

文章编号:1001-9014(2009)04-0316-05

对数变换与小波变换用于野外采集植物波谱降噪

周广柱¹, 王翠珍¹, 杨锋杰², 李寅明¹

(1. 山东科技大学 化学与环境工程学院, 山东 青岛 266510;

2. 山东科技大学 地质科学与工程学院, 山东 青岛 266510)

摘要:地物波谱野外测试过程中常引入噪声. 本文结合植物波谱测试原理, 提出波谱噪声属于乘性复合噪声. 经理论推导, 又提出了对数变换与小波变换相结合的降噪方法. 仿真降噪试验结果表明, 空域相关算法最适合于光谱数据降噪, 模极大法次之, 阈值法则不适于该类噪声的消减. 对野外采集植物波谱的处理结果表明, 空域相关去噪法对1450nm附近的噪声去除能力较强, 1800~1900nm强噪声则去噪效果不理想. 原因在于波谱仪纪录精度有限, 当理论比值远大于1时, 能够准确记录下来; 远小于1时记录值为0, 从而在强噪声干扰波段出现较严重的系统误差, 经小波降噪后被视作奇异点被保留下来. 研究表明对数变换与小波变换相结合采用空域相关去噪对于含乘性复合噪声的光谱是可行的.

关键词:对数变换; 小波变换; 野外采集波谱; 空域相关滤波

中图分类号:TP79 **文献标识码:**A

FIELD COLLECTED PLANT SPECTRUM DENOISING BY LOGARITHM TRANSFORM AND WAVELET TRANSFORM

ZHOU Guang-Zhu¹, WANG Cui-Zhen¹, YANG Feng-Jie², LI Yin-Ming

(1. School of Chemistry & Environment Engineering, Shandong University of Science & Technology, Qingdao 266510, China;

2. School of Geology Science & Engineering, Shandong University of Science & Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: The objects' spectrum is often contaminated by noise when it is collected in the open air. According to the principle of the spectrum collection, the noise was considered as one kind of multiplicative compound noise. By theoretical derivation, the combination of logarithm transform and wavelet transform was introduced into noise reduction. Multiplicative noise simulation test was carried out. And the results show that the spatial correlation algorithm is best suited for spectral data denoising, modulus maxima algorithm is inferior to it. Threshold shrinking rule is unsuitable for spectrum denoising. The wild plants spectrum were processed based on spatial correlation algorithm. Results show that the noise near 1450 nm in the spectrum is perfectly denoised, while near 1800 ~ 1900 nm strong noise can not be removed perfectly. The reason is the limited records accuracy of the spectrometer. When the theoretical ratio is far greater than 1, the spectrometer will accurately record them. While the theoretical ratio is far less than 1, the record will be 0. So serious system errors will be generated in strong noise band and will be retained after the wavelet transform was applied because they are considered as signal singularity. Experiments prove that spatial correlative filtering with the combination of logarithm transform and wavelet transform is feasible for multiplicative-noise-contaminated spectrum denoising.

Key words: logarithm transform; wavelet transform; field collected spectrum; spatial correlative filtering

引言

遥感生物地球化学为研究生化物质对植物影响提供了理论支持^[1,2]. 地物光谱是遥感生物地球化学信息获取的重要来源. 在野外植物光谱曲线测量

过程中存在大气吸收、大气散射、传感器信噪比下降等干扰因素, 尤其是在红外水吸收区域, 噪声影响严重^[3]. 野外采集的光谱具有明显的噪声局部化特征, 其强度和频率在整个采集波段存在很大变化. 采用传统的去噪手段很难达到目的. 通常在提取特征

收稿日期: 2008-05-22, 修回日期: 2009-02-04

Received date: 2008-05-22, revised date: 2009-02-04

基金项目: 国家“863”计划(2009AA12Z147)、国家自然科学基金(40842003)和山东省软科学(2007RKA071)资助项目

作者简介: 周广柱(1974-), 男, 山东莱芜人, 副教授, 博士后, 主要从事环境遥感和环境污染防治研究, E-mail: zhou_sdust@163.com.

