

太赫兹共焦扫描图像复原算法比较

李 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 150081)

摘要 太赫兹共焦扫描成像中,由于太赫兹激光器不可能恒定输出和采集信号微弱等原因,成像质量有待提高。在消除激光抖动的背景抑制后进行了中值滤波、块匹配和三维滤波(BM3D)、非局部均值(NLM)滤波和中值非局部均值(MNLM)滤波等方法比较;同时研究了滤波参数对处理效果的影响。图像处理结果表明,对所考察图像应用所确定的滤波参数时,MNLM 滤波稍好于 NLM 滤波,NLM 滤波稍好于 BM3D,中值滤波效果较差。

关键词 图像处理;太赫兹成像;图像复原;共焦扫描;中值非局部均值;非局部均值;块匹配和三维滤波

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s111005

Comparisons of Restoration Algorithm for Terahertz Confocal Scanning Image

Li Qi Yang Yongfa

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstract In the terahertz confocal scanning imaging, the imaging quality is to be improved for the reason that terahertz laser can not output the beam constantly and that the signal collected is weak, and so on. The comparison among median filtering, block-matching and three dimensional (3D) filtering (BM3D), non-local means filtering (NLM) and median non-local means filtering (MNLM) is made after eliminating the background suppression resulting from laser shaking. The influence of the filtering parameters on the processed effect is studied. The results of image processing show that on the condition of applying definitive filter parameters to the investigation images, MNLM's effect is better than that of NLM's, and NLM's effect is better than BM3D's, while median filtering's effect is the worst.

Key words image processing; terahertz imaging; image restoration; confocal scanning; median non-local means; non-local means; block-matching and three dimensional filtering

OCIS codes 110.3000; 110.4280; 110.6795

1 引 言

共焦显微成像方式理论上可达到超分辨,且此种成像方式可以获得目标的三维(3D)轮廓,因此共焦扫描显微成像技术受到太赫兹(THz)成像领域研究人员关注^[1]。2010年,丁胜晖等^[2]进行了 2.52 THz 共焦扫描显微成像初步实验。随后,他们又进行了利用数字图像处理方法提高成像质量的初步探索,提出了解决逐点扫描激光波动造成图像质量下降的解决办法^[3]。2013年,本课题组提出了一种用于太赫兹共焦扫描图像复原的基于两步背景抑制、中值非局部均值

(MNLM)滤波和灰度变换的复合方法。但尚未研究应用 Dabov 等^[4]提出的基于块匹配和三维滤波(BM3D)的图像去噪算法的可行性,对中值非局部均值滤波等滤波参数的选取也未进行对比分析;而滤波参数的选取对滤波效果影响不容忽视。

BM3D 通过将含有相似块的图像二维数据依次进行块匹配并堆叠成三维阵列,进行 3D 变换、收缩频谱和 3D 逆变换三步操作,得到滤波后的二维图像块组成的三维数据;其块匹配过程与非局部均值(NLM)的邻域搜索过程十分相似。该算法不仅复

收稿日期: 2013-10-31; 收到修改稿日期: 2014-01-16

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

原了相似块间共有的细节部分,同时也保持了各相似块自身的基本特性,是目前研究较多的一种图像复原方法^[5-7]。

BM3D滤波、空域非局部均值滤波算法(NLM)及在此基础上提出的MNLM滤波均进行了块匹配计算,均为当前普遍认可的图像复原方法,尤其是BM3D更被推崇。由于图像处理算法的针对性较强,不能以几类图像处理效果一定推得另一类图像的处理结果,因此,这三种算法在太赫兹共焦扫描图像复原中的作用值得实验验证。

本文在已有的消除太赫兹共焦扫描图像噪声的研究基础上,基于背景波动抑制后进行了中值滤波、基于块匹配和三维滤波、非局部均值滤波和中值非局部均值滤波等方法比较;同时研究了滤波参数对处理结果的影响。

