

基于热像仪的太赫兹成像及图像增强初步研究

李琦 姚睿* 单纪鑫 尹奇国 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 初步利用美国生产的 Pyrocam III 热像仪和 SIFIR-50 激光器构建了太赫兹 (THz) 面阵成像系统, 对 20 元人民币水印进行了 2.52 THz 激光成像实验, 探索了面阵成像机制和图像增强方法。针对 5 幅图像叠加后的太赫兹面阵图像, 研究了对比拉伸变换、直方图均衡化和中值滤波等图像增强方法的效果。实验结果表明, 利用此成像系统和后续的图像处理, 能够获得与成像物体较相似的图像; 对于比较暗的图像, 不能单靠对比拉伸变换。采用直方图均衡化方法效果较好, 在直方图均衡化后再运用中值滤波, 图像增强效果会更好。

关键词 图像处理; 气体激光器; 太赫兹成像; 阵列探测; 图像增强

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0275

A Preliminary Study on THz Imaging and Image Enhancement Based on Thermal Imager

Li Qi Yao Rui Shan Jixin Yin Qiguo Wang Qi

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

Abstract THz array imaging system is constructed by utilizing the thermal imager of Pyrocam III made in USA and laser of SIFIR-50. Imaging experiments on 20 ¥ paper money with 2.52 THz laser are done in order to explore array imaging mechanism and method of imaging enhancement. The effects of the methods of contrast stretching transformation, histogram equalization, and median filter are studied according to the THz array image added by 5 images. The experimental results show that employing this imaging system and subsequent image processing, the images obtained are similar with the objects. For the low contrast images, the effects are not obvious only by contrast stretching transformation. Good effects are gained with the method of histogram equalization, and the effects of image enhancement are better when employing mean filtering after histogram equalization.

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

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。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^[1~6]。

太赫兹 (THz) 成像技术的关键在于太赫兹源和探测器的选择。由于 CO₂ 激光抽运太赫兹激光源结构紧凑, 输出较稳定, 功率较高, 而且易于操作, 被认为是一种较易推广应用的太赫兹辐射源。

为提高成像速度, Lee 等^[7] 利用响应光谱范围为 7.5~14 μm 的 160×120 像元的微辐射热计焦平面阵列进行了实时连续波太赫兹成像, Yang 等^[8] 也开展了太赫兹面阵探测成像的研究。由于目前所用面阵探测器峰值响应波长不在太赫兹波段, 对太赫兹波段的响应率还不够高, 另外太赫兹激光束光斑质量还有待提高, 因此成像质量受到较大影响。

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助项目。

作者简介: 李琦(1963—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光主动成像和太赫兹成像技术等方面的研究。

E-mail: hit_liqi@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: hi.rory@yahoo.com.cn

在太赫兹面阵成像的图像增强方面,迄今为止主要采取多幅图像叠加和直方图修正等方法^[9-11]。

本文初步利用美国生产的热像仪(Pyrocam III)和激光器(SIFIR-50)构建了太赫兹面阵成像系统,对人民币水印进行了 2.52 THz 激光成像实验。针对 5 幅图像叠加后的太赫兹面阵图像,研究了对比拉伸变换、直方图均衡化和中值滤波等图像增强方法的效果。

2 太赫兹面阵成像原理及图像增强方法

Pyrocam III 热像仪光谱响应范围为 $1.06 \mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$ 以上,连续波探测灵敏度为 $2.2 \text{ mW}/\text{cm}^2$,面阵大小为 $12.4 \text{ mm} \times 12.4 \text{ mm}$,像元数为 124×124 ;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,为便于按实际太赫兹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。

太赫兹面阵成像原理如图 1 所示。SIFIR-50 激光器输出的太赫兹激光经反射镜照射到物体上,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机,通过自行编制的软件,显示出物体的太赫兹透射图像并进行存储。实验中 SIFIR-50 激光器输出波长为 $118.83 \mu\text{m}$,输出功率约 30 mW。

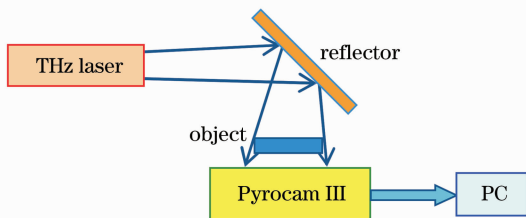


图 1 太赫兹面阵成像原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of THz array imaging

本文将对比拉伸变换等三种传统的图像增强方法用于太赫兹面阵图像并对其效果进行研究。

对比拉伸变换是一种图像灰度的线性变换方法,可增大图像灰度的动态范围。最常用的对比度拉伸变换的数学表达式为

$$s_k = (l - 1) \times \frac{f_k - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}, \quad (1)$$

式中 s_k 为变换函数, l 为变换后的图像灰度级, f_k 为输入图像第 k 个像素的灰度值, f_{\max} 为输入图像最大灰度值, f_{\min} 为输入图像最小灰度值。

