

文章编号 1004-924X(2014)08-2188-08

## 太赫兹 Gabor 同轴数字全息二维再现像复原

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:**提出结合分段对比度拉伸变换(PCST)和基于块的局部最优维纳(PLOW)滤波算法进行太赫兹 Gabor 同轴数字全息二维再现像图像复原的方法。分别介绍了 PCST 和 PLOW 的工作原理, 给出了 PCST-PLOW 组合滤波算法的工作流程。对真实的 2.52 THz 数字全息再现像进行了去噪处理, 并对每一处理过程进行了对比分析。比较了 PCST 节点对增强效果的影响, 其节点的起点和终点分别根据直方图和图像均值确定。对真实太赫兹再现像的处理结果显示: 去噪处理后的 40 帧平均全息图再现像的整体标准差由 0.184 9 提升到 0.307 4, 均值与标准差的比值由 1.720 8 提升到 2.268 8。得到的结果表明所用方法明显抑制了噪声, 同时提高了图像对比度。

**关键词:**太赫兹成像; 图像复原; 数字全息; 基于块局部最优维纳滤波; 分段对比度拉伸变换

**中图分类号:**O438.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2188

## 2D reconstructed-image restoration of terahertz Gabor in-line digital holography

LI Qi\*, HU Jia-qi, YANG Yong-fa

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

\* Corresponding author, E-mail: liqi2013@hit.edu.cn

**Abstract:** An image restoration method of 2D reconstructed-image of terahertz Gabor in-line digital holography was proposed with combination of Piecewise-contrast-stretching Transformation(PCST) and Patch-based Locally Optimal Wiener (PLOW) filter. The PCST and the PLOW algorithms were introduced, respectively, and the working flow of the combined PCST-PLOW algorithm was given. The denoising for a real 2.52 THz reconstructed-image of digital holography was executed, and each step of the image processing was compared. The effect of the PCST on the image enhancement was analysis, in which the starting point and the end point of the nodes were dependent on a histogram and an image average value. The results of treatment on the real terahertz reconstructed-image show that the global standard deviation of the denoising reconstructed-image of 40-frame averaged hologram rises from 0.184 9 to 0.307 4, and the ratio of the mean value to standard deviation rises from 1.720 8 to 2.268 8. These results demonstrate that the proposed method has suppressed image noise, while improving image contrast.

收稿日期:2013-09-25;修订日期:2013-11-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61377110);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20112302110028)

**Key words:** terahertz imaging; image restoration; digital holography; local optimal Wiener filter; piecewise-contrast-stretching transformation

## 1 引言

太赫兹波具有可穿透塑料、纸张、衣服等不透明的非金属和非极性物质的能力,因此太赫兹成像技术在许多领域均有较大的应用潜力。太赫兹数字全息技术结合了太赫兹技术与数字全息技术,是当前成像领域的研究热点之一<sup>[1]</sup>,并具有广阔的应用前景。近年来,国际上已开展了相关太赫兹数字全息成像的实验研究<sup>[2-4]</sup>。

由于数字全息再现像的对比度较差且存在不规则的条纹状背景噪声等误差,因此有必要采用图像处理方法对图像进行滤波去噪和对比度增强。目前,国内一些研究人员已采用中值滤波、Lee 滤波、小波变换和 SUSAN 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>[5-6]</sup>。其中,中值滤波是经典的基于局部统计特性的非线性滤波方法,算法简单<sup>[7]</sup>,常用于滤除椒盐噪声。Lee 滤波是 20 世纪 90 年代最具代表性的基于局部统计特性的散斑噪声滤除方法,方差参数的选择对算法效果影响较大,一般需针对特定成像系统通过大量实验来获得。小波变换是基于阈值的低通滤波去噪,对大尺寸图像更具有应用优势。

近年来,研究人员提出了多种基于非局部滤波的去噪算法。与传统的基于局部统计特性算法相比,这些算法可以获得较好的图像复原质量,并已在视频、红外热成像、激光雷达等领域推广应用。2011 年, P. Chatterjee 和 P. Milanfar 提出的基于块的局部最优维纳滤波<sup>[8-10]</sup> (Patch-based Locally Optimal Wiener filter, PLOW) 算法,该算法在复原图像时综合考虑了整帧图像自身的几何结构相似性和亮度相似性,较好地利用了图像块间的冗余信息。算法通过参考块与其它图像块之间的某种度量来比较块之间的相似性,在滤波前根据图像块的几何结构特征并利用 K-均值聚类算法将图像中所有像素点分为  $k$  个组,依次对每组中的像素进行滤波,和参考块相似的图像块的所有像素对滤波都有贡献,每次得到一个图像块的估计值。此种方法虽然复原质量较好,但较