2 算法原理

2.1 背景抑制及灰度变换算法原理

为消除大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 的图像 $f(m, n)$ 中照明光分布不均的影响,需要估计出每点的照明光 $b(m, n)$ 值,对图像进行复原。则复原后的图像 $o(m, n)$ 为

$$o(m, n) = f(m, n)/b'(m, n), \quad (1)$$

式中 $b'(m, n)$ 为 (m, n) 点处对 $b(m, n)$ 的估计。

考虑到扫描方式为逐点逐行,激光器输出功率漂移较缓慢,原则上以扫描图像每一行的起始端第 i_0 像素计数的 p_i 个像素以及终止端第 i_e 像素前 p_o 个像素的灰度均值来估计 $b(m, n)$ 。 $b'(m, n)$ 只与行数 m 有关。利用此法,(1)式中复原后的图像 $o(m, n)$ 可写为

$$o(m, n) = \frac{(p_i + p_o) \times f(m, n)}{\sum_{n=i_0}^{p_i+i_0} f(m, n) + \sum_{n=i_e-p_o}^{i_e} f(m, n)}, \quad (2)$$

当 $i_0 = 1$ 时,即为该行第1个像素;当 $i_e = N$ 时,即为该行最后一个像素。

为了提高图像对比度,应用灰度变换函数^[8],其对比度拉伸表达式为

$$o'(m, n) = \left[\frac{o(m, n) - o_{\min}}{o_{\max} - o_{\min}} \times 255 \right], \quad (3)$$

式中 $[\cdot]$ 表示取整数, o_{\max} 和 o_{\min} 分别表示 $o(m, n)$ 的最大和最小灰度值, $o'(m, n)$ 为 $o(m, n)$ 经对比度拉伸到 $[0 \ 255]$ 区间后的图像。

2.2 非局部均值滤波(NLM)

NLM滤波基本思想是图像中每一个像素点的

估计值是所有邻域结构相似的点的加权平均。该算法是非局部的,原则上可以利用图像中的所有点。

给定一幅离散的含噪声图像 $g = \{g(i) \mid i \in I\}$, I 表示整幅图像。为减少计算量,采用 $(2s+1) \times (2s+1)$ 搜索窗口 I_s 代替整幅图像。对其中任何一个像素 i , 利用图像中搜索窗口 I_s 内的像素的加权平均来得到该点的估计值 $N_L[g(i)]$, 即

$$N_L[g(i)] = \sum_{j \in I_s} w(i, j) g(j), \quad (4)$$

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 N_i, N_j 表示以像素点 i, j 为中心的 $(2r+1) \times (2r+1)$ 邻域, $g(N_i), g(N_j)$ 为其邻域的灰度值矩阵, 则权重定义为

$$w(i, j) = \frac{1}{Z(i)} \exp \left[- \frac{\|g(N_i) - g(N_j)\|_{2,a}^2}{h^2} \right], \quad (5)$$

式中 $\|g(N_i) - g(N_j)\|_{2,a}^2$ 为高斯加权的欧氏距离, $a > 0$ 为高斯核函数的标准差, $Z(i)$ 为归一化常数^[6,9], 表达式

$$Z(i) = \sum_j \exp \left[- \frac{\|g(N_i) - g(N_j)\|_{2,a}^2}{h^2} \right], \quad (6)$$

这里参数 $h = v w_m$, v 为系数, v_m 表示整幅图像标准差。

2.3 中值非局部均值滤波(MNLM)

为提高估计权重的精度,在NLM滤波的基础上,采用中值滤波的图像来代替噪声图像来估计权重,并对原始噪声图像中的像素进行加权平均。

$$m = M_{\text{edian}}(g, s_m), \quad (7)$$

式中 g 为噪声图像, s_m 为中值操作时的窗口大小, M_{edian} 表示在 s_m 窗口内取中值。因此,两个像素点 i 与 j 之间的相似性为

$$w_{ij}(m_i) = \frac{1}{Z(i)} \exp \left(- \frac{\|m_i - m_j\|_{2,a}^2}{h^2} \right), \quad (8)$$

