

# 太赫兹同轴数字全息二维再现像复原方法比较

李琦 胡佳琦 杨永发

(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** 太赫兹同轴数字全息再现像噪声较大,尤其是背景噪声,严重影响着图像整体效果。因此,为实现图像平滑,提出了联合数学形态中重建的开运算和闭运算的非局部均值或中值非局部均值滤波进行太赫兹 Gabor 同轴数字全息二维再现像的图像复原方法,并对目标分辨率较低的真实再现像进行了数字处理比较分析。所研究的图像处理结果表明,提出的复合算法能够去除绝大部分噪声,达到图像平滑和提高信噪比的目的,效果明显优于单独使用复合算法中任一滤波方法。

**关键词** 成像系统; 太赫兹成像; 数字全息; 图像复原; 非局部均值; 中值非局部均值; 重建的开运算; 重建的闭运算

中图分类号 TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s109010

## Comparisons of Restoration Methods on Two-Dimensional Reconstructed Images of THz In-Line Digital Hologram

Li Qi Hu Jiaqi Yang Yongfa

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

**Abstract** The reconstructed image noises of THz in-line digital hologram are higher, especially the background noises, which seriously affect the overall effect of the image. To realize image smoothing, this paper proposes the restoration methods on two-dimensional reconstructed images of THz Gabor in-line digital hologram by combining opening-closing-by-reconstruction in mathematical morphology with non-local means or median non-local means filter. Digital processing and comparative analysis for the real reconstructed image of the target with lower resolution are carried out. The images processing results show that the proposed composite algorithm can remove most of the noise, leading to image smoothing and signal-to-noise ratio improvement, and the effect is obviously better than separately using any one single filter in composite algorithm.

**Key words** image systems; terahertz imaging; digital holography; image restoration; non-local means; median non-local means; opening-by-reconstruction; closing-by-reconstruction

**OCIS codes** 110.0110; 110.6795; 110.3000

### 1 引言

近年来,国际上已开展了太赫兹数字全息技术的实验研究<sup>[1-3]</sup>。由于数字全息再现像对比度较差且含有不规则条纹状背景噪声,影响着图像质量,因此采用数字图像处理方法对图像进行滤波去噪处理十分必要。目前国内一些研究人员已采用中值滤波等方法对可见光数字全息及计算机仿真再现像进行了图像去噪研究<sup>[4-5]</sup>,而对太赫兹数字全息再现像

背景噪声抑制和图像增强的研究尚处于初始阶段。目前太赫兹同轴数字全息的再现方法主要有角谱法和卷积法,其再现结果图像噪声较大,尤其是背景噪声严重影响图像整体效果,因此需要进行图像平滑。

基于局部统计的滤波方法、数学形态学、小波变换等方法都在一般图像去噪方面发挥了作用。近年来,在图像处理领域提出了多种基于非局部滤波的去噪算法,这些算法较传统的基于局部统计特性算

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-11-07

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

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

E-mail: liqi2013@hit.edu.cn

法可以获得较好的图像复原质量,并已在许多领域推广应用<sup>[6-7]</sup>。非局部均值(NLM)算法是 Buades 等<sup>[8]</sup>于 2005 年提出的一种去除高斯噪声的算法。由于具有较好的去噪效果,得到了不断的改进。2010 年文献<sup>[9]</sup>提出一种中值非局部均值(MNLM)算法,在 NLM 算法中引入一个间接的中值操作,用来处理低信噪比的图像,取得了一定效果。

目前,李琦等<sup>[10]</sup>已开展了基于非局部均值滤波方法的太赫兹图像去噪研究,但尚未利用此法进行全息图像去噪研究。而且,国际上尚无将 NLM 和 MNLM 滤波用于太赫兹全息再现像去噪的研究报道。由于数学形态学中重建的开运算(OR)和重建的闭运算(CR)联合应用可以较好地消除复杂图像的背景<sup>[11]</sup>,因此,本文提出联合形态数学中重建的开运算和闭运算的 NLM 或 MNLM(ORCR-NLM 或 ORCR-MNLM)滤波进行太赫兹 Gabor 同轴数字全息二维再现像的图像复原方法,并对目标分辨率较低的真实再现像进行了数字处理比较分析。

