

# 单探测器快速扫描被动太赫兹人体成像系统

冯辉, 卜伟华, 王文静, 高炳西, 姚洪, 涂昊, 武帅\*

博微太赫兹信息科技有限公司, 安徽 合肥 230088

**摘要** 报道了一种单探测器快速扫描准光学被动太赫兹人体成像系统,并设计了成像分辨率测试卡。该成像系统的光路由反射式准光学器件构成。被检测人员自身辐射的太赫兹波通过成像系统的透波窗口进入设备,依次经过摆动反射镜、旋转反射镜、聚焦反射镜和固定反射镜后到达太赫兹探测器。该成像系统仅用一个太赫兹探测器,配合由旋转反射镜和摆动反射镜组成的扫描机构,就可在2.5 s的时间内完成对一个距离设备1.5 m处0.65 m×1.9 m区域的完整成像,成像线分辨率达到2 cm。该成像系统不仅可有效显示金属、液体、陶瓷和粉末等材料的可疑危险物品的轮廓,还可对太赫兹图像上显示出的携带物品进行自动标记。

**关键词** 成像系统; 太赫兹成像; 人体成像; 被动成像; 安检

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0711002

## Passive Terahertz Imaging System for Fast Scanning of Human Body by a Single Detector

Feng Hui, Bu Weihua, Wang Wenjing, Gao Bingxi, Yao Hong, Tu Hao, Wu Shuai\*

Brainware Terahertz Information Technology Co., Ltd., Hefei, Anhui 230088, China

**Abstract** In this paper, a passive quasi-optical terahertz imaging system for a human body based on a single detector with fast scan mechanism is presented. A resolution test chart for image quality evaluation is designed. The proposed imaging system comprises several reflection quasi-optical devices. Terahertz waves emitted from the human body were transmitted through a terahertz window into the imager and were sequentially reflected by a flapping mirror, rotating mirror, focusing mirror, and fixed mirror and finally reached the terahertz detector. The imaging system can obtain a full image of 0.65 m×1.9 m using only one detector, with a resolution of 2 cm and an imaging distance of 1.5 m within 2.5 s using a fast scanning mechanism comprising a flapping mirror and a rotating mirror. The imaging system is capable of displaying the profiles of suspected dangerous items carried on the human body, such as metals, liquids, ceramics, and powders. The detected items are automatically marked by software.

**Key words** imaging system; terahertz imaging; human body imaging; passive imaging; security check

**OCIS codes** 110.6795; 040.2235; 230.4040

## 1 引 言

太赫兹辐射是电磁波谱中有待开发的最后一个频段<sup>[1-2]</sup>,其频率位于微波和红外之间。与微波相比,太赫兹波的频率更高,用于成像时可获得更高的分辨率;与红外相比,太赫兹波可以更轻易地穿透衣服<sup>[3-5]</sup>;与X射线相比,太赫兹辐射光子能量低,不会对人体带来电离伤害,特别是被动太赫兹成像,设备本身不对外辐射太赫兹波,因此对被检测人员和设备操作人员都绝对安全。基于以上特点,太赫兹成像特别适用于对人体衣物内隐藏物品的检测,因

此在安全检查领域受到了越来越广泛的关注,太赫兹人体成像也因此成为太赫兹领域的一个重要研究方向<sup>[6-7]</sup>。

目前太赫兹成像的主要方法有准光学焦平面成像<sup>[8-12]</sup>、压缩感知成像<sup>[13-17]</sup>、扫描主动三维成像<sup>[18-19]</sup>和扇形波束扫描合成孔径成像<sup>[20-21]</sup>等。另外一些微波波段常用的合成孔径成像<sup>[22]</sup>和稀布阵成像<sup>[23-24]</sup>等成像技术在未来收发器件的工作频率提升后也可用于太赫兹波段的成像。在以上成像方法中,准光学焦平面成像结构简单,特别适合用于被动式太赫兹人体成像。但是目前太赫兹探测器的成本较高,

收稿日期: 2019-10-30; 修回日期: 2019-11-21; 录用日期: 2019-12-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0800505, 2016YFC0800508)

