

太赫兹被动成像系统性能研究

李雅尚^{1,2,3}, 赵国忠^{1,2,3*}, 韦青云¹, 刘宇洋¹, 阚晨¹, 李帅^{1,2,3}

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

摘要: 太赫兹被动成像技术具有很多独特的优势, 已经成为安全检查领域的重要研究方向。为了提高太赫兹被动成像系统的成像性能和实用性, 研究了实验室自研的一套基于光机扫描的太赫兹被动成像系统的性能。通过探索不同系统参数和实验条件, 包括成像距离、成像速度以及探测器状态, 对背景噪声以及分辨率等图像性能的影响, 获得了系统优化的性能参数, 同时探究了该系统探测人体隐藏物品的能力, 说明该系统可以有效地对人体进行安全检查。实验结果表明: 该太赫兹被动成像系统的成像距离在机器前面 1.5~2.5 m 的范围内, 即在大约 1 m 的景深内, 能够显示清晰的太赫兹图像; 该系统的成像速度为每帧 1~2 s; 探测器工作电平和增益对图像清晰度和系统噪声有较大的影响, 存在一个优化的探测器工作状态, 在该条件下可以获得清晰的太赫兹图像。在各项参数优化的条件下, 该太赫兹成像系统可以达到的目标分辨率为 1.5~2 cm, 能够清晰地探测隐藏在人体衣服之下的金属物品和对太赫兹波有较强吸收的物质。

关键词: 太赫兹; 被动成像; 光机扫描; 安全检查

中图分类号: TN206 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0404005

Study on the performance of terahertz passive imaging system

Li Yashang^{1,2,3}, Zhao Guozhong^{1,2,3*}, Wei Qingyun¹, Liu Yuyang¹, Kan Chen¹, Li Shuai^{1,2,3}

- (1. Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
2. Beijing Key Laboratory of Terahertz Spectroscopy and Imaging, Beijing 100048, China;
3. Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 100048, China)

Abstract: Terahertz passive imaging technology has many unique advantages and has become an important research direction in the field of security inspection. In order to further improve the imaging performance and practicability of the terahertz passive imaging system, the performance of a terahertz passive imaging system based on opto-mechanical scanning developed by our laboratory was studied. By exploring the influence of different system parameters and experimental conditions including its imaging speed, distance and the status of detector on the performance of imaging system such as the image resolution and background noise, the optimized system parameters were obtained. At the same time, the performance of imaging system to detect the human body hiding the metal objects was explored. It was shown that the system was suitable for the security inspection of

收稿日期: 2019-12-02; 修订日期: 2020-01-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61575130)

作者简介: 李雅尚 (1994-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹被动成像技术和数字图像处理方面的研究。Email: 17600807593@163.com

通讯作者: 赵国忠 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事太赫兹波段光子功能材料和器件、光谱、成像等方面的研究。

Email: guozhong-zhao@126.com

human body. The experimental results show that the imaging distance of the terahertz passive imaging system is within the range of 1.5–2.5 m in front of imager, that is, its depth of field is about 1 m. The imaging speed of system is 2–4 seconds per frame. Moreover, the operating level and gain of detector have a great impact on image sharpness and system noise. There exists an optimized operating state of detector. Under the optimized condition, the clear terahertz images can be achieved and the resolution of target was 1.5–2 cm. Our imaging system can clearly detect metal objects hidden under human body's clothes and substances with strong absorption on terahertz waves.

Key words: terahertz; passive imaging; opto-mechanical scanning; security inspection

0 引言

目前,人们对公共安全问题日益关注,安全检查已经成为研究的热点。传统的安检手段,例如X射线成像系统,穿透性好,但X射线能量较高对人体有害;红外成像系统无法透过衣物清晰地成像,总之在安全检查方面都存在着不足。相比于传统的安检手段,太赫兹被动成像技术已经成为安全检查领域一个非常重要的方向。第一,太赫兹波的光子能量较低,对人体无害;第二,太赫兹波的波长介于微波和红外之间,能够兼顾人体的安全性和较好的分辨率;第三,太赫兹波对衣物、塑料等非金属物体具有良好的穿透性;第四,太赫兹被动成像系统对人体成像时,无需接触人体,可以有效保护人体的隐私;最后太赫兹被动成像系统相比于主动成像系统,具有很多独特的优势。比如,它以人体作为太赫兹辐射源,没有外界辐射源照射人体,更为安全,易于被民众接受,此外它的系统稳定性更好,图像处理时间更短^[1-5]。

目前,国内外众多机构都对太赫兹被动成像系统开展了一系列研究^[6]。如美国TRW公司研制的89 GHz被动成像系统,实现对室外着落的飞机和室内隐匿物体的探测^[7];美国Millivision公司研制的94 GHz的Vela125型被动成像仪,采用焦平面阵列探测技术和机械扫描相结合的方法,可以有效降低成像成本,成像速率为10 Hz,但成像分辨率较低仅达到5 cm^[6];英国Digital Barriers公司研制的250 GHz被动成像Thruvision系列产品,采用8个外差接收机组成的焦平面阵列进行成像,成像时间为3~10 s,成像分辨率为2 cm^[8];英国Qientiq公司研制的94 GHz的Ispo-30型被动成像系统,成像速率为15 Hz,成像分辨率为2.5 cm,该公司使用反射面聚焦系统改进光路,可用于机场等环境^[9];德国IPHT Jena研究所利用卡塞格伦天线结构和0.3 K吸附制冷机提高了系统的灵敏