## 2 算法原理

### 2.1 重建的开运算和闭运算

重建的开运算中,一幅图像  $f$  首先被结构元素(SE)腐蚀并作为掩模,而原图像  $f$  则作为标记图像,经过一定的迭代过程来扩展标记图像直至其被掩模图像  $p$  压制为止。它是一种常用的消除图像中细小噪声的方法,其迭代过程可表示为

$$h_{k+1} = (h_k \oplus \mathbf{B}) \wedge p, \quad (1)$$

式中  $\wedge$  表示点方式的最小算子, $\oplus$ 表示膨胀运算, $\mathbf{B}$ 为结构元素,本文中 $\mathbf{B}$ 为元素值均为1的 $3 \times 3$ 矩阵,在图像位置 $(x, y)$ 处的膨胀为

$$[h_k \oplus \mathbf{B}](x, y) = \max_{(s, t) \in \mathbf{B}} [h_k(x - s, y - t)]. \quad (2)$$

本文中 SE 取值  $\mathbf{V}_{SE}$  为各元素皆为 1 的矩阵,因此,掩模可表示为

$$p(x, y) = f \ominus \mathbf{V}_{SE} = \min_{(s, t) \in \mathbf{V}_{SE}} [f(x - s, y - t)], \quad (3)$$

式中, $\ominus$ 表示腐蚀, $h_k$ 为第 $k$ 次迭代结果, $h_1$ 为原图像 $f$ , $h_{k+1} = h_k$ 迭代结束。

重建的闭运算定义为  $f$  先对被结构元素膨胀,再由  $f$  的腐蚀重建。由于对偶性,图像的重建闭运算可以用图像求补、计算重建的开运算、对结果求补这一过程实现<sup>[11]</sup>。

### 2.2 非局部均值滤波

给定一幅离散的含噪声图像  $g = \{g(i) \mid i \in \mathbf{I}\}$ ,

$\mathbf{I}$ 表示整幅图像。为减少计算量,采用搜索窗口  $\mathbf{I}_s$  代替整幅图像。对其中任何一个像素  $i$ ,利用图像中所有像素值的加权平均来得到该点的估计值  $V_{NL}[g(i)]$ ,即

$$V_{NL}[g(i)] = \sum_{j \in \mathbf{I}_s} w(i, j) g(j), \quad (4)$$

式中权值  $w(i, j)$  依赖于像素点  $i$  与  $j$  之间的相似性,并满足  $0 \leq w(i, j) \leq 1$  且  $\sum_j w(i, j) = 1$ 。

设  $\mathbf{N}_i, \mathbf{N}_j$  表示以像素点  $i, j$  为中心的邻域, $g(\mathbf{N}_i), g(\mathbf{N}_j)$  为其邻域的灰度值矩阵,则权重定义为

$$w(i, j) = \frac{1}{Z_g(i)} \exp\left[-\frac{\|g(\mathbf{N}_i) - g(\mathbf{N}_j)\|_{2,a}^2}{h^2}\right], \quad (5)$$

式中  $\|g(\mathbf{N}_i) - g(\mathbf{N}_j)\|_{2,a}^2$  为高斯加权的欧氏距离, $a > 0$  为高斯核函数的标准差, $Z_g(i)$  为归一化常数,

$$Z_g(i) = \sum_j \exp\left[-\frac{\|g(\mathbf{N}_i) - g(\mathbf{N}_j)\|_{2,a}^2}{h^2}\right], \quad (6)$$

参数  $h$  决定着滤波的平滑程度<sup>[8]</sup>。

### 2.3 中值非局部均值滤波

MNLM 滤波采用中值滤波的图像来代替噪声图像来估计权重,这些权重对原始噪声图像中的像素进行加权平均<sup>[9,12]</sup>。

$$\mathbf{m} = f_m(\mathbf{g}, s_1), \quad (7)$$

式中  $\mathbf{g}$  为噪声图像, $s_1$  为中值操作时的窗口大小, $f_m$  表示取中值。因此,两个像素点  $i$  与  $j$  之间的相似性为

$$w_{ij}(\mathbf{m}_i) = \frac{1}{Z_m(i)} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j\|_{2,a}^2}{h^2}\right), \quad (8)$$