式中 $Z(i)$ 为归一化常数

$$Z(i) = \sum_j \exp \left(- \frac{\|m_i - m_j\|_{2,a}^2}{h^2} \right).$$

像素 i 的估计值由搜索窗口中所有像素值的加权平均得到,即

$$N_L[g(i)] = \sum_{j \in I_s} w_{ij}(m_i) g(j). \quad (9)$$

显然, MNLM 滤波与 NLM 滤波不同之处在于用(8)式代替了(5)式^[10]。

2.4 BM3D 滤波

BM3D算法分为基本估计和最终估计两个步

骤,其流程图如图 1 所示,包围在点划线内的操作对每一参考块(用字母 R 标记)均重复执行一次。为骤为:

1) 基本估计,对噪声图像执行块匹配并进行硬

阈值滤波。分为块估计和聚集;

2) 最终估计,根据真实图像的基本估计,执行块匹配并对噪声图像进行维纳滤波。分为块估计和聚集^[5-7]。

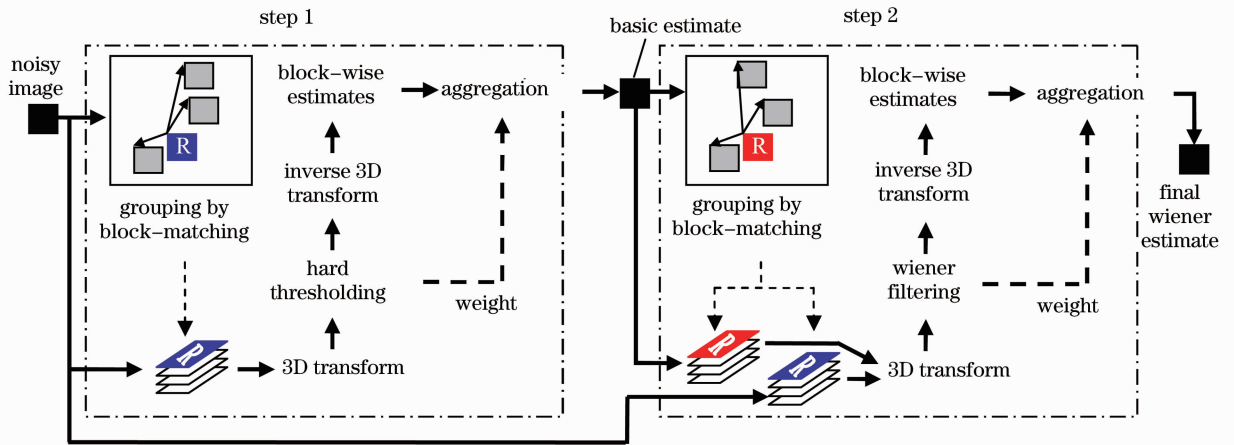


图 1 BM3D 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of BM3D algorithm

3 图像复原结果及分析

这里中值滤波窗口大小 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$, MNLM 滤波中的中值窗口大小也是 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$;采用(2)式背景抑制后的图像经(3)式对比度拉伸到 $[0 \ 255]$ 范围。

以 0.1 mm 为步长的 X 光片底片“年”字[见图 2(a)]扫描成像结果^[3]进行研究。图 2(b)给出经 90° 旋转后的 256 灰度级原始图像,图像大小为 $82 \text{ pixel} \times 50 \text{ pixel}$ 。边缘点出现的锯齿噪声是由于光强变化幅度较大超过数据采集系统的探测范围而出现的探测误差。显然,由于扫描时间较长,引入了较大的激光器输出功率波动噪声,而且信号偏低也引入

了椒盐电噪声。图 2(c)为没有旋转的原始图像经(2)式和(4)式获得的结果。其中 $i_0 = 2, p_i = 1$,即行开始端只有第 1 个像素做为背景估计,且此像素为第 2 个像素; $i_e = N - 1, p_e = 4$,即行尾部用倒数第 2 至倒数第 5 这 4 个像素作为背景估计;总共所用背景估计的像素数为 5。这样选择是由于图像中目标“年”顶部距离图像边界较近,只有约 $2 \sim 3 \text{ pixel}$,而底部距图像边界有 $6 \sim 7 \text{ pixel}$ 。由图 2(c)和图 2(b)对比可以看出,图 2(b)右侧亮度偏高的现象得到明显抑制。但个别竖列不均匀,说明因为原始图像的椒盐噪声的存在所用背底的均值不能完全准确。