度,成像分辨率达到1 cm,但系统需要低温工作,实用性差^[10];芬兰VTT技术研究中心基于超导天线耦合微测辐射计,也自主研发了被动成像仪,能够在250 GHz、450 GHz和720 GHz多个频段进行成像,成像速率为10 Hz,成像分辨率为1.5 cm,该系统同样存在需要低温工作,实用性差的问题^[11]。

在国内,中国电子科技集团某所,目前也推出了博微被动太赫兹安检仪,利用被动式压缩感知探测手段,可以达到2~3 s的成像时间和约2 cm的分辨率^[12]。航天某所和航天易联研发的被动式太赫兹人体安检仪,采用集装箱流动式安检和单机静态扫描相结合的方式成像,这些系统的成像分辨率都较低。目前世界范围内的太赫兹被动成像技术还处于发展阶段,由于人体所辐射的太赫兹波强度较低,尚没有灵敏度较高的高频太赫兹探测器,且高成像速率的系统需要利用焦平面阵列探测技术,大幅提高系统的成本,以上因素限制了远距离、高分辨率、高成像速率的太赫兹被动成像系统的发展。国内对太赫兹被动成像的研究晚于国外,国内能够实现快速、高分辨率、长时间稳定工作、能够适应像机场、地铁等复杂环境的太赫兹被动成像安检仪样机的单位较少,因此还需要进一步对太赫兹被动成像技术进行研究。

首都师范大学太赫兹实验室,多年来研制了多种被动太赫兹成像系统。文中主要研究一套基于光机扫描的太赫兹被动成像系统性能,通过探索不同系统参数和实验条件对具体成像性能的影响,获得了系统优化的成像距离、成像时间、以及成像分辨率的具体性能参数,同时探究了系统探测人体隐藏金属物品的性能。通过对该系统性能的研究,可以说明本系统具有探测人体隐藏物体的能力,进一步说明该系统具备开发并应用于人体安全检查的潜力,也为进一步发展太赫兹被动成像技术,提供了重要的实验依据。

1 硬件设计

1.1 基本原理

该系统以人体为辐射源,利用光机扫描和波束聚焦系统将视场中人体的各个位置逐点成像^[13-15]。光机扫描系统可以将视场中的每一个点逐点扫描到探测器上,波束聚焦系统则用于把太赫兹波束聚焦到探测器上,最后探测器把采集到的太赫兹信号转换为电信号,从而在计算机系统中获得太赫兹图像。具体来说,人体上每一个点辐射出的太赫兹波,首先通过一个平面转镜,再反射到一个三面体聚焦扫描镜上,该扫描镜同时实现了太赫兹波束的一维扫描和波束聚焦功能,最后探测器将太赫兹波段的电磁波信号转换为电信号,计算机处理接受到的电信号形成太赫兹图像。

1.2 太赫兹被动成像系统

该系统主要由太赫兹信号扫描模块,太赫兹波束聚焦模块,太赫兹信号接收与处理模块组成。其光路示意图如图 1 所示。被测物体辐射出太赫兹波,经过第一面反射镜反射至下面的聚焦扫描镜。系统中光学元器件为经过抛光处理的纯铝制作,以提高太赫兹信号反射率。第一面反射镜为方形反射镜,可绕平行于纸面的中心轴转动,实现横向扫描;下面的聚焦扫描镜为一个三面体扫描镜,可绕垂直于纸面的中心轴转动,实现纵向扫描,太赫兹波通过两面扫描镜即可实现对物体的二维扫描,组成太赫兹信号扫描模块。三面体扫描镜同时还是一面凹面镜,将信号汇聚至后面的信号接收器,这样组成太赫兹聚焦系统。系统的信号接收器为 250 GHz 的太赫兹探头,通过光纤通信系统连接到计算机,计算机处理接收到太赫兹信号形成图像,组成太赫兹信号接收与处理模块。

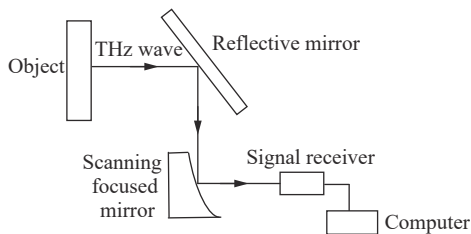


图 1 太赫兹被动成像系统光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of optical path of terahertz passive imaging system

1.3 图像评价算法

为了获取系统优化的成像距离,成像时间和成像

分辨率等具体性能指标,需要对实验所得图像进行图像质量评价。图像评价分为两种,一种为对无噪声的参考图像和带噪声的待测图像进行评价,另一种为对没有参考图像的待测图像进行评价。太赫兹被动成像系统所成图像为无参考图像,因此,可以采用信息熵^[16]对实验所得图像进行图像质量评价。信息熵为:

$$H = \sum_{i=0}^{255} p_i \log p_i \quad (1)$$

式中: p_i 表示灰度值为 i 的像素所占的概率; H 为信息熵,反映了图像中平均信息量的多少。图像灰度值 i 的级别范围为 0~255, 0 表示图像显示颜色为黑色, 255 表示图像显示颜色为白色,灰度值越高,表明图像越亮。首先,依次统计每一级灰度值为 i 的像素在待测图像像素矩阵中出现的个数 n ,再用 n 除以待测图像总的像素数量,得出每一级灰度值为 i 的像素出现的概率 p_i ,再将 p_i 代入公式 (1),计算结果即为待测图像的信息熵 H ,信息熵越高代表图像包含的信息越多,图像质量越好。

2 实验结果与分析

2.1 探测器电平和增益对成像性能的影响

太赫兹被动成像系统成像质量受探测器电平和增益影响很大。探测器电平为所加的偏置直流信号,增益为探测器信号的放大倍数。系统中,探测器电平的可调范围分为五级,增益的范围为四级。零级代表不加电平和增益信号,所加级数越高,代表电平和增益信号的强度越高。