式中  $Z_m(i)$  为归一化常数,其表达式为

$$Z_m(i) = \sum_j \exp\left(-\frac{\|\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j\|_{2,a}^2}{h^2}\right). \quad (9)$$

像素  $i$  的估计值由搜索窗口中所有像素值的加权平均来得到,即

$$V_{NL}[g(i)] = \sum_{j \in \mathbf{I}_s} w_{ij}(\mathbf{m}_i) g(j). \quad (10)$$

### 2.4 ORCR-MNLM 和 ORCR-NLM 滤波算法实现流程

所采用的 ORCR-MNLM 和 ORCR-NLM 滤波算法实现框图如图 1 所示。原再现像经重建的开运算去除大部分条纹噪声,再经重建的闭运算去除部分狭小斑纹噪声;然后由 NLM 或 MNLM 滤波去除余下的部分噪声,得到去除噪声的高对比度图像。

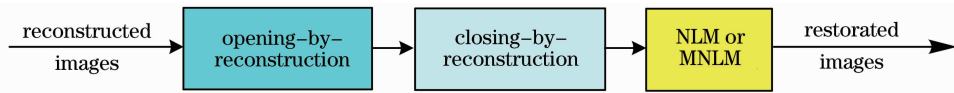


图1 算法实现框图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

### 3 实验结果及分析

像元数为  $124 \text{ pixel} \times 124 \text{ pixel}$  原再现图像为同轴  $2.52 \text{ THz}$  数字全息角谱法再现结果, 图像灰度级为 256, 目标为异型的金属垫片<sup>[13]</sup>, 此目标分辨率较低。本文中, MNLM 和 NLM 滤波中, 相似块大小为  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ , 搜索窗口大小  $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ , 中值窗口  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ , 输入参数  $h$  取整幅待滤波图像的标准差; 重建的开运算、闭运算中的腐蚀的结构元素分别为元素皆为 1 的  $31 \times 31$  和  $9 \times 9$  矩阵。

由于太赫兹同轴数字全息再现过程中常用多帧平均的全息图进行再现以提高信噪比, 因此分别对单帧和 4 帧平均的全息图再现像进行了算法性能研究。

#### 3.1 4 frame 平均的全息图再现像处理结果及比较

图 2 所示为待处理的 4 frame 平均的全息图的再现像和对其分别进行 NLM 和 MNLM 滤波的结果。4 frame 平均的全息图的再现像[图 2(a)]中目标下方背景偏亮且图像边界偏暗, 这主要由于照射

光束不均匀且探测器边缘部分光能量过低; 图像中有横竖条纹, 这主要是孔径效应造成; 圆环状背景主要是衍射效应引起的。图 2(b) 为图 2(a) 经 NLM 滤波的结果, 图像噪声得到一定抑制, 但依然可以看到明显的条纹和目标内凹陷处的两个亮斑。图 2(c) 为图 2(a) 经 MNLM 滤波的结果, 与 NLM 滤波结果相近, 较 NLM 滤波目标边缘略微光滑。

图 3 所示为图 2(a) 重建的开运算及随后重建的闭运算和 NLM、MNLM 滤波结果, 图像灰度级为 79, 用 256 灰度级显示。由图 3 可知, 重建的开运算去除了大部分细窄的条纹, 目标内凹陷处的两个亮斑消失了, 但目标上方的背景还是偏暗; 另外, 经重建的开运算后目标周围背景整体变暗, 使图像灰度级降至 79。再经重建的闭运算后, 去除掉部分重建的开运算未能平滑的噪声。在图 3(b) 的基础上的 NLM 和 MNLM 滤波平滑效果明显好于图 2(b) 和图 2(c), 也好于图 3(b)。

