

一种用于太赫兹共焦扫描图像复原的复合算法

李琦, 杨永发, 胡佳琦

(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 150081)

摘要: THz 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, 导致成像质量有待提高; 数字图像复原方法是一种节约系统成本和空间的有效手段。文中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, 并将此方法用于真实太赫兹图像, 与中值滤波、开运算和非局部均值滤波相比较。真实图像处理结果表明, 此方法具有较好的复原效果, 尤其是图像对比度有明显提高。

关键词: 太赫兹成像; 图像复原; 中值非局部均值; 共焦扫描

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0321-06

A composite algorithm used for terahertz confocal scanning image restoration

Li Qi, Yang Yongfa, Hu Jiaqi

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

Abstract: Among the experiments of terahertz confocal scanning imaging, the image quality of the system remains to be improved for the reason that the terahertz laser used in the system can not constantly output and the signal acquired by the detector is weak, etc. Digital image restoration is an effective method to save the cost and the space of confocal scanning imaging system. Based on the consideration above, a composite method was put forward for the use of the terahertz confocal scanning image restoration. This composite method is based on two-step background suppression, median non-local means (MNLM) filtering and gray level transformation. A comparison with median filtering, open operation and non-local means filtering was made after using this composite method on the real terahertz images. The results of real terahertz imaging processing show that this composite method has a good effect of image restoration and the image contrast is obviously enhanced in particular.

Key words: terahertz imaging; image restoration; confocal scanning; median non-local means

0 引言

由于 THz 辐射较可见光波长长,一般成像方式受到衍射的限制;因此,THz 成像的分辨率一般只能达到亚毫米量级。而共焦显微成像方式原理上可突破衍射极限,即达到超分辨。另外,此种成像方式原理上可以获得目标的三维轮廓,因此太赫兹共焦扫描显微成像引起学者的广泛关注。THz 共焦扫描显微成像,是 THz 技术与共焦扫描显微成像技术的结合,是当今 THz 成像技术的前沿之一^[1-3]。

2010 年,笔者所在课题组利用美国相干公司生产的远红外激光系统和热释电探测器进行了 2.52 THz 共焦扫描显微成像初步实验^[4]。由于太赫兹波段激光器和探测器的性能均不及可见光和近红外,因此获得的图像信号微弱;而且由于太赫兹激光器输出功率长期稳定性不够高,而逐点扫描成像势必耗费时间,从而导致图像质量下降。为此,也进行了利用数字图像处理方法提高成像质量的初步探索^[5]。随着近些年发展起来的新算法,不断被诸多成像领域认可;如何利用这些算法提高太赫兹共焦成像质量的研究具有很大的实用价值。

非局部均值 (Non-local Means, NLM) 算法是 Buades 等人于 2005 年提出的一种去除高斯噪声的新算法^[6]。由于具有较好的去噪效果,该算法得到不断的改进。其中,2010 年参考文献[7]提出一种中值非局部均值(Median Non-local Means, 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。

文中在已有的消除太赫兹照射波动的研究^[5]基础上,结合中值非局部均值,提出了用于太赫兹共焦扫描图像的基于两步背景抑制、MNLM 滤波和灰度变换的复合方法,并将此方法用于真实太赫兹图像,同时与中值滤波、开运算和 NLM 滤波相比较。

1 太赫兹共焦成像装置及图像复原算法

1.1 共焦扫描成像装置

透射型 2.52 THz 共焦扫描成像装置如图 1 所示^[8]。M1、M2、M3 依次为焦距为 10.16、15.28、5.08 cm 的镀金离轴抛物面镜,聚乙烯薄透镜的焦距均为 12 cm。THz 激光器发出的 THz 激光经 M1、M2 整形及扩束

后被聚乙烯透镜聚焦到样品表面,透过样品的光束被聚乙烯透镜及 M3 收集并聚焦至探测器表面。样品置于二维平移台上,由步进电机控制二维平移台进行 x - y 方向的扫描。