首先,通过保持增益和其他实验条件不变,从低到高依次改变电平,对人体进行成像,研究探测器电平对太赫兹被动成像系统性能的影响,实验结果见图 2。

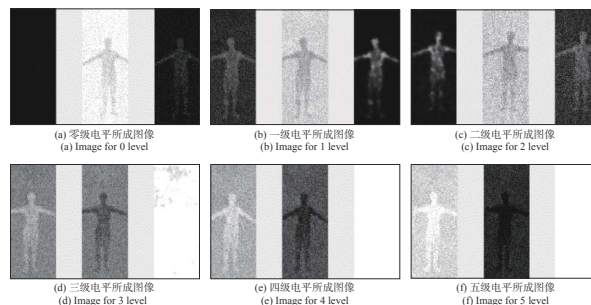


图 2 不同探测器电平下人体太赫兹成像结果比较

Fig.2 Comparison of THz imaging results for the human body under the different levels of detector

为了定量研究探测器电平对系统所成图像质量的影响,分别取不同电平下的原图见图 2(a),统计原图各级灰度值出现的概率,代入公式 (1) 计算出相应电平下实验所得图像的信息熵,计算结果如图 3 所示。图 3 表明原始图像的信息熵随着电平增长,呈现先增长后降低的趋势,说明取低电平和高电平时,均不能获得较好质量的图像。结合图 2 可以看出,电平主要影响系统所成图像的亮度,在成像系统成像时需要找到合适的电平使得图像最为清晰。

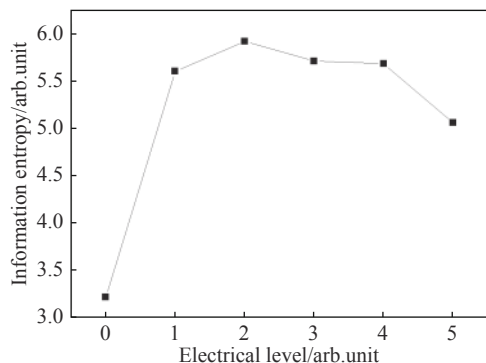


图 3 不同探测器电平下人体图像的信息熵

Fig.3 Information entropy of the images on human body under different levels of detector

接着,通过保持电平和其他实验条件不变,从低到高依次改变增益,对人体进行成像,研究探测器增

益对太赫兹被动成像系统性能的影响,实验结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,随着增益增大,原始图像和去噪图像中人体图像部分的灰度值被显著增强,图像对比度增加,这表明人体辐射出的 THz 信号被系统放大,从而获得更清晰的人体图像。但同时原始图像和去噪图像中背景部分的灰度值也被增强,图像背景变模糊,这表明人体辐射出的 THz 信号被系统放大的同时,背景噪声也被系统放大。

为了定量研究增益对系统所成图像质量的影响,分别取不同增益下的去噪图像,统计去噪图像下各级灰度值出现的概率,代入公式 (1) 计算出相应增益下实验所得图像的信息熵,计算结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,在合适的电平下,增加增益,图像的信息熵也随之增加。这说明增加增益可以获得更多信息的图像。但是随着增益增加,图像信息熵的增加量在减小,这表明增加增益时,人体辐射出的 THz 信号和背景噪声都被逐渐放大,其中人体的 THz 信号将迅速趋近于饱和,而噪声继续增大,从而导致信息熵增加量降低,进而降低图像的信噪比。因此,在系统成像时同样需要选取合适的增益,获得更清晰的图像。

总之,电平与增益对图像质量影响很大,利用该系统对目标物体成像之前,先对系统的电平和增益进行调节,以获得最清晰的图像。后续实验表明,系统最大横向分辨率为 1.5 cm,因此调节系统电平和增

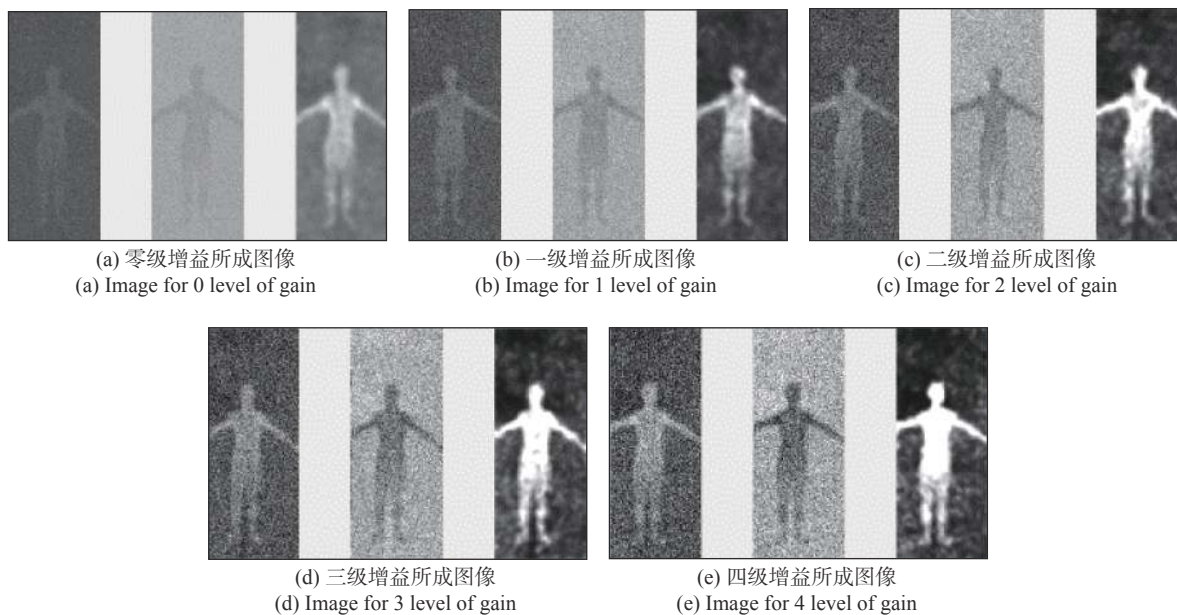


图 4 不同探测器增益下人体太赫兹成像结果比较

Fig.4 Comparison of THz imaging results for the human body under different gains of detector