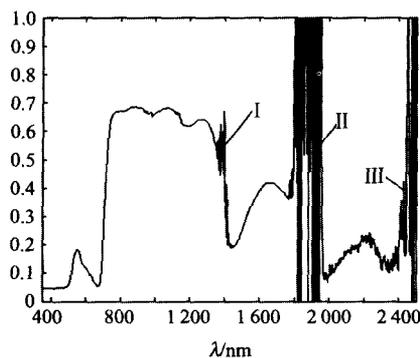


图1 野外测试植物波谱, I、II和III区为强噪声干扰波段
Fig.1 Field collected plant spectrum, where heavy noise existing bands were marked with I, II and III

参数时,这些波段舍弃不用^[2,3],其后果就是该波段光谱信息缺失.故从噪声中恢复原始信号的波形实现信噪分离十分必要.通常噪声和信号在频域上的能量分布规律不同:噪声主要分布在中高频区域,有用信号分布在低频区域^[4-6].采用在时频域都具有局部化特征的小波分析方法对含噪数据进行降噪,在降低噪声的同时能够较好地保持细节信息,在去噪和特征提取研究中多有应用^[7-9].本文在野外波谱信号处理中,探讨小波分析方法用于降噪处理.

1 植物野外光谱噪声分布特点及去除方法的理论推导

地物光谱野外测量主要采用比较法.波谱曲线中反射率的值是一个比值,通常是目标地物与参考标准板的反射辐射值之比.文献指出^[3],反射率的理论计算式如下

$$CR[n] = \frac{TTS[n]}{TRS[n]} \times 100\% \quad (1)$$

其中, $CR[n]$ 是反射率计算值 (computed reflectance), $TTS[n]$ 是实际地物反射信号 (true target signal), $TRS[n]$ 参考板反射信号 (true reference signal). 因仪器及光传输过程中的随机干扰,噪声存在于整个测试波段.作者认为,在分别对实际地物和参考板进行的两次测量中,都会因为各种因素使信号染噪,故反射率的计算式应作如下修正

$$CR[n] = \frac{TTS[n] + \varepsilon_1[n]}{TRS[n] + \varepsilon_2[n]} \times 100\% \quad (2)$$

其中, $\varepsilon_1[n]$ 为伴随 TTS 的随机噪声, $\varepsilon_2[n]$ 为伴随 TRS 的随机噪声.由于大气分子的吸收作用,在部分波段目标地物和标准板的反射辐射值均较小,尤其在 1450nm 和 1800nm 附近,由于水汽的吸收作用强,噪声占优势,采集的数据变成了噪声比值,噪声

的随机性使采集信号剧烈波动“反射率值”远远超过 1 或远远小于 1. 因此,反射波谱曲线中的噪声为一种特殊的乘性复合噪声.令 $TS = TTS[n] + \varepsilon_1[n]$, $RS = TRS[n] + \varepsilon_2[n]$, 则 TS 、 RS 所含的均为加性噪声,对数变换可以将乘除运算变为加减运算,故将式(2)进行对数变换可得式(3)

$$\log(CR[n]) = \log(TTS[n] + \varepsilon_1[n]) - \log(TRS[n] + \varepsilon_2[n]) \quad (3)$$

但噪声仍然包含在真数中.由于小波变换有使得噪声白化的趋势^[4-6],故可以假定经过对数变换和小波变换处理,包含在真数中噪声可以分离出来,即

$$\begin{aligned} WT(\log(CR[n])) &= WT(\log(TTS[n] + \varepsilon_1[n]) - \log(TRS[n] + \varepsilon_2[n])) \\ &\approx WT(\log \frac{TTS[n]}{TRS[n]}) + WT(\varepsilon'_1[n] + \varepsilon'_2[n]) \\ &= WT(\log \frac{TTS[n]}{TRS[n]}) \end{aligned} \quad (4)$$

乘性复合噪声经此变换变成了近似加性噪声,利用加性噪声的去噪方法并经反对数变换获得真实信号.由于有可能存在反射率为零的情况,为了不至于当真数为零而使得程序出现运行错误,在原始信号中普遍加上一个偏移量 1×10^{-10} ,相当于仪器系统响应下限,反变换时再减去该值即可.

2 小波降噪仿真实验

本文采用染噪的突跃信号 (Bumps) 和正弦信号 (HeavySine) 合成了乘性复合仿真信号,复合信号中,随机噪声强于信号,相除的结果使得其幅值变化迅速,呈尖锐毛刺状.野外波谱数据中这种尖锐噪声的出现,与两个严重污染随机噪声信号相除得到的复合信号表现是相似的(图2).本文首先采用仿真试验寻求可行的去噪方法,然后对野外采集的光谱数据进行处理,验证去噪处理方法的有效性.

