

2.5 THz 面阵实时成像及图像处理初步研究

李琦 姚睿 单纪鑫 王骥

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要 实时成像是太赫兹成像技术的发展方向之一。利用美国相干公司生产的 CO₂ 抽运的 THz 激光器, 采用 124 × 124 像元的面阵探测器对人民币水印进行了成像实验研究; 实验中所用激光频率为 2.5 THz。同时, 采用多幅图像平均等方法提高图像信噪比, 最后采用阈值分割方法实现水印提取。利用此成像装置已获得较清晰的人民币水印实时图像, 通过所用的图像处理方法以使水印更清晰可辨。实验结果表明, 此种成像方式在图像分辨率和成像帧频方面具有很大的优势。

关键词 气体激光器; THz 成像; 阵列探测; 图像处理

中图分类号 TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0084

Preliminary Study on 2.5 THz Array Real-Time Imaging and Image Processing

Li Qi Yao Rui Shan Jixin Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Optic-Electronic, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstract Real-time imaging is one important development direction of THz imaging technology. In this paper, utilizing CO₂-pumped THz laser made by Coherent Inc. and 124 × 124 array detector, imaging experiments on RMB watermark are made and the experimental results are studied. In the experiments the frequency of the laser is 2.5 THz. The method of image averaging could realize the improvement of the image signal-to-noise ratio and the extraction of the watermark image is achieved by the method of the threshold segmentation. The real-time clear images of RMB watermark have been obtained from this imaging device and the image processing methods used could make the watermark clear. The experimental results show that this imaging mode has enormous advantage of improving image resolution and imaging frame.

Key words gas laser; THz imaging; array detection; image processing

1 引 言

太赫兹辐射是频率在 0.1~10 THz 区间内的远红外电磁辐射。由于它易于穿过大多数非金属、非极性物质成像, 例如背包、衣服、塑料和纸制包装品等, 可用于安检。而且, 太赫兹辐射的光子能量低, 频率为 1 THz 的电磁波的光子能量只有约 4 meV, 远远小于 X 射线的能量, 因此不会对生物组织产生有害的电离, 适于生物组织活体检查。另外, 太赫兹辐射具有惧水性, 水分子对太赫兹波段有十分强烈的吸收。因此, 太赫兹辐射成像在危险品检测、医疗和食品检验等领域有广泛的应用前景^[1~3], 太赫兹成像已成为研究热点之一, 相关文章很多, 倍受瞩目^[4]。

THz 成像技术的关键在于 THz 源、探测器和

信号及图像处理。由于 CO₂ 激光抽运 THz 激光源结构紧凑, 输出较稳定, 功率较高, 而且易于操作, 因此, 它被认为是一种较易推广应用的 THz 辐射源。国内外研究 CO₂ 激光抽运 THz 激光源的单位很多, 但做为商品出售的主要有美国相干公司的 SIFIR-50 激光器。

在已研究的基于 CO₂ 激光抽运 THz 成像系统中, 为提高成像速度, 美国麻省理工学院于 2005 年利用响应光谱范围为 7.5~14 μm 的 160 pixel × 120 pixel 的微辐射热计焦平面阵列进行了实时连续波 THz 成像^[5], 国内的深圳大学于 2007 年也开展了 THz 面阵探测成像的研究^[6]。由于目前所用面阵探测器峰值响应波长不在 THz 波段, 对 THz 波段的响应率还不够高, 另外 THz 激光束光斑质量

还有待提高,因此成像质量受到较大影响。

图像处理是 THz 成像系统的重要组成部分,能起到事半功倍的作用。在激光输出功率及光斑质量、探测器探测率一定的情况下,适当的图像处理方法会较大幅度提高成像质量和帧频,也可以实现目标自动识别,同时又不会给系统带来体积和重量及功耗方面的负担。图像处理具有重要的应用价值,但目前对于这方面的研究还处于初级阶段。在 THz 面阵成像的图像处理方面,迄今为止主要采取多幅图像叠加、直方图修正、对比度拉伸、直方图均衡化、中值滤波等方法达到图像增强目的^[6-9]。在其他体制的太赫兹图像处理方面已有维纳滤波、Jansson-van-Cittert 算法、高斯滤波、同态滤波、傅里叶逆变换、小波变换等方法进行图像增强、复原和分割研究^[11-15]。THz 连续波面阵成像方面,尚未见图像分割研究报告。

