

基于波原子理论的超声检测信号降噪方法*

李霞^{1,2}, 杨明¹, 孙灵芳²

(1. 哈尔滨工业大学控制与仿真中心 哈尔滨, 150001) (2. 东北电力大学自动化工程学院 吉林, 132012)

摘要 如何在消除噪声的同时更好保留信号中的有效信息一直是无损检测信号处理研究中的热点。尝试通过构建虚拟观测信号将单通道超声检测信号扩展为信号阵列, 利用波原子方法进行降噪处理, 并引入非局部均值算法进行平滑以压制波原子硬阈值滤波方式可能产生的伪吉布斯现象。用该算法对仿真信号与某碳酸钙污垢层超声检测信号进行降噪, 并与小波阈值降噪进行对比。结果显示该方法对信号信噪比的提高、信号有效特征及微弱信号的保持均有较好效果。

关键词 超声检测; 波原子; 非局部均值; 降噪

中图分类号 TN911.72; TB52; TK39

引言

超声检测以其安全、快捷和有效等优点, 在工业生产各领域中获得了较为广泛的应用^[1-2]。由于实际生产中工况较为复杂, 超声检测信号中常带有噪声与杂波干扰, 影响对检测结果的分析与提取。目前, 超声检测信号的降噪主要采用裂谱分析、小波分析和经验模态分解等方式^[3-5]。裂谱分析缺乏多分辨能力等缺陷限制了它的应用; 经验模态分解具有对信号分解的自适应性, 但其端点效应和频率混叠等缺陷会影响分解降噪的结果。小波分析方法有较好的去噪效果和较为广泛的应用, 但在去噪的同时也对信号的有效信息造成一定损失。

笔者提出采用波原子与非局部均值滤波相结合的方法对一维超声检测信号进行降噪。对仿真信号与实验超声检测信号的降噪结果显示, 该方法在噪声消除与原信号信息保留方面有较好效果。

1 基本理论

1.1 波原子降噪基本理论

含噪图像的降噪与恢复是数字信号处理领域的研究热点之一。小波分析等方法对含点奇异的目标函数有最优表示, 但对高维数据的表示与处理并不

理想。针对高维数据的多尺度几何分析方法, 如正交脊波分析和曲波分析等^[6-7]对纹理图像的表示也不是最优。

文献[8-9]提出的波原子(wave atoms)变换成为了纹理图像表征与处理的较有效工具。波原子是一种特殊的二维波包变形, 其支撑区间各向同性, 有较好的时频局部化特性。相对于小波等方法而言, 波原子方法对于振荡函数有最优的稀疏表示, 能够有效地表达二维纹理信息。

设一无穷可微实值冲击函数 g 的支撑区间为 $[-7\pi/6, 5\pi/6]$, 当 $|\omega| \leq \pi/3$ 时满足等式 $g(\pi/2 - \omega)^2 + g(\pi/2 + \omega)^2 = 1$ 和 $g(-\pi/2 - 2\omega) = g(\pi/2 + \omega)$ 。

设 $\gamma = \bar{g}$ 为 g 的逆傅里叶变换, 且 $\psi_m^0(x) = 2\text{Re}\{e^{i\alpha(m+1/2)x}\gamma((-1)^m(x-1/2))\}$, 则在频域 $\bar{\psi}_m^0(\omega) = e^{-i\omega/2}\{e^{i\alpha_m}g(\epsilon_m(\omega - \pi(m+1/2))) + e^{-i\alpha_m}g(\epsilon_{m+1}(\omega + \pi(m+1/2)))\}$ (1)

其中: $\epsilon_m = (-1)^m$; $\alpha_m = (\pi/2)(m+1/2)$, 并使 $\sum_m |\bar{\psi}_m^0(\omega)|^2 = 1$ 。