2.1 小波基选择

对比小波函数的各种性质^[10], $bior$ 和 $rbio$ 函数系对称性好,在重构时具有很好的正则性,具有高阶消失矩.第一、二代小波的各种算法均已具备,因此在实验中,采用了 $Bior$ 小波函数系,本论文中主要采用的是 $bior4.4$ 小波(图3).

2.2 小波降噪算法对比研究

小波降噪方法大致分为三大类: Donoho^[11] 提出的小波域阈值滤波; Mallat^[13] 提出的小波模极大值重构滤波; Xu^[15] 提出的空域相关去噪. Donoho 与 Johnstone (1994) 提出了小波收缩方法 (Wave-

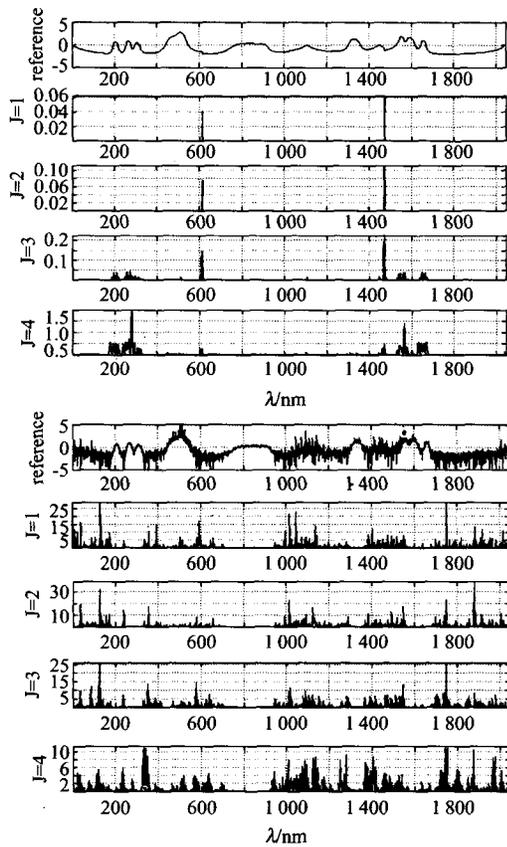


图2 乘性复合信号及其小波系数能量分布图,上为未染噪信号,下为强染噪信号(SNR=2.5414)
 Fig.2 Wavelet coefficient energy transmitting character of multiplicative composite signals, the upper is no noise contaminated, the lower is heavy random noise contaminated(SNR=2.5414)

Shrink),是目前研究最为广泛的方法之一^[11]. Mallat给出了交替投影(AP)算法用来重构小波系数^[12,13]. Witkin首先提出了利用尺度空间相关性来对信号进行滤波的思想^[14], Xu在此基础上于1994年提出空域相关滤波的方法^[15].

阈值方法即小波收缩方法,是目前研究最为广泛的方法之一. 全局阈值方法简单易用,但在复杂噪声存在下去噪效果不好. 局部阈值方法比全局阈值方法虽然具有更好的自适应能力,具有较好的去噪

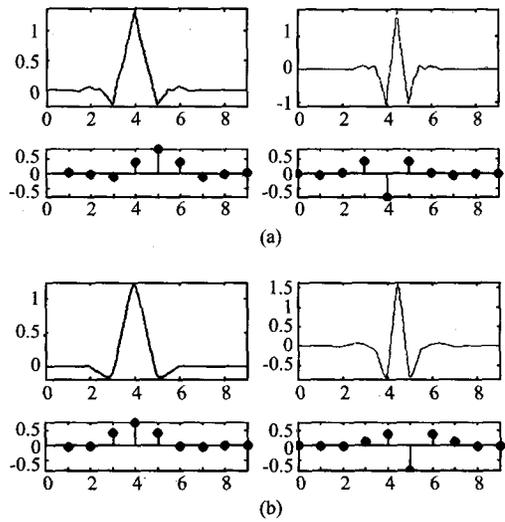


图3 Bior4.4小波 (a)分解小波函数 (b)重建小波函数
 Fig.3 Wavelet named as Bior4.4 (a) decomposition wavelet function (b) reconstruction wavelet function

效果,但是计算复杂度高. 模极大去噪法对噪声依赖小,无需知道噪声的方差,适合低信噪比信号去噪. 但交替投影算法复杂,去噪效果并不令人满意. 空域相关去噪通过将相邻尺度间小波系数直接相乘进行相关计算,在锐化边缘信号与其它重要特征的同时抑制噪声,能够提高信号主要边缘的定位精度. 该去噪方法吸取了模极大值重构算法的优点,而算法相对简单,对复杂噪声的适应能力强. 该算法中存在迭代次数控制和停止迭代阈值选取问题,使该算法的应用受到了限制.