本文利用美国生产的热像仪(Pyrocam III)和 THz 激光器(SIFIR-50)构建的紧凑的 THz 面阵成像系统,进行了隐藏物(挡纸的人民币水印)的 2.5 THz 激光成像机理实验,并组合多种传统的图像处理方法进行了初步的图像增强和图像分割。

2 THz 面阵成像原理及图像处理方法

Pyrocam III 热像仪光谱响应范围 1.06 μm ~ 1 mm 以上,连续波探测灵敏度 2.2 mW/cm²,面阵大小 12.4 mm × 12.4 mm,像元数 124 pixel × 124 pixel;内部含有斩波器,斩波频率有 24 Hz 和 48 Hz 两种,实验中选择斩波频率为 48 Hz。Pyrocam III 热像仪虽然自带数据采集卡和图像显示软件,为便于按实际 THz 成像需求显示和存储图像,自行开发了基于 C++ 语言的图像控制和显示软件。

THz 面阵成像原理如图 1 所示。SIFIR-50 激光器输出的 THz 激光经镀金反射镜和聚乙烯透镜照射到物体上,透过的光束被 Pyrocam III 焦平面阵列接收,采集卡将焦平面阵列获得的信号传给计算

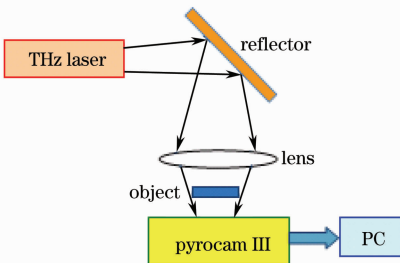


图 1 THz 面阵成像原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of THz array imaging

机,通过自行编制的软件,显示出物体的 THz 透射图像并进行存储。实验中 SIFIR-50 激光器输出波长 118.83 μm,输出功率约 30 mW,光斑成高斯分布,图 2 给出 SIFIR-50 激光器输出 2.5 THz 激光的光斑轮廓。

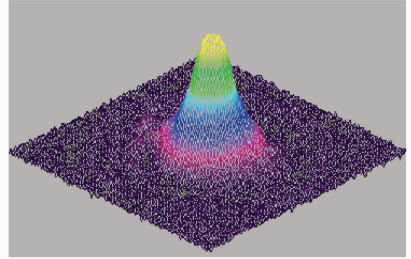


图 2 输出光斑轮廓

Fig. 2 Output beam profile

在图像处理方面,本文首先将直方图均衡化等三种传统的图像增强方法用于 THz 面阵图像增强,然后采用阈值法进行图像分割。

直方图均衡化是一种利用图像直方图进行图像增强的方法,就是要使原来直方图组成成分由不均匀分布变换为均匀分布。即,将输入图像中灰度级为 r_k 的各像素映射到输出图像中灰度级为 s_k 的对应像素,变换函数 s_k 为

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k P(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n}, \quad (1)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$$

式中 n 是图像中像素的总和, n_k 是灰度级为 r_k 的像素个数, L 为图像中灰度级的总数。

直方图均衡化的优点是具有覆盖整个灰度范围的灰度值且运算完全自动化。

中值滤波为非线性滤波,是顺序统计滤波的一种。其优点是既能保持目标边缘细节,又能起到一定的图像平滑作用,是一种常用的图像增强方法。中值滤波的数学表达式为

$$s(x, y) = \underset{(s, t) \in S_{xy}}{\text{med}} [f(s, t)], \quad (2)$$

式中 S_{xy} 表示中心在 (x, y) 点且尺寸为 $m(m)$ 的方形窗口坐标组, $f(s, t)$ 表示输入图像在 (s, t) 点的灰度值, $s(x, y)$ 表示输出图像 (x, y) 点的灰度值。