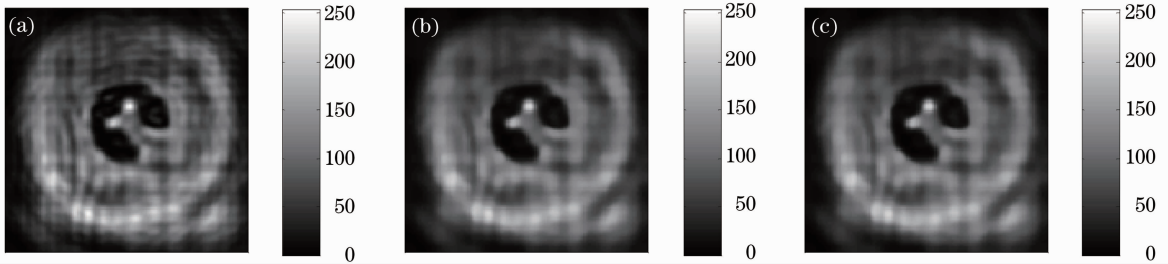


图 2 4 frame 平均全息图再现像及其 NLM 和 MNLM 滤波结果。(a) 4 frame 平均的再现像; (b) NLM; (c) MNLM  
Fig. 2 4-frame-averaging reconstructed image, NLM and MNLM results. (a) 4-frame-averaging reconstructed image; (b) NLM; (c) MNLM

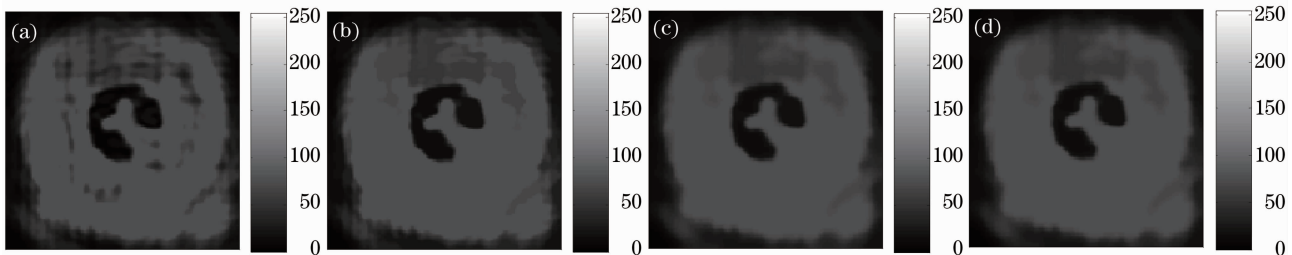


图 3 图 2(a) 的滤波结果。(a) 图 2(a) 重建的开运算; (b) 图 3(a) 重建的闭运算; (c) 图 3(b) 的 NLM 结果; (d) 图 3(b) 的 MNLM 结果

Fig. 3 Filtering results of Fig. 2(a). (a) Open-by-reconstruction of Fig. 2(a); (b) closing-by-reconstruction of Fig. 3(a); (c) NLM results of Fig. 3(b); (d) MNLM results of Fig. 3(b)

表 1 所示为 4 frame 平均全息图的再现像及处理结果的目标上的均值、标准差及均值与标准差比值的计算结果。目标是由图 4 所示的大小为 124 pixel×124 pixel 场景模板中的白色区域定义。由表 1 可知,当不用形态学滤波直接应用 NLM 或 MNLM 滤波情况下,均值与标准差比由原来的 1.1482 分别提高到 2.1842 和 2.1971;经过形态学重建的开运算和重建的闭运算后,均值与标准差比提高到 8.7568;在用形态学滤波后应用 NLM 或 MNLM 滤波情况下,均值与标准差比分别提高到 10.2072 和 10.2343。这说明形态学重建的开运算和重建的闭运算起到了重要的平滑作用。同时,由表 1 还也可知,对于本文所研究的图像,MNLM 滤波标准差略低于 NLM 滤波,MNLM 滤波均值与标准差比略高于 NLM,说明 MNLM 滤波平滑效果略好于 NLM 滤波,两者差别不大,这也表明了视觉评价的正确性。

表 1 4 frame 平均全息图再现像及处理结果目标性能比较  
Table 1 Object characteristic comparisons of 4-frame-averaging reconstructed image and processing results

	Mean	Standard deviation	Mean/standard deviation
Fig. 2(a)	10.3352	9.0015	1.1482
Fig. 2(b)	12.3467	5.6528	2.1842
Fig. 2(c)	12.3848	5.6368	2.1971
Fig. 3(a)	8.7936	6.2337	1.4107
Fig. 3(b)	15.7462	1.7982	8.7568
Fig. 3(c)	16.5084	1.6173	10.2072
Fig. 3(d)	16.5180	1.6140	10.2343