\* E-mail: shuaiwu52@126.com

还不具备像光学 CCD 那样的二维探测条件,因此需采用少量探测器配合机械扫描的方式实现对整个人体的成像。常见的扫描方式有两种。一种是二维平移台扫描,这种成像方式将太赫兹探测器或被成像物体安装在机械扫描架上进行二维扫描<sup>[25-26]</sup>,这种方式原理简单,容易实现,但成像速度慢,不适合用于对人体的成像。另外一种是一维探测阵列配合另一维机械扫描<sup>[27]</sup>,这种方式成像速度快,可达到准视频速度,但是探测单元数量多,成本高,不适合大规模应用。为了在成像速度和设备成本之间取得兼顾,近年来也出现了其他的扫描方式<sup>[28-29]</sup>。另外,压缩感知成像的一个重要优势就是可以在低成本的情况下实现快速成像。

本文采用一种基于单探测器的快速扫描被动太赫兹成像方法,以达到降低成本并使成像时间降低到实际应用中可接受程度的目的。通过设计太赫兹成像准光学系统和相应的机械扫描装置,采用商用太赫兹成像前端模块作为太赫兹探测器,设计匹配太赫兹探测器和太赫兹准光学系统的接收天线,完

成太赫兹成像样机的研制。利用自研的样机对各种物品进行了测试实验,并对太赫兹图像分辨率进行了定量评价。本成像系统可用于机场、铁路和体育场馆等各种公共场合对人体的安检检查。

## 2 成像系统设计

### 2.1 系统原理

系统工作原理如图 1 所示,物平面上任意一点发出的太赫兹波依次经摆动反射镜和旋转反射镜反射后,被聚焦反射镜会聚成像于太赫兹探测器。为了节省空间,在聚焦反射镜和探测器之间设置了固定反射镜用于折叠光路。探测器输出的模拟信号经过数据采集后传输至控制计算机,由控制计算机同时控制摆动反射镜和旋转反射镜的运动,通过对位于物平面上的被成像人员进行完整的扫描,得到人体的太赫兹图像。为防止异物进入设备,并从安全性考虑,在设备的太赫兹波入口处安装聚四氟乙烯板作为太赫兹透波窗口。

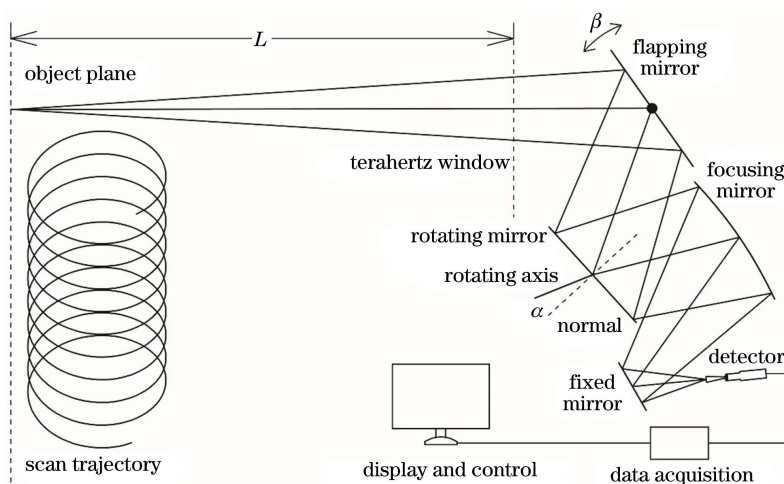


图 1 系统架构图

Fig. 1 System configuration

### 2.2 光学设计

太赫兹准光学成像通常有透射成像<sup>[8-9]</sup>和反射成像<sup>[10-12]</sup>两种方式。从光学设计的角度来讲,透射成像中一个透镜有两个面可以用于像差校正,仅用一个透镜即可校正旁轴像差,而一个反射镜只有一个反射面,若要校正旁轴像差,则需要两个及两个以上的反射镜。从接收效率的角度来讲,目前常见的由聚四氟乙烯或聚乙烯制成的太赫兹透镜,大约有 8% 的反射损失,而金属反射镜在太赫兹波段的反射率可达 99% 以上。由于本成像系统只有一个太赫兹探测器,只需优化主轴光路,无需优化旁轴像差,