$\{\psi_m(x-n)\}$ ($n \in Z, m=0, 1, 2, \dots$) 构成一组 $L_2(R)$ 规范正交基, 形成了频域坐标平面的一致覆盖。若引入尺度 j , 重写基函数为 $\psi_{m,n}^j(x) = \psi_m^j(x-2^{-j}n) = 2^{j/2}\psi_m^0(2^jx-n)$, 得到一维波包族 $\{\psi_{m,n}^j(x)\}$ 。二维波原子可由其张量积形式构造。 H 表示 Hilbert 变换, 设

* 国家自然科学基金资助项目(51176028); 吉林省自然科学基金资助项目(201115181)
收稿日期: 2013-05-21; 修改稿收到日期: 2013-07-09

$$\begin{cases} \varphi_{\mu}^{+}(x_1, x_2) = \psi_{m_1}^k(x_1 - 2^{-j}n_1)\psi_{m_2}^k(x_2 - 2^{-j}n_2) \\ \varphi_{\mu}^{-}(x_1, x_2) = H\psi_{m_1}^k(x_1 - 2^{-j}n_1)H\psi_{m_2}^k(x_2 - 2^{-j}n_2) \end{cases} \quad (2)$$

则 $\varphi_{\mu}^{(1)} = (\varphi_{\mu}^{+} + \varphi_{\mu}^{-})/2$ 和 $\varphi_{\mu}^{(2)} = (\varphi_{\mu}^{+} - \varphi_{\mu}^{-})/2$ 构成冗余度为 2 的波原子紧框架。二维波原子变换系数为 $c_{\mu} = \langle f, \varphi_{\mu}^{(1)} \rangle + \langle f, \varphi_{\mu}^{(2)} \rangle$ 。通过阈值方法对波原子变换系数滤波后重构,可有效实现对纹理图像的降噪^[10]。

1.2 非局部均值滤波基本原理

图像的消噪希望在降噪同时尽可能的保持图像中的纹理、边缘等细节信息,但大多局部均值滤波算法容易产生过平滑而造成图像的细节损失。Buades 等提出的非局部均值(non local means, 简称 NL-means)方法充分利用了图像中的自相似冗余信息,通过图像的块相似性计算权重用于均值运算,更适用于纹理图像的降噪^[11-13]。该方法的基本思想为:若待降噪图像为 $v = \{v(i) | i \in I\}$,非局部均值方法降噪后像素 $NL(v)(i)$ 值由图像中与它结构相似的像素加权平均计算得到

$$NL(v)(i) = \sum_{j \in I} w(i, j)v(j) \quad (3)$$

权值 $w(i, j)$ 是以 i 像素为中心的图像子块与 j 像素为中心子块之间的高斯加权欧氏距离 $d(i, j) = \|v(N_i) - v(N_j)\|_{2, \alpha}$ 的负指数函数

$$w(i, j) = \frac{1}{Z(i)} e^{-\frac{d(i, j)}{h^2}} \quad (4)$$

其中:归一化参数 $Z(i) = \sum_j \exp(-d(i, j)/h^2)$; α 为高斯标准差; h 为权值的指数衰减速度,影响滤波程度; $0 \leq w(i, j) \leq 1$, $\sum w(i, j) = 1$ 。

该方法的特性决定其在平滑点状噪声同时对图像细节有较好的保留效果。

2 算法设计

2.1 虚拟观测阵的建立

设 $x_1(t)$ 为接收信号, $s(t)$ 为超声回波信息, $n(t)$ 为噪声与干扰,则超声检测回波信号一般形式为

$$x_1(t) = s(t) + n(t) \quad (5)$$

其中:超声回波信息 $s(t)$ 为超声发射信号在声阻不同界面产生的反射,携带着被测介质与界面的大量信息。

若相近时刻检测同一测点,所得接收信号中

$s(t)$ 形式往往相差不大,而噪声与干扰信号 $n(t)$ 多产生于介质的散射或工况的干扰,其形式随机,各时刻数值的相关性也较小。

为更好地利用回波中有用信息与噪声的不同特点进行降噪,采用在原检测信号上添加白噪声的方式构造虚拟测量信号 $x_2(t)$ 至 $x_M(t)$,形成虚拟观测矩阵 \mathbf{X}