非线性灰度变换思路是,利用幂次变换 $s_k = cr_k^\gamma$,将输入图像的部分灰度级映射到输出图像新的灰度级范围。也就是减掉输入图像一部分灰度级,以凸现其余灰度级。本文 $\gamma = 2$,因此,映射被加权至更低的输出值。

图像分割采用单阈值法,利用阈值 T 将 256 灰度级图像转换成 2 值图像。其分割后的图像 $g(x, y)$

数学表达式为:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & s(x,y) \geq T \\ 0, & s(x,y) < T \end{cases} \quad (3)$$

整个图像处理过程为:1)直方图均衡化;2)中值滤波;3)非线性灰度变换;4)单阈值分割。

3 实验结果及分析

利用图 1 所示的成像装置,对 5 元人民币水印进行 THz 透射成像。图像一律采用 256 灰度级,中值滤波均采用 9×9 窗口。未有遮挡物的 THz 图像非线性变换范围为 $255 \times (0.3 \text{ 至 } 0.9)$ 的值按 2 次幂指数拓展到 0 至 255,分割阈值 T 为 220;隔一张纸的 THz 图像非线性变换范围为 $255 \times (0.3 \text{ 至 } 0.7)$,

分割阈值 T 为 200。

图 3 给出实际的水印照片、未有遮挡物的单帧 THz 图像及其处理结果,其中图 3(b)为原始图像,此图像已完成对比拉伸变换,很不清晰;图 3(c)为原始图像经直方图均衡化结果,对比度较原始图像好,但仍然不清晰;图 3(d)是图 3(c)经中值滤波的结果,显然图像较平滑些,数字 5 基本可辨;图 3(e)是图 3(d)经非线性变换的结果,数字 5 清晰可辨;图 3(f)是图 3(e)经阈值分割的结果(阈值),数字 5 的水纹印被分割出来。从图 3 的结果可以看出,没有遮挡物的单帧 5 元人民币水印 THz 图像,经本文提出的图像处理过程,由原来很不清晰变为可以清晰辨认,并被分割出来。

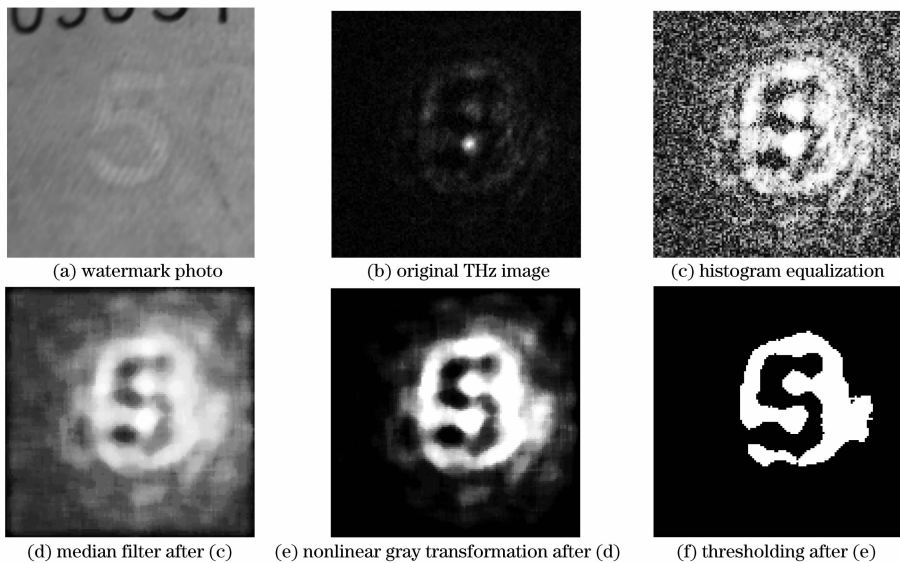


图 3 5 元人民币水印照片、单帧水印 THz 图像及其处理结果

Fig. 3 ¥ 5 watermark photo, a single frame of THz image and processing results

实际应用中,THz 隔障碍物成像更有吸引力。为此进行了 5 元人民币挡一张纸的 THz 成像实验。图 4 给出隔一张纸的单帧水印图像及其按上述图像处理过程得到的处理结果。由图 4 可以看出,原始图像无法辨认,经直方图均衡化、中值滤波和非线性

