

基于小波变换的太赫兹数字全息再现像去噪研究

崔珊珊, 李琦

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 太赫兹数字全息是当今太赫兹成像领域的研究热点之一。以真实连续太赫兹同轴数字全息再现像作为研究对象,进行了基于小波变换的去噪研究。选用“bior2.2”和“sym4”两种小波基,分别采用硬阈值和软阈值方式,对全息再现图像进行小波阈值去噪和基于小波的同态滤波处理,然后定量分析去噪结果。实验结果证明,对连续太赫兹同轴数字全息系统记录的再现像,采用“bior2.2”小波基的基于小波软阈值去噪的同态滤波,对太赫兹同轴数字全息再现图的去噪效果最好。

关键词: 太赫兹; 数字全息; 小波变换

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1836-05

De-noising research on terahertz digital holography based on wavelet transform

Cui Shanshan, Li Qi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Terahertz digital holography is one of the research hotspots in the terahertz imaging field over the world nowadays. The real reconstructed image was used as the research object, which was achieved by the continuous terahertz inline digital holographic imaging system, and the de-noising research was studied based on wavelet transform. Wavelet threshold technique and the homomorphic filtering based on wavelet were applied to denoise the image, with hard threshold and soft threshold technique respectively, by "bior2.2" and "sym4" wavelet base. Then the denoising result was quantitatively assessed. The experimental results show that the homomorphic filtering based on wavelet has the best de-noising performance for the reconstructed image of terahertz continuous inline digital hologram, which works with soft threshold method and the "bior2.2" wavelet basis.

Key words: terahertz; digital holography; wavelet transform

收稿日期: 2014-10-20; 修订日期: 2014-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(61377110); 高等学校博士学科站点专项科研基金(20112302110028)

作者简介: 崔珊珊(1990-), 女, 硕士生, 主要从事太赫兹成像方面的研究。Email: hitcss@126.com

导师简介: 李琦(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光与太赫兹成像及图像处理等方面的研究。

Email: liqi2013@hit.edu.cn

0 引言

太赫兹成像技术以其独特的优良特性,具有十分诱人的应用前景,太赫兹全息作为太赫兹成像领域的前沿技术之一,也越来越受到人们的广泛关注^[1-3]。

随着太赫兹数字全息技术的发展,如何提高再现像质量已经成为研究热点之一。在数字全息成像中,影响再现像质量的因素是多方面的,有零级衍射、孪生像、激光散斑等,其中激光散斑是数字全息中影响成像质量的重要因素,也是比较难以解决的问题之一^[4]。

M. Abolhassina 等人通过对全息图分割,并将子图再现像叠加的方式来减小散斑的影响^[5]。翁嘉文等人利用 Gabor 小波变换消除了菲涅耳全息再现像中的零级衍射和孪生像的影响^[6]。此外,在激光雷达成像中也有关于去除散斑噪声的研究,李自勤等人采用“sym4”小波基对激光雷达成像系统中的散斑像进行基于小波的同态滤波处理,并取得了较好的效果^[7]。

但目前尚无基于小波变换的太赫兹数字再现像中散斑噪声的研究,而太赫兹数字全息再现像的去噪研究对提高太赫兹数字全息再现像质量意义重大。文中所研究的真实 2.52 THz 数字全息再现像是基于连续太赫兹 Gabor 同轴数字全息成像系统,在单帧无遮挡条件下得到的金属薄片的再现像^[8]。利用“bior2.2”和“sym4”两种小波基,在硬阈值和软阈值两种方式下分别对图像进行了小波阈值去噪和基于小波变换的同态滤波,并定量分析了去噪结果。

1 去噪算法原理

Donoho 提出了小波阈值去噪方法,其基本思想是对小波分解(即小波变换)后的高频小波系数设置阈值,认为噪声引起的小波系数绝对值较小,且分散在小波变换后的所有系数中,将其置为零,而绝对值较大的系数是由图像本身产生的,主要集中在高频,予以保留或收缩,然后对阈值处理后的系数进行小波重构(即小波反变换),即可实现去噪的目的。

若把原图像描述为 C_0 , Mallat 二维小波分解算法可表示为:

$$\begin{cases} C_{j+1} = HC_j H^* \\ D_{j+1}^h = GC_j H^* \\ D_{j+1}^v = HC_j H^* \\ D_{j+1}^d = GC_j H^* \end{cases} \quad j=0, 1, \dots, J-1 \quad (1)$$

式中: j 表示分解尺度; J 为分解层数; $*$ 表示取复共轭; h, v, d 分别表示水平、垂直和对角方向。重构算法相应地表示为:

$$C_{j-1} = H^* C_j H + G^* D_j^h H + H^* D_j^v G + G^* D_j^d G \quad (2)$$

若采用离散小波变换对图像进行 3 层分解,则图像的二维离散小波分解示意图如图 1 所示,其中 H 和 L 分别代表低通和高通滤波器, LL 表示图像的低频分量, HL, LH, HH 分别表示图像的水平、垂直和对角 3 个方向的高频分量,右下角的数字表示相应的分解层。