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(t) \\ x(t) + n_2(t) \\ \vdots \\ x(t) + n_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(t) + n(t) \\ s(t) + n(t) + n_2(t) \\ \vdots \\ s(t) + n(t) + n_M(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: $n_2(t), \dots, n_M(t)$ 可取与 $n(t)$ 同分布高斯白噪声。

该矩阵各行之间分量 $s(t)$ 信息相关性很强,而噪声间相关性较弱。将其看做待降噪图像信息进行处理,相当于图像中有效信息为竖直震荡纹理,其中含有噪声干扰,图形化特征较为清晰。

2.2 算法分析与设计

将虚拟观测阵作为图像信息,采用多分辨的二维波原子阈值方法进行降噪,能够在滤除噪声干扰的同时,有效利用虚拟观测阵中有效回波信息在空间的高度相关和波原子去噪方式对纹理图像的最优稀疏表示特点。降噪后的“图像”纹理信息更加清晰突出,能够更好地保持 $s(t)$ 的原有特征,对微弱信息也有较好的保持作用。

阈值降噪方法中,硬阈值滤波方式对原信号细节保持较好,但容易产生伪吉布斯振荡,生成新的噪声。软阈值滤波结果相对平滑,但易产生信号变形与信息损失。对虚拟观测矩阵进行波原子硬阈值降噪后,进行非局部均值滤波,可在平滑噪点的同时减小对图像边缘和纹理的影响,在硬阈值降噪保证尽量小的信号损失前提下,抑制可能产生的伪吉布斯现象影响。

拟采用算法主要步骤如下:

1) 原含噪信号加入白噪声,构造 $(M-1)$ 个虚拟观测信号,形成 $M \times N$ 虚拟观测阵,其中 N 为待处理信号长度。

2) 波原子降噪。截取 $M \times M$ 观测阵数据,采用波原子阈值降噪方法进行降噪。完成后移动至下一帧,重复过程。帧之间可重叠,此处取重叠度为 $1/2$ 。

3) 对波原子降噪后 $M \times N$ 矩阵进行非局部均值滤波, 滤除其中硬阈值降噪可能产生的伪吉布斯振荡和部分随机噪声。

4) 将上述矩阵进行均值运算, 得出一维降噪结果。

该方法将波原子阈值降噪与非局部均值滤波结合应用于一维信号降噪, 在减少信号细节信息损失的基础上消除信号中的噪声, 更好地实现超声信号降噪。

3 信号处理及分析

3.1 仿真分析

为定量评价算法的降噪效果, 以 3 个指数衰减余弦信号的线性叠加作为超声检测回波信号的仿真。3 个组成信号的幅值不相同, 按先后顺序取其幅值比为 3:1:2, 来模拟超声检测中由于被测材质不同产生的回波信号强度的差异, 以更有效地观察算法对细节信息的保留效果, 如图 1(a) 所示。

在仿真超声信号中加入一定高斯白噪声来模拟检测中的干扰, 如图 1(b) 所示。对加噪信号分别采用经典小波硬阈值、小波软阈值、波原子方法和结合非局部均值方法的波原子方法进行降噪。小波硬阈值与软阈值降噪采用“sum4”小波进行 5 层分解, 阈值选取采用“heursure”启发式阈值选择规则。在仿真信号中加入噪声, 使信噪比 (signal-to-noise ratio, 简称 SNR) 分别为 5, -1, -3 dB, 几种方法的降噪结果如图 1~3 中的 (c)~(f) 所示。

图 1 显示, 当原信号信噪比较高时, 几种方法均能较有效地实现信号的降噪。其中: 波原子方法对信号的形状保存较为完好; 小波硬阈值、软阈值降噪对信号形状均产生了一定变形; 经非局部均值处理的波原子方法降噪后曲线较为平滑, 在保存有效信息的基础上实现了信号的进一步去噪。

