

被动式人体太赫兹成像系统的图像重构算法研究

张馨¹ 赵源萌¹ 邓朝^{1,2} 赵亚芹^{1,2} 祝德充¹ 王晓燕¹ 张存林¹

(¹首都师范大学物理系太赫兹光电子学教育部重点实验室,北京市太赫兹波谱与成像重点实验室,北京 100048)

²北京理工大学光电学院,北京 100081

摘要 为提高被动式人体太赫兹成像系统所获取图像的目标分辨力,采用反卷积方法处理图像,提出了一种被动式太赫兹图像重构算法。从系统的基本成像原理出发,分析了导致图像退化的主要原因;在对原始太赫兹图像进行去噪预处理后,采用高斯型点扩展函数进行图像反卷积重构,提高图像的分辨率,用灰度变换方法提高图像的对比度。应用本算法重构原始人体太赫兹图像,获得了清晰度和目标分辨力明显改善的处理效果。实验结果表明,本算法能有效提高被动式人体太赫兹成像系统的图像质量,有利于观察者快速准确地发现被检测者隐藏在衣服内的违禁品,增强了系统的实用性。

关键词 图像处理;被动式太赫兹成像;图像去噪;图像反卷积重构

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.s111009

Study on the Image Reconstruction Algorithm for Passive Human Terahertz Imaging System

Zhang Xin¹ Zhao Yuanmeng¹ Deng Chao^{1,2} Zhao Yaqin^{1,2} Zhu Dechong¹
Wang Xiaoyan¹ Zhang Cunlin¹

¹Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education of China,
Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Department of Physics,
Capital Normal University, Beijing 100048, China

²School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In order to improve the object identification capacity of our passive human terahertz imaging system, a passive terahertz image reconstruction algorithm is put forward using deconvolution method. First the main reasons of image degradation are analyzed according to the basic imaging principle of the system. Then the original terahertz images are de-noised as preprocessing course. Afterwards the images are reconstructed by deconvolution method using Gaussian point spread function, so the image resolution is improved. Their grayscales are corrected. The original human terahertz images are processed and resulting images with higher definition and better object identification capability are obtained. Experimental results show that the proposed algorithm is able to effectively improve the image quality of our passive human terahertz imaging system. It can help the observers detect the contrabands hidden in the clothes of imaging subjects more quickly and accurately, which consequently strengthens the practicability of our imaging system.

Key words image processing; passive terahertz imaging; image denoising; deconvolution-based image reconstruction

OCIS codes 100.2960; 100.1830; 100.3010; 110.6795

1 引言

近年来恐怖威胁愈演愈烈,恐怖事件频繁发生。

世界各国政府越来越关注机场、车站、码头等公共场所的安全检查工作。目前在对物品安检时,识别率

收稿日期:2011-08-10;收到修改稿日期:2011-09-28

基金项目:国家 973 计划(2007CB310408)、国家自然科学基金(11004140)和北京市教育委员会科技面上项目(11224010011)资助课题。

作者简介:张馨(1987-),女,硕士研究生,主要从事太赫兹成像及其图像处理技术等方面的研究。

E-mail: achona@sohu.com

导师简介:张存林(1961-),男,博士,教授,主要从事太赫兹光谱与成像技术和光电信息功能材料等方面的研究。

E-mail: cunlin_zhang@yahoo.com(通信联系人)

较高的大功率 X 射线扫描仪已被广泛应用。但是在人体安检中,由于 X 射线对人体具有伤害性,目前基本是采用穿行式或手持式金属探测器进行检查,如有初步警示则进一步采取人工检查^[1]。这样的安检方式存在金属探测器误报率高、二次检查耗时较长等缺点。由于太赫兹辐射的光子能量低,不会电离生物细胞组织,而且被动式系统没有用任何辐射源,所以对人体非常安全。另外,太赫兹成像的空间分辨率在理论上优于毫米波成像,而且具有比红外成像更好的穿透性,因此应用于安检领域的太赫兹成像技术体现出了显著的发展潜力。