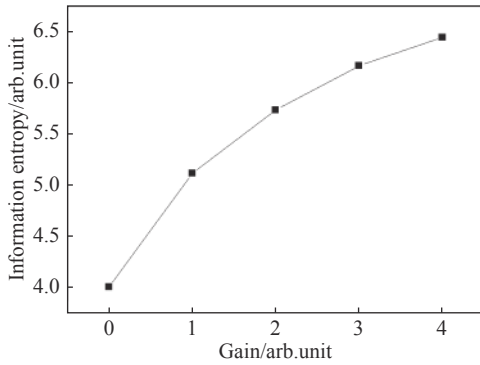


图 5 不同增益下人体图像的信息熵

Fig.5 Information entropy of the image on the human body at different gains

益,使系统成功对 1.5 cm 金属分辨率板清晰成像,则表明系统达到最佳成像状态。金属分辨率板为狭缝型金属板,具有两道中空的狭缝,狭缝间距为 1.5 cm。在成像距离为 1.5 m 处,将金属分辨率板横向放置于胸前,先调节电平,使图像亮度适中,再调节增益,使金属分辨率板的狭缝清晰可见,调节好的成像结果如图 6 所示。

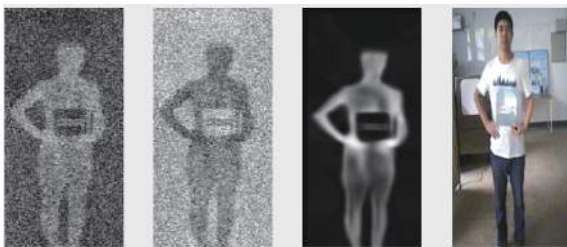


图 6 系统电平增益优化后的成像结果

Fig.6 Imaging result after the optimization of level and gain

2.2 系统成像距离的影响

为了研究本套系统的成像距离对所成图像质量的影响,保持其他条件相同,仅改变被测物体与成像系统的距离,对人体进行成像。从 1 m 开始每隔 50 cm 进行一次测量,成像结果如图 7 所示。由图 7 可知,随着成像距离增加,人体图像逐渐变模糊,同时人体图像逐渐缩小。分别取不同距离下的去噪图像,统计去噪图像中各级灰度值出现的概率,代入公式(1)计算出相应成像距离下实验所得图像的信息熵,计算结果如图 8(a)所示。再取不同距离所成图像中人物身高占图像总高度的百分比表征人物缩小的程度。利用图像中背景部分灰度值低,人物部分灰度值高的特点,采用阈值分割的方法对图像进行二值化处理,提取人物的轮廓,计算人物的身高,最后除以图像总高度所得计算结果如图 8(b)所示。

由图 8(a)可以看出,随着成像距离的增加,从 1~3.5 m 处所成的图像信息熵呈现逐渐下降的趋势,这表明随着成像距离的增加,成像质量在逐渐下降。而且信息熵下降速度逐渐变小,这表明图像中包含的信息随成像距离减少,THz 波信号随着成像距离的增加,信号在剧烈衰减。从 3.5~4.5 m 处所成的图像信息熵没有明显的变化,表明此时图像中信息大部分为背景噪声。同时可以由图 8(b)看出,随着成像距离的增加,系统所成人体图像在逐渐缩小,到 3 m 处图像中人体身高已经只接近图像高度的一半,1 m 处虽然人体占图像比例很大,但是人的整个身体显示不足,均不适合进行成像。所以系统成像距离为 1.5~2.5 m 时,可以获得清晰的图像。

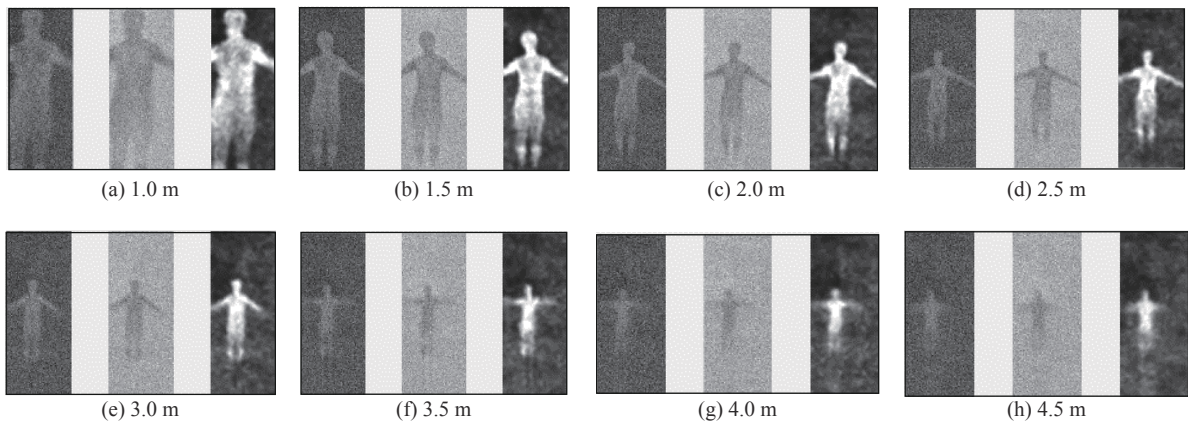


图 7 不同成像距离下人体太赫兹图像结果比较

Fig.7 Comparison of THz images for the human body under different imaging distances