图 2 中待降噪信号信噪比为 -1 dB, 由图 2(b) 可见, 噪声几乎淹没第 2 个波峰。小波软阈值降噪结果中已经观察不到第 2 个微弱波形。小波硬阈值降噪对第 2 个波峰有保留, 但变形现象较为严重, 对原信号特征保留不佳。波原子方法与非局部均值波原子方法对原信号的信息有较好的保留, 后者的降噪结果更平滑与清晰。

当待降噪信号信噪比进一步降低为 -3 dB, 如图 3(b) 所示, 噪声几乎将信号完全淹没。此时小波

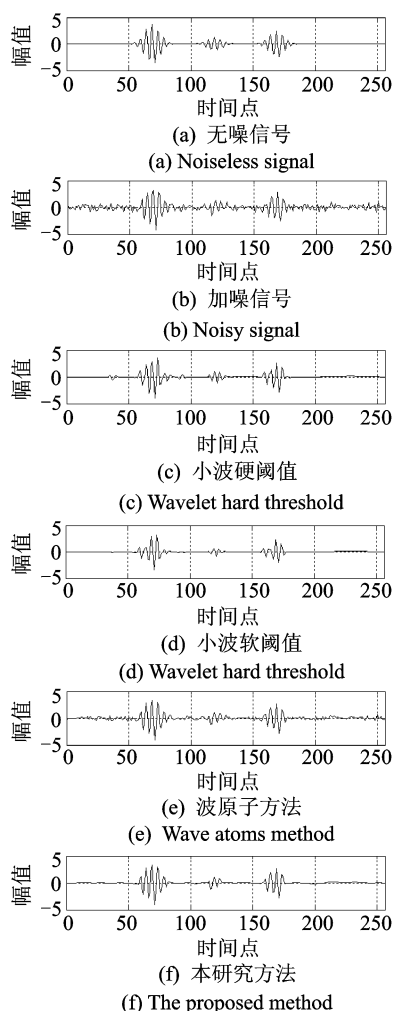


图 1 信号及降噪结果 (SNR=5 dB)

Fig. 1 Signal and denoising results (SNR=5 dB)

硬阈值与软阈值滤波对信号的损失进一步加大, 降噪结果中信号 2 与信号 3 保存程度非常小。图 3 (e), (f) 波原子方法与非局部均值波原子方法降噪结果中仍相对较好地保持了原信号有效特征。

对不同信噪比下信号的几种方法降噪反复进行多次试验, 其降噪后平均信噪比 (SNR) 与均方根误差 (root mean square error, 简称 RMSE) 结果数值如表 1 所示。

由表 1 可知, 上述几种方法均能提高信号信噪比, 但降噪效果均随原信号信噪比降低而下降。其中, 本研究方法降噪效果最佳。当原信号信噪比较低时, 非局部均值波原子方法降噪后信号的信噪比甚至是小波阈值方法的数倍, 而均方根误差远低于小波方法。波原子方法降噪结果稍差于非局部均值波原子方法, 其差值虽从数值观察并不显著, 但从图形上看, 非局部均值的平滑作用对降噪结果的可观测性具有重要意义。

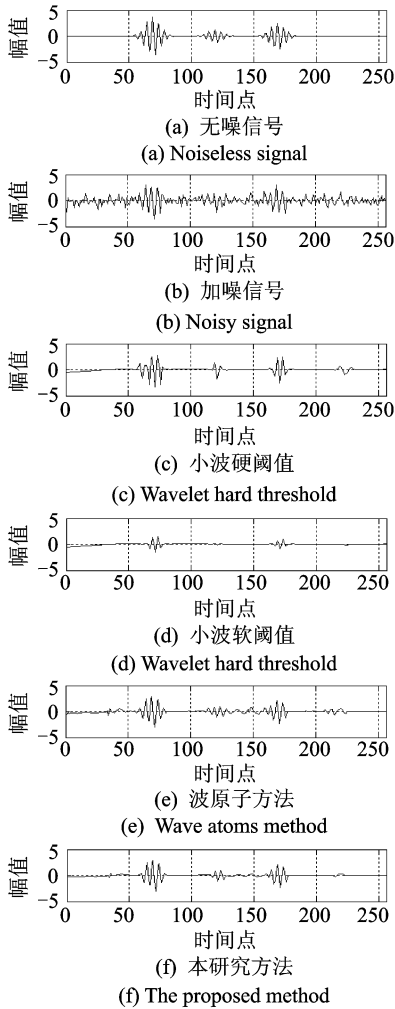


图 2 信号及降噪结果图(SNR=-1 dB)