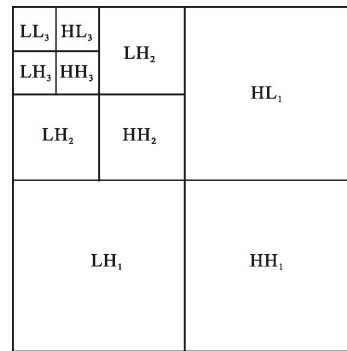


图 1 图像的三层分解示意图

Fig.1 Sketch diagram of 3-levels decomposition of image

阈值 T 通常采用 Donoho 等人提出的 Visu shrink 方法计算得到的固定阈值,表达式为:

$$T = \sigma \sqrt{2 \ln(MN)} \quad (3)$$

式中: σ 为噪声标准差; M, N 为图像的大小。由于噪声主要存在于高频小波系数中,一般取 $\sigma^2 = \text{median}|Y|/0.6745$, Y 采用最高层中高频分量 HH_1 来估计, median 表示将一个数组或序列按大小排序,求取中间值。

设 $f(x, y)$ 为原始图像信号,常用的阈值去噪方法有两种:硬阈值和软阈值。其中硬阈值方法定义为:

$$\tilde{f} = \begin{cases} f & |f| \leq T \\ 0 & |f| \geq T \end{cases} \quad (4)$$

软阈值方法定义为:

$$\tilde{f} = \begin{cases} \text{sign}(f)(|f| - T) & |f| \leq T \\ 0 & |f| \geq T \end{cases} \quad (5)$$

小波变换可直接用于图像的去噪处理，也可结合同态滤波进行图像去噪研究。数字全息再现像中噪声主要是散斑噪声，该噪声是乘性噪声，通过对图像的同态变换可以将乘性噪声转化为加性噪声，再采用加性噪声滤波器就可以较好地去除噪声。

基于小波的同态滤波算法滤除乘性噪声的过程如图 2 所示。首先，对原始图像取自然对数(ln)，然后对图像进行离散小波变换(DWT)， $H(u, v)$ 表示滤波器，利用滤波后的小波系数进行离散小波反变换(IDWT)，最后进行 e 指数操作(exp)。

输入含散斑噪声的图像，经取对数操作后的图像含加性噪声，对图像进行小波分解得到低频和高频系数，再对高频小波系数做阈值处理，利用处理后的小波系数重构即可得到去除加性噪声后的图像，再对图像取指数就可以得到原图像的去噪结果。

为了对图像的去噪效果进行定量评价，引入信噪比，其表达式为：

$$SNR = \frac{E(X)}{var(X)} \tag{6}$$

式中： X 代表图像； E 和 var 分别为平均值和标准差。

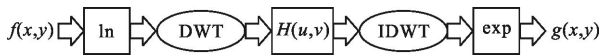


图 2 基于小波变换的同态滤波器

Fig.2 Homomorphic filter based on wavelet transform

2 实验结果分析

文中所处理的对象是基于连续太赫兹 Gabor 同轴数字全息成像系统，以常见的金属薄片作为成像物体，在单帧无遮挡条件下再现得到的图像，其信噪比为 1.453 1，如图 3 所示，其中图 3(a)为金属薄片，图 3(b)为金属片的全息再现图。

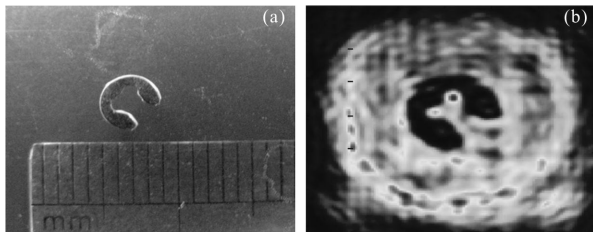


图 3 实验原始图像

Fig.3 Original images

首先选用“sym4”小波基对图像进行一层分解，分解结果如图 4 所示。对分解后的图像进行观察，发

现低频分量中主要包含图像的基本信息，水平和垂直的高频分量包含较多图像的细节，因此，噪声标准差 δ 的估计根据对角高频分量来计算。

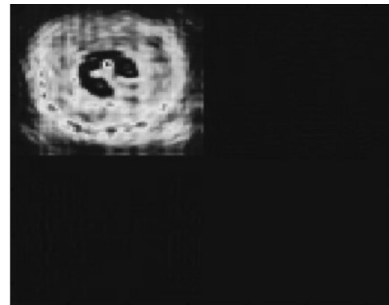
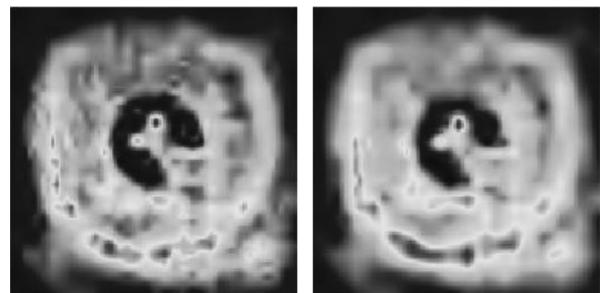