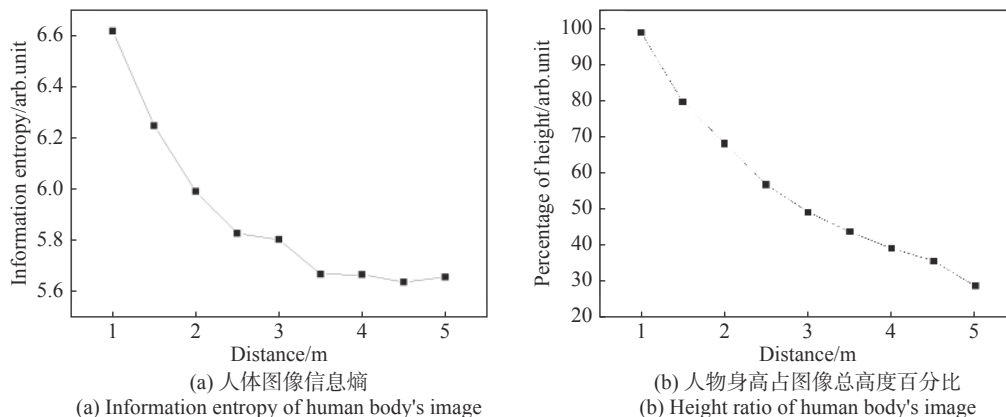


图 8 不同成像距离下人体图像信息熵和人物身高占图像高度百分比结果比较

Fig.8 Comparison of information entropy and height ratio of the human body's images at different imaging distances

2.3 系统成像速度的影响

为了研究本套太赫兹被动成像系统的成像时间对系统图像质量的影响,在成像距离为 2.5 m 下,保持其他实验条件一致,分别在转速为 125、245、369、433 r/m 时,对人体进行成像,系统成像方式为连续扫描成像,成像间隔为 3 s,连续成 10 幅图像时,记录总的成像时间。减去成像间隔之后,计算不同转速下系统的平均成像时间,实验结果如图 9 所示。

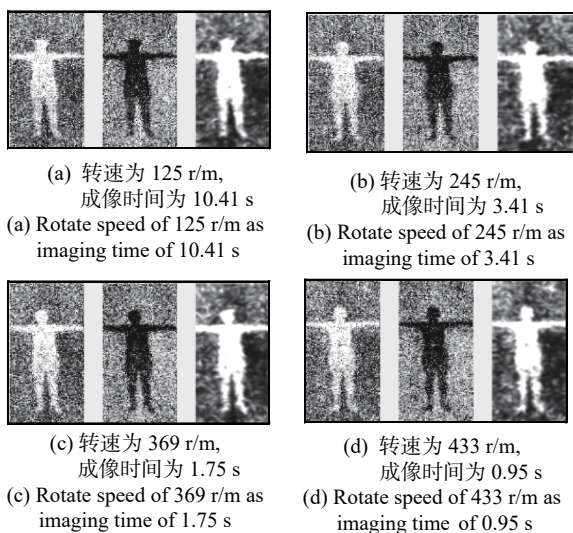


图 9 不同转速下人体成像结果比较

Fig.9 Comparison of images on the human body at different imaging speeds

分别取不同转速下的去噪图像,统计去噪图像下各级灰度值出现的概率,代入公式(1)计算出相应转速下实验所得图像的信息熵,计算结果如图 10 所示。由图 10 可以看出,不同转速下,图像信息熵没有

明显变化,说明不同转速下的图像质量差别不大,取最快转速依然可以获得较为清晰的图像,所以系统成像时间为 0.95 s。一般情况下,系统成像时间能够达到每帧 1~2 s。

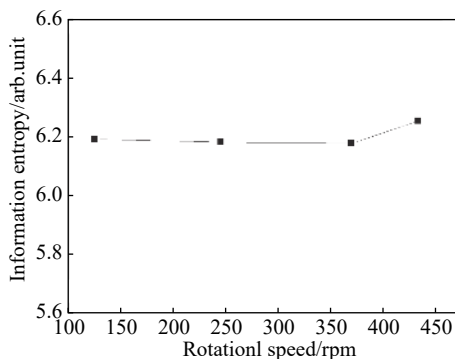


图 10 不同转速下人体图像信息熵

Fig.10 Information entropy of the human body images under different rotational speeds

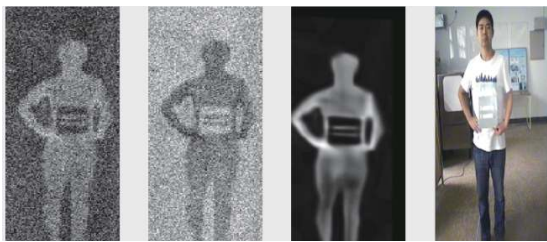
2.4 成像分辨率测量

太赫兹被动成像系统成像分辨率是系统重要的性能参数。为了研究系统的成像分辨率,选取成像距离为 1.5 m,其他条件相同,分别对不同间距的金属分辨率板进行测量。先将金属分辨率板横向放置于胸前,测量纵向分辨率,再将金属分辨率板纵向放置于胸前,测量横向分辨率。金属分辨率板为狭缝型金属板,具有两道中空的狭缝。太赫兹波不能透过金属部分,所成图像为黑色,中空部分透过太赫兹波,所成图像为白色,因此,图像中两道白色条纹即为金属分辨率板中空部分所成图像。为了探究系统对金属分辨率板成像的分辨效果,在金属分辨率板中空部分所成