上面提及的算法复杂;仅在处理尺寸较小的图像上具有较高的性价比。

太赫兹数字全息是新兴的研究方向,对其再现像背景噪声的抑制和图像增强的研究尚处于初始阶段。由于太赫兹 Gabor 同轴数字全息成像体制的限制,其图像尺寸较小,一般为  $124 \times 124$ 。这使得再现像噪声分布并不完全符合散斑噪声指数分布,而且对比度亟待提高。

迄今,本课题组已开展基于非局部均值滤波方法的太赫兹图像去噪研究<sup>[11]</sup>。本文提出了结合分段对比度拉伸变换 (Piecewise-contrast-stretching Transform, PCST) 和 PLOW 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,并对真实再现像进行了数字处理和分析。

## 2 算法原理

### 2.1 对比度拉伸变换

对比度拉伸<sup>[12]</sup>是图像增强的常用方法之一,本文所用的归一化的对比度拉伸变换可表示为:

$$f'(m, n) = \frac{f(m, n) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}, \quad (1)$$

式中:  $f(m, n)$  表示待处理的  $m \times n$  图像,  $f'(m, n)$  表示对比度拉伸到  $[0, 1]$  区间后的图像,  $f_{\min}$  和  $f_{\max}$  分别为  $f(m, n)$  的最小灰度值和最大灰度值。

当  $f_{\min} = 0$  时,

$$f'(m, n) = \frac{f(m, n)}{f_{\max}}. \quad (2)$$

由于本文所研究的“HIT”字母原全息再现像的最小值约为 0.2, 最大值约为 3 500, 因此,在对原再现像进行归一化对比度拉伸变换时,用式(2)代替式(1)进行计算。此时,该变换仅起到归一化作用,对比度没有变化,即所显示的图像效果与原再现像相同。

若用 256 灰度级表示图像  $f'(m, n)$ , 则有:

$$f_{256} = [f'(m, n) \times 255], \quad (3)$$

式中:  $[\cdot]$  表示取整数;  $f_{256}$  为  $f(m, n)$  经对比度拉伸到  $[0, 255]$  区间后的图像,即灰度级为 256 的图像。

分段对比度拉伸变换方法是一种突出感兴趣目标,并抑制不感兴趣的灰度区域的有效方法<sup>[10]</sup>。根据所研究图像的性质不同,具体的分段对比度拉伸变换函数也不同。

本文采用的分段对比度拉伸变换函数为:

$$g(m, n) = \begin{cases} 0 & 0 \leq f(m, n) \leq a \\ \frac{f'(m, n) - a}{b - a} & a < f(m, n) < b, \\ 1 & b \leq f(m, n) \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $g(m, n)$ 表示处理后的图像在 $(m, n)$ 处的灰度值,其灰度值为 $[0, 1]$ ;常数 $a$ 和 $b$ 表示分段的节点灰度值,本文 $a=10/255$ 。当 $a=0$ 且 $b=1$ 时, $g(m, n) = f'(m, n)$ ,即处理后的图像为待处理图像对比度拉伸到 $[0, 1]$ 后的结果。

## 2.2 基于块的局部最优维纳滤波算法<sup>[8-10, 13]</sup>

给定一幅离散的含噪声图像 $\mathbf{g} = \{g(i) | i \in \mathbf{I}\}$ , $\mathbf{I}$ 表示整帧图像。设 $\mathbf{f}$ 为不含噪声的原始图像,则基于图像块的空域维纳滤波估计为:

$$\hat{\mathbf{g}}_i = \bar{\mathbf{f}} + (\mathbf{C}_f^{-1} + \sum_{j=1}^M \omega_{ij} \mathbf{I})^{-1} \sum_{j=1}^M \omega_{ij} (\mathbf{g}_j - \bar{\mathbf{f}}), \quad (5)$$

式中: $\bar{\mathbf{f}}$ , $\mathbf{C}_f^{-1}$ 分别为图像 $\mathbf{f}$ 的均值、协方差; $\sigma$ 为噪声的标准差; $\omega_{ij}$ 为权重值,依赖于图像块 $\mathbf{g}_i$ 和 $\mathbf{g}_j$ 之间的相似程度。

根据梯度图像 $\nabla \mathbf{g}$ 估计噪声的标准差 $\sigma$ 为:

$$\sigma = \frac{1}{0.674 \cdot 5} \text{median}(|\nabla \mathbf{g} - \text{median}(\nabla \mathbf{g})|), \quad (6)$$

$$\nabla \mathbf{g} = \frac{1}{\sqrt{6}} \text{vec} \left\{ \mathbf{g} * \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \right\}, \quad (7)$$