受现有成像系统技术水平所限,目前多数原始太赫兹图像^[2]分辨率和信噪比较低,因此太赫兹图像处理技术受到很多研究者关注。Ferguson 等^[3]2001 年提出了结合小波去噪和 Wiener 反卷积的太赫兹脉冲图像处理算法以实现图像去噪效果。Shon 等^[4]用边缘探测、去噪、高通滤波器以及小波滤波等方法提高太赫兹脉冲图像质量。2009 年李良超等^[5]提出了一种改进的最大后验(MAP)超分辨率算法,用以提高 91.5 GHz 无源图像的分辨率,该算法使用 Wiener 滤波算法复原图像通带内的低频分量,运用 MAP 算法作为主迭代过程实现频谱外推,有效地复原图像截止频谱外的信息,提高图像空间分辨率。2010 年徐英等^[6]提出一种结合小波去噪的多尺度增强算法,来提高太赫兹图像的分辨力,并应用该算法对 338 GHz 的透射太赫兹图像进行增强处理实验,证明该算法在增强图像细节的同时能够抑制噪声的影响。

在安检成像系统方面,英国 ThruVision 公司 2008 年开发了 ThruVision T5000 型安检系统,能够在发现违禁品的同时保护人的隐私。2010 年,美国 Brijot 公司推出基于 GEN 2 技术的两套人员检查系统——SafeScreenTM和 MobileScanTM,可以很容易地检测出隐藏在衣服里的金属或非金属物体。在国内,中国科学院物理研究所、清华大学和中山大学等高校和研究机构积极开展了太赫兹成像的相关研究。南京理工大学设计了一套工作频率为 94 GHz 的被动式成像系统^[7,8],根据黑体辐射原理,通过线扫描的模式对所成像的区域进行扫描成像。

本课题组从 2007 年起开展对太赫兹扫描成像安检系统的研究,至今为止已经成功研制了三套被动式人体太赫兹成像安检仪。其中,工作频率约为 0.1 THz 的五面体棱镜扫描成像系统能够实现 1 frame/s 的快速成像,然而由于太赫兹辐射探测器和扫描系统

的自身水平局限以及外界环境的干扰,现有的被动式人体太赫兹成像安检系统获取的太赫兹图像质量较差,分辨率和信噪比较低,对于人体携带的可疑物体的辨识能力有待提高。因此本文将应用图像去噪、图像反卷积重构等方法处理原始太赫兹图像,以期获得有效提高目标识别能力的处理结果。

2 成像系统结构

被动式人体太赫兹成像利用太赫兹波探测系统,获取目标的辐射分布特性并生成图像。这种图像能够反映出各被测目标之间以及被测目标各部分之间辐射能力差异。一般来说,被动太赫兹成像系统主要包括扫描机构、太赫兹波探测器和信号处理单元。被测人员本身辐射出太赫兹波信号,经扫描装置将太赫兹信号传递至探测部分后转变为直流电信号,然后传递至计算机中进行处理,最后获得被测人员的辐射图像。图 1 为研发的五面体棱镜扫描被动式太赫兹成像系统原理图。被动式太赫兹扫描系统的扫描装置是成像系统的主要部分,其位于系统的最前端,即最接近被测人体的位置。扫描装置对被测目标进行快速二维扫描,以获得被测物的辐射图像信息。扫描装置决定着成像系统的成像范围、成像时间以及可探测的距离,并且和成像系统的空间分辨率有着直接的联系。

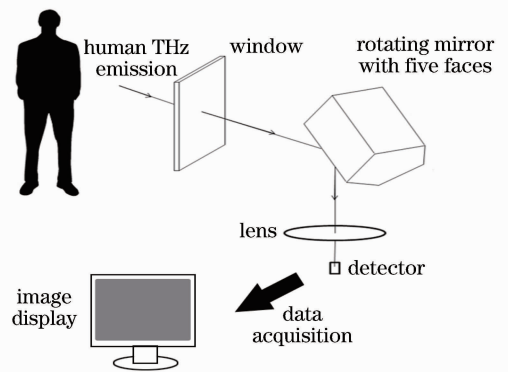


图 1 被动式太赫兹扫描成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram for passive terahertz imaging system