图 4 再现图像的一层分解示意图

Fig.4 Schematic diagram of the single layer decomposed reconstruction image

基于“sym4”对全息再现图像进行三层分解，根据上文中的阈值估计方法计算得到的阈值为 50.08，分别利用硬阈值和软阈值对小波系数进行处理，在这两种方式下的去噪结果如图 5 所示。可以看出，这两种去噪方式都使信噪比有了较大提高，其中软阈值方式得到的图像信噪比更高，更平滑，但是不可避免地造成了一定的目标边缘模糊；硬阈值方式可以更好地保留细节分量，目标的边缘比较清晰，但周围的平滑效果不够好。综合考虑，对于文中数字全息再现像来说，硬阈值方式的去噪效果更好一些。



(a) 硬阈值

(b) 软阈值

(a) Hard threshold(SNR=1.481 9) (b) Soft threshold(SNR=1.536 8)

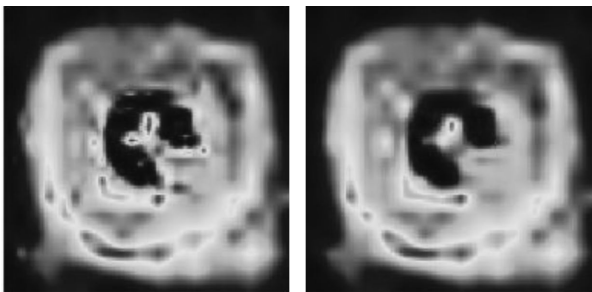
图 5 小波阈值去噪结果

Fig.5 Results of wavelet threshold de-noising

由于全息记录系统中激光的高度相干性，所得再现像上的噪声主要是乘性噪声，可利用如图 2 所示的基于小波的同态滤波对图像进行去噪处理。仍采用小波基“sym4”对同态变换后的图像进行噪声方差估计，计算出的阈值为 2.15，其硬阈值和软阈值的

去噪结果由图6给出。

从图6可以看出,硬阈值去噪方式保留细节较完整,目标非常清晰;软阈值去噪的信噪比稍高,但细节信息损失比较严重,目标边缘模糊。硬阈值方式的平滑效果虽不如软阈值,但完全可以接受,所以硬阈值更适于该图像的去噪。将图6与图5比较发现,小波阈值去噪与基于小波的同态滤波所得信噪比相差不多,后者的图像亮度较低,保留目标细节能力也比较强,目标较为清晰,且周边也更平滑。因此,基于小波的同态滤波比小波阈值去噪的去噪效果更好。综上,对于“sym4”图6(a)的去噪效果最好。



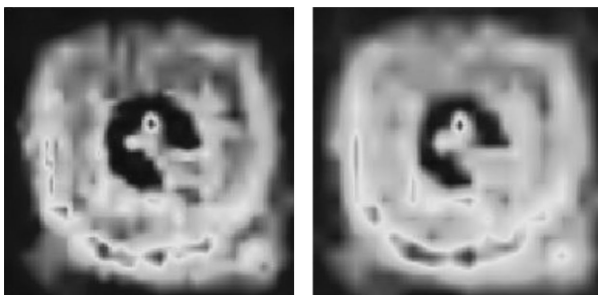
(a) 硬阈值 (b) 软阈值

(a) Hard threshold(SNR=1.491 9) (b) Soft threshold(SNR=1.500 1)

图6 基于小波的同态滤波器去噪结果

Fig.6 De-noising results of homomorphic wavelet filter

改用“bior2.2”小波基分别对图像直接做小波阈值处理和基于小波的同态滤波处理,其阈值分别为79.50和1.99,前者大于“sym4”的阈值,后者小于“sym4”的阈值,硬阈值和软阈值两种方式下的去噪结果如图7和图8所示,并给出相应去噪图像的信噪比。



(a) 硬阈值 (b) 软阈值

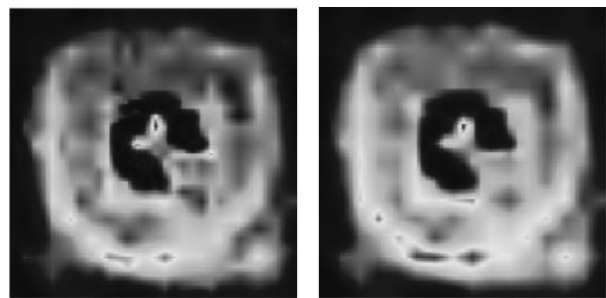
(a) Hard threshold(SNR=1.503 1) (b) Soft threshold(SNR=1.564 2)