式中: $\text{median}$ 表示取中间值, $\text{vec}(\cdot)$ 表示向量化操作,\*表示卷积。

由于通常无法获得原始图像,因此从含噪声图像中估计图像的均值和协方差来替代 $\bar{\mathbf{f}}$ 和 $\mathbf{C}_f^{-1}$ 。设定图像块的大小为 $n=11 \text{ pixel} \times 11 \text{ pixel}$ ,对每一图像块 $\mathbf{g}_i$ ,计算其局部适应回归核(Locally Adaptive Regression Kernel, LARK)作为图像块集合的几何结构特征,并根据该特征使用K-均值聚类算法将图像块划分为15个集合 $\Omega_k, k=1, 2, \dots, 15$ 。每一集合的均值 $\bar{\mathbf{g}}_k$ 为:

$$\bar{\mathbf{g}}_k = E[\mathbf{g}_i \in \Omega_k] \approx \frac{1}{M_k} \sum_{\mathbf{g}_i \in \Omega_k} \mathbf{g}_i, \quad (8)$$

式中: $M_k$ 为第 $k$ 个集合的元素数。

每一集合 $\Omega_k$ 无噪声时的协方差 $\hat{\mathbf{C}}_k$ 的估计为:

$$\hat{\mathbf{C}}_k = [\mathbf{C}_k - \hat{\sigma}^2 \mathbf{I}]_+, \quad (9)$$

式中: $[\cdot]_+$ 为矩阵 $\mathbf{X}$ 中的负本征值被替换为0或极小的正值; $\mathbf{C}_k$ 为图像块集合 $\Omega_k$ 含噪声时的协方差; $\hat{\sigma}^2$ 为噪声的协方差。

采用 $\bar{\mathbf{g}}_k$ 和 $\hat{\mathbf{C}}_k$ 替代式(5)中的 $\bar{\mathbf{f}}$ 和 $\mathbf{C}_f^{-1}$ ,有:

$$\hat{\mathbf{g}}_i = \bar{\mathbf{g}}_k + (\hat{\mathbf{C}}_k^{-1} + \sum_{j=1}^M \omega_{ij} \mathbf{I})^{-1} \sum_{j=1}^M \omega_{ij} (\mathbf{g}_j - \bar{\mathbf{g}}_k), \quad \mathbf{g}_i \in \Omega_k. \quad (10)$$

为减少计算量,取大小为 $30 \text{ pixel} \times 30 \text{ pixel}$ 的搜索窗口 $\mathbf{I}_s$ 代替整帧图像。对图像块集合 $\Omega_k$ 中的每一图像块 $\mathbf{g}_i$ ,在以 $\mathbf{g}_i$ 为中心的搜索窗口 $\mathbf{I}_s$ 内查找满足以下条件的 $\mathbf{g}_j$ 为其相似块:

$$\{\mathbf{g}_j | \|\mathbf{g}_i - \mathbf{g}_j\|^2 \leq \gamma^2 + 2\hat{\sigma}^2 n, j \in \mathbf{I}_s\}, \quad (11)$$

式中: $\gamma^2$ 为阈值, $\gamma^2 = (\frac{255p}{100})^2 n$ , $n$ 为图像块中的

像素数,像素灰度取值为 $[0, 255]$ , $p$ 表示相似块在像素灰度范围被容许变化的百分数。由文献[8]可知,当 $p=5$ 时,即每个像素灰度变化小于5%时,处理效果最好,因此,本文取 $p=5$ 。

图像相似块 $\mathbf{g}_i$ 和 $\mathbf{g}_j$ 间的权重 $\omega_{ij}$ 为:

$$\omega_{ij} \approx \frac{1}{\sigma^2} \exp \left\{ -\frac{\|\mathbf{g}_i - \mathbf{g}_j\|^2}{h'^2} \right\}, \quad (12)$$

式中:滤波参数 $h' = 1.75 \sigma^2 n$ 。

因此,第 $i$ 个图像块 $\mathbf{g}_i$ 的估计值为:

$$\hat{\mathbf{g}}_i = \frac{\sum_{j=1}^M \omega_{ij} \mathbf{g}_j}{\sum_{j=1}^M \omega_{ij}} + \frac{\sum_{j=1}^M \omega_{ij} \bar{\mathbf{g}}_k}{\sum_{j=1}^M \omega_{ij}} \cdot \left( \sum_{j=1}^M \omega_{ij} \hat{\mathbf{C}}_k + \mathbf{I} \right)^{-1} (\bar{\mathbf{g}}_k - \mathbf{g}_i). \quad (13)$$