扫描装置采用最简单的结构,仅由两个部件组成:一个是五面体棱镜,一个是太赫兹波透镜。五面体棱镜采用铝合金加工而成,中心采用镂空处理以减小其转动惯量;太赫兹波透镜采用聚四氟乙烯^[9]加工而成。五面体棱镜的中心轴与水平方向平行,绕其中心轴高速旋转,每旋转 1 圈扫描 5 列。五面体棱镜除了在绕其中心轴旋转外,还设计了绕其摆

动轴往复摆动,从而实现对被测目标的二维扫描。由五面体棱镜的二维运动扫描得到的被测目标所辐射的太赫兹波通过透镜的汇聚,最后被探测器所接收。探测器将接收到的辐射信号转换成直流电压信号,电压的大小与探测器接收到的太赫兹波的强弱成正比,然后经过模/数(A/D)转换从而实现数据采集。计算机接收扫描器发出的同步信号和数据采集卡采集来的电压信号,重构出被测目标的太赫兹波二维图像。成像系统样机如图2所示,系统参数见表1。



图2 太赫兹安检仪样机

Fig.2 Terahertz imaging system

表1 太赫兹安检仪系统参数

Table 1 Parameters of terahertz imaging system

Parameter	Value
Working frequency /THz	0.1
Lens diameter /mm	300
Detector	Radiometer
Size of image /pixel	100×50
Spatial resolution /cm	5
Temperature resolution /K	1.7
Field /($^{\circ}$)	20×40
Imaging speed /Hz	1
Size of system /m ³	1.6×0.8×0.7
Weight of system /kg	350

3 成像质量分析

使用被动式人体太赫兹成像安检系统对人体进行成像,结果如图3所示,目标人物距离成像系统2.6 m 双手叉腰站立身着白色棉质外套,腹部藏有16 cm×16 cm 的铝板,在室内对目标人物同时进行可见光成像和被动式太赫兹成像。图3(b)为太赫兹成像系统获取的原始人体太赫兹图像,人体的轮廓和金属物的位置可以清楚辨认。然而图像存在着的分辨率较低、人体轮廓不够清晰、细节缺失、人体与背景的对比度不足等问题;再者人体和金属板的

形状轮廓出现畸变失真;同时图像中存在着明显的纵向条带噪声。总的来说成像系统获取的原始太赫兹图像质量较差,对于可疑物的准确辨识能力较弱,用于安全检查的可行性有待提升。

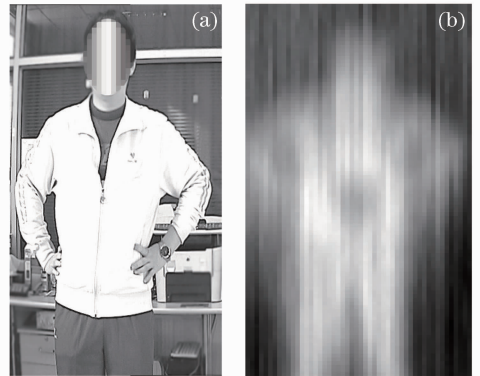


图3 室内太赫兹成像图。(a) 可见光图像;
(b) 太赫兹图像

Fig.3 Terahertz imaging indoor. (a) Visible image;
(b) terahertz image

对于被动式人体太赫兹成像安检系统而言,造成图像退化的原因主要可以归纳为以下4点:1) 成像系统的相对孔径大小限制了图像的分辨率;2) 光机扫描的成像机制导致了图像中出现条带噪声;3) 探测单元对于信号的响应延迟,造成了轮廓的畸变;4) 环境热噪声对系统的成像有干扰。