Fig. 2 Signal and denoising results (SNR=-1 dB)

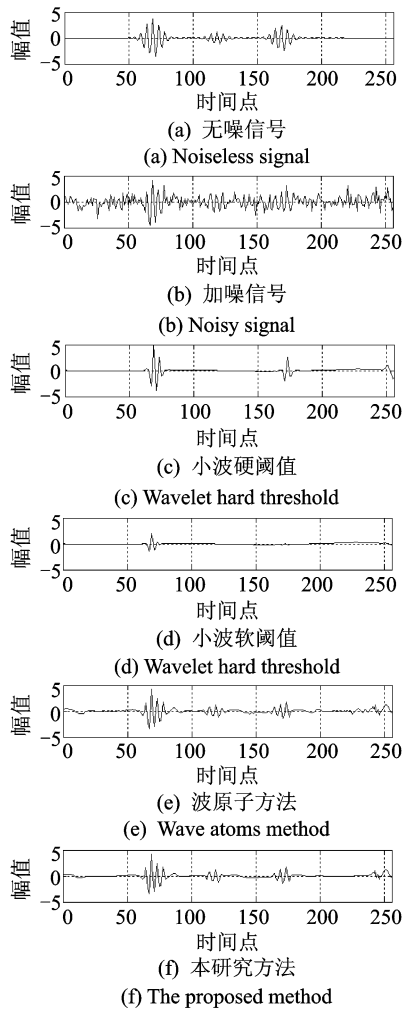


图 3 信号及降噪结果图(SNR=-3 dB)

Fig. 3 Signal and denoising results (SNR=-3 dB)

表 1 降噪结果统计表

Tab. 1 Statistics of denoising results

原加噪信号		小波硬阈值		小波软阈值		波原子方法		非局部均值波原子	
SNR/dB	RMSE	SNR/dB	RMSE	SNR/dB	RMSE	SNR/dB	RMSE	SNR/dB	RMSE
10	0.219 4	11.208 1	0.191 3	13.050 6	0.154 7	13.168 6	0.152 7	14.201 0	0.135 5
5	0.390 2	7.569 5	0.290 8	5.960 3	0.350 0	9.220 5	0.240 5	10.769 3	0.201 2
1	0.618 4	4.483 3	0.414 9	1.909 2	0.558 1	7.713 5	0.286 1	8.284 9	0.267 9
-1	0.778 6	3.445 2	0.467 6	1.981 9	0.553 4	6.234 5	0.339 2	6.686 7	0.322 0
-3	0.980 1	2.308 5	0.533 0	1.125 9	0.610 7	4.574 8	0.410 6	4.894 2	0.395 8

为进一步验证本研究算法的有效性,修改仿真信号参数进行多组实验。实验结果显示,该非局部均值波原子降噪方法具有较好的降噪作用与信号细节保持能力。

3.2 实验信号处理

换热设备结垢问题在工业生产中广泛存在。对污垢的监测、预测与消除的研究成为生产安全领域的研究热点。介入式的污垢检测方法对生产安全影响较大,而间接检测的热力学方法由于影响因素较

多、准确性有待提高。针对此问题,本课题组开展了采用超声反射方法进行换热设备污垢直接检测的研究。拟采用超声时域反射方法(ultrasonic time-domain reflectometry,简称 UTDR)直接进行污垢检测,利用事先测定的碳酸钙污垢中超声纵波声速可直接得出污垢厚度。污垢作为薄层软质疏松物质,其表面不平整,较复杂的反射折射使污垢超声检测回波较多噪声干扰,影响了后续数据的处理与结果的读取^[14-15]。对信号的降噪成为后续研究的重要基础。