计算该估计误差的协方差为:

$$\mathbf{C}_e \approx (\mathbf{C}_g^{-1} + \sum_{j=1}^M \omega_{ij} \mathbf{I})^{-1}. \quad (14)$$

对各集合中的图像块逐一滤波后,由于图像中的一个像素点 $i$ 可能有多个估计值(即多个图像块包含像素点 $i$ ),用 $\hat{\mathbf{g}}_r(l)$ 表示包含像素点 $i$ 的第 $r$ 个图像块,且该图像块的第 $l$ 个估计值为点 $i$ 的估计值。 $v_{rl}$ 表示第 $r$ 个图像块的估计误差的协方差 $\mathbf{C}_e$ 中第 $l$ 个对角元素,则像素点 $i$ 的最终估计值为:

$$\hat{\mathbf{g}}(i) = \frac{\sum_{r=1}^M v_{rl}^{-1} \hat{\mathbf{g}}_r(l)}{\sum_r v_{rl}^{-1}}, \quad (15)$$

式中: $M$ 为所有包括像素点 $i$ 的图像块的总数。

## 2.3 PCST-PLOW 滤波的算法流程

本文所采用的PCST-PLOW滤波算法流程如图1所示。原再现像经公式(2)归一化后再经式(4)分段对比度拉伸变换提高对比度,然后由

PLOW 滤波去除噪声,最后再经式(1)归一化的对比度拉伸变换提高去噪图像的对比度,最终得到增强后的图像。

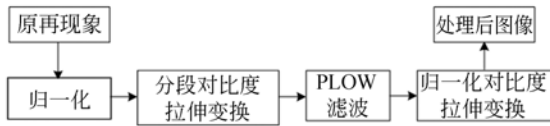


图 1 算法实现框图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

### 3 实验结果及分析

像元数为  $124 \times 124$  原再现图像为同轴 2.52 THz 数字全息在约距探测面 24 mm 的角谱法再现结果。图像灰度级为 256, 图像中横坐标纵坐标分别表示图像的列数和行数, 按图像处理的一般规定, 坐标起点为图像的左上角。PLOW 滤波中的相似块大小为  $11 \text{ pixel} \times 11 \text{ pixel}$ , 搜索窗口大小为  $30 \text{ pixel} \times 30 \text{ pixel}$ , 输入参数的噪声标准差取整幅待滤波图像的标准差。

图 2 给出实验得到的 40 帧平均的全息图。图 3 给出归一化原始再现像和经 PLOW 滤波再归一化对比度拉伸后的结果及经归一化对比度拉伸的局部放大图像。

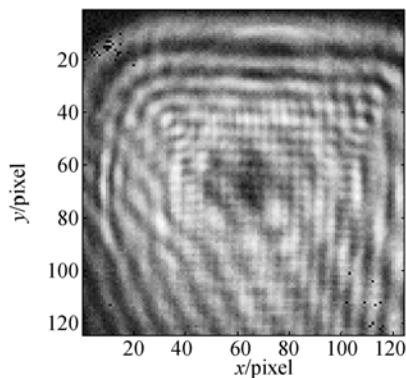
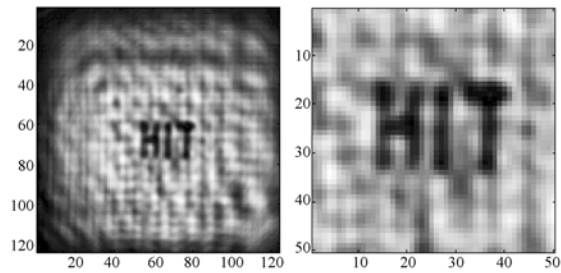


图 2 全息图

Fig. 2 Hologram

图 3(a) 为利用式(2)得到的归一化再现像, 显然再现像的整体图像偏暗, 有格状纹理, 背景严重不光滑。图 3(b) 为图 3(a) 中含英文字母“HIT”的 44 行至 93 行, 41 列至 90 列的截图,