图像中间处取一条直线，画出线上的像素分布曲线。纵向分辨率实验结果如图 11 所示。

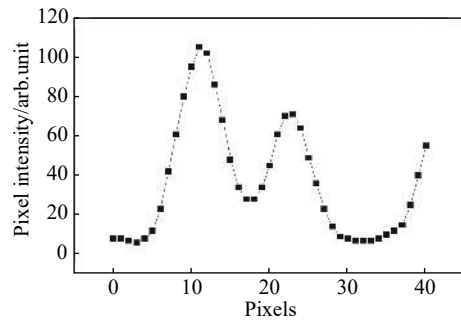
由图 11 可以看出，由于分辨率板中空部分可以透过太赫兹波，探测器接收的光强高，所成图像的像素强度高，其余金属部分不能透过太赫兹波，探测器接收的光强低，所成图像的像素强度低，因此像素分布曲线中的两个峰即为图像中的两个白色亮条纹，即对应分辨率板中空的狭缝部分。三个间距的像素分辨曲线均具有两个峰，表明横向放置金属分辨率板时，系统均能成功对三个不同间距的金属分辨率板成像，因此系统纵向分辨率为 1.5 cm。

同样地，对金属分辨率板横向分辨能力进行测量，结果如图 12 所示。由图 12 可以看出，2.5 cm 间距和 2 cm 间距的像素分辨曲线均具有两个峰，而 1.5 cm 像素分布曲线则看不到相应的峰，说明纵向放置金属分辨率板时，系统能够成功地对 2.5 cm 间距和 2 cm 间距的金属分辨率板成像，而分辨不开 1.5 cm 间距的金属狭缝，因此系统横向分辨率为 2 cm。总之，实验结果表明太赫兹被动成像系统纵向分辨率为 1.5 cm，横向分辨率为 2 cm。可以发现系统的横向分辨率和系统的纵向分辨率不同，主要的原因是系统的横向和纵向扫描光路不对称造成的。系统的横向扫描由可



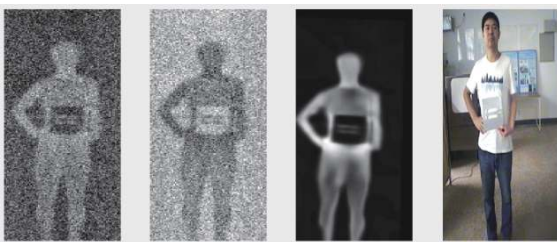
(a) 间距为 2.5 cm 金属分辨率板成像结果

(a) Imaging results of metal resolution plate with the gap of 2.5 cm



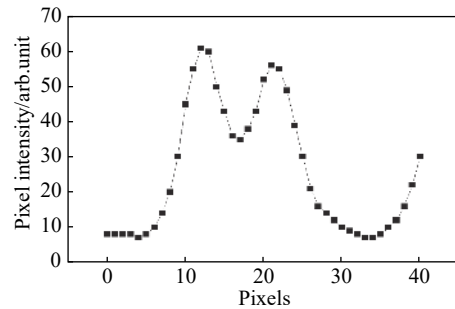
(b) 2.5 cm 金属分辨率板图像的像素分布

(b) Pixel distribution of metal resolution plate with the gap of 2.5 cm



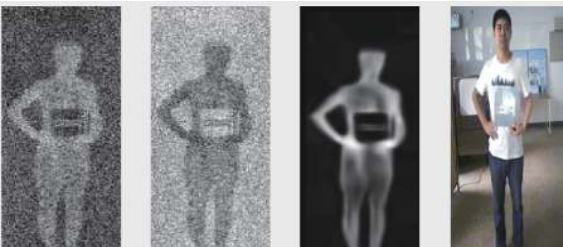
(c) 间距为 2 cm 金属分辨率板成像结果

(c) Imaging results of metal resolution plate with the gap of 2 cm



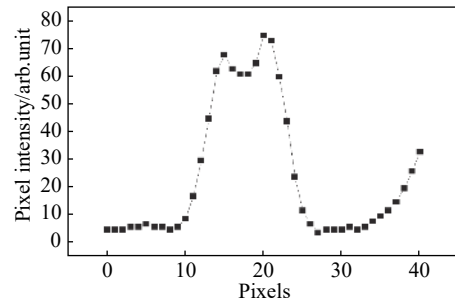
(d) 2 cm 金属分辨率板图像的像素分布

(d) Pixel distribution of metal resolution plate with the gap of 2 cm



(e) 间距为 1.5 cm 金属分辨率板成像结果

(e) Imaging results of metal resolution plate with the gap of 1.5 cm



(f) 1.5 cm 金属分辨率板图像的像素分布

(f) Pixel distribution of metal resolution plate with the gap of 1.5 cm

图 11 不同条纹间距横向放置的金属分辨率板成像结果

Fig.11 Imaging results of metal resolution plates with different landscape stripe spacing