因此只需一个聚焦凹面反射镜即可完成成像功能,并且在同等口径下可以获得更高的接收效率。

本成像系统的设计工作距离  $L=1.5\text{ m}$ ,成像线分辨率为  $2.0\text{ cm}$ 。根据成像总体设计指标需求,如图 2 所示,设定成像聚焦凹面反射镜的物距  $L_1=3\text{ m}$ ,像距  $L_2=0.8\text{ m}$ ,物方光路主轴与像方光路主轴之间的夹角  $\theta=40^\circ$ ,聚焦反射镜的有效口径为  $36\text{ cm}$ 。根据上述要求计算,凹面反射镜的反射面为旋转椭球面的一部分,物点和像点分别位于椭球面的两个焦点上,该椭球的长半轴为  $1900.0\text{ mm}$ ,短半轴为  $1455.8\text{ mm}$ 。根据椭球反射面的特性,从一

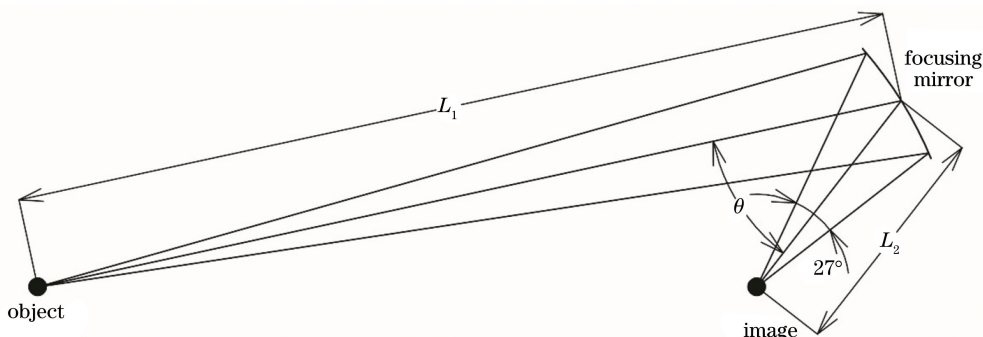


图 2 聚焦反射镜光路

Fig. 2 Optical path of the focusing mirror

个焦点上发出的电磁波,被椭球面反射后聚焦成像于另一个焦点上,其中没有几何光学像差,成像分辨率取决于衍射极限。根据成像光学理论,图 2 中物点发出的太赫兹波,在像点处由衍射效应决定的光强分布为<sup>[30]</sup>

$$I = I_0 \left[ \frac{2J_1(m)}{m} \right]^2, \quad (1)$$

式中: $I_0$  是艾里斑中心处的光强,也是光强的最大值; $J_1$  是一阶第一类贝塞尔函数; $m = \frac{\pi\omega \sin \phi}{\lambda}$ ,  $\omega$  是光学系统的口径,  $\phi$  是像平面上一点与光学系统中心的连线与光轴的夹角; $\lambda$  为光波波长。

对聚焦反射镜的线分辨率进行计算,计算步骤如图 3 所示:1)利用(1)式计算该聚焦反射镜对点目标的成像结果,进而得到聚焦反射镜成像的点扩展

函数;2)设定线对目标,如图 3 左侧所示,线宽从上到下依次为 1.5, 2.0, 2.5 cm,线条间距与线宽相等,线对分为横排和竖排两种排列方式;3)将线对目标与点扩展函数进行卷积,得到聚焦反射镜对线目标的成像结果,如图 3 右侧所示。从计算结果中可以看出,1.5 cm 的线对比较模糊,2.0 cm 的线对可以比较清晰地分辨开来,2.5 cm 的线对可以非常清晰地分辨开来。因此,该聚焦反射镜成像的设计线对分辨率可达 2.0 cm,符合设计要求。需要说明的是,当物平面上的物体偏离成像光路的主光轴时,成像系统产生几何光学像差,成像分辨率恶化。为避免这一问题,本成像系统在设计过程中需保证成像过程中物平面上每一点均处于物方光路的主光轴上,因此该系统物平面上的每一点均能达到仿真结果。