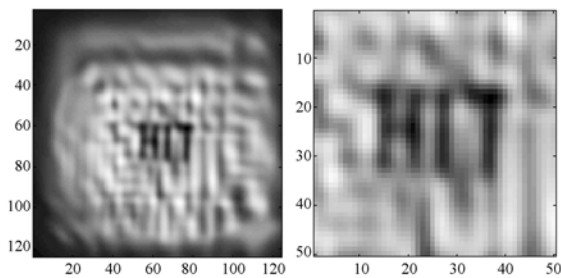


(a) 归一化原始再现像

(b) (a) 的截图

(a) Normalized raw reconstructed-image

(b) Cropped from (a) after piecewise-contrast-stretching



(c) PLOW 滤波

(d) (c) 的截图

(c) PLOW filtering

(d) Cropped from (c) after piecewise-contrast-stretching

图 3 归一化原始再现像和去噪结果及局部放大图像  
Fig. 3 Normalized raw reconstructed-image, de-noised results and enlarged images

“HIT”截图的大小皆为  $50 \times 50$ , 且截取位置相同。图 3(b) 为经式(1)归一化对比度拉伸处理的结果, 可以看出“HIT”在图 3(b) 中较图 3(a) 中有所突出。这是由于经过截图, 去掉图像边界附近的暗背景, 大大提升了图像对比度。图 3(c) 为图 3(a) 经 PLOW 滤波再利用式(1)归一化对比度拉伸后的结果。显然, 图 3(c) 比图 3(a) 光滑, 噪声得到了一定的抑制, 这一点也体现在图 3(d) 和图 3(b) 的比较中。图 3(d) 是图 3(c) 的截图, 也利用式(1)进行了归一化对比度拉伸。下文中展示的其他截图均利用式(1)进行了归一化对比度拉伸。

为了定量地评价图像质量, 本文计算了图像整体均值、标准差及均值与标准差的比值; 另外, 还计算了相同背景处的均值、标准差及均值与标准差的比值, 此部分背景从 20 行到 110 行, 20 列至 50 列, 即字母“H”左侧较亮区域。表 1 给出图 3 中上述参数的计算结果。从表 1 不难看出, 经 PLOW 滤波及对比度拉伸变换后, 图像均值、标

准差和均值与标准差的比值均有所提高,表明图像较亮,对比度有所提高;由背景标准差提高较小而均值提高约 0.6 可以看出,背景去噪有效果。

表 1 图 3 计算参数比较

Tab. 1 Comparison of calculated parameters of Fig. 3

	均值	标准差	均值/标准差
图 3(a)	0.318 1	0.184 9	1.720 8
图 3(a)部分背景	0.426 5	0.154 1	2.767 1
图 3(c)	0.369 5	0.196 4	1.881 0
图 3(c)部分背景	0.491 9	0.154 2	3.190 2

图像的直方图是图像分析的一种有效手段,它能够反映图像像素数随灰度值的分布情况。为此,本文利用式(3)将图 3(a)量化到 256 灰度级,求其直方图,如图 4 所示。由直方图可以看出,原再现像经式(2)和式(3)变换后,灰度值集中在 10 到 120 之间。为此,在选择分段节点  $a$  和  $b$  时,取  $a=10/255, b=120/255$ ;同时还取  $b=130/255$  和  $b$  为图像均值(约为  $81/255$ )进行了对比。

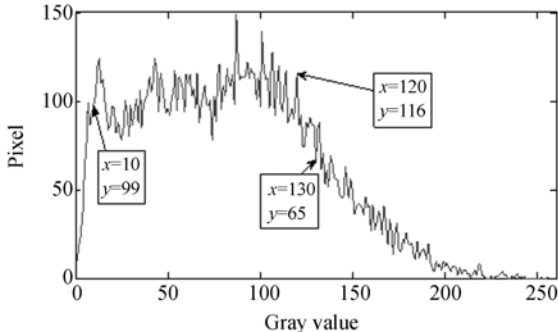
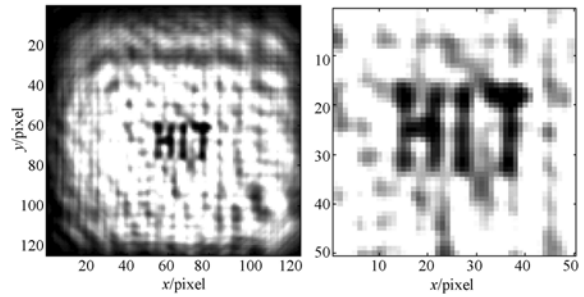


图 4 图 3(a)的直方图

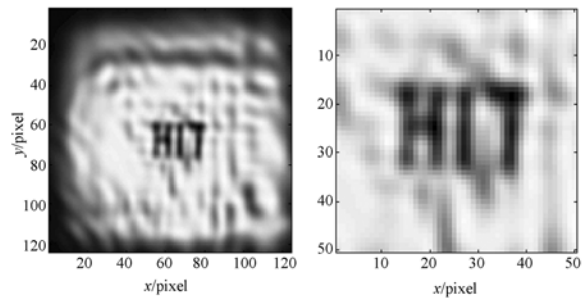
Fig. 4 Histogram of Fig. 3(a)