三种降噪方法各有优缺点,故本文首先进行仿真试验,对含乘性噪声的仿真信号进行对数变换和小波变换,对比这三种去噪方法的去噪效果,择优用于野外光谱数据处理. 仿真试验中采用 matlab wnoise 函数通过强染噪 bumps 和 heavy sine 生成乘性噪声. 模极大去噪程序以及阈值去噪程序按参考文献[5,16]编制,其中模极大去噪采用交替投影算法,阈值去噪采用 heursure 硬阈值去噪算法. 空域相关去噪程序按参考文献[4,5]所提供的算法编制,小

表1 乘性复合仿真信号三种去噪方法结果

Table 1 Composite signal denoising results of simulating tests using three WT denoising methods

染噪信号信噪比(SNR, dB)		-29.56	-27.96	-24.56	-22.18	-20.77	-15.24	-9.80	-8.30
信噪比(SNR, dB)	MMD	4.87	6.68	8.31	8.56	0.85	10.51	10.09	10.97
	SCF	6.86	8.03	9.15	9.63	2.21	11.33	11.14	11.51
	TD	-4.68	-23.56	-18.11	-8.58	-11.25	-4.81	-3.72	-6.32
信噪比提升(SNRG, dB)	MMD	34.43	34.64	32.88	30.74	21.62	25.75	19.90	19.27
	SCF	36.42	35.99	33.71	31.81	22.97	26.57	20.95	19.81
	TD	24.88	4.39	6.45	13.60	9.52	10.43	6.09	1.98

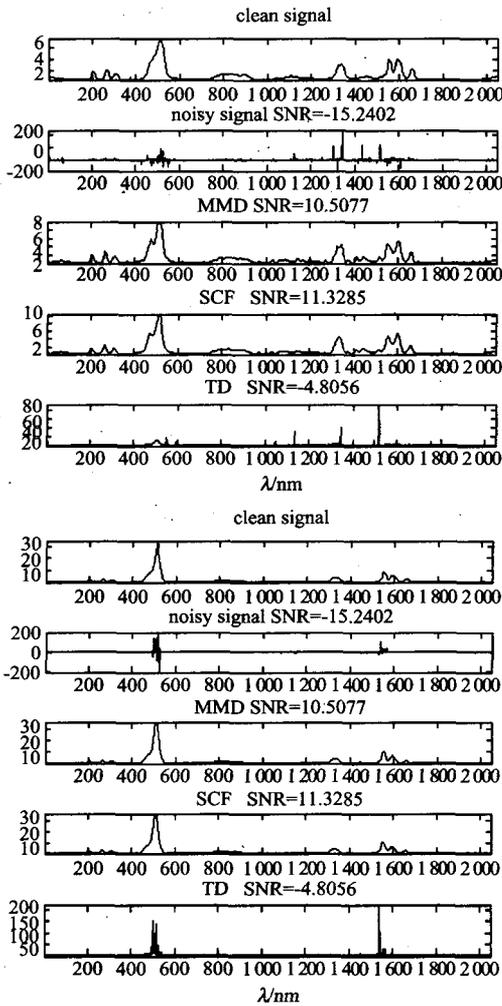


图4 乘性染噪仿真信号的小波去噪结果
Fig. 4 Denoising results of multiplicative-noise-contaminated simulating signals via WT

波分解尺度数均为4. 试验结果如表1及图4所示.