若要从硬件上改善来提高成像质量,不仅技术难度大而且造价昂贵,因此借由后台的数字图像处理技术来提高图像质量具有更高的可操作性。本文的工作重心就是研究一种适合被动式人体太赫兹成像系统的图像重构算法来提高退化图像的质量。针对此退化图像,提出了结合图像去噪、反卷积重构以及图像增强的处理方法来改善被动太赫兹图像的质量。

4 图像重构算法

4.1 图像去噪

图像的常见噪声主要有加性噪声、乘性噪声和量化噪声等。图像中的噪声往往和信号交织在一起,尤其是乘性噪声,如果平滑不当,就会使图像本身的细节如边界轮廓、线条等变得模糊不清。如何既平滑掉噪声又尽量保持图像细节,是图像去噪的主要研究任务。针对太赫兹图像本文中去噪的目的是为了去除对被动式人体太赫兹图像影响最为严重的纵向条带噪声。

根据图像信号的频率特性可知,一幅图像的边缘、灰度跳跃部分以及颗粒噪声对应着图像信号的

高频分量,而灰度值平滑的区域则对应着图像信号的低频分量。图像中的条带噪声是产生于图像采集过程中的电机干扰,可以归类于周期噪声,对应着图像频谱中的高频部分。通常图像中的周期噪声可通过频域滤波处理来去除。用滤波的方法分离有用信号和干扰信号,即滤除其高频部分就能去掉噪声使图像得到平滑从而达到去噪效果,由卷积定理可知

$$I(u, v) = H(u, v)Q(u, v), \quad (1)$$

式中 $Q(u, v)$ 是含噪声图像的傅里叶变换, $I(u, v)$ 是去噪后图像的傅里叶变换, $H(u, v)$ 是低通滤波器传递函数。利用 $H(u, v)$ 使 $Q(u, v)$ 的高频分量得到衰减,得到 $I(u, v)$ 后再经过反变换就可得到所希

望的去噪图像 $i(x, y)$ 。

通过对比各低通滤波器的滤波效果,选定高斯低通滤波器(GLPF)^[10]对原始太赫兹图像进行滤波去噪。CLPF的傅里叶逆变换也是高斯型,这意味着由CLPF傅里叶反变换得到的空间CLPF将没有振铃。CLPF的传递函数为

