

Study of Multi-Scale Enhancement Algorithm for THz Images Combining Wavelet Denoising*

XU Ying¹, HONG Zhi^{2*}

(1. Center for Optical and Electromagnetic Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;)
(2. Center for Terahertz Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Due to low contrast and big noise in continuous-wave THz images obtained by backward-wave oscillator, a multi-scale image enhancement algorithm combining wavelet denoising is proposed. It performs multi-scale decomposition by building image pyramids first, and then enhances the detailed images by exponential transform in spatial domain. To remove the influences of enlarged noises, the wavelet soft-threshold method is adopted to denoise the approximation images in each level of the pyramid when rebuilding the enhanced image. Furthermore, nonlinear transform is also adopted for image enhancement in wavelet domain. Several experimental results demonstrate that, the proposed algorithm can remove noises efficiently, and the enhanced THz images have clear details and sharpened edges, which is useful for further image processing and recognition.

Key words: THz image; enhancement; multi-scale decomposition; wavelet denoising

EEACC: 6140 **doi:** 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.03.017

结合小波去噪的 THz 图像多尺度增强算法研究*

徐 英¹, 洪 治^{2*}

(1. 浙江大学光及电磁波研究中心, 杭州 310058;
2. 中国计量学院太赫兹技术与应用研究所, 杭州 310018)

摘 要: 针对返波管获得的连续 THz 透射图像对比度低且噪声大的特点, 提出了一种结合小波去噪的多尺度图像增强算法。该算法先用图像金字塔变换对 THz 图像进行多尺度分解, 然后采用指数变换在空域对获得的细节图像进行增强。为减小放大噪声的影响, 在重构增强图像的过程中对每一分解层次的近似图像采用小波软阈值方法进行去噪, 并对小波图像采用非线性变换进一步增强图像细节。大量实验表明, 提出的算法有效地减小了噪声, 增强后的 THz 图像细节分明, 边缘清晰, 有利于后续的图像处理和识别。

关键词: 太赫兹图像; 增强; 多尺度分解; 小波去噪

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)03-0398-04

太赫兹 (Terahertz, THz) 波通常是指频率位于 0.1 ~ 10 THz 之间的电磁辐射。随着超快光电子技术和小尺度半导体技术的发展, 为 THz 辐射提供了合适的光源和探测手段, 使 THz 科学和技术得以飞速发展。由于具有强穿透能力, 对人体安全性, 以及光谱分辨能力等优点, THz 波在安全检查、医疗诊断和质量监控等方面具有广阔的应用前景^[1]。

返波振荡管 (返波管) 具有输出功率高、波前质量好、稳定性强, 以及操作简便等优点, 是一种重要

的连续 THz 辐射源, 已广泛应用于连续 THz 成像研究。Dobroiu 等人^[2] 首先将返波管用于连续 THz 波透射式成像, 并对影响成像质量的主要因素进行了分析。文献^[3] 实现了基于返波管的连续 THz 波反射式成像。国内进行 THz 成像相关研究的单位主要包括首都师范大学^[3-4] 和哈工大^[5] 等。由于 THz 波的波长为毫米量级, 限制了获得图像的空间分辨率, 且该辐射源输出功率和稳定性对图像的对数比度及信噪比有较大影响, 因而需要对获得的 THz 图像