比较表1及图4可知,空域相关去噪法对于信号边缘的提取非常有效,信噪比有大幅提升,最大达36.42dB,尤其是对低信噪比严重染噪信号去噪效果更好.模极大值去噪方法对于信号边缘的提取也很有效,信噪比有大幅提升,最大达34.64dB,但去噪效果次于空域相关法.阈值去噪方法去噪效果远不如前二者.从仿真信号的波形变化来看,空域相关去噪和模极大值去噪后的信号与未染噪信号波形相似,而阈值去噪结果中仍存在严重的毛刺.作者认为,这主要因为阈值法无论是硬阈值还是软阈值,都仅仅考虑某一尺度上小波系数的分布,认为噪声对应于小系数从而将小于某一值的小波系数置零或消减某一值,未利用噪声的尺度传播特性;乘性噪声虽经对数变换,信号中仍然存在明显的毛刺状噪声污

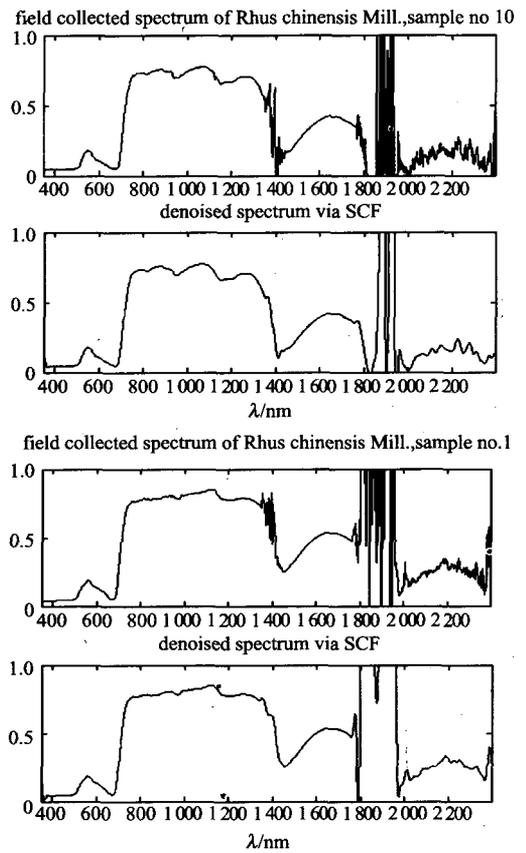


图5 盐肤木(Rhus chinensis Mill.)波谱空域相关去噪处理结果
Fig.5 Denoising results of spectrum of Rhus chinensis Mill. with spatial correlative filtering

染点,其小波变换系数仍然很大,在阈值去噪中被误认作信号边缘而保留下来,因而去噪能力有限.空域相关和模极大去噪并不考虑小波系数在同一尺度上的相对大小,充分利用了噪声的传播特点,能够将噪声和信号区分开.本文选择空域相关去噪方法处理波谱噪声.

3 植物野外反射波谱噪声的小波变换去噪

图5与图6为部分植物波谱数据去噪处理结果.实验表明,采用5尺度分解可以取得最好的噪声去除效果,并且能够很好地保留信号特征.对于1450nm附近的噪声的去除效果较好,可以取得与室内波谱曲线形状类似的曲线.遗憾的是,在1900nm附近虽然噪声去除效果显著,但并不能达到室内波谱曲线测试所取得的效果,在波谱曲线特征提取中仍不能发挥作用.原因在于,波谱仪纪录精度有限,当理论比值远大于1时,能够准确记录下来;远小于1时记录值为0,从而在强噪声干扰波段出现较严重

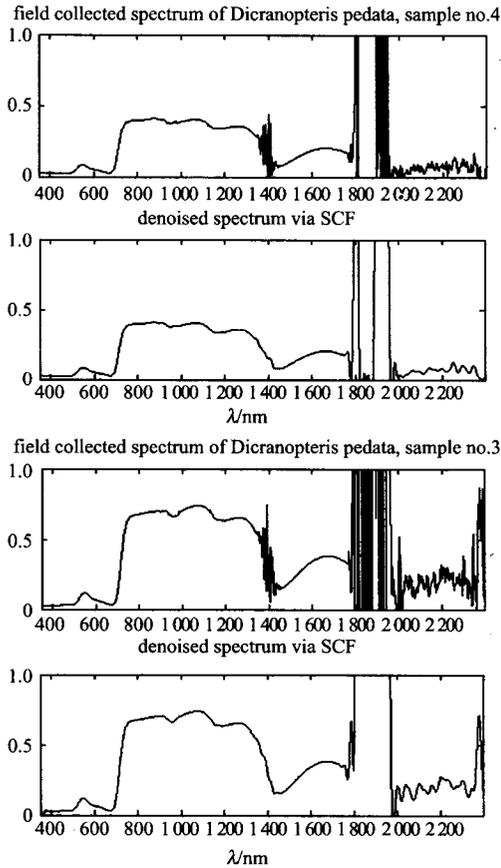


图6 芒萁(*Dicranopteris pedata*)波谱空域相关去噪处理结果

Fig. 6 Denoising results of spectrum of *Dicranopteris pedata* with spatial correlative filtering