图 5 为在分段节点  $a=10/255, b=120/255$  时的图像处理结果。图 5(a)为图 3(a)经分段对比度拉伸变换后的结果,图 5(b)是图 5(a)的局部截图;显然经分段对比度拉伸后图像的对比度增强。图 5(c)是图 5(a)经 PLOW 滤波再利用式(1)归一化对比度拉伸后的结果,图 5(d)是图 5(c)的局部截图。经过这些处理后,图 5 对比度有明显提高且图像网格状噪声也进一步降低。

表 2 给出图 5 中图的像整体均值、标准差及均值与标准差的比值和相同背景处的均值、标准差及均值与标准差的比值。



(a) 图 3(a)分段对比度拉伸 (b) (a)的截图  
(a) Piecewise-contrast-stretching (b) Cropped from (a) for Fig. 3(a)



(c) PLOW 滤波 (d) (c)的截图  
(c) PLOW filtering (d) Cropped from (c)

图 5  $b=120/255$  时的图像处理结果及局部放大图像  
Fig. 5 Image-processing results and enlarged images with  $b=120/255$

表 2 图 5 计算参数比较

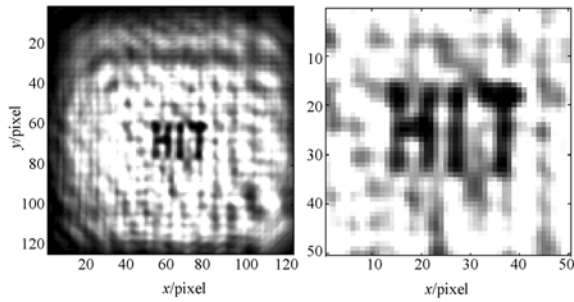
Tab. 2 Comparison of calculated parameters of Fig. 5

	均值	标准差	均值/标准差
图 5(a)	0.592 9	0.340 7	1.740 6
图 5(a)部分背景	0.795 6	0.222 5	3.576 7
图 5(c)	0.569 7	0.294 4	1.935 3
图 5(c)部分背景	0.756 9	0.175 5	4.313 7

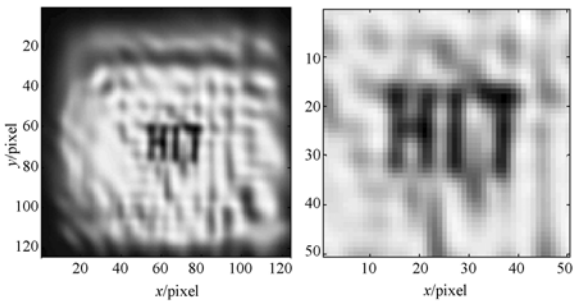
对比表 2 和表 1 不难看出,图 5 较图 3 所对应的图像均值、标准差和均值与标准差的比值均有所提高,表明图像较亮,对比度有所提高,去噪效果更好。图 5(a)和图 5(b)背景的标准差明显下降的结果表明,背景去噪效果优于图 3。

图 6 为在分段节点  $a=10/255, b=130/255$  时的图像处理结果。表 3 给出图 6 中图像的整体均值、标准差及均值与标准差的比值和相同背景处的均值、标准差及均值与标准差的比值。比较图 6 和图 5 及表 3 和表 2 可以看出,图 6 的去噪

效果和对比度均不及图 5。这是由于  $b$  的取值偏高,对比度提升少,同时消除的噪声也少。



(a) 图 3(a)分段对比度拉伸 (b) (a)的截图  
(a) Piecewise-contrast-stretching (b) Cropped from (a)  
for Fig. 3(a)



(c) PLOW 滤波 (d) (c)的截图  
(c) PLOW filtering (d) Cropped from (c)

图 6  $b=130/255$  时的图像处理结果及局部放大图像  
Fig. 6 Image-processing results and enlarged images with  $b=130/255$

表 3 图 6 计算参数比较

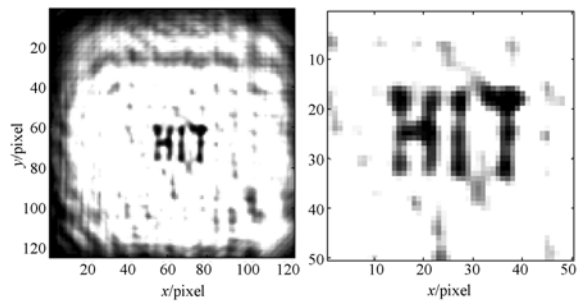
Tab. 3 Comparison of calculated parameters of Fig. 6