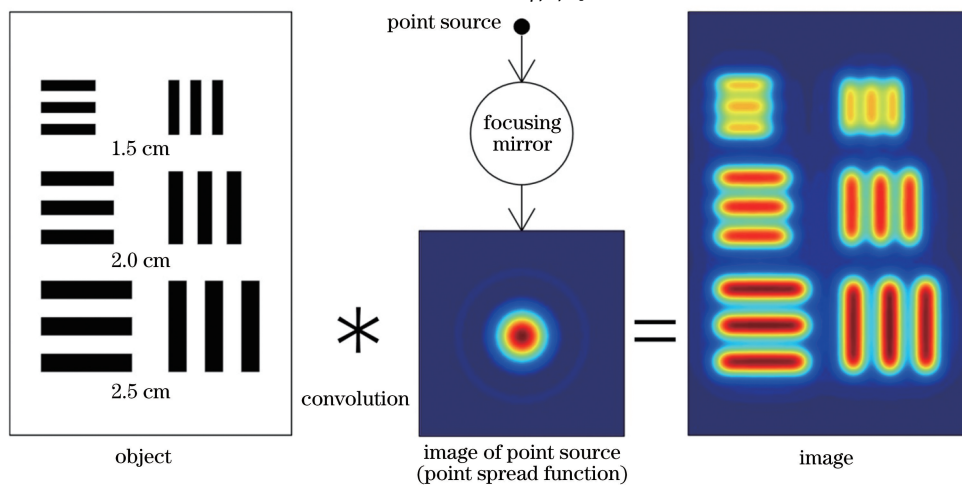


图 3 成像分辨率仿真结果

Fig. 3 Simulation results of image resolution

### 2.3 探测与数据采集

探测器采用 Farran 公司的 W 波段成像前端模块作为太赫兹探测器,该成像前端的工作频率为 75~110 GHz,中心工作频率为 94 GHz,增益为

50 dB,噪声系数为 3.5 dB,灵敏度为 1200 mV/mW。探测器的输入为 WR-10 波导,输出正比于输入太赫兹功率的直流差分电压信号。成像系统中采用数据采集卡对太赫兹探测器的输出电压信号进行采集

后传输至上位机进行处理。

本研究设计了用于接收太赫兹辐射的角锥喇叭天线,如图4所示。图4(a)显示了94 GHz时的天线辐射方向图,E面和H面的10 dB波束宽度分别

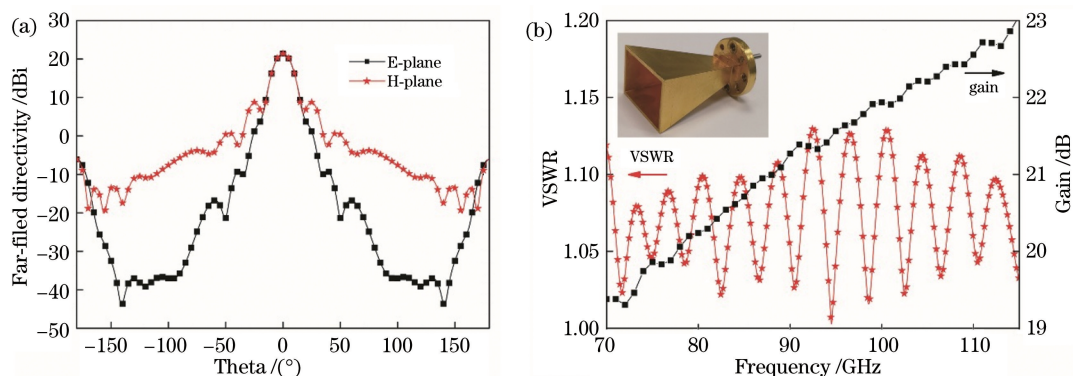


图4 天线的参数图。(a)天线的方向图;(b)天线的电压驻波比和增益,插图为天线的实物

Fig. 4 Parameters of the antenna. (a) Radiation patterns of the antenna; (b) VSWR and gain of the antenna, in which the inset shows the antenna

## 2.4 扫描机构

图2所示的光学系统,只能对一个点目标进行成像,如需对完整的人体进行成像,还需在光学系统的基础上增加扫描机构。扫描机构由两部分组成,如图1所示,第一部分是圆形旋转反射镜,其转轴通过圆心并与镜面法线方向形成夹角 $\alpha$ 。旋转反射镜绕其转轴连续旋转,扫描轨迹是一个圆,夹角 $\alpha$ 的大小决定了圆的直径,也就是成像视场的宽度。第二部分是矩形摆动反射镜,其转轴位于反射面上,并垂直于图1的纸面方向。摆动反射镜绕其转轴来回摆动,摆动幅度角为 $\beta$ , $\beta$ 的大小决定了扫描视场的高度。旋转反射镜转动扫描形成的圆轨迹在摆动反射镜摆动扫描时上下移动,形成图1左边的螺旋扫描轨迹,覆盖了整个被成像人体的二维平面。从扫描轨迹图中可以看出,扫描区域可以分为上、中、下三部分。上、下两部分被扫描了一次,中间部分被扫描了两次,即扫描轨迹有重复,而且重复扫描的部分在轨迹上分别和上、下两部分连续。因此在图像重构时,比较方便的方法是将中间重复扫描的部分分别与上、下两部分一起构图,然后再拼合起来去除重复部分形成完整图像。