进行处理,以便后续图像识别。

为提高 THz 图像的分辨力,可采用的图像处理办法包括图像复原和图像增强两种。文献[5]对影响连续 THz 图像分辨率的因素进行了分析,并采用图像复原方法提高 THz 图像的质量,但是该方法需要知道扫描成像使用的特征参数。不同于图像复原,图像增强通过改变目标和背景之间的像素分布,使更有利于后续分析,已广泛应用于医学图像处理领域。常用的图像增强方法包括空域增强、频域增强和小波域增强等^[6]。文献[4]比较了直方图均衡化等几种增强算法,并提出了一种基于 Retinex 理论的连续 THz 图像增强算法。由于能够获得图像在多个尺度下的细节和轮廓,金字塔变换^[7]和小波变换^[8]这两种多尺度分解方法已广泛用于图像增强领域。文献[9]提出了一种基于拉普拉斯金字塔的多尺度医学图像增强算法—MUSICA 算法。该算法首先构建图像拉普拉斯金字塔,然后对获得的细节图像采用指数变换进行对比度拉伸,实验表明该算法在医学图像增强方面取得了十分令人满意的效果。小波变换已广泛应用于图像压缩、图像去噪和信号奇异性检测方面,取得了较好的效果^[8]。文献[10]提出了一种基于小波分解的医学图像增强算法,虽然采用了小波软阈值^[11]方法对小波图像进行去噪,然而进行非线性变换时参数的选择对增强效果有很大影响。文献[12]通过实验比较了基于金字塔变换和小波变换的 X 射线图像增强效果。实验表明,基于小波变换的多尺度图像增强算法会使增强后的图像带有瑕疵,且相比于前者图像增强效果较差。

由于利用返波管获得的连续 THz 透射图像不仅对比度低,且 THz 波探测器的光生电流散粒噪声等使图像信噪比较低,仅采用空域增强方法在增强图像细节的同时也放大了图像噪声。本文在 MUSICA 算法的基础上,提出了一种结合小波去噪的多尺度图像空域增强算法,有效地利用了小波去噪和多尺度图像空域增强算法的优点,在逐步增强细节的同时抑制了图像噪声的影响,使增强后的连续 THz 图像对比度有了明显提高,边缘清晰,有利于后续图像的处理与识别。

1 多尺度图像分解算法

与单一尺度图像处理算法不同,多尺度图像分解算法通过采用特定的滤波器先对图像进行滤波,然后通过抽样的方法获得原始图像在不同分辨率下的多个图像,即多尺度图像。由于图像细节信息是在不同分辨率下呈现出来的,因而这种方法更有利于对图像的细节进行处理。图像金字塔变换^[7]和

小波变换^[8]是两种常用的多尺度图像分解方法。

基于金字塔变换的图像增强直接对原始图像的灰度级进行处理,因而是一种空域方法。为构造拉普拉斯金字塔,首先对当前尺度图像采用高斯核进行滤波,并进行二元下采样获得低分辨率的近似图像,然后对该图像进行二元上采样和逆滤波,重构得到当前图像的近似图像,用当前图像减去该近似图像来获得当前尺度的细节图像,重复上述过程就获得了图像的拉普拉斯金字塔结构,如式(1)所示。其中 $\{I_n\}_{n=0\dots N}$ 和 $\{\text{diff } I_n\}_{n=0\dots N-1}$ 分别为构造得到拉普拉斯金字塔的近似图像和细节图像,算子 REDUCE() 和 EXPAND() 的定义见文献[7]。

$$\begin{cases} I_n = \text{REDUCE}(I_{n-1}) \\ \text{diff } I_{n-1} = I_{n-1} - \text{EXPAND}(I_n) \end{cases} \quad (1)$$

小波变换可以采用滤波器组分别对输入图像 A_j 进行水平和垂直滤波,并进行水平和垂直二元下采样,从而获得原始图像的一个近似图像 A_{j+1} ,水平、垂直和对角线方向的三个细节图像 $\{H_{j+1}, V_{j+1}, D_{j+1}\}$,即小波图像^[8]。对 A_{j+1} 再进行分解,获得更多尺度的小波图像,如式(2)所示。其中 $\{h, g\}$ 为分析滤波器, D_{\downarrow} 和 D_{\downarrow} 分别对应于水平二元下抽样和垂直二元下抽样。

$$\begin{aligned} A_{j+1}(x, y) &= (D_{\downarrow}(D_{\downarrow}(h * A_j(x, y))) * h) \\ H_{j+1}(x, y) &= (D_{\downarrow}(D_{\downarrow}(h * A_j(x, y))) * g) \\ V_{j+1}(x, y) &= (D_{\downarrow}(D_{\downarrow}(g * A_j(x, y))) * h) \\ D_{j+1}(x, y) &= (D_{\downarrow}(D_{\downarrow}(g * A_j(x, y))) * g) \end{aligned} \quad (2)$$