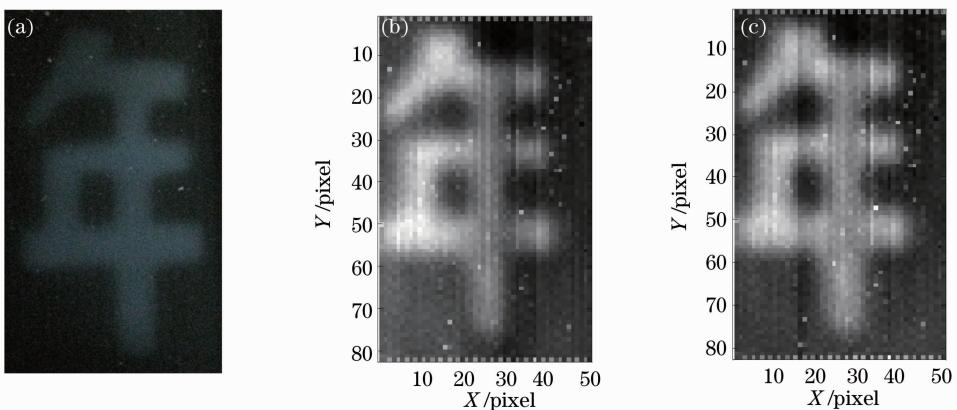


图 2 (a) 目标照片; (b) 旋转后的原始图像; (c) 经背景抑制

Fig. 2 (a) Object photo; (b) rotated 8-bit raw image; (c) background suppression

图 3 为图 2(c)的直方图。可以看出图像偏暗,灰度值在 50 附近较多,亮值多集中在 150 附近。图像噪声近似趋于高斯分布,并不是较理想的高斯分布。因此,在尽可能保持目标边缘的同时,去除图像噪声只用滤除高斯噪声的算法不可能是最佳方案,需要多种算法。

将 BM3D、NLM、MNLM 和中值滤波分别应用到图 2(c)中。图 4 给出噪声方差分别为整幅图像标准差的 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.3、5 倍时 BM3D 应用结果。从图 4 的复原结果可以看出,滤波后噪声得到明显去除,标准差倍数 v 为 0.8~1.3 的复原

结果相差不大, $v=5$ 时图像模糊;从图像对比度看, $v=0.8$ 时略好些。

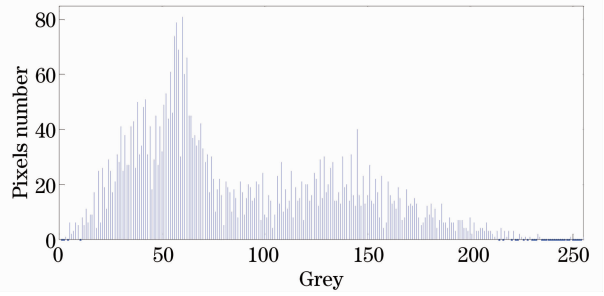


图 3 图 2(c)的直方图
Fig. 3 Histogram of Fig. 2(c)