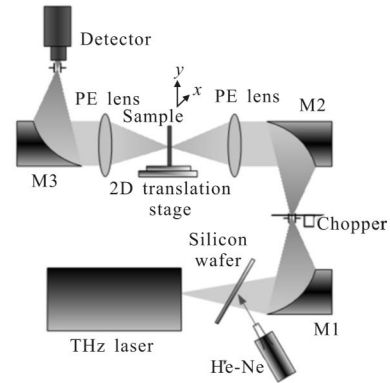


图 1 2.52 THz 共焦扫描成像实验装置

Fig.1 2.52 THz confocal-scanning imaging setup

1.2 背景抑制及灰度变换算法原理

为消除大小为 $M \times N$ 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 $b(m, n)$ 的值 $b'(m, n)$ 。文中采用两步抑制的方法。第一步,由于扫描方式为逐点逐行,激光器输出功率漂移较缓慢,原则上以扫描图像是每一行的起始点以及终止点的均值来估计 $b(m, n)$ ^[5]。但考虑到在每行的首尾可能探测误差较大,为此,文中提出利用每行第二个像素和倒数第二个像素的灰度值的均值来估计 $b(m, n)$;因此 $b'(m, n)$ 只与行数 m 有关。复原后的图像 $o(m, n)$ 可写为:

$$o(m, n) = \frac{2f(m, n)}{f(m, 2) + f(m, N-1)} \quad (1)$$

这部分主要抑制行间太赫兹源照射波动,因此,此法可称为行间波动抑制法。

第二步,以图像 $o(m, n)$ 为待处理图像,利用数学形态学中的开运算求其背景。复原后的图像 $o'(m, n)$ 可写为:

$$o'(m, n) = \frac{o(m, n)}{o(m, n) \circ U(l, k)} \quad (2)$$

式中: \circ 为形态开运算; $U(l, k)$ 为各元素皆为 1 的 l 行 k 列矩阵,文中 $l=30, k=20$ 。这部分抑制行内及行间照射波动,可称为整幅背景抑制法。

为了提高图像对比度,文中引入了灰度变换函数^[9],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 $o'(m,n)$ 的最小和最大灰度值, $o''(m,n)$ 为 $o'(m,n)$ 经对比度拉伸到 $[0,255]$ 区间后的图像,即 8 比特图像。

1.3 非局部均值滤波(NLM)^[6]

给定一幅离散的含噪声图像 $g=\{g(i)|i \in I\}$, I 表示整幅图像。为减少计算量,采用搜索窗口 I_s 代替整幅图像。对其中任何一个像素 i ,利用图像中所有像素值的加权平均来得到该点的估计值 $NL[g(i)]$,即:

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

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 $\sum_j w(i,j)=1$ 。

两个像素点 i 与 j 之间的相似性通过其邻域之间的高斯加权的欧氏距离来衡量。设 N_i, N_j 表示以像素点 i, j 为中心的邻域, $g(N_i), g(N_j)$ 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。

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

式中:参数 h 决定着滤波的平滑程度。

1.4 中值非局部均值滤波(MNLM)^[7,10]

采用中值滤波的图像代替噪声图像估计权重,

$$m=\text{Median}(g,s) \quad (7)$$

式中: g 为噪声图像; Median 表示求中值; s 为中值操作时的窗口大小。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来得到,即:

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

1.5 算法实现流程

文中提出用于太赫兹共焦扫描图像复原的复合

算法框图如图 2 所示。原始图像通过除以图像最大值再乘 255,直接量化为 8 比特图像;经公式(1)去除绝大多数因照射源功率漂移引起的扫描行间波动;经开运算求图像各像元背景,并除此背景,从而去除残余的行内及行间照射波动;通过公式(3)将背景抑制后的图像拉伸到 $[0,255]$ 区间;MNLM 滤波,去除高斯和椒盐噪声;通过公式(3)将滤波后的图像拉伸得到复原后的图像。