2 结合小波去噪的多尺度图像增强算法

基于金字塔变换的图像增强算法是一种空域增强方法,该算法直接对原始图像的灰度进行处理,因而增强后图像的对比较高,但是由于不能够区分目标和噪声,因而在增强图像细节的同时放大了噪声,会影响图像增强的最终效果。基于小波变换的图像增强方法在进行图像增强的同时能够去除图像噪声,但是这种方法由于是对变换后的小波系数进行处理,经过小波反变换后的图像经常会偏离原始图像的灰度级范围,且小波函数以及对小波系数进行非线性变换时参数的选择对图像增强的效果有较大影响,这些参数的选择都是经验性的。

综合以上分析,本文提出的结合小波去噪的多尺度空域增强算法流程如图1所示。该算法首先对原始图像进行分解构造拉普拉斯金字塔,然后对细节图像在空域进行非线性增强。在进行金字塔重构的过程中,对于每一分解层次,首先采用小波对图像

进行去噪,以消除对低分辨率图像进行增强后放大的图像噪声影响,然后再重构高分率的图像。通过结合两种增强方法,按照分辨率从低到高的顺序依次对图像进行去噪增强,有效减小了增强时放大的图像噪声,保证了图像增强的效果。

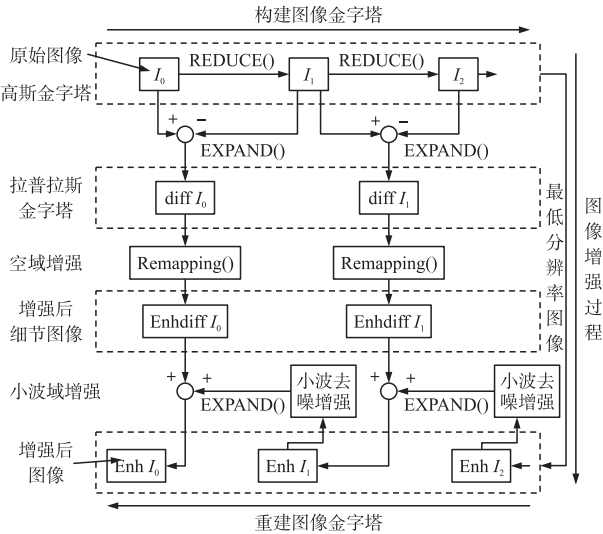


图 1 结合小波去噪的多尺度图像增强算法

在图 1 中, $\text{Remapping}()$ 为空域细节图像增强函数,对图像增强效果起到至关重要的作用。由于 THz 图像和 X 射线图像具有相似的性质,参照文献 [9],本文采用指数变换实现图像细节的对比度拉伸,如式(3)所示。为获得较好的图像增强效果,经过实验分析,取 $\alpha = 0.5$ 。

$$\text{Remapping}(v) = \begin{cases} 127 \cdot (v/128)^\alpha & \text{if } v \geq 0 \\ -127 \cdot (-v/128)^\alpha & \text{if } v < 0 \end{cases} \quad (3)$$

文献 [10] 表明,经过小波分解后的图像噪声一般位于高分率的小波图像中,因而本文在进行小波去噪时仅进行一层小波分解,对小波图像 H_1, V_1, D_1 进行去噪采用的公式如式(4)所示。

$$WT(x) = \begin{cases} WT(x) - T & x > T \\ 0 & -T \leq x \leq T \\ WT(x) + T & x < -T \end{cases} \quad (4)$$

其中 $T = \text{Median}() \cdot [2 \ln(n)/n]^{1/2}$, $\text{Median}()$ 表示小波图像系数绝对值的中值, n 为像素总数。为进一步提高图像的对比度,采用文献 [10] 提出的自适应增益法对去噪后的小波图像进行非线性拉伸,而对低频系数保持不变,这样就能保证经过小波逆变换后的图像灰度范围和原始图像基本一致,通过该过程使得图像的对比度进一步增强。