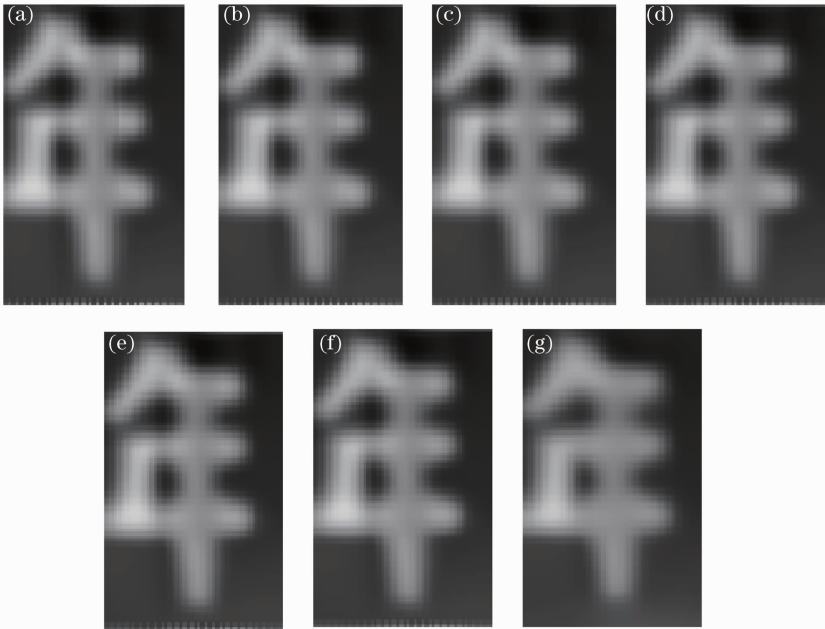


图 4 BM3D 用于图 2(c)的复原结果。(a) $v=0.8$; (b) $v=0.9$; (c) $v=1.0$; (d) $v=1.1$; (e) $v=1.2$;
(f) $v=1.3$; (g) $v=5.0$

Fig. 4 BM3D results of Fig. 2(c). (a) $v=0.8$; (b) $v=0.9$; (c) $v=1.0$; (d) $v=1.1$; (e) $v=1.2$;
(f) $v=1.3$; (g) $v=5.0$

图 5 给出 h 为整幅图像标准差时搜索窗口半径 s 分别为 7 pixel 和 2 pixel,滤波窗口半径 r 为 2 pixel 和 1 pixel 时 NLM 滤波应用结果。从图 5 复原结果可以看出, $s=7$ pixel 不及 $s=2$ pixel 的效果,这是由于图像中目标像素较少,因此大的搜索窗口反而造成图像边缘模糊。 $s=2$ pixel 且 $r=1$ pixel 时的 NLM 滤波效果最好;背景均匀性 $s=7$ pixel 时好于 $s=2$ pixel。与图 4 对比,目标灰度稍微偏暗,背景均匀性稍差。

图 6 给出 h 为整幅图像标准差时搜索窗口半径 s 分别为 7 pixel 和 2 pixel,滤波窗口半径 r 为 2 pixel 和 1 pixel 时 MNLM 滤波应用结果。从图 6 和图 5 的复原结果视觉对比可以看出,相同搜索和滤波窗口条件,NLM 和 MNLM 滤波效果相差甚微。

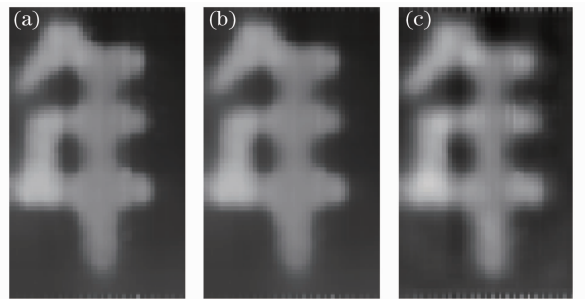


图 5 NLM 用于图 2(c)的复原结果。(a) $s=7$ pixel, $r=1$ pixel; (b) $s=7$ pixel, $r=2$ pixel; (c) $s=2$ pixel, $r=1$ pixel

Fig. 5 NLM results of Fig. 2(c). (a) $s=7$ pixel, $r=1$ pixel; (b) $s=7$ pixel, $r=2$ pixel; (c) $s=2$ pixel, $r=1$ pixel

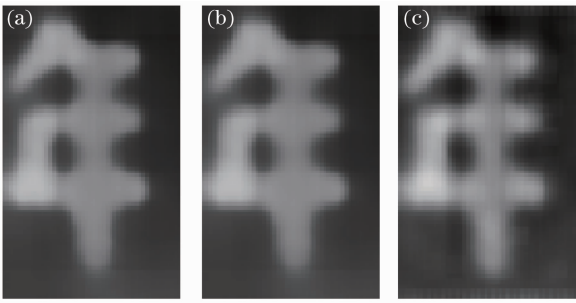


图6 MNLM用于图2(c)的复原结果。(a) $s=7$ pixel, $r=1$ pixel; (b) $s=7$ pixel, $r=2$ pixel; (c) $s=2$ pixel, $r=1$ pixel

Fig. 6 MNLM results of Fig. 2(c). (a) $s=7$ pixel, $r=1$ pixel; (b) $s=7$ pixel, $r=2$ pixel; (c) $s=2$ pixel, $r=1$ pixel