$$H(u, v) = \exp[-D^2(u, v)/(2D_0^2)], \quad (2)$$

式中 D_0 是截止频率。当 $D(u, v) = D_0$ 时,滤波器下降到它最大值的 0.607。

选取的 D_0 值为填充后的图像宽度的 17%,低通滤波器的模型如图 4 所示。

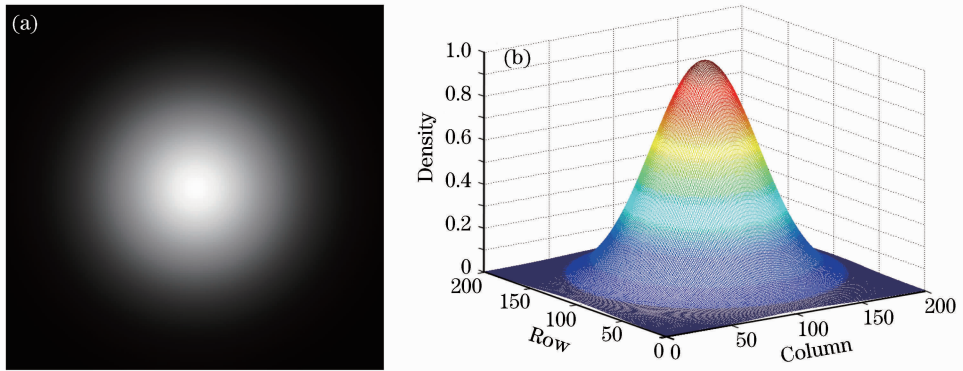


图 4 CLPF 的(a)频谱图和(b)三维显示

Fig. 4 (a) Spectrum and (b) three-dimensional mesh image of GLPF

通过对比图 5 中原始太赫兹图像(a)和去噪结果图像(b),可以看出所选的高斯低通滤波器可以有效地滤除条带噪声,图像变得平滑。滤除的噪声部分如图(c)所示,与干扰原始图像的噪声分布相吻合。对比滤波前后图像的频谱图,相较于于图 5(d), (e)中的高频部分明显衰减了,同时低频信息得到完好的保留。频域的处理方法主要是用滤波器把有用

的信号和干扰信号分开,它在有用信号和干扰信号的频谱没有重叠的前提下,才能把有用信号和干扰信号完全区别开来。但在实际的情况中,有用信号和干扰信号的频谱往往是重叠的,因为无论是高斯白噪声还是脉冲干扰,它们的频谱几乎都是分布在整个频域。使用高斯型低通滤波器进行滤波可以平滑图像达到良好的去噪效果,但往往是以牺牲部分

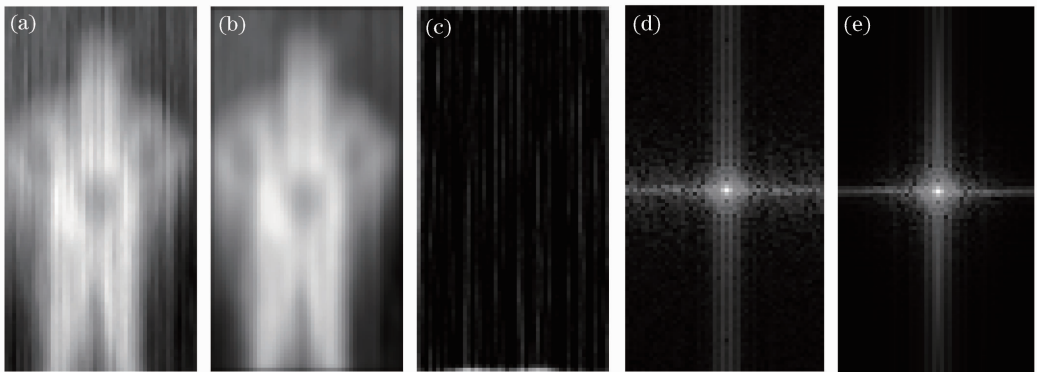


图 5 太赫兹图像的去噪结果。(a) 原始太赫兹图像; (b) 去噪结果; (c) 滤除的噪声部分; (d) 原始图像频谱图; (e) 去噪结果图像频谱图

Fig. 5 Result of terahertz image denoising. (a) Original terahertz image; (b) result of image denoising; (c) filtered noise; (d) spectrum of original terahertz image; (e) spectrum of denoised image

图像的轮廓细节为代价。而就本文提及的太赫兹图像而言如图 5(b) 所示,去噪后的太赫兹图像纵向条带噪声得到了有效地抑制,却没有出现严重的模糊现象,这是因为由于成像系统自身的分辨率限制使得获取图像的有用信息仅仅分布在低频区,即图 5(d) 中所示的频域中的高频部分其实对应的是“无用”的高频噪声干扰,因此本文所采用的高斯型低通滤波器能够在处理原始太赫兹图像的噪声问题上发挥效用,又不会损失图像的有用轮廓信息。

4.2 图像反卷积重构

经过去噪预处理后的图像其噪声干扰已经得到较好地抑制,但是去噪结果图像分辨率仍然较低,轮廓细节丢失,图像模糊。针对人体太赫兹图像而言,造成图像模糊的原因可以主要归结于系统的衍射极限。按照傅里叶光学的观点,光学成像系统相当于一个低通滤波器,由于受到光学衍射的影响,在由衍射极限分辨率所决定的截止频率以上,其传递函数的值均为零。为了突破成像系统的衍射极限,以提高图像的分辨率,这里引入了图像反卷积重构技术^[10~12]。图像反卷积重构就是在不改变成像系统硬件条件的前提下,利用信号处理和软件的方法消除成像系统导致的图像退化,同时复原出成像系统的分辨率极限外的信息,形成空间分辨率更高的清晰图像。