图7 “bior2.2”小波阈值去噪结果

Fig.7 Results of wavelet threshold de-noising on "bior2.2"

在图7和图8中,硬阈值方式的信噪比均低于软阈值,从图像上来看,软阈值去噪图像平滑性较

好,然而丢失了大量目标细节;硬阈值方式保留图像细节能力较强,由于计算所得阈值较大,图像也比较平滑,相比之下,更适于该全息图像中噪声的去除。将图7与图8对比可以发现,无论是硬阈值还是软阈值方式,基于小波的同态滤波不仅具有更强的图像平滑能力,而且更好地保留了目标的细节,在信噪比提高方面与小波阈值去噪相差无几。也就是说,对于“bior2.2”图8(a)的去噪效果最好。



(a) 硬阈值 (b) 软阈值

(a) Hard threshold(SNR=1.494 5) (b) Soft threshold(SNR=1.508 2)

图8 基于“bior2.2”小波的同态滤波去噪结果

Fig.8 De-noising result of homomorphic wavelet filtering on "bior2.2"

最后将“bior2.2”与“sym4”的去噪结果相比较,对于硬阈值,因“bior2.2”情况下计算出的阈值较大,所以图像更平滑一些;对于软阈值,因“bior2.2”情况下阈值较小,图像细节保留情况较好一些,稍微弥补了一下它们自身的缺点。因此,“bior2.2”小波基的去噪效果优于“sym4”小波基。且图6(a)中有亮点出现,视觉效果不如图8(a)。综合以上结论可知,采用“bior2.2”的基于小波软阈值去噪的同态滤波,去除该太赫兹数字全息再现像中的噪声最成功。

3 结论

文中对连续太赫兹同轴数字全息系统记录的真实的单帧再现像进行了基于小波变换的去噪研究。经实验发现,对于文中的太赫兹全息再现像中噪声的去除,硬阈值方式比软阈值方式更适用;基于小波变换的同态滤波与小波阈值去噪的信噪比提高能力相差不多,而基于小波的同态滤波在目标的细节保留方面具有明显优势,周边的平滑效果也更好;且小波基“bior2.2”的去噪效果优于“sym4”。因此,采用“bior2.2”的基于小波软阈值去噪的同态滤波对太赫

兹同轴数字全息再现像的去噪效果最好。

参考文献:

- [1] Li Qi, Yao Rui, Ding Shenghui, et al. Experiment on 2.52 THz transmission-mode imaging for concealed objects [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0711001. (in Chinese)
李琦, 姚睿, 丁胜晖, 等. 遮挡物的 2.52 THz 透射成像实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0711001.
- [2] Zheng Xianhua, Wang Xinke, Sun Wenfeng, et al. Developments and applications of the terahertz digital holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209003. (in Chinese)
郑显华, 王新柯, 孙文峰, 等. 太赫兹数字全息术的研发与应用[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209003.
- [3] Deng Chao, Xing Chunfei, Lü Mo, et al. CW THz standoff imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(S1): 50–52. (in Chinese)
邓朝, 邢春飞, 吕默, 等. 连续太赫兹波远距离成像[J]. 光学学报, 2009, 29(S1): 50–52.
- [4] Cai Xiaoou, Ni Xiaojing. Study on reduction of speckle noise in reconstructed image of digital hologram [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(050901): 1–6. (in Chinese)
蔡晓鸥, 倪晓静. 数字再现像散斑噪声消除的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(050901): 1–6.
- [5] Abolhassina M, Rostimi Y. Speckle noise reduction by division and digital processing of a hologram [J]. *Optik*, 2012, 123(10): 937–939.
- [6] Weng Jiawen, Zhong Jingang, Hu Cuiying. Digital reduction of Fresnel hologram with a ridge of Gabor wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2109–2114. (in Chinese)
翁嘉文, 钟金钢, 胡翠英. 菲涅尔数字全息图的 Gabor 小波变换再现算法[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2109–2114.
- [7] Li Ziqin, Wang Qi, Li Qi, et al. Multiplication of speckle image and speckle suppression in imaging lidar [J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(8): 717–720. (in Chinese)
李自勤, 王琪, 李琦, 等. 激光成像雷达系统中散斑像的乘法模型及其滤除[J]. 中国激光, 2003, 30(8): 717–720.
- [8] Li Qi, Xue Kai, Li Yunda, et al. Experimental research on terahertz Gabor inline digital holography of concealed objects [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(29): 7052–7058.