本扫描方式的优点在于:转动反射镜和摆动反射镜位于物方,扫描至任何位置都可保证成像光学系统工作在最佳位置,不会带来几何光学像差,系统的分辨率由衍射极限决定,故在扫描过程中,物平面上每一点的分辨率都能达到图3中的仿真结果。

为 $27.4^\circ$ 和 $26.8^\circ$ ,均接近 $27^\circ$ ,与图2中像点与聚焦反射镜形成的张角 $27^\circ$ 匹配,波导接口为WR-10,与探测器匹配。图4(b)显示了天线的电压驻波比(VSWR)和增益,插图中显示了天线实物。

## 3 成像结果与图像处理

### 3.1 图像重构与处理

如图5所示,图像重构与处理步骤如下:

- 1) 图像重构:根据扫描轨迹分别重构出原始图像的上扫描区域和下扫描区域,得到图(a)和图(b);
- 2) 图像拼接:将图(a)和图(b)的重合区域进行融合形成平滑无缝全景图像,得到图(c);
- 3) 图像预处理:通过图像灰度局部增强和加权均值滤波,提升图像清晰度和信噪比,得到图(d);
- 4) 增加图像清晰度:对图(d)进行非线性拉伸处理,提升图像对比度,得到图(e);
- 5) 伪彩色处理:对灰度图像(e)上的每一个像素点,取得该点的灰度值并送入三个颜色通道实施不同的颜色变换,产生的相应的R、G、B亮度值,即所求彩色图像对应像素点的彩色值,得到图(f);
- 6) 提取轮廓线:对图(f)进行对比度增强处理,然后对增强处理图像相邻像素的灰度差和设定阈值进行比较,若相邻像素灰度差大于设定阈值,则认为该点是边界点,反之则不是边界点,得到图(g);
- 7) 目标自动标记:对图(g)分别提取出外边界点和内边界点,若该点是外边界点,通过比较边界点相邻像素间的横向距离来确定该点是不是特征点,若该点是内边界点,则认为该点是特征点,对特征点区域作矩形框处理,并将矩形框叠加到经对比度增强处理的图片(f)中,得到图(h)。

从图5(h)中可以看出,本成像系统能够有效检

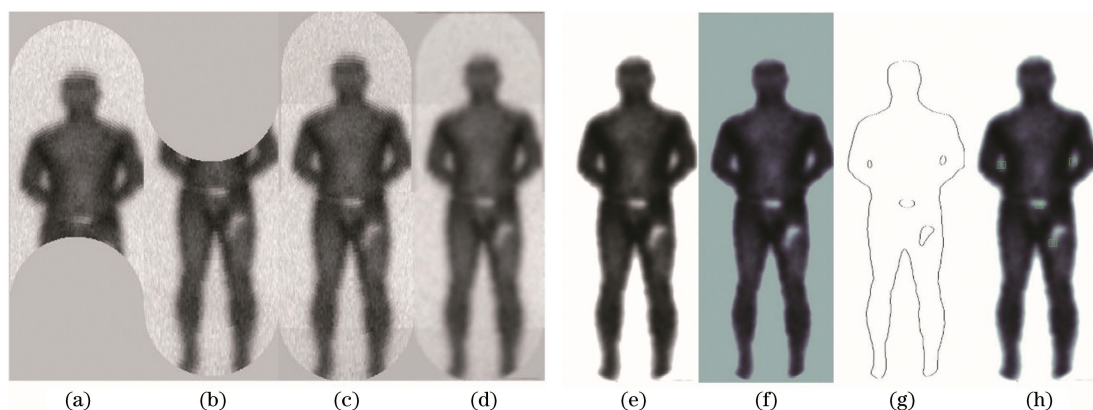


图5 图像重构与处理流程。(a)上半身图像;(b)下半身图像;(c)全身图像;(d)降噪处理后的图像;  
(e)增加对比度图像;(f)伪彩色图像;(g)轮廓图;(h)自动标记图像