本文在构建图像金字塔时分解层次设为 6,采用的小波函数为 Symlets 4 小波。

3 THz 图像增强结果分析

本文采用的 THz 图像是基于 Microtech 公司生产的返波管作为连续 THz 辐射源的透射成像系统,返波管型号为 OV-31,频段调节范围在 231 GHz ~ 375 GHz,系统所用频率为 338 GHz,该频率为返波管峰值输出功率点,能够使 THz 图像获得最高的对比度,探测器为热释电探测器,斩波器频率为 100 Hz,锁相放大器时间常数为 30 ms,被测物体放置于二维扫描步进平台上,平移台定位精度为 $1 \mu\text{m}$ 。

由图 2 可见,原始 THz 图像的对比度非常低,采用直方图均衡化方法实现了增强效果,但增强后图像字母轮廓明显变宽。本文提出的算法继承了 MUSICA 算法的优点,不仅明显提高了图像的对比度,同时由于结合了小波去噪过程,有效减小了图像噪声,如图 2(d) 所示,图像的边缘比较清晰。图 3 为进行小波去噪过程中采用的阈值 T 随金字塔分解层次的变化曲线。从曲线中可以看出,初始时噪声方差较低,由于对图像细节进行了对比度拉伸,噪声阈值先增强,说明进行图像增强时对噪声进行了放大。由于小波具有显著的去噪能力,之后噪声方差逐渐减小并趋向于 0。说明本文提出的增强算法是有效的,在增强图像细节的同时能够抑制噪声的影响。

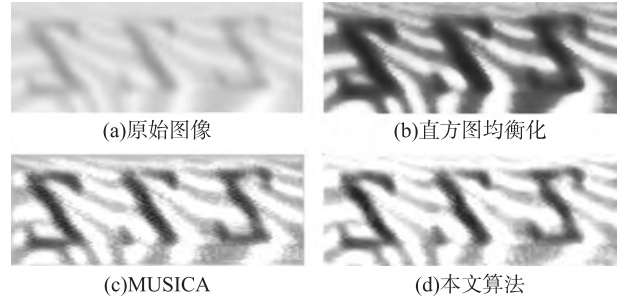


图 2 文字图像增强效果对比图

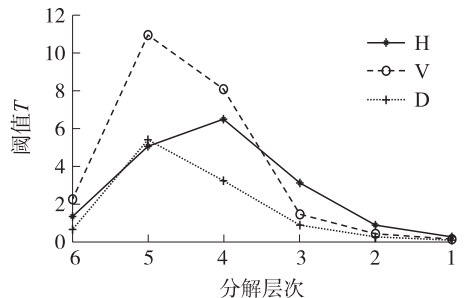


图 3 THz 图像增强过程中噪声阈值 T 随分解层次变化曲线

图 4 为刀片图像的增强效果对比图。直方图均衡化方法对于该图像失去了效果,而采用小波域增强方法有效地抑制了图像噪声的影响,但是图像增强的效果不明显,采用本文的算法取得了最好的增强效果。

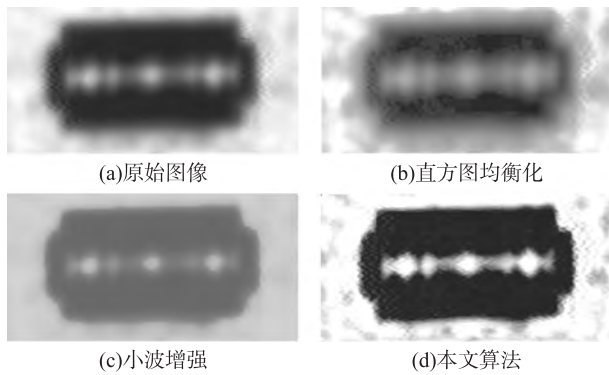


图4 刀片图像增强效果对比图

采用本文提出的算法对获得的 THz 图像进行了大量的测试,均取得了令人满意的增强效果,如图5所示。增强后的树叶图像能够分清其主要脉络,而增强后的刀具图像对比度有了明显提高,轮廓分明,有利于后续的图像处理和识别。从图2(a)中可以看出,采用单点扫描法获得的 THz 图像会存在明显的条纹现象,这是由于多路反射 THz 波在探测器内相干叠加形成的干涉条纹,以及平移台定位精度和振动影响产生的条状噪声造成的。文献[13]已经进行了去除 THz 图像条纹的工作,这也将是本文进一步研究的重点。