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。若一幅图像其像素占有全部可能的灰度级,并且分布均匀,则这样的图像有高的对比度和多变的灰度色调。直方图均衡化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。一幅图像中灰度级 r_k 出现的概率近似为

$$P(r_k) = n_k/n, \quad k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (2)$$

n 为图像中像素的总和, n_k 为灰度级为 r_k 的像素个数, L 为图像中灰度级的总数。则变换函数为

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k P(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n}. \quad (3)$$

根据(3)式,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。

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。由于本文要保持目标边缘,因此采用此方法。中值滤波的数学表达式为

$$s(x, y) = \text{med}_{(s, t) \in S_{xy}} \{f(s, t)\}, \quad (4)$$

式中 S_{xy} 表示中心在 (x, y) 点且尺寸为 $m \times m$ 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。

3 实验结果及分析

本文图像一律采用 256 灰度级。利用图 1 所示的成像装置,对 20 元人民币水印进行太赫兹透射成像。图 2 为实际的水印照片,图 3 显示 5 幅图像叠加后的太赫兹图像,此图像未经对比拉伸变换,图像很暗,很难辨认出数字 20。

图 4 显示图 3 经对比度拉伸变换后的结果,图像效果明显好于图 3,图像更明亮,基本可辨认出数字 20,但未能较准确反映实际 20 元钱水印的轮廓。

图 5 给出图 2 经直方图均衡化后的结果,显然此

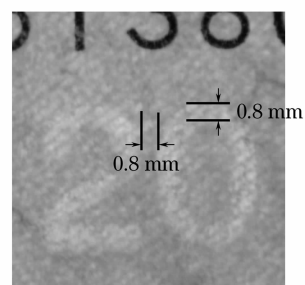


图 2 20 元人民币水印照片

Fig. 2 Picture of 20 ¥ watermark



图3 5幅图像叠加的水印图像

Fig. 3 Image added by 5 images



图4 对比度拉伸后的图像

Fig. 4 Image after contrast stretching



图5 直方图均衡化后的图像

Fig. 5 Image after histogram equalization



图6 中值滤波后的图像

Fig. 6 Image after median filtering

图像更接近20元水印的轮廓。从图3~图5中可明显看出数字20的上面空白处灰度值本应较高,但实际却较低,这主要是由于激光束分布不均匀造成的。

图6显示图5经窗口 9×9 的中值滤波后的结果。从图可以看出,经直方图均衡化和中值滤波后

数字20清晰可辨,且与真实数字轮廓较接近。

4 结 论

太赫兹成像的速度和质量是考核太赫兹成像系统的两个重要技术指标,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。本文利用所搭建的基于Pyrocam III热像仪和SIFIR-50 THz激光器的面阵成像系统,对20元人民币水印进行了成像。实验结果表明,利用此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。对于比较暗的图像,不能单靠对比拉伸变换,直方图均衡化方法较好,在直方图均衡化后加上中值滤波,图像增强效果会更好。直方图均衡化不依赖任何参数,中值滤波采用 9×9 矩形窗口也不涉及其他参数,因此,采用直方图均衡化和中值滤波复合的方法实用性很强。

参 考 文 献

- 1 B. Pradarutti, S. Riehemann, G. Notni *et al.*, Terahertz imaging for styrofoam inspection [C]. *SPIE*, 2007, **6772**: 67720P
- 2 David Zimdars, Jeffrey White, G. Stuk *et al.*, Time domain terahertz detection of concealed threats in luggage and personnel [C]. *SPIE*, 2006, **6212**: 62120O
- 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 Wang Qi, Chi Xin, Li Qi. Imaging theory and development of THz free electron lasers[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(6): 643~646
王 骐,迟 欣,李 琦. 太赫兹自由电子激光器的成像原理及进展[J]. *激光技术*, 2006, **30**(6): 643~646
- 5 Zhang Lei, Xu Xinlong, Li Fuli. Review of the progress of T-ray imaging[J]. *Chin. J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(2): 129~134
张 蕾,徐新龙,李福利. 太赫兹(THz)成像的进展概况[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(2): 129~134
- 6 P. C. M. Planken, H. J. Bakker. Towards time-resolved THz imaging[J]. *Appl. Phys. A*, 2004, **78**(4): 465~469
- 7 Alan Wei 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
- 8 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
- 9 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
- 10 Eddie L. Jacobs, Steve Moyer, Charmaine C. Franck *et al.*, Concealed weapon identification using terahertz imaging sensors [C]. *SPIE*, 2006, **6212**: 62120J
- 11 Zhang Min, Ruan Shuangchen, Yang Jun *et al.*, The software design of THz imaging system[J]. *Microcomputer Information*, 2007, **23**(11-1): 25~27
张 敏,阮双琛,杨 珺等. 太赫兹成像系统控制软件设计[J]. *微计算机信息*, 2007, **23**(11-1): 25~27