图7给出 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 中值滤波应用结果。显然中值滤波均匀性在已用的算法中去噪效果最差,目标和背景均匀性不及以上三种滤波方式。



图7 中值滤波用于图2(c)的复原结果

Fig. 7 Median filtering results of Fig. 2(c)

为了客观评价滤波算法去噪效果,这里通过计算目标均值、标准差及均值与标准差比值的方法进行比较分析。表1给出在图像目标部分(汉字“年”)性能计算结果。可以得出,从均值与标准差比值上看,适当选择参数情况下 MNLM 略为优于 NLM、NLM 优于 BM3D,以上三种算法优于中值滤波。BM3D 参数变化的比较可以看出, $v=5.0$ 时均值与标准差比值可达 6.5848, $v=0.8$ 时均值与标准差比值可达 6.3275,前者比值高于后者,即前者信噪比高于后者;但前者的均值明显低于后者,即后者对比度最高。从图像中也可看出后者对比度高于前者。同样可以看出在 MNLM 和 NLM 两种算法中, $s=7$ pixel, $r=1$ pixel 时均值与标准差比值最高,但 $s=2$ pixel, $r=1$ pixel 时均值最高,即对比度最高。由表1和图3~6的对比可以得出,综合对比度、去噪效果、边缘保持度等因素, $s=2$ pixel, $r=1$ pixel 时, MNLM 复原效果最好。BM3D 背景均匀性稍好。

表1 目标性能比较

Table 1 Comparison of object characteristics

| | Mean | Standard deviation | Mean/Standard deviation |
|---------------------------------|----------|--------------------|-------------------------|
| Fig. 2(c) | 153.1132 | 28.0272 | 5.4630 |
| Fig. 4 $v=0.8$ | 151.1252 | 23.8840 | 6.3275 |
| Fig. 4 $v=0.9$ | 150.8284 | 23.7222 | 6.3581 |
| Fig. 4 $v=1.0$ | 150.5705 | 23.6096 | 6.3775 |
| Fig. 4 $v=1.1$ | 150.2885 | 23.5143 | 6.3914 |
| Fig. 4 $v=1.2$ | 150.0408 | 23.3955 | 6.4132 |
| Fig. 4 $v=1.3$ | 149.8033 | 23.3065 | 6.4275 |
| Fig. 4 $v=5.0$ | 143.7236 | 21.8266 | 6.5848 |
| Fig. 5 $s=7$ pixel, $r=1$ pixel | 143.3135 | 21.0250 | 6.8163 |
| Fig. 5 $s=7$ pixel, $r=2$ pixel | 142.7532 | 21.1734 | 6.7421 |
| Fig. 5 $s=2$ pixel, $r=1$ pixel | 149.4230 | 22.9990 | 6.4969 |
| Fig. 6 $s=7$ pixel, $r=1$ pixel | 142.8961 | 20.9040 | 6.8358 |
| Fig. 6 $s=7$ pixel, $r=2$ pixel | 142.3033 | 21.0399 | 6.7635 |
| Fig. 6 $s=2$ pixel, $r=1$ pixel | 149.4212 | 22.9347 | 6.5151 |
| Fig. 7 | 150.7532 | 24.7027 | 6.1027 |

表2 对比度拉伸后目标性能比较

Table 2 Object characteristic comparisons after contrast-stretching

| | Mean | Standard deviation | Mean/Standard deviation |
|---------------------------------|----------|--------------------|-------------------------|
| Fig. 4 $v=0.8$ | 171.9573 | 29.0409 | 5.9212 |
| Fig. 4 $v=0.9$ | 171.4861 | 28.9858 | 5.9162 |
| Fig. 4 $v=1.0$ | 171.0195 | 28.9961 | 5.8980 |
| Fig. 4 $v=1.1$ | 170.6224 | 28.9872 | 5.8861 |
| Fig. 4 $v=1.2$ | 170.2143 | 29.0347 | 5.8624 |
| Fig. 4 $v=1.3$ | 169.9777 | 29.0316 | 5.8549 |
| Fig. 4 $v=5.0$ | 166.4397 | 30.2628 | 5.4998 |
| Fig. 5 $s=7$ pixel, $r=1$ pixel | 178.4898 | 31.4809 | 5.6698 |
| Fig. 5 $s=7$ pixel, $r=2$ pixel | 177.8980 | 31.6052 | 5.6288 |
| Fig. 5 $s=2$ pixel, $r=1$ pixel | 174.1197 | 28.5205 | 6.1051 |
| Fig. 6 $s=7$ pixel, $r=1$ pixel | 177.1790 | 31.5959 | 5.6077 |
| Fig. 6 $s=7$ pixel, $r=2$ pixel | 176.6846 | 31.8703 | 5.5439 |
| Fig. 6 $s=2$ pixel, $r=1$ pixel | 174.2570 | 28.4502 | 6.1250 |