Fig. 5 Image reconstruction and processing. (a) Image of the upper part of the body; (b) image of the lower part of the body; (c) image of the full body; (d) image after denoising; (e) image after contrast improving; (f) pseudo color image; (g) profile image; (h) image with hidden objects auto-marked

测出人员腰部的腰带扣和裤兜里的物品,并进行自动标记。但是对于手臂和身体之间形成的闭环空间,也被错误地当成物品进行了标记。这是本文中采用的自动标记算法的缺陷,后期我们将采用深度学习方法进一步提高自动标记准确度,提升成像系统的智能化水平。

### 3.2 测试结果

成像系统的样机如图6所示,为了评估成像系统的工作性能,进行了分辨率测试和实际物品检测测试。针对分辨率测试,参照USAF1951分辨率测试方法<sup>[11]</sup>设计了分辨率测试卡,如图7(a)所示,分辨率测试卡图案与图3左侧的仿真计算模型完全一致。实际测试中采用吸波材料(AN-72)作为测试卡的本底材料,将不同宽度的铜胶带作为线条贴在吸波材料表面形成测试线对,并对吸波材料进行加热,使其发射出的太赫兹波强度与人体辐射相当,以便模拟人体辐射,达到最接近真实情况的测试结果。为测试成像系统的实际物品检测功能,本研究测试了金属枪模型、液体(水)、陶瓷刀和粉末(面粉)4种样品,如图7(b)所示。

为了更真实地反映成像系统的工作性能,本研究给出了原始未经任何处理的图像,如图8所示,图中黑色表示强太赫兹信号,白色表示弱太赫兹信号。图8(a)显示了成像系统对均匀背景的成像结果。图8(b)显示了成像系统对图7(a)中分辨率测试卡的成像结果,从图中可以看出,1.5 cm的线对比较模糊,无法分辨,2.0 cm的线对可以比较清晰地分辨开来,2.5 cm的线对可以非常清晰地分辨开来,这与图3中的仿真计算结果完全一致。因此,该成



图6 样机照片

Fig. 6 Photos of the prototype

像系统的分辨率为2.0 cm。图8(c)~(g)分别显示了人体未携带任何物品(c)以及人体分别携带粉末(d)、金属枪模型(e)、陶瓷刀(f)和液体(g)的成像结果,从图中可以看出,4种物品的轮廓均能通过本太赫兹成像系统有效地显示出来。

沿图8(b)中虚线的剖面曲线如图9所示。从图9中可看出,1.5 cm的3条铜胶带完全融合到一起,形成了一条不可分辨的粗线,而2.0 cm和2.5 cm的铜胶带则可以清晰地分辨出来,因此成像系统的分辨率为2.0 cm。2.0 cm的成像分辨率,离很多公共场所的实际安检需求还有一定差距。按照光学成像理论,可以通过增大光学系统孔径、减小成像距离和提高工作频率等方法来提高成像分辨率。增大光学系统孔径会增大整个设备的体积,减小成