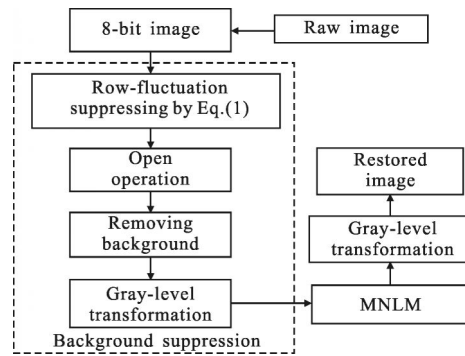


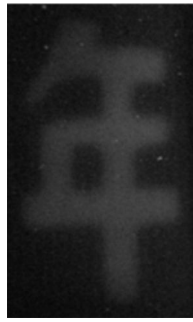
图 2 复合算法框图

Fig.2 Flow chart of the composite algorithm

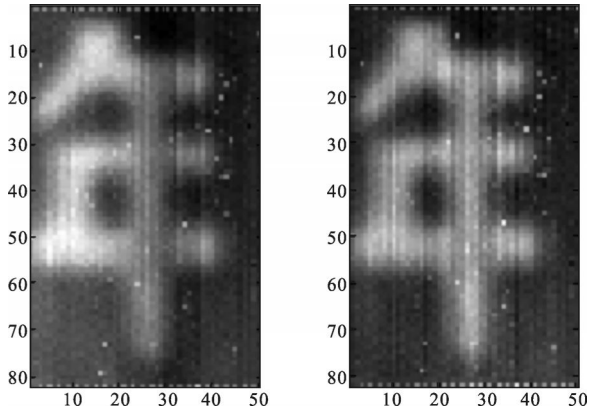
2 真实图像处理结果及分析

文中所显示的图像均为 8 比特图像。MNLM 和 NLM 滤波中,搜索窗口和相似窗口大小均分别为 5×5 和 3×3 , h 均为标准差。MNLM 滤波中的中值窗口大小 3×3 。与 MNLM 滤波相比较的中值滤波采用 3×3 窗口,开运算滤波的结构元素为各元素皆为 1 的 3×3 矩阵。文中所有背景抑制后的图像经中值滤波、开运算、MNLM 和 NLM 滤波算法处理结果,均利用公式(3)进行了对比度拉伸变换。

以 0.1mm 为步长的 X 光片底片“年”字(见图 3(a))扫描成像结果^[5,8]进行研究。图 3(b)给出经 90° 旋转后按照所提算法步骤 1 直接量化的结果,图像大小为 82×50 ,扫描时间约 50 min。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 3(c)为图 3(b)经公式(2)行间波动抑制及公式(4)对比度拉伸结果。由图 3(c)和图 3(b)对比可以看出,图 3(b)右侧亮度偏高的现象得到明显抑制。图 3(c)中汉字的灰度值的均匀度明显提高。显然,此行间波动抑制方法去除了绝大多数因照射源功率漂移引起的图像噪声。



(a) 目标照片
(a) Object photo

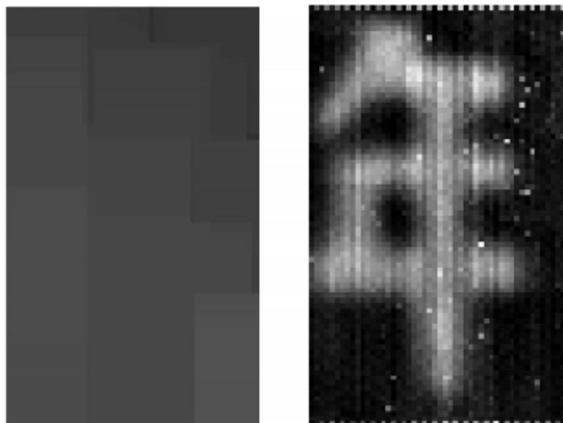


(b) 旋转后的 8-bit 图像
(b) Rotated 8-bit image
(c) 经行间波动抑制及拉伸
(c) Row-fluctuation suppression and contrast-stretch

