G, Goncalves P. Empirical mode decomposition as a filter bank [J]. IEEE Signal Processing Letters, 11(2): 112-114
- [11] 刘忠轩,彭思龙.方向 EMD 分解与其在纹理分割中的应用[J].中国科学 E 辑:信息科学,2005,35(2):113-123
- [12] 盖强.局域波时频分析方法的理论研究与应[D].大连:大连理工大学,2001
- [13] Qin Xu-jia, Liu Shi-shuang, Wu Zheng-qiang. Medical Image Enhancement Methods Based on 2D Empirical Mode Decomposition [C]// Proceedings of ICBBC, Shanghai, May 2008: 2533-2536
- [14] Zervakis M E, Sundararajan V, Parhi K K. Vector processing of wavelet coefficient for robust image denoising [J]. Image and Vision Computing, 2001, 17(19): 435-450
- [15] 李兴东. SAR 图像相干斑噪声抑制算法的研究 [D]. 上海:上海交通大学,2007