图 4 场景模板

Fig. 4 Scene template

为了便于视觉观察,图 5 给出图 3(c)和(d)图像灰度级为 79 的显示结果,明显比用 256 灰度级显示视觉效果好。

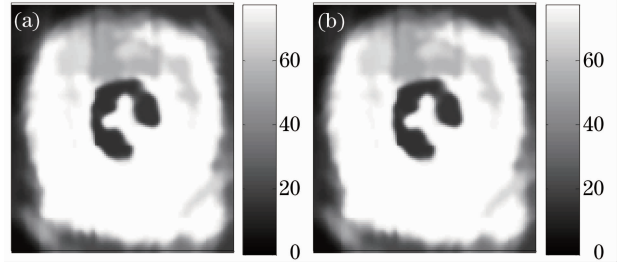


图 5 (a)图 3(c)和(b)图 3(d)79 灰度级显示结果

Fig. 5 79-grey-level display results of (a) Fig. 3(c) and (b) Fig. 3(d)

### 3.2 单帧全息图再现像处理结果及比较

图 6 所示为待处理的单帧全息图的再现像和对其分别进行 NLM 和 MNLM 滤波的结果。单帧全息图的再现像[图 6(a)]与图 2(a)所示 4 frame 平均结果相类似。经 NLM 或 MNLM 滤波的结果,也与图 2 处理结果相近;这主要因为全息图平均帧数较少,2 frame 再现像相近。

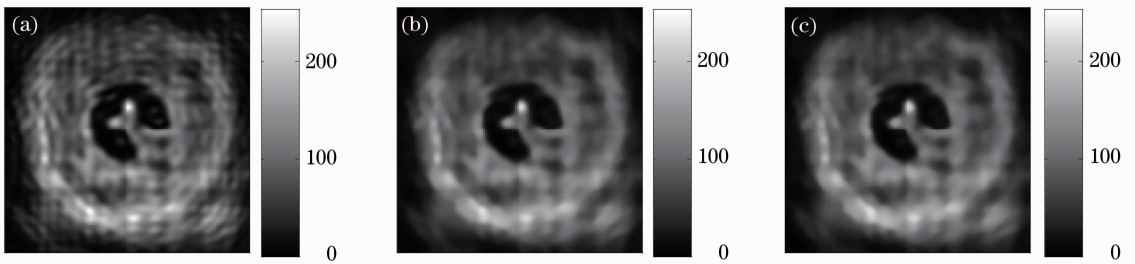


图 6 单帧全息图再现像及其 NLM 和 MNLM 滤波结果。(a) 单帧再现像; (b) NLM; (c) MNLM

Fig. 6 Single-frame reconstructed image, NLM and MNLM results. (a) Single-frame reconstructed image; (b) NLM; (c) MNLM

图 7 给出图 6(a)重建的开运算及随后重建的闭运算和 NLM、MNLM 滤波结果,图像灰度级为 66,用 256 灰度级显示。与图 3 类似,重建的开运算去除了大部分细窄的条纹,使图像灰度级降至 66。再经重建的闭运算后,去除掉部分重建的开运算未能平滑的噪声。在图 6(b)的基础上的 NLM 和

MNLM 滤波平滑效果明显好于直接 NLM 和 MNLM 滤波效果。

表 2 所示为单帧全息图的再现像及处理结果的目标上的均值、标准差及均值与标准差比值的计算结果。目标也是由图 4 所示的白色区域定义。由表 2 可知,算法性能趋势与表 1 相同。当不用形态学滤

波直接应用 NLM 或 MNLM 滤波情况下,均值与标准差比由原来的 1.1078 分别提高到 2.0763 和 2.0877;经过形态学重建的开运算和闭运算后,均值与标准差比提高到 7.1739;在用形态学滤波后应用 NLM 或 MNLM 滤波情况下,均值与标准差比分别提高到 8.6673 和 8.7173。对比表 1 和表 2 可知,

原始单帧再现像均值与标准差比略低于原始 4 frame 平均全息图再现像,而经本文所提算法处理后,单帧再现像均值与标准差比明显低于 4 frame 平均全息图再现像。表明 4 frame 平均全息图再现对后续图像处理较单帧再现效果好。