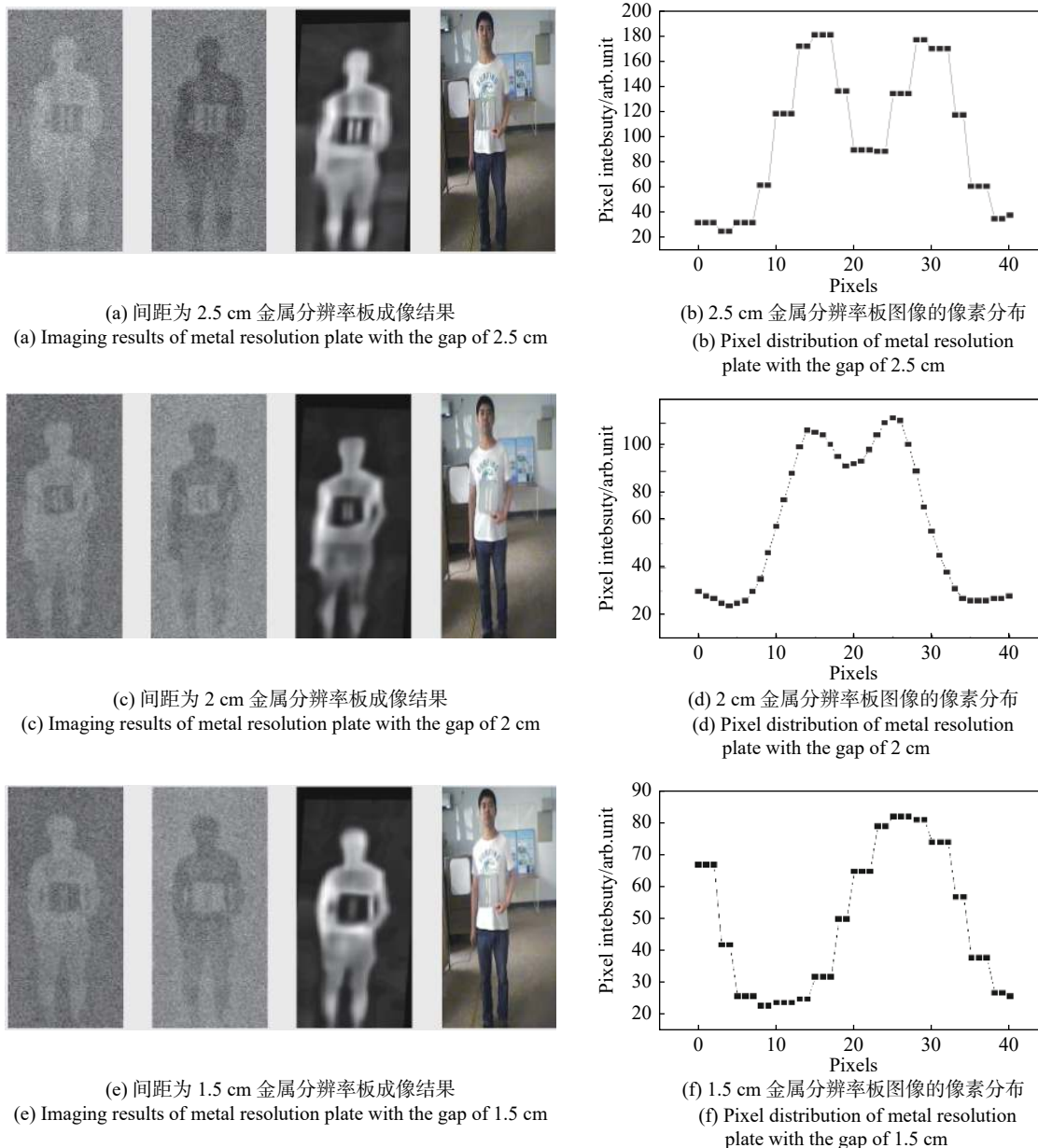


图 12 不同条纹间距纵向放置的金属分辨率板成像结果

Fig.12 Imaging results of a metal resolution plate with different portrait stripe spacing

绕平行于纸面中心轴转动的方形金属反射镜完成, 转动速率较慢; 系统的纵向扫描则由可绕垂直于纸面中心轴转动的三面体金属转镜完成, 转动速率较快, 此外三面体转镜同时还承担了聚焦波束的功能。系统先由三面体转镜完成一系列纵向扫描成像, 再由方形反射镜横向转动太赫兹波至第二列, 由三面体转镜完成第二列扫描, 依次循环完成人体的二维成像, 可以发现两个维度的成像效率并不相同, 因此横向和纵向成像分辨率存在一定差异。考虑到目前大多数太赫兹

被动成像系统分辨率为 2 cm^[12], 而本系统纵向分辨率为 1.5 cm, 因此本系统成像效果相比于其他系统性能较为优越。

2.5 太赫兹被动成像系统对隐蔽物成像

为了探究本套系统对隐蔽物的成像效果, 选取有衣物遮蔽的手机作为成像对象, 在成像距离为 1.5 m 处, 其他条件不变, 手持扳手于胸前, 手机藏于右侧裤兜中, 对人体进行成像, 图 13 为成像结果。

太赫兹波对衣服具有很好的穿透性, 但不能透过

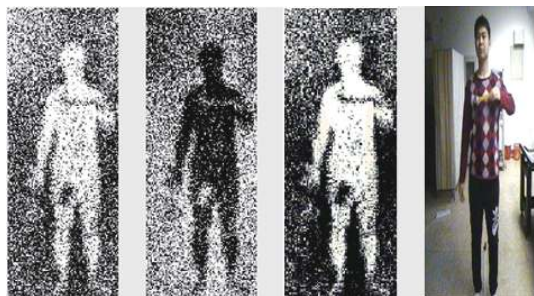


图 13 对隐藏的手机和扳手的成像结果

Fig.13 Imaging results for concealed cell phones and wrenches

金属物体传播,因此被衣物遮蔽的手机会在人像中出现相应的黑色区域。由图 13 可见,图中右侧裤兜中出现了手机形状黑色区域,表明系统能够成功探测到隐藏在裤兜中的手机。