将一钢制平板试件置于碳酸钙溶液中进行换热,使试件表面生成碳酸钙结垢。采用 5800PR 超声脉冲信号发射接收仪作为超声脉冲发生装置,用 Panametrics-DNT 公司的 V311-SU 型 10MHz 水浸收发一体超声探头对积垢平板试件表面进行超声检测。回波信号如图 4 所示。图中第 1 次集中波动为发射波,第 2 次集中波动为试件表面回波与污垢

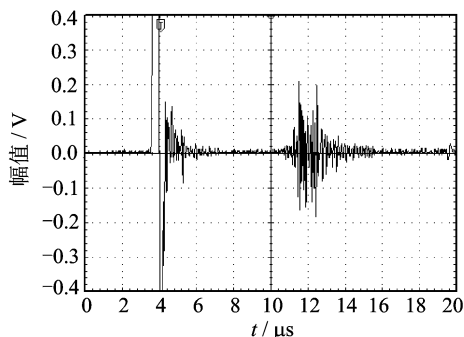


图 4 碳酸钙污垢超声回波信号

Fig. 4 Calcium carbonate fouling ultrasonic echo signal

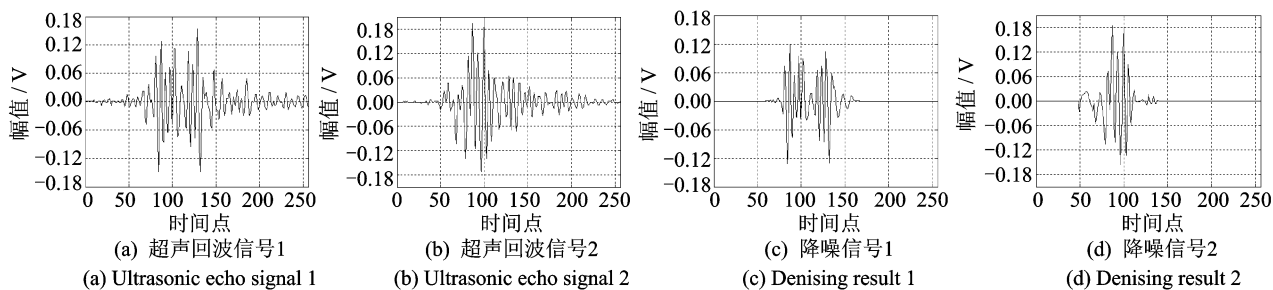


图 5 信号及降噪结果

Fig. 5 Signal and Denoising Results

4 结束语

提出波原子与非局部均值相结合的一维信号降噪算法。实验结果显示,该方法能够在有效提高超声检测信号信噪比的同时,更好地保持信号有效信息与细节特征。该方法将图像处理方法引入一维检测信号降噪处理中,为超声检测信号的处理和波原子理论的应用提出了新的思路。

参 考 文 献

[1] 焦敬品,张强,何存富,等. 机械结构液体层厚度超声谐振的测量方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2): 296-300.
Jiao Jingpin, Zhang Qiang, He Cunfu, et al. Thickness measurement of liquid layer in mechanical structure using ultrasonic resonant technique[J]. Journal of

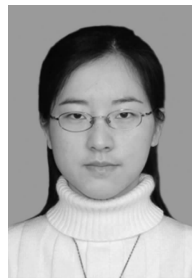
表面回波。污垢的垢质疏松、分布不均且厚度较薄,污垢回波与试件界面回波的混叠度高,且较多杂波干扰不易分辨。为了更好地实现后续研究,需进行信号降噪。