像距离会带来更大的光学像差,这两种方法均不是最佳选择。而提高工作频率可以在不影响其他性能

的前提下提高成像分辨率,随着未来太赫兹探测技术的发展,将会是最可行的方案。

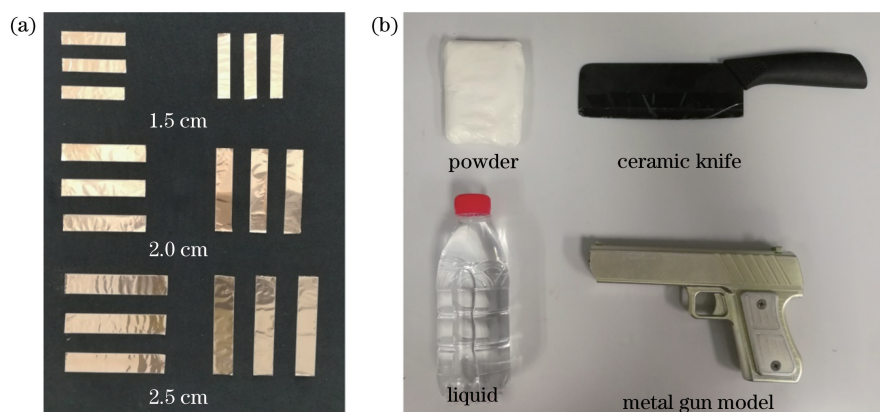


图 7 测试器材。(a)分辨率测试卡;(b)测试样品

Fig. 7 Test equipment. (a) Resolution test chart; (b) samples

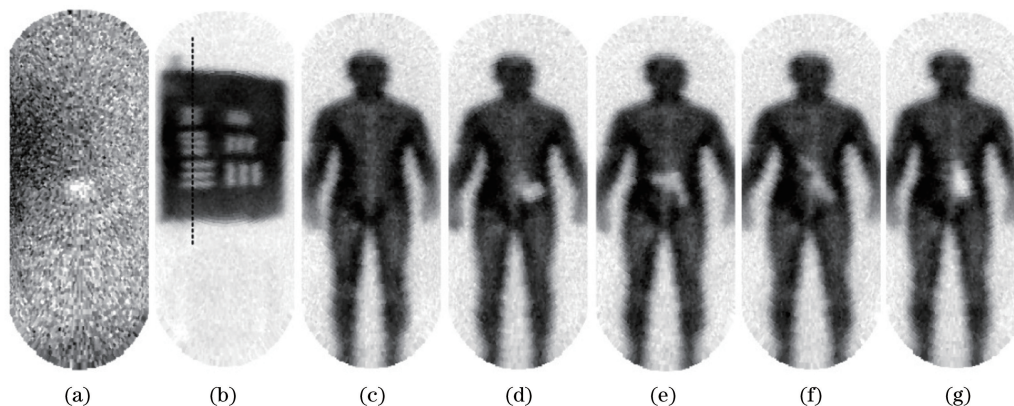


图 8 成像系统性能测试结果。(a)背景;(b)分辨率测试卡;(c)人体;(d)人体携带粉末;(e)人体携带金属枪模型;(f)人体携带陶瓷刀;(g)人体携带液体

Fig. 8 Performance of the imaging system. (a) Background; (b) resolution test chart; (c) human body; (d) human body with powder; (e) human body with metal gun model; (f) human body with ceramic knife; (g) human body with liquid

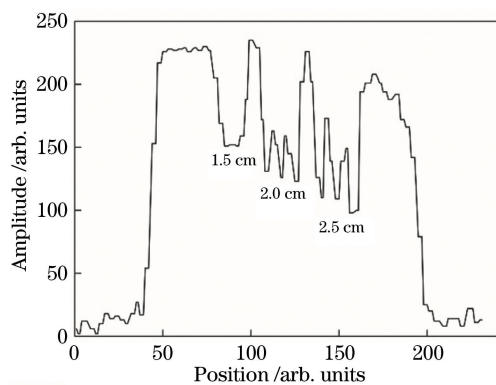


图 9 图像分辨率

Fig. 9 Resolution of the image

成人体的太赫兹成像,并能检测出人体衣物内隐藏的物品。后续将对该系统进行另外三个方面的改进,一是通过增加探测器的数量来提升成像速度,二是通过提高工作频率来提升图像分辨率,三是通过深度学习提升目标自动标注的准确度。本成像系统作为安检设备,可以在不接触被检测人员的情况下,显示人体衣物内隐藏的金属、液体、陶瓷和粉末等潜在危险物品的轮廓,对安检效果有大幅提升。因为设备本身不对外辐射太赫兹波,所以本系统对被检测人员和设备操作人员都绝对安全,具有快速、可靠、安全和保护隐私等优点,可在各种公共场所的安检中得到广泛的应用。

## 4 结 论

实现了一种快速、低成本、被动式太赫兹人体成像系统,该系统仅需一个太赫兹探测器就可快速完

## 参 考 文 献

[1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.