经典的反卷积重构方法有很多,这里主要研究 Lucy-Richardson(L-R)算法^[13~16]对被动式太赫兹图像的处理效果。L-R 算法是一种基于迭代运算的

图像复原技术,最终收敛于泊松统计的最大似然解,其迭代方程为^[10]

$$f'_{k+1}(x,y) = f'_k(x,y) \left[h(-x,-y) * \frac{g(x,y)}{h(x,y) * f'_k(x,y)} \right], \quad (3)$$

(3) 式即是 L-R 算法求解最佳估计 $f'(x,y)$ 的迭代式。式中 k 为迭代次数 ($k=0,1,2,\dots$), $f'_k(x,y)$ 为第 k 次迭代求出的最佳估计, $h(x,y)$ 为系统退化函数, $g(x,y)$ 为已知退化图像。L-R 算法是迭代非线性方法,和大多数的迭代非线性方法一样,关于什么时候停止 L-R 算法通常很难回答。通常情况下,接下来的处理途径是对于给定的应用,在得到满意的结果时观察输出并终止迭代。

通过观察 L-R 算法的迭代方式(3)式可知,要使用 L-R 算法进行反卷积图像重构首先需要迭代式进行初始化,也就是给定 $f'_0(x,y)$ 的值,一般情况下使用全 1 矩阵作为迭代初始值^[16];其次给定系统的退化函数 $h(x,y)$,也可以称为系统的点扩展函数(PSF),由于系统的 PSF 一般难以准确获得,因此采用了常用的高斯模型作为系统的 PSF,如图 6 所示,可表示为

$$h(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left[-\frac{(x-M/2)^2 + (y-N/2)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (4)$$

式中 σ 为标准偏差; M,N 分别为图像的长和宽。这里 σ 取填充后的图像宽度的 6%; $x=1,2,\dots,M$; $y=1,2,\dots,N$ 。

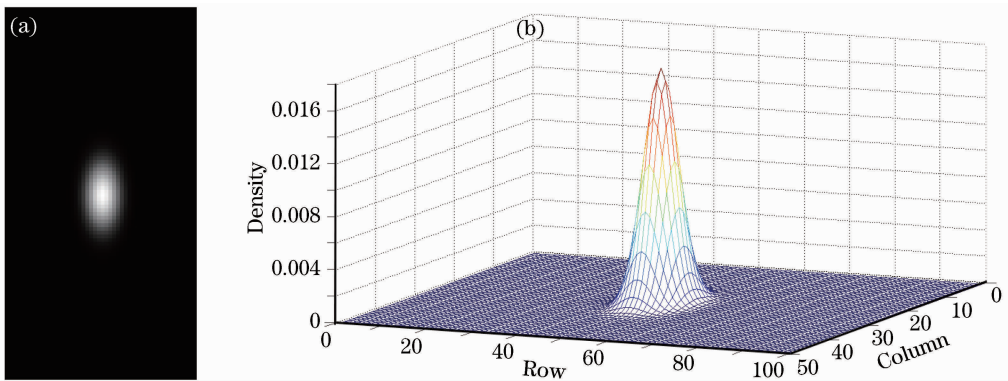


图 6 高斯型 PSF 的(a)空域图和(b)三维网格图

Fig. 6 (a) Special image and (b) three-dimensional mesh image of Gaussian PSF

最后就是迭代次数的确定,由于 L-R 算法属于迭代非线性方法,于是迭代次数的确定需要通过实际情况来确定,根据观察迭代结果,实验中取迭代次数为 4。使用 L-R 算法对去噪后的太赫兹图像图 5(b) 进行反卷积重构处理实验,结果如图 7 所示。