	均值	标准差	均值/标准差
图 6(a)	0.558 9	0.331 6	1.685 4
图 6(a)部分背景	0.755 4	0.229 6	3.289 3
图 6(c)	0.531 4	0.281 1	1.890 8
图 6(c)部分背景	0.709 7	0.178 3	3.979 8

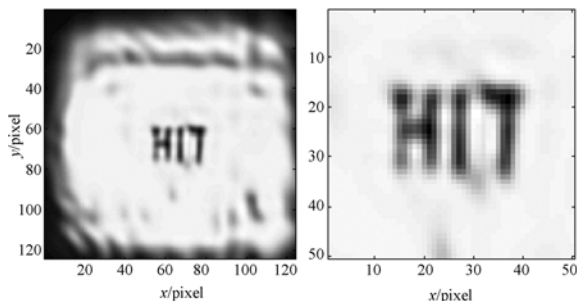
图 7 为在分段节点  $a=10/255$ ,  $b$  为图像整体均值时的图像处理结果。表 4 给出了图 7 中图像的整体均值、标准差及均值与标准差的比值和相同背景处的均值、标准差及均值与标准差的比值。比较图 7 和图 5 及表 4 和表 2 可以看出,图 7 的去噪效果和对比度均明显优于图 5。所计算背景的标准差由 0.175 5 下降到 0.114 6,均值与标准差的比值由 1.935 3 提升到 2.268 8;图像整体标准差由 0.294 4 微升到 0.307 4,均值与标准差的

比值由 4.313 7 提升到 7.737 1。这是由于  $b$  的取值小于图 5(a)中的数值,对比度提升大,同时消除的噪声也多。由于图像均值非常容易获得,因此利用均值确定  $b$  十分方便。

同时,对比图 7 与图 3 和表 4 与表 1 可以看出,所计算背景的标准差由 0.154 1 下降到 0.114 6,均值与标准差的比值由 2.767 1 提升到 7.737 1;图像的整体标准差由 0.184 9 升到 0.307 4,均值与标准差的比值由 1.720 8 提升到 2.268 8。由此说明,经本算法处理后的再现像较原再现像去噪效果明显,同时对对比度提高很大。



(a) 图 3(a)分段对比度拉伸 (b) (a)的截图  
(a) Piecewise-contrast-stretching (b) Cropped from (a)  
for fig. 3(a)



(c) PLOW 滤波 (d) c)的截图  
(c) PLOW filtering (d) Cropped from (c)

图 7  $b$  为图像均值时的图像处理结果及局部放大图像  
Fig. 7 Image-processing results and enlarged images with  $b=\text{mean value}$

表 4 图 7 计算参数比较

Tab. 4 Comparison of calculated parameters of Fig. 7

	均值	标准差	均值/标准差
图 7(a)	0.725 8	0.347 4	2.089 0
图 7(a)部分背景	0.929 2	0.150 0	6.194 6
图 7(c)	0.697 5	0.307 4	2.268 8
图 7(c)部分背景	0.886 6	0.114 6	7.737 1

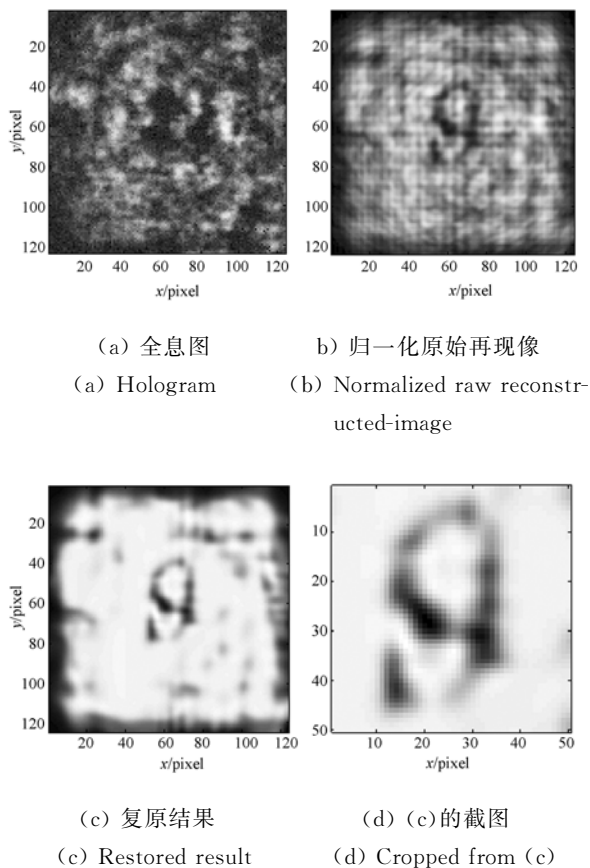


图 8 “g”的复原结果

Fig. 8 Restored results of “g”