- [2] Dhillon S S, Vitiello M S, Linfield E H, et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(4): 043001.
- [3] Appleby R, Wallace H B. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(11): 2944-2956.
- [4] Knipper R, Brahm A, Heinz E, et al. THz absorption in fabric and its impact on body scanning for security application [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5(6): 999-1004.
- [5] Bjarnason J E, Chan T L J, Lee A W M, et al. Millimeter-wave, terahertz, and mid-infrared transmission through common clothing [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(4): 519-521.
- [6] Appleby R, Robertson D A, Wikner D. Millimeter wave imaging: a historical review [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10189: 1018902.
- [7] Zhao G, Shen Y, Wang J, et al. New progress of active and passive terahertz imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10030: 100300Q.
- [8] Sato H, Sawaya K, Mizuno K, et al. Development of 77 GHz millimeter wave passive imaging camera [C] // 2009 IEEE Sensors, October 25-28, 2009, Christchurch, New Zealand. New York: IEEE, 2009: 1632-1635.
- [9] Yeom S, Lee D S, Son J Y, et al. Real-time outdoor concealed-object detection with passive millimeter wave imaging [J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 2530-2536.
- [10] Luukanen A, Grönberg L, Haarnoja T, et al. Passive THz imaging system for stand-off identification of concealed objects: results from a turn-key 16 pixel imager [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6948: 69480O.
- [11] Heinz E, May T, Born D, et al. Towards high-sensitivity and high-resolution submillimeter-wave video imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8022: 802204.
- [12] Anderton R N, Appleby R, Beale J E, et al. Security scanning at 94 GHz [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6211: 62110C.
- [13] AlSaafin W, Villena S, Vega M, et al. Compressive sensing super resolution from multiple observations with application to passive millimeter wave images [J]. *Digital Signal Processing*, 2016, 50: 180-190.
- [14] Qiao L B, Wang Y X, Shen Z J, et al. Compressive sensing for direct millimeter-wave holographic imaging [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(11): 3280-3289.
- [15] Augustin S, Hieronymus J, Jung P, et al. Compressed sensing in a fully non-mechanical 350 GHz imaging setting [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, 36(5): 496-512.
- [16] Zhao Y Q, Zhang L L, Zhu D C, et al. Single-pixel terahertz imaging based on compressed sensing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(s1): s111003. 赵亚芹, 张亮亮, 祝德充, 等. 基于压缩传感的单个太赫兹成像 [J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s111003.
- [17] Wang Y Y, Ren Y C, Chen L Y, et al. Terahertz wave wide-beam imaging technology based on block compressive sensing theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0407001. 王与焯, 任宇琛, 陈霖宇, 等. 基于分块压缩感知理论的太赫兹波宽光束成像技术 [J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0407001.
- [18] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. Penetrating 3-D imaging at 4- and 25-m range using a submillimeter-wave radar [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, 56(12): 2771-2778.
- [19] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. Fast high-resolution terahertz radar imaging at 25 meters [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7671: 76710Y.
- [20] Gu S M, Li C, Gao X, et al. Terahertz aperture synthesized imaging with fan-beam scanning for personnel screening [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(12): 3877-3885.
- [21] Li C, Fang G. Terahertz imaging for security-algorithm and system realization [J]. *Terahertz Science and Technology*, 2016, 9(1): 19-36.
- [22] Sheen D M, McMakin D L, Hall T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, 49(9): 1581-1592.
- [23] Ahmed S S, Schiessl A, Schmidt L P. A novel fully electronic active real-time imager based on a planar multistatic sparse array [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, 59(12): 3567-3576.
- [24] Caba W, Boreman G. Active sparse-aperture millimeter-wave imaging using digital correlators [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, 32(4): 434-450.
- [25] Karpowicz N, Zhong H, Zhang C L, et al. Compact

- continuous-wave subterahertz system for inspection applications[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(5): 054105.
- [26] Wang B, Wang X K, Yu Y, et al. Terahertz linear array fast scanning imaging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614029.  
王彪, 王新柯, 俞跃, 等. 太赫兹线阵快速扫描成像 [J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614029.
- [27] Sato H, Sawaya K, Mizuno K, et al. Passive millimeter-wave imaging for security and safety applications[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7671: 76710V
- [28] Meng Y, Qing A Y, Lin C, et al. Passive millimeter wave imaging system based on helical scanning [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 7852.
- [29] Zhang J S, Zhu W W, Zhao Y J, et al. Passive THz imaging system based on the crank-rocker mechanism [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1211006.  
张镜水, 朱维文, 赵跃进, 等. 基于曲柄摇杆机构的被动太赫兹波成像系统 [J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1211006.
- [30] Smith W J. Modern optical engineering [M]. New York: McGraw-Hill, 2000: 157-160.