通过对比图 7 的(a)和(b)可以看出,经过反卷积重构处理后图像中人体的轮廓变得清晰,人体与背景的对比如得到提高,图像质量有显著提高;对比二者相应的频谱图(c)和(d)可以看出经过反卷积处理后图像的频谱向高频外推,说明 L-R 算法确实能够复原

部分高频信息,达到提高图像分辨率的作用。本文中采用的高斯型 PSF 对图像进行反卷积重构能达到提

高图像分辨率的目的,说明成像系统的实际 PSF 和该模型可能具有一定的相似性。

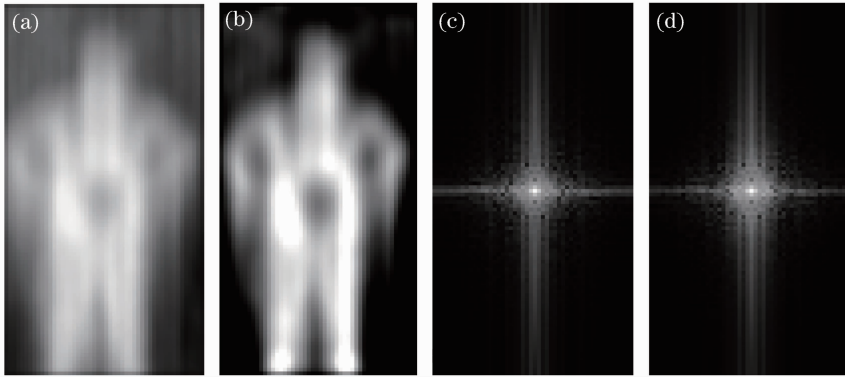


图 7 反卷积重构结果。(a) 去噪后的图像; (b) 反卷积重构结果; (c),(d)分别为(a),(b)的频谱图

Fig. 7 Result of image reconstruction by deconvolution. (a) Denoised image; (b) result of image reconstruction by deconvolution; (c) spectrum of (a); (d) spectrum of (b)

4.3 图像灰度变换

灰度变换可调整图像的动态范围或图像对比度,是图像增强的重要手段之一。为了在图像反卷积重构的基础上进一步提高图像清晰度,借由灰度变换方法将图像中的人和背景进一步分离。由于人体的太赫兹辐射比背景环境要强,体现在灰度图像上就是灰度值比背景要高,因此通过选定合适的阈值能够达到压缩背景干扰突显人体信息的效果。采用线性变换方法作为整个重构算法的最后一步,灰度变换处理结果如图 8 所示。经过灰度变换处理后的图像人体与背景的对比如进一步增强,人体和金属物的轮廓已经十分清晰。但是,随着图像对比度的增强,图像中存在的畸变现象也愈发明显。

通过分析工作频率约为 0.1 THz 的被动式人体太赫兹成像系统采集到的图像的退化原因,提出了结合图像去噪、反卷积重构以及图像增强方法的被动式人体太赫兹图像重构算法。通过对原始的太赫兹图像进行重构实验,得到了比较理想的处理结果,表明该算法能够有效提高图像分辨率,改善图像质量。算法的可操作性强,重构效果明显,在系统的实用中具有一定的可行性。然而,该算法对被动式太赫兹图像的畸变修整能力弱,在后续的研究中将进一步改进重构算法,提高其校正图像空间形状畸变的能力,以达到重构清晰度更佳的图像处理效果。