图 3 原始图像及经行间波动抑制及对比度拉伸结果

Fig.3 Raw image, row-fluctuation suppression and contrast-stretch results

图 4 给出了图3(b)经文中所提算法中整个背景



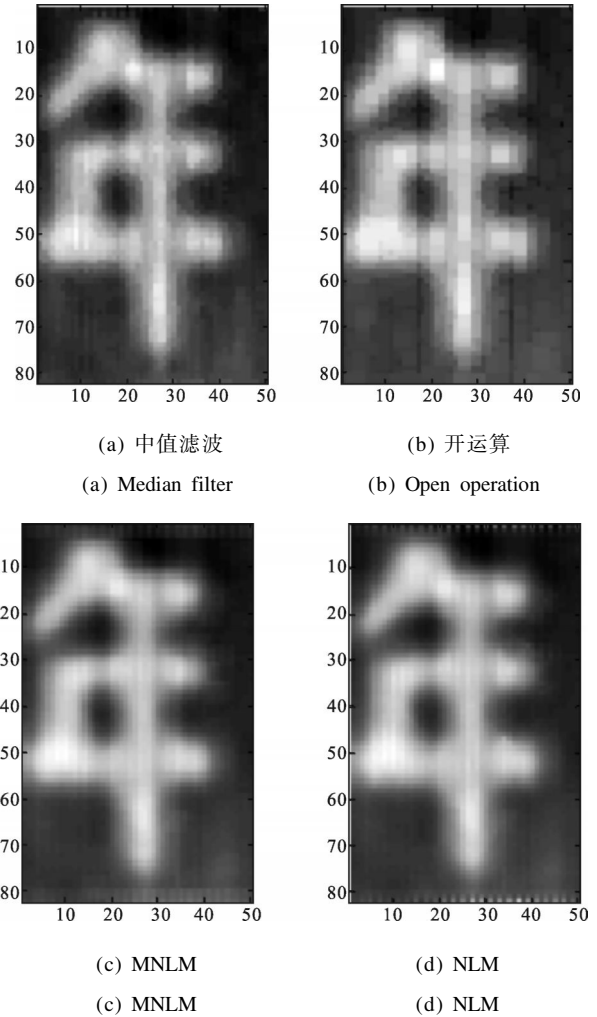
(a) 求得的背景
(a) Obtained background
(b) 背景抑制及拉伸
(b) Background suppression and contrast-stretch

图 4 图 3(b)背景抑制后的结果

Fig.4 Background suppression results of Fig.3(b)

抑制过程后的结果;图像拉伸到[0,255]区间。图 4(b)和图 3(c)相比,均匀性略差,对比度有所提高。

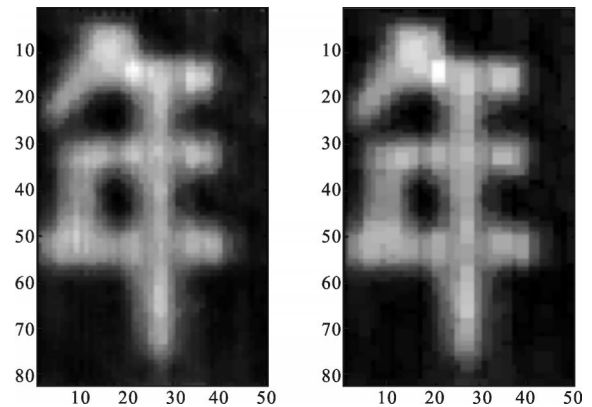
为了比较两步抑制法特性,分别对图 3(c)和图 4(b)进行了后续的滤波处理。图 5 和图 6 分别给



(a) 中值滤波
(a) Median filter
(b) 开运算
(b) Open operation
(c) MNLM
(c) MNLM
(d) NLM
(d) NLM

图 5 图 3(c)的复原结果

Fig.5 Restored results of Fig.3(c)



(a) 中值滤波
(a) Median filter
(b) 开运算
(b) Open operation

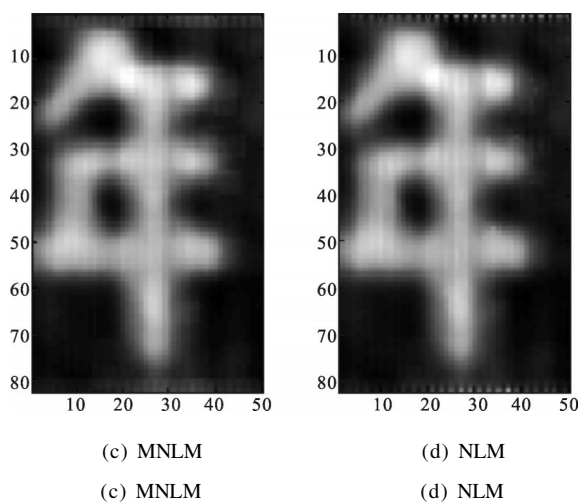


图 6 图 4 的复原结果

Fig.6 Restored results of Fig.4

出对图 3(c)和图 4(b)的复原结果。从图 5 和图 6 的复原结果可以看出, MNLM 和 NLM 滤波去噪效果较中值滤波和开运算效果好很多; MNLM 较 NLM 去噪效果略好一点。文中所提方法对比度最高。

表 1 给出在图像右下角背景部分, 即从 62 行至 76 行、6 列至 16 列的均值、标准差和均值与标准差之比的计算结果。从表中可以得出, 图 5(c)的文中提出方法处理结果的背景标准差最低且均值与标准差比值照原图像提高最大; 但此法背景均值与标准差比值低于仅基于行间波动抑制和 MNLM 复原(图 5(c))的效果。从均值与标准差之比可以较明显看出 MNLM 优于 NLM, 这与参考文献[5]所提算法初衷相吻合; 但两者差别不及它们与中值和开运算差别大。相同背景抑制条件下, 中值滤波效果最差, 开运算次之, 两者相差不大。