## 参考文献:

- [1] 杨勇, 薛东旭, 盖琦, 等. 同态滤波法抑制离轴数字全息零级项[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1877-1882.  
YANG Y, XUE D X, GE Q, *et al.*. Suppression of zero-order image in off-axis digital holography based on homomorphic filtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1877-1882. (in Chinese)
- [2] 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.  
LI Q, DING SH H, LI Y D, *et al.*. Advances in Research of THz digital holography imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 050006. (in Chinese)
- [3] XUE K, LI Q, LI Y D, *et al.*. Continuous-wave terahertz in-line digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(15): 3228-3230.
- [4] 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.  
LI Q, DING SH H, LI Y D, *et al.*. Comparison between 2.52 THz off-axis digital holography and focal-plane imaging [J]. *Chinese J. Laser*, 2012, 39(9): 0909003. (in Chinese)
- [5] 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.  
JIA Q, LI ZH Q. Speckle denoising new method for reconstructed image of digital holography [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(9): 205-207. (in Chinese)
- [6] 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.  
ZHOU C L, KANG Y L, ZHANG ZH F. Application of wavelet transform in digital holography [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(7): 42-45. (in Chinese)
- [7] 杨文波, 马天玮, 刘剑. 非局部差分修复法去除高密度椒盐噪声[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 876-884.  
YANG W B, MA T W, LIU J. Elimination of impulse noise by non-local variation inpainting method

为了进一步验证该算法的适用性, 本文对手写铅笔字“g”的全息图再现像进行了去噪处理。图 8 为其全息图、归一化原始再现像及复原结果。全息图为 80 帧平均结果, 再现距离为 27 mm。由于 A4 纸上手写铅笔字的透射能量强度和均匀性均不及聚四氟乙烯上覆铜的“HIT”, 另外, 前者的背景和目标的对比度也不及后者, 因此, 图 8(a)显示的全息图偏暗, 原始再现像质量也明显不如“HIT”。图 8(c)是应用本文算法且算法参数选择原则与图 7 相同时的复原结果, 图 8(d)是图 8(c)中含手写字母“g”的 34 行至 83 行, 41 列至 90 列的截图。经过本文提出的复原方法处理后, 手写字母较清晰, 图像对比度提高了很多。

## 4 结 论

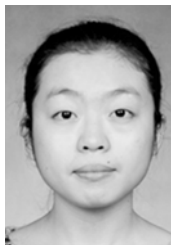
本文采用结合分段对比度拉伸变换和基于块的局部最优维纳滤波(PCST-PLOW)算法进行了二维 Gabor 同轴 2.52 THz 数字全息再现像的图像增强。图像处理结果表明, 所提方法可以用于 Gabor 同轴太赫兹再现像的复原; 去噪效果明显, 对比度提高很大; 分段对比度拉伸变换节点的起点和终点可以分别根据直方图和图像均值确定。

- [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 876-884. (in Chinese)
- [8] CHATTERJEE P, MILANFAR P. Patch-based locally optimal denoising [C]. *Proc. of IEEE Intl. Conf. on Image Processing*, 2011: 2553-2556.
- [9] CHATTERJEE P, MILANFAR P. Path-based near-optimal on image denoising [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2012, 21(4):1635-1649.
- [10] CHATTERJEE P, MILANFAR P. Is denoising dead? [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(4):895-911.
- [11] 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.
- LI Q, XIA ZH W, DING SH H, *et al.*. Image denoising of CW THz images by use of non-local mean [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 517-524. (in Chinese)
- [12] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital Image Processing* [M]. Third Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010:137-141.
- [13] 夏志伟. 基于非局部滤波算法的相干激光雷达图像复原研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
- XIA ZH W. *Coherent Ladar Image Restoration by Non-local Filtering Algorithms* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)

#### 作者简介:



李琦(1963—),女,黑龙江牡丹江人,教授,1999年于哈尔滨工业大学获得博士学位,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



胡佳琦(1990—),女,辽宁铁岭人,硕士研究生,2013年于长春理工大学获得学士学位,主要从事太赫兹成像技术的研究。Email: hujiaqi66@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)