灰度变换后,隐约可区分目标和背景,但无法确定数字是 8 还是 5;分割后也难以确认。显然经图像处理有一定效果,但未达到清晰可辨的目的。

为了克服图 4 面对的单帧图像难于区分的难题,采用了多帧图像叠加平均的方法,提高信噪比。

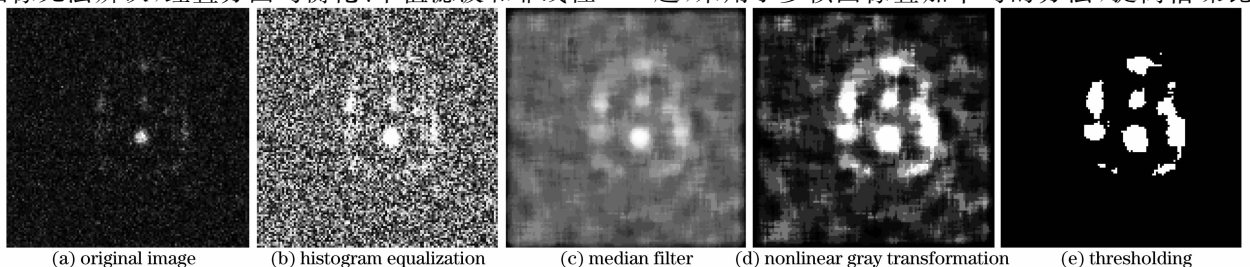


图 4 隔一张纸的单帧水印图像及其处理结果

Fig. 4 A single image of watermark covered by a piece of paper and processing results

图 5 给出隔一张纸的 2 帧图像平均的 THz 图像处理结果。将图 5(a)和图 4(a)对比,显然前者目标轮廓较突出。从图 5 可以看出,经直方图均衡化等图像处理,数字 5 隐约可辨,并被基本分割出来。

图 6 给出隔一张纸的 3 帧图像平均的 THz 图像处理结果。从图 6 可以看出,经直方图均衡化等的图像处理,数字 5 基本清晰,分割效果好于图 5。

图 7 给出隔一张纸的 5 帧图像平均的 THz 图像处理结果。从图 5 可以看出,经直方图均衡化等

的图像处理,数字 5 清晰看见,并被分割出来,效果明显好于图 6。

由于多帧图像叠加平均势必降低成像帧频,因此不宜过多叠加。图 8 给出了隔一张纸的 10 帧图像平均的 THz 图像处理结果。显然,图 8 的分割结果和图 7 的分割结果相差不多,图 8 的结果略好于图 7。这一结果表明,经后期的图像处理,5 帧图像平均即可使原来无法辨认的单帧图像清晰可辨,不必再提高图像叠加数量。

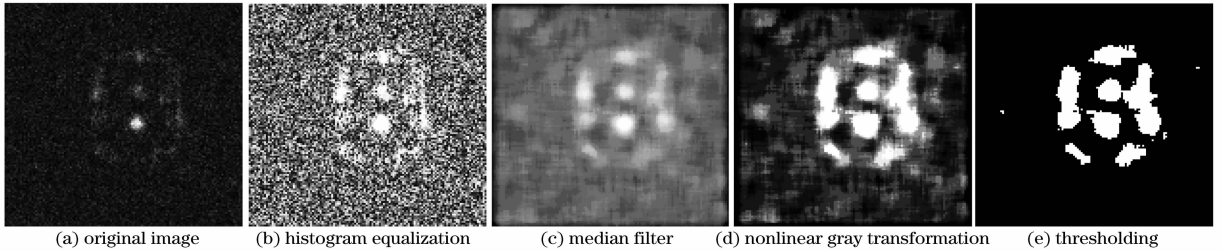


图 5 隔一张纸的 2 帧图像平均的水印图像及其处理结果

Fig. 5 2-frame-averaging image of watermark covered by a piece of paper and processing results