对试件上多个测点进行超声检测,截取回波中污垢与试件界面两混叠回波信号部分进行本研究方法的信号降噪处理。取其中垢层较厚(超声波信号 1)与垢层较薄(超声波信号 2)两个信号如图 5(a), (b)所示,及其降噪处理结果分别对应图 5(c), (d)所示。采样时间点的间隔为 0.02 us。如图 5(a), (b)所示,原超声回波信号中有较多杂波干扰,而本研究方法的降噪结果((c), (d)所示)在滤除杂波的同时,对超声反射信号的波形有效信息有较好地保留。降噪后的信号中能够较清晰观察出符合理论形式的两相邻超声回波,为回波信息的进一步提取与量化打下基础。

Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2): 296-300. (in Chinese)

[2] 邵志学,石立华,张琦. 混凝土超声检测技术的研究与实现[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(3): 397-401.
Shao Zhixue, Shi Lihua, Zhang Qi. Research and realization of concrete ultrasonic detecting technology[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(3): 397-401. (in Chinese)
[3] 杨克己,乔华伟. 基于支持矢量机的小波域超声信号消噪技术[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 66-71.
Yang Keji, Qiao Huawei. Denoising techniques for ultrasonic signals in wavelet domain based on support vectorm achine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 66-71. (in Chinese)
[4] 沈晓安,杨克己. 基于小波变换的裂谱分析法[J]. 工程设计学报, 2008, 15(5): 361-364.
Shen Xiaon, Yang Keji. Split spectrum processing technique based on wavelet transform[J]. Journal of

- Engineering Design, 2008, 15 (5): 361-364. (in Chinese)
- [5] 罗玉昆, 罗诗途, 罗飞路, 等. 激光超声信号去噪的经验模态分解实现及改进[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 479-486.
- Luo Yukun, Luo Shitu, Luo Feilu, et al. Realization and improvement of laser ultrasonic signal denoising based on empirical mode decomposition[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21 (2): 479-486. (in Chinese)
- [6] Candes E, Demanet L, Donoho D, et al. Fast discrete curvelet transforms[J]. Multiscale Model Simul, 2006, 5(3): 861-899.
- [7] Candes E J, Donoho D L. Ridgelets: a key to higher dimensional intermittency[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1999, A357 (1760): 2459-2509.
- [8] Demanet L. Curvelets, wave atoms and wave equations[D]. California: California Institute of Technology, 2006.
- [9] Demanet L, Ying L. Wave atoms and sparsity of oscillatory patterns [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2007, 23(3): 368-387.
- [10] 白宏刚, 张建奇, 王晓蕊. 基于波原子变换的红外复杂背景杂波抑制算法[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25 (1): 37-41.
- Bai Honggang, Zhang Jianqi, Wang Xiaorui. Infrared complex background clutter suppression algorithm based on wave atom transform[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(1): 37-41. (in Chinese)
- [11] Buades A, Coll B, Morel J M. A non-local algorithm for image denoising[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego: [s. n.], 2005: 60-65.
- [12] Buades A, Coll B, Morel J M. A review of image denoising algorithms, with a new one [J]. Multiscale Modeling & Simulation, 2006, 4(2): 490-530.
- [13] 易子麟, 尹东, 胡安洲, 等. 基于非局部均值滤波的 SAR 图像去噪[J]. 电子与信息学报, 2012, 34 (4): 950-955.
- Yi Zilin, Yin Dong, Hu Anzhou, et al. SAR image despeckling based on non-local means filter[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34 (4): 950-955. (in Chinese)
- [14] 杨善让, 徐志明, 孙灵芳. 换热设备污垢与对策[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2004: 1-100.
- [15] Sun Lingfang, Feng Guoliang, Lu Wenxuan. Fouling detection based on analysis of ultrasonic time-domain reflectometry using wavelet transform[J]. Communications in Computer and Information Science, 2011, 153: 347-352.



第一作者简介:李霞,女,1979年5月生,博士研究生、讲师。主要研究方向为超声检测、信号处理。曾发表《基于改进FOA匹配追踪的超声信号处理研究》(《仪器仪表学报》2013年第34卷第9期)等论文。
E-mail: li9872202@163.com