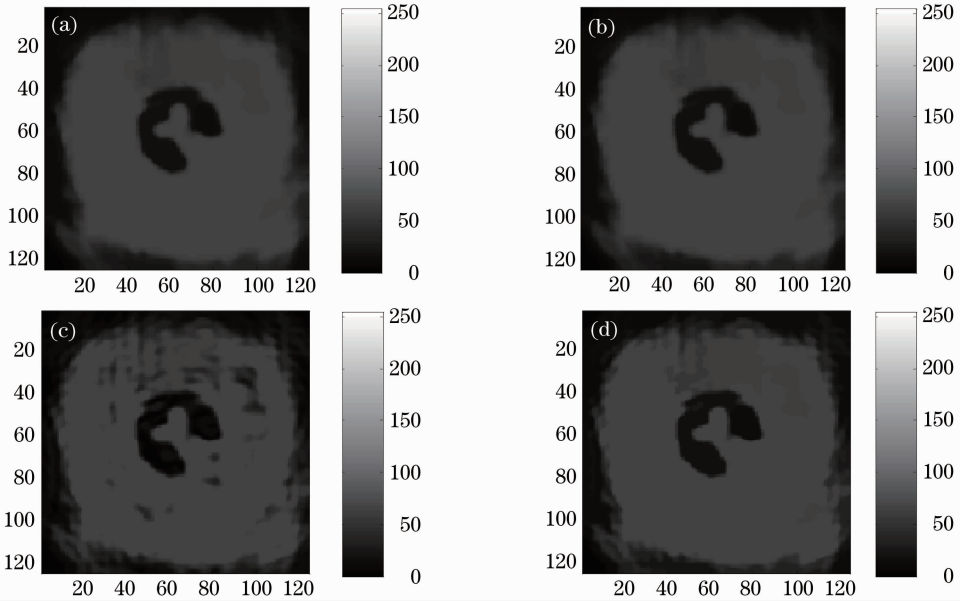


图 7 图 6(a)的滤波结果。(a)图 6(a)重建的开运算;(b)图 7(a)重建的闭运算;(c)图 7(b)的 NLM 结果;(d)图 7(b)的 MNLM 结果

Fig. 7 Filtering results of Fig. 6(a). (a) Opening-by-reconstruction of Fig. 6(a); (b) closing-by-reconstruction of Fig. 7(a); (c) NLM results of Fig. 7(b); (d) MNLM results of Fig. 7(b)

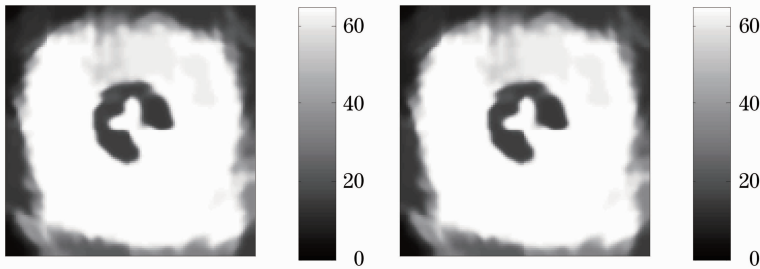


图 8 (a)图 7(c)和(b)图 7(d)灰度级为 66 的显示结果

Fig. 8 66-grey-level display results of (a) Fig. 7(c) and (b) Fig. 7(d)

表 2 单帧全息图再现像及处理结果目标性能比较

Table 2 Object characteristic comparisons of single-frame reconstructed image and processing results

	Mean	Standard deviation	Mean/standard deviation
Fig. 6(a)	9.9659	8.9958	1.1078
Fig. 6(b)	11.6793	5.6249	2.0763
Fig. 6(c)	11.7178	5.6127	2.0877
Fig. 7(a)	8.6799	6.6568	1.3039
Fig. 7(b)	16.3542	2.2797	7.1739
Fig. 7(c)	16.8386	1.9428	8.6673
Fig. 7(d)	16.8423	1.9320	8.7173

同样,为了便于视觉观察,图 8 给出图 7(c)和图 7(d)图像灰度级为 66 的显示结果,明显比用 256 灰度级显示视觉效果好。

## 4 结 论

由于太赫兹数字全息再现图像中存在大量的细条纹噪声,而重建的开运算和闭运算组合可以去除绝大部分细小噪声的方法,并且 NLM 和 MNLM 滤波在去噪同时又能较好保持边缘的特点,因此提出了联合形态数学中重建的开运算和闭运算的 NLM