参 考 文 献

- 1 Sun Li'na, Yuan Peixin. Design of an intelligent control and diagnosis system for X-ray security inspection equipment[J]. *Proceedings of Chinese J. Scientific Instrument*, 2007, **28**(1): 154~157
- 2 孙丽娜,原培新. X射线安检设备智能控制与诊断系统设计[J]. *仪器仪表学报*, 2007, **28**(1): 154~157
- 3 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulsed terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2853~2858
- 4 杨 昆,赵国忠,梁承森等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. *中国激光*, 2008, **36**(11): 2853~2858
- 5 B. Ferguson, D. Abbott. De-noising techniques for terahertz responses of biological samples[J]. *Microelectronics J.*, 2001, **32**(12): 943~953
- 6 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 & Millimeter Waves*, 2008, **29**(1): 79~88
- 7 Li Liangchao, Yang Jianyu, Zheng Xin *et al.*. Research on passive millimeter wave image super-resolution algorithm and real-time implementation[J]. *J. University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, **38**(6): 952~956
- 8 李良超,杨建宇,郑 鑫等. 无源毫米波超分辨算法及实时性研

5 结 论

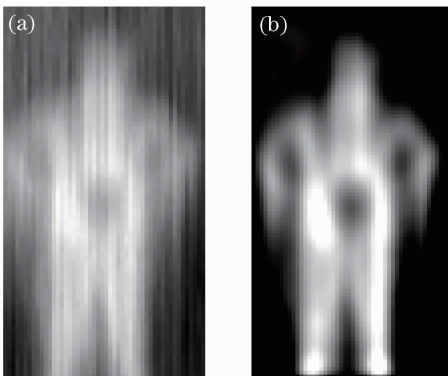


图 8 图像灰度变换结果。(a) 原始太赫兹图像; (b) 灰度变换结果图

Fig. 8 Result of gray level transform. (a) Original terahertz image; (b) result of gray level transform

- 究[J]. 电子科技大学学报, 2009, **38**(6): 952~956
- 6 Xu Ying, Hong Zhi. Study of multi-scale enhancement algorithm for THz images combining wavelet denoising[J]. *Chinese J. Sensors and Actuator*, 2011, **24**(3): 398~401
徐英, 红治. 结合小波去噪的THz图像多尺度增强算法研究[J]. 传感技术学报, 2011, **24**(3): 398~401
- 7 M. Peichl, S. Kill, M. Jiroused *et al.*. Microwave radiometry-imaging technologies and application[C]. Chemnitz: Proceedings of WFMN07, 2007. 75~83
- 8 Xiao Zelong. Study on Millimeter-Wave Radiometric Imaging for Concealed Contraband Detection [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007
肖泽龙. 毫米波对人体隐匿物品辐射成像研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007
- 9 Li Qi, Chi Xin, Shan Jixin *et al.*. Terahertz absorption characteristics of polytetrafluoroethylene[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 756~759
李琦, 迟欣, 单纪鑫等. 聚四氟乙烯材料的太赫兹特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 756~759
- 10 Rafael C. Gonzlez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. Digital Image Processing Using MATLAB[M]. Ruan Qiuqi transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 117~134
Rafael C. Gonzlez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. 冈萨雷斯数字图像处理(MATLAB版)[M]. 阮秋琦译, 北京: 电子工业出版社, 2005. 117~134
- 11 A. H. Lettington, D. Dunn, M. P. Rollason *et al.*. Use of constraints in super-resolution of passive millimetre-wave images[C]. *SPIE*, 2003, **5077**: 100~109
- 12 Liu Yang, Cui Jiwen. Image restoration based on hybrid wiener/projection onto convex sets algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **35**(3): 789~794
刘洋, 催继文. 维纳/投影限制集混合算法实现超分辨率图像复原[J]. 中国激光, 2010, **35**(3): 789~794
- 13 S. Borman, R. L. Stevenson. Super-resolution from image sequences—a review[C]. USA: 1998 Midwest Symposium on Circuits and System, 1998. 374~378
- 14 L. B. Lucy. An iterative technique for the rectification of observed distributions[J]. *Astron. J.*, 1974, **79**: 745~759
- 15 W. H. Richardson. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(1): 55~59
- 16 Yue Li, Li Li, Andrew Hellicar *et al.*. Super-resolution reconstruction of terahertz images [C]. *SPIE*, 2008, **6949**: 69490J

栏目编辑: 李文喆