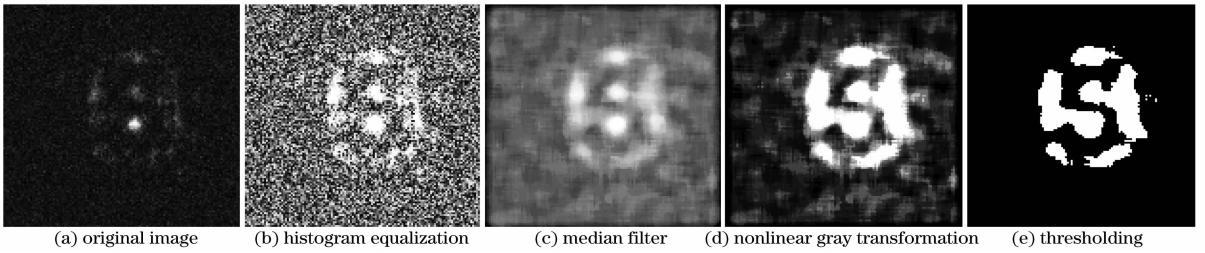


图 6 隔一张纸的 3 帧图像平均的水印图像及其处理结果

Fig. 6 3-frame-averaging image of watermark covered by a piece of paper and processing results

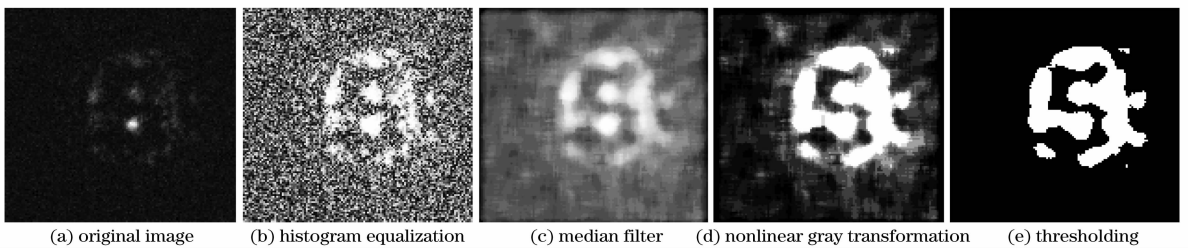


图 7 隔一张纸的 5 帧图像平均的水印图像及其处理结果

Fig. 7 5-frame-averaging image of watermark covered by a piece of paper and processing result

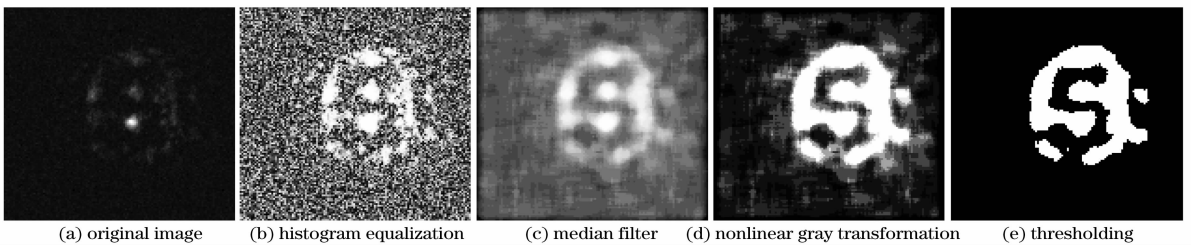


图 8 隔一张纸的 10 帧图像平均的水印图像及其处理结果

Fig. 8 10-frame-averaging image of watermark covered by a piece of paper and processing result