系统误差,经小波降噪后被视作奇异点被保留下来。

4 结语

本文理论推导与仿真实验相结合,对野外采集的植物波谱噪声去除方法进行了研究,得出以下主要结论:

1. 根据植物波谱测试原理,提出了波谱噪声属于乘性复合噪声。经理论推导,提出对数变换与小波变换相结合的降噪方法。

2. 仿真降噪试验表明,空域相关算法最适合于光谱数据降噪,模板大法次之,阈值法则不适于该类噪声的消减。

3. 对野外采集植物波谱处理结果表明,空域相关算法对 1450nm 附近的噪声去除能力较强,对 1800~1900nm 的强噪声则效果不理想。原因在于,波谱仪记录精度有限,当理论比值远大于 1 时,能够准确记录下来;远小于 1 时记录值为 0,从而在强噪声干扰波段出现较严重系统误差,经小波降噪后被

视作奇异点被保留下来。

REFERENCES

- [1] PU Rui-Liang, GONG Peng. *Hyperspectral Remote Sensing and its Applications* [M]. Beijing: Higher Education Press (浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社), 2000, 82—85.
- [2] XU Rui-Song, MA Yue-Liang, HE Zai-Cheng. *Remote Sensing Applications on Biogeochemistry* [M]. Guangzhou: Guangdong Technology Press (徐瑞松, 马跃良, 何在成. 遥感生物地球化学. 广州: 广东科技出版社), 2003, 12—90.
- [3] Hatchell D C. Technical Guide, 4th ed. http://www.asdi.com/tg_rev4_wev4_web.pdf, Analytical spectral devices (ASD) Inc. USA, 1999, 18—24.
- [4] PAN Quan, ZHANG Lei, MENG Jin-Li, et al. *Wavelet Filtration and its Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press (潘泉, 张磊, 孟晋丽, 等. 小波滤波方法及应用. 北京: 清华大学出版社), 2005, 42—62.
- [5] SUN Yan-kui. *Wavelet Analysis and its Application* [M]. Beijing: China Machine Press (孙延奎. 小波分析及其应用. 北京: 机械工业出版社), 2005, 219—221.
- [6] Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing (2nd Edition)* [M]. Beijing: China Machine Press. 2003, 89—101.
- [7] SHEN Yuan-Ting, NI Guo-Qiang, XU Da-Qi, et al. Study on gas exploration by hyperion hyperspectral remote sensing data [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (沈渊婷, 倪国强, 徐大琦, 等. 利用 Hyperion 短波红外高光谱数据勘探天然气的研究. *红外与毫米波学报*), 2008, 27(3): 210—213
- [8] ZHOU Feng-Qi, DI Xiao Guang, ZHOU Jun. Method of infrared image denoising based on stationary multiwavelet transform [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (周凤岐, 迪小光, 周军. 基于平稳多小波变换的红外图像噪声抑制方法. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(2): 151—155.
- [9] ZHOU Guang-zhu, YANG Feng-jie, WANG Cui-zhen. Lifting transform via savitsky-golay filter predictor and application of denoising [J]. *J. Of Coal Sci. & Engi (CHINA)* (煤炭学报英文版), 2006, 12(2): 85—89.
- [10] YANG Jian-Guo. *Wavelet Analysis and Its Engineering Application* [M]. Beijing: China Machine Press (杨建国. 小波分析及其工程应用. 北京: 机械工业出版社), 2005, 166—167.
- [11] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage [J]. *Biometrika*, 1994, 81: 425—455.
- [12] Mallat S. A theory for multisolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674—693.
- [13] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelet [J]. *IEEE Trans on IT*, 1992, 38(2): 617—643.
- [14] Witkin A P. Scale-space filtering [A]. Proc. 8th Int. Joint Conf. Art. Intell [C]. 1983: 1019—1022.
- [15] Xu Y, Weaver J B, Healy D M, et al. Wavelet transform filters: a spatially selective noise filtration technique [J]. *IEEE Transforms on Image Processing*, 1994, 3(6): 747—758.
- [16] HU Guang-shu. *Modern Signal Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press (胡广书. 现代信号处理. 北京: 清华大学出版社), 2004, 390—405.