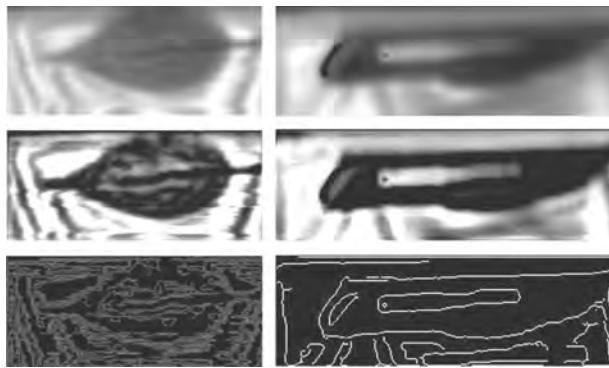


图5 采用本文算法的增强后 THz 图像及其边缘图像

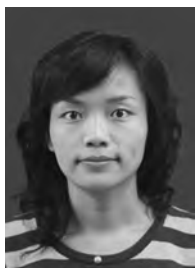
4 结论

本文提出了一种结合小波去噪的 THz 图像多

尺度空域增强方法,有效结合了多尺度空域增强和小波去噪两种算法的优点,在增强图像对比度的过程中逐步抑制噪声的影响。大量实验表明,采用该方法使 THz 图像的对比度有了明显增强,方便了后续判读和处理。

参考文献:

- [1] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007.
- [2] Dobroiu A, Yamashita M, Ohshima Y N, et al. Terahertz Imaging System Based on a Backward-Wave Oscillator[J]. Applied Optics 2004, 43(30): 5637-5646.
- [3] 葛新浩,吕默,钟华,等. 反射式太赫兹返波振荡器成像系统及其应用[J]. 红外与毫米波学报,2010, 29(1): 15-18.
- [4] 李海涛. 连续太赫兹波图像增强算法的研究[D]. 北京:首都师范大学硕士学位论文,2008.
- [5] Li Q, Yin Q, Yao R, et al. Continuous-Wave Terahertz Scanning Image Resolution Analysis and Restoration [J]. Optical Engineering, 2010, 49(3): 037007-037007-5.
- [6] 冈萨雷斯,伍兹. 数字图像处理(第二版)[M]. 阮秋琦等译. 北京:电子工业出版社,2003.
- [7] Burt P J, Adelson E H. The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code[J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, 31(4): 532-540.
- [8] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [9] Vuylsteke P, Schoeters E P. Multiscale Image Contrast Amplification (MUSICA) [C]//Proceedings of SPIE Image Processing USA: SPIE, 1994, 551-560.
- [10] Laine A F, Schuler S, Fan J, et al. Mammographic Feature Enhancement by Multiscale Analysis [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1994, 13(4): 725-740.
- [11] Donoho D L. De-Noising by Soft-Thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [12] Dippel S, Stahl M, Wienker R, et al. Multiscale Contrast Enhancement for Radiographies: Laplacian Pyramid Versus Fast Wavelet Transform [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2002, 21(4): 343-353.
- [13] 邹园园,葛庆平,韩煜,等. 基于频域滤波的 THz 图像条纹噪声处理[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(17): 241-243.



徐英(1982-),女,浙江大学光电系博士研究生,主要研究方向为连续太赫兹源及应用研究,xuying_61@163.com;



洪治(1964-),男,博士,研究员,中国计量学院太赫兹技术与应用研究所所长,主要研究方向为太赫兹技术与应用,激光技术,非线性光学,生物光学和量子信息,hongzhi@cjlu.edu.cn。