由于手机尺寸较大,而实际安全检查中需检测物体尺寸常常较小,为了进一步探究本套系统在实际安全检查方面的成像效果,选取小刀作为成像对象,分别在无报纸遮蔽小刀和有报纸遮蔽小刀的情况下进行成像,成像结果如图 14 所示。小刀为金属物体,同样对太赫兹具有遮蔽效果,导致图像中出现相应的黑色区域。由图 14 可见,在无报纸遮蔽小刀和有报纸遮蔽小刀两种情况下,系统所成图像中人物的肚子部位均出现了小刀形状黑色区域。实验结果表明,本套系统成功探测到了隐蔽的小刀,具备探测隐蔽金属物体并显示其隐藏位置的能力。



(a) 不隐藏的小刀成像结果

(a) Image without the concealed knife



(b) 隐藏的小刀成像结果

(b) Image with the concealed knife

图 14 分别对不隐藏和隐藏的小刀成像的结果

Fig.14 Imaging results of the knives unhidden and hidden

3 结 论

文中通过实验探索不同系统参数和实验条件对太赫兹被动成像系统成像效果的影响,利用信息熵对实验所得图像的有效信息进行评价,分析得到太赫兹被动成像系统优化的成像距离、成像时间、分辨率这些关键参数,同时实验探究了系统对隐蔽物的成像效果,证实该套系统具备探测隐藏的金属物体的能力。结果表明,该太赫兹被动成像系统的有效成像距离范围为 1.5~2.5 m;成像时间为每帧 1~2 s;探测器工作电平和增益对图像清晰度和系统噪声有较大的影响,需要调节探测器状态,才能获得清晰的太赫兹图像。各项参数优化之后,该太赫兹成像系统可以达到目标分辨率为 1.5~2 cm,并且具备探测隐藏在人体衣服之下的金属物品和对太赫兹波有较强吸收的物质的能力。

参考文献:

- [1] Rui Yao, Qi Li, Ding Shenghui, et al. Investigation on 2.45 THz array transmission imaging[C]// Proceedings of SPIE, 2009, 7385: 73850P-7.
- [2] Wang Nannan, Qiu Jinghui, Deng Weibo. Development status of millimeter wave imaging systems for concealed detection [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(3): 129-135. (in Chinese)
王楠楠, 邱景辉, 邓维波. 隐匿物品探测毫米波成像系统发展现状[J]. *红外技术*, 2009, 31(3): 129-135.
- [3] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [4] Guo Lantao, Mu Kaijun, Deng Chao, et al. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 51-56. (in Chinese)
郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 51-56.
- [5] Zhang Zhi, Lin Xunlin, Zhang Jianbing, et al. Improvement method for terahertz imaging quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 298-302. (in Chinese)
张智, 林栩凌, 张建兵, 等. 太赫兹成像质量提升方法[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(11): 298-302.
- [6] Williams T D, Vaidya N M. A compact, low-cost, passive MMW security scanner[C]// Proceedings of SPIE, 2005, 5789: 109-116.
- [7] Yujiri L, Flannery M R, Shoucri M, et al. Passive millimeter-wave camera[C]// Proceedings of SPIE, 1997, 3064: 15-22.
- [8] Mann C. A compact real time passive terahertz

- imager[C]//Proceedings of SPIE, 2006, 6211: 62110E-1-5.
- [9] Appleby R, Anderton R N. Millimeter-wave and submillimeter-wave imaging for security and surveillance [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(8): 1683–1690.
- [10] Heinz E, May T, Born D, et al. Passive submillimeter-wave stand-off video camera for security applications [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2010, 31(11): 355–369.
- [11] Luukanen A, Leivo M M. Measured performance of a high-resolution passive video-rate submillimeter-wave imaging system demonstrator for stand-off imaging[C]// Proceedings of SPIE, 2012, 8362(10): 8.
- [12] Gao Bingxi, Feng Hui. The key technology and application of terahertz human security [J]. *Police Technology*, 2016(3): 23–26. (in Chinese)
高炳西, 冯辉. 太赫兹人体安检关键技术及应用[J]. *警察技术*, 2016(3): 23–26.
- [13] Hou Liwei, Xie Wei, Pan Ming. Terahertz imaging system for security check [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2015, 51(S1): 351–354.
- [14] Li Haitao, Wang Xinke, Mu Kaijun, et al. Experimental studies on terahertz continuous wave related to security inspection [J]. *Laser and Infrared*, 2007, 37(9): 876–878. (in Chinese)
李海涛, 王新柯, 牧凯军, 等. 连续太赫兹波在安全检查中的实验研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(9): 876–878.
- [15] Ding Li, Ding Xi, Ye Yangyang, et al. Overview of passive terahertz imaging systems for indoor concealed detection [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 114–121. (in Chinese)
丁丽, 丁茜, 叶阳阳, 等. 室内人体隐匿物被动太赫兹成像研究进展[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 114–121.
- [16] Lu Peng, Lin Genqiao, Zou Guoliang. Research on no-reference image quality evaluation method based on information entropy and deep learning [J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(11): 3508–3512. (in Chinese)
卢鹏, 林根巧, 邹国良. 基于信息熵和深度学习的无参考图像质量评价方法研究[J]. *计算机应用研究*, 2018, 35(11): 3508–3512.