和 MNLM 滤波进行太赫兹 Gabor 同轴数字全息二维再现像的图像复原方法,并分别对单帧和 4 frame 平均全息图的再现像进行了数字图像处理性能比较。图像处理结果表明,对于所研究的图像,提出的三种算法复合的新方法能够去除绝大部分噪声,达到图像平滑和提高信噪比的作用;滤波效果明显好于直接应用 MNLM 或 NLM 结果;滤波效果也较明显好于仅应用重建的开运算和重建的闭运算联合结果;MNLM 滤波平滑效果略微好于 NLM 滤波,两者差别不大;形态学重建的开运算和重建的闭运算的联合起到了重要的平滑作用;4 frame 平均全息图再现对后续图像处理较单帧再现效果好。总之,所采用的算法对太赫兹全息再现像的处理有较好的效果;也可以推广到可见光的全息图复原。

本文所用相似窗口大小为  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ ,中值窗口大小为  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ ,已是最小尺寸。对于分辨率高的目标的再现像,如像元数不大于  $3 \text{ pixel}$ 时,本文所用方法会造成目标细节模糊。因此,今后还需进一步研究适合高分辨率目标的新算法。

### 参 考 文 献

- 1 Li Qi, Ding Shenghui, Li Yunda, *et al.*. Advances in research of THz digital holography imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 050006.  
李 琦,丁胜晖,李运达,等. 太赫兹数字全息成像的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 050006.
- 2 Kai Xue, Qi Li, Yunda Li, *et al.*. Continuous-wave terahertz in-line digital holography [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(15): 3228–3230.
- 3 Li Qi, Ding Shenghui, Li Yunda, *et al.*. Comparison between 2.52 THz off-axis digital holography and focal-plane imaging [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0909003.  
李 琦,丁胜晖,李运达,等. 2.52THz 离轴数字全息成像和焦

- 平面成像特性比较 [J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0909003.
- 4 Jia Qin, Li Zhiqian. Speckle denoising new method for reconstructed image of digital holography [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(9): 205–207.  
贾 勤,李志全. 数字全息再现图像散斑噪声消除新方法 [J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(9): 205–207.
- 5 Zhou Canlin, Kang Yilan, Zhang Zhifeng. Application of wavelet transform in digital holography [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(7): 42–45.  
周灿林,亢一澜,张志锋. 小波变换在数字全息中的应用 [J]. *光电工程*, 2004, 31(7): 42–45.
- 6 Xia Zhiwei, Li Qi, Liu Zhengjun, *et al.*. Study on coherent lidar image denoising by block-matching and 3D filtering [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s114010.  
夏志伟,李 琦,刘正君,等. 基于块匹配和三维滤波的相干激光雷达图像去噪研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s114010.
- 7 Xia Zhiwei, Li Qi, Ding Shenghui, *et al.*. Lidar intensity image denoising by non-local means algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(s1): s100409.  
夏志伟,李 琦,丁胜晖,等. 基于非局部均值滤波的激光雷达强度像去噪研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(s1): s100409.
- 8 A Buades, B Coll, J M Morel. A review of image denoising algorithms, with a new one [J]. *Multiscale Model Simul*, 2005, 4(2): 490–530.
- 9 C Chan, R Fulton, D D Feng, *et al.*. Median non-local means filtering for low SNR image denoising; application to PET with anatomical knowledge [C]. *Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC) IEEE*, 2010. 3613–3618.
- 10 Li Qi, Xia Zhiwei, Ding Shenghui, *et al.*. Image denoising of CW THz images by use of non-local mean [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 517–524.  
李 琦,夏志伟,丁胜晖,等. 采用非局部均值的连续太赫兹图像去噪处理 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 517–524.
- 11 Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. *Digital Image Processing: third edition* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 435–436.
- 12 Zhi-wei Xia, Qi Li, Zhi-peng Xiong, *et al.*. Lidar range image denoising by a non-local probability statistics algorithm [J]. *Opt Eng*, 2013, 52(1): 017003.
- 13 Qi Li, Kai Xue, Yun-da Li, *et al.*. Experimental research on THz gabor inline digital holography of concealed objects [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(29): 7052–7058.

栏目编辑: 何卓铭