利用(3)式分别将 BM3D、NLM、MNLM 滤波结果对比度拉伸到 $[0\ 255]$ 范围内。表 2 给出对比度拉伸后在图像目标部分(汉字“年”)性能计算结果。此结果恰好与综合对比度、去噪效果、边缘保持度等因素而得出的 $s=2\ \text{pixel}$ 、 $r=1\ \text{pixel}$ 时 MNLM 复原效果最好这一结果相吻合。另外,表 2 也说明在对比度拉伸后,BM3D 算法中 $v=0.8$ 效果较好。

4 结 论

针对太赫兹共焦扫描图像噪声特点,在抑制由于激光器输出功率不够稳定造成的背景波动基础上,本文对近几年较为普遍研究的基于块匹配和三维滤波(BM3D)、非局部均值滤波(NLM)和中值非局部均值滤波(MNLM)等方法进行了比较分析。实验结果表明,综合对比度、去噪效果、边缘保持度等因素,在 $s=2\ \text{pixel}$ 、 $r=1\ \text{pixel}$ 时 MNLM 复原效果最好, $s=2\ \text{pixel}$ 、 $r=1\ \text{pixel}$ 时 NLM 复原效果稍差。BM3D 算法背景均匀性稍好;对比度拉伸后,BM3D 算法中 $v=0.8$ 效果较好。

参 考 文 献

- 1 Li Qi, Ding Shenghui, Yao Rui, *et al.*. Advances in research of confocal THz scanning microscope [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(8): 081101.
- 李 琦, 丁胜晖, 姚 睿, 等. 太赫兹共焦扫描显微成像研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(8): 081101.
- 2 Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui, *et al.*. Preliminary study on

- THz confocal imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(s1): s100402.
- 丁胜晖, 李 琦, 姚 睿, 等. 太赫兹共焦成像的初步研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(s1): s100402.
- 3 Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui, *et al.*. Preliminary study on image processing of THz confocal scanning image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(s): 656–660.
- 丁胜晖, 李 琦, 姚 睿, 等. THz 共焦扫描成像图像处理方法初步研究[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(s): 656–660.
- 4 K Dabov, A Foi, V Katkovnik, *et al.*. Image denoising by sparse 3D transform-domain collaborative filtering [J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2007, 16(8): 2080–2095.
- 5 Xia Zhiwei, Li Qi, Liu Zhengjun, *et al.*. Study on coherent ladar 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.
- 6 Li Qi, Xia Zhiwei, Liu Zhengjun, *et al.*. Intensity image denoising based non-local filtering algorithms for real coherent ladar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s2): s211003.
- 李 琦, 夏志伟, 刘正君, 等. 基于非局部滤波算法的真实相干激光雷达强度像去噪[J]. *光学学报*, 2013, 33(s2): s211003.
- 7 Yang Juan, Jia Zhenhong, Qin Xizhong, *et al.*. BM3D image denoising based on shape-adaptive principal component analysis [J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(3): 241–244.
- 杨 娟, 贾振红, 覃锡忠, 等. 基于形状自适应 PCA 的三维块匹配图像去噪[J]. *计算机工程*, 2013, 39(3): 241–244.
- 8 R C Gonzalez, R E Woods. *Digital Image Processing (3rd Edition)* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 137–141.
- 9 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.
- 10 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]. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC)*, 2010. 3613–3618.

栏目编辑: 张浩佳