4 结 论

成像帧频及质量是 THz 成像系统的重要技术指标,围绕这两个指标,不仅需在成像系统硬件上采取措施,而且需在图像处理软件上进行改进。对人民币水印的隔纸成像实验结果表明:利用本文搭建的激光连续输出功率 30 mW 左右的 THz 成像系统和后续的图像处理,能够获得与成像目标较相似的图像,并被分割出来。所提出的图像处理过程起到了事半功倍的作用。3 帧图像平均即可达到辨识目的,5 帧图像平均图像更为清晰。在兼顾帧频和图像质量情况下,一般可选择 2~5 帧图像平均。此种成像方式在图像分辨率和成像帧频方面具有很大的优势,但目前面阵探测器探测灵敏度还较低,成像距离较近。今后需在如何提高光学系统效率和利用系统参数实现图像复原等方面进行研究,从而提高成像系统帧频和成像质量。

参 考 文 献

- 1 B. Pradarutti, S. Riehemann, G. Notni *et al.*. Terahertz imaging for styrofoam inspection [C]. *SPIE*, 2007, **6772**: 67720P1~67720P5
- 2 David Zimdars, Jeffrey White, G. Stuk *et al.*. Time domain terahertz detection of concealed threats in Luggage and personnel [C]. *SPIE*, 2006, **6212**: 62120O1~62120O5
- 3 J. F. Federici, Brian Schulkin, Feng Huang *et al.*. THz imaging and sensing for security applications-explosive, weapons, and drugs[J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, **20**(7): S266~S280
- 4 P. C. M. Planken, H. J. Bakker. Towards time-resolved THz imaging[J]. *Appl. Phys. A*, 2004, **78**(4): 465~469
- 5 Alan Wei Min Lee, Qing Hu. Real-time, continuous-wave Terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2563~2565
- 6 Jun Yang, Shuangchen Ruan, Min Zhang. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by a pyroelectric camera[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 29~31
- 7 Chae-Hwa Shon, Won-Yong Chong, Seok-Gy Jeon *et al.*. High speed terahertz pulse imaging in the reflection geometry and image quality enhancement by digital image processing[J]. *Int. J. Infrared Milli Waves*, 2008, **29**(1):79~88
- 8 Eddie L. Jacobs, Steve Moyer, Charmaine C. Franck *et al.*. Concealed weapon identification using terahertz imaging sensors [C]. *SPIE*, 2006, **6212**: 62120J-1~62120J-10
- 9 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin *et al.*. A preliminary study on THz imaging and image enhancement based on thermal imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 275~277
李琦,姚睿,单纪鑫等.基于热像仪的THz成像及图像增强初步研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 275~277
- 10 C. Schildknecht, T. Kleine-Ostmann, P. Knobloch *et al.*. Numerical image enhancement for THz time-domain spectroscopy [C]. *IEEE Tenth International Conference on Terahertz Electronics Proceedings*, 2002. 158~160
- 11 D. Nötel, J. Huck, H. Essen *et al.*. A demonstrator approach for the technology of a passive millimeterwave imaging system and the related image processing[C]. *IRMMW-THz 2005 Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics*, 2005. 319~320
- 12 A. Y. Zragevskiy, V. A. Golunov, D. M. Ermakov *et al.*. Polarization stereoradiovision in the MM wavelength region[C]. *IRMMW-THz 2005 Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics*, 2005. 347~348
- 13 Yu Fei, Hui Mei, Song Qian *et al.*. The application of the wavelet transform to the continuous wave Terahertz imaging[C]. *Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronics Conference*, 2007. 502~504
- 14 Qiguo Yin, Qi Li, Jixin Shan *et al.*. Suppression of laser output fluctuation in THz scanning transmission imaging [C]. *International Congress on Image and Signal Processing*, Sanya Hainan, 2008, **3**: 407~411
- 15 Xiaoxia Yin, B. W.-H Ng. B. Ferguson *et al.*. 2-D wavelet segmentation in 3-D T-ray tomography[J]. *IEEE Sensors J.*, 2007, **7**(3): 342~343