表 1 图 3~6 中部分背景性能比较

Tab.1 Some background characteristic comparisons in Fig.3~6

	Mean	Standard deviation	Mean/standard deviation
Fig.3(c)	49.490 9	6.689 7	7.398 1
Fig.4(b)	15.575 8	6.973 1	2.233 7
Fig.5(a)	48.090 9	4.190 3	11.476 7
Fig.5(b)	60.412 1	5.119 3	11.800 9
Fig.5(c)	51.866 7	3.500 1	14.818 8
Fig.5(d)	51.612 1	3.658 6	14.107 1
Fig.6(a)	16.0121	3.583 5	4.468 3
Fig.6(b)	11.212 1	4.712 2	2.379 4
Fig.6(c)	15.060 6	3.025 7	4.977 6
Fig.6(d)	14.987 9	3.090 1	4.850 3

表 2 给出在图像目标部分计算结果。从表中可以得出, 相同背景抑制条件下, 中值滤波效果最差, 开运算次之, 两者相差不大; MNLM 优于 NLM。图 5(c)所示处理结果的目标标准差最低且均值与标准差比值最高, 与文中提出方法相差不大; 从这两个数值上看, 此法也略好于基于文中提出两步抑制的复原(图 6(c))的效果。但从整个图像目标与背景的对比度(目标均值:背景均值)看, 文中方法为 11.6272, 仅基于行间波动抑制和 MNLM 复原(图 5(c))为 3.6760, 前者远远大于后者。说明文中算法在对比度上具有很大优势。

表 2 图 3~6 中目标性能比较

Tab.2 Object characteristic comparisons in Fig.3~6

	Mean	Standard deviation	Mean/standard deviation
Fig.3(c)	148.6058	24.8315	5.9846
Fig.4(b)	141.6271	29.1101	4.8652
Fig.5(a)	180.1568	27.0337	6.6641
Fig.5(b)	191.0937	26.5278	7.2035
Fig.5(c)	190.6633	25.3563	7.5194
Fig.5(d)	189.4555	25.4581	7.4418
Fig.6(a)	158.0835	27.4522	5.7585
Fig.6(b)	157.9137	27.7182	5.6971
Fig.6(c)	175.1132	27.1768	6.4435
Fig.6(d)	173.2616	27.1974	6.3705

3 结 论

利用文中提出的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, 对真实 2.52 THz 共焦扫描图像进行了复原研究。实验结果表明, 此方法具有较好的复原效果, 在对比度上具有很大优势; 综合对比度和均匀性, 两步背景抑制效果好于单独行间波动抑制; 在相同的背景抑制条件下, 中值滤波、开运算、NLM 和 MNLM 复原效果依次提高。

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. (in Chinese) 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] Zhu Weiwen, Zhao Yuejin, Zhu Huishi, et al. Improved

- mean filtering algorithm in THz imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1241–1246. (in Chinese)
宋维文, 赵跃进, 朱慧时, 等. 改进的均值滤波算法在太赫兹成像中的应用[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1241–1246.
- [3] Li Ze, Wang Mingang, Liu Xiaohua, et al. Terahertz imaging based on compressed sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1523–1525. (in Chinese)
李泽, 王民钢, 刘小华, 等. 基于压缩传感的太赫兹成像[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1523–1525.
- [4] Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui, et al. Preliminary study on THz confocal imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(s1): 100402. (in Chinese)
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): 100402.
- [5] 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. (in Chinese)
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.
- [6] Buades A, Coll B, Morel J M. A review of image denoising algorithms, with a new one [J]. *Multiscale Model Simul*, 2005, 4(2): 490–530.
- [7] Chan C, Fulton R, Feng D D, 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.
- [8] Ding Shenghui. Research on resolution improvement in CW THz imaging [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 14–15. (in Chinese)
丁胜晖. 提高连续太赫兹成像分辨率的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 14–15.
- [9] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. Digital Image Processing (Third Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 137–141.
- [10] Xia Zhiwei, Li Qi, Xiong Zhipeng, et al. Ladar range image denoising by a non-local probability statistics algorithm [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(1): 017003.