

太赫兹成像技术在人体安检领域的研究进展

蒋林华, 王尉苏, 童慧鑫, 岳贵阳, 黄 慧

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 分析了太赫兹波的特点及其在人体成像安检中应用的潜在优势, 概述了国内外太赫兹人体成像安检的发展现状, 总结了太赫兹人体成像安检技术正在向阵列化、多频段、复合式方向发展, 并对国内外学者在太赫兹图像处理算法上的研究成果进行了总结。

关键词: 太赫兹人体成像; 隐藏物品检测; 人体安检; 图像处理

中图分类号: TN 29; TP 751

文献标志码: A

Research Progress of Terahertz Imaging in the Field of Human Security

JIANG Linhua, WANG Weisu, TONG Huixin, YUE Guiyang, HUANG Hui

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The characteristics of terahertz wave and the potential advantages in its application to the human imaging security were analyzed. The status of terahertz human imaging security at home and abroad was briefly summarized. It is concluded that the terahertz human imaging security technology is developing towards the array and multi-band and composite direction. The research progress and the results of domestic and foreign scholars on the terahertz image processing algorithms were summarized.

Keywords: terahertz human imaging; hidden object detection; human security; image processing

近年来, 随着恐怖爆炸袭击等事件的频繁发生, 人们对于反恐安防提出了更高的要求。特别是在人员聚集的公共场所, 如何实现对密集人群中恐怖分子携带的刀具、枪支及炸药等隐藏武器进行快速检测和预警, 是目前公共安全面临的一个难题。由于 X 射线电子能量较高, 容易对被检测物质产生电离性伤害, 所以, 当前市场上主流

的 X 射线安检扫描仪不能直接对人体进行安全扫描, 机场“金属门”式的安检方法无法排除陶瓷刀具、炸药等危险品, 需要配以“搜身”式的检查, 从而带来效率低下、隐私侵犯等一系列的问题。目前人体安防检测技术的不足, 促使世界各国都在积极探索研究更先进的人体安全检查新技术、新设备。近年来, 随着太赫兹应用的发展, 人们

收稿日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61775139); 上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位计划 (2013-51)

第一作者: 蒋林华 (1977-), 男, 教授. 研究方向: 电子光学图像处理、电子显微学. E-mail: lhjiang@usst.edu.cn

对太赫兹成像技术产生了浓厚的兴趣, 发展太赫兹人体安检仪可以较好地解决上述问题。

太赫兹成像技术已被证明是测量拥有远红外特性介质的一种强有力的光谱测量技术, 可以测量半导体、超导体、液体和气体^[1-4]。其优点表现在: a. 太赫兹波可穿透衣物、纸张、塑料、皮革及陶瓷等绝缘材料, 对金属材料有强反射特性, 可以实现对人员携带的隐藏物品进行穿透衣物探测和成像^[3-5]; b. 随着太赫兹源功率水平和探测灵敏度的提高, 一些性能优良的太赫兹人体安检仪能够在较长的范围内对携带危险物品的人员提供早期的威胁预警; c. 相比传统的 X 射线安检扫描仪, 太赫兹人体安检仪不会在生物组织中产生有害的光致电离而对人体造成伤害^[3-6]。随着太赫兹源和检测技术的发展, 新的太赫兹人体安检仪可以获取更高分辨率的图像。

本文从太赫兹波的特点出发, 分析其在成像安检中的应用优势, 并重点对国内外太赫兹人体成像技术硬件和图像处理算法方面的研究现状作了调研和分析。

1 太赫兹成像安检技术分析

太赫兹 (THz) 成像技术作为一种新兴的安全检查技术以它独特的优异性能受到世界各国的广泛关注。图 1 显示了一个具有较高分辨率图像的太赫兹人体安检仪。如图 2 所示, 太赫兹的频率范围对应 0.1~10 THz (THz=10¹² Hz), 是介于微波和红外波段之间的一种特殊电磁波^[7]。近年来, 随着太赫兹技术的发展和工艺水平的提升, 目前研制的太赫兹源、检测器等关键器件的性能指标已逐步具备满足安检应用等近距成像要求的条件。根据成像模式的区别, 太赫兹安检成像可分为被动式和主动式。被动式成像系统自身并不发射任何射线或者能量, 利用物体和人身体自身产生和反射环境的太赫兹波的差异进行对比成像^[8]; 主动式成像系统发射太赫兹波信号并对目标散射的回波信号进行探测处理, 从而获得目标图像。主动式成像与被动式成像各有优劣, 被动式成像结构简单, 无辐射安全问题, 但成像质量受环境影响大; 而主动式成像不受温度和周围辐射的影响, 环境适应性要远强于被动式成像。主动式成像分辨率高, 图像更清晰, 但系统结构复杂、成本高。



图 1 太赫兹人体安检仪对隐藏危险品的检测案例
Fig.1 Terahertz human security instrument for the detection of hidden dangerous goods

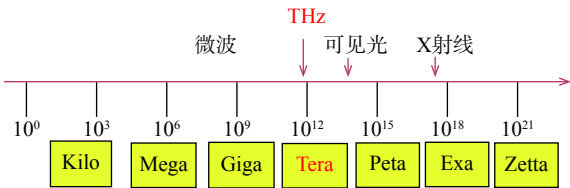


图 2 太赫兹在全波段电磁波中的频谱范围
Fig.2 Terahertz range in the spectrum of full-band electromagnetic waves

2 太赫兹成像安检技术研究现状

太赫兹成像安检技术已引起国内外研究者的广泛关注, 特别是欧美投入大量人力研究太赫兹反恐安检系统, 并取得了较大的进展, 已有一些被动式成像安检仪产品问世。例如, 英国 Digital Barriers 公司的 THRUVISION 系列产品, 这是目前全球最先进的太赫兹安检系统之一, 系统非常紧凑, 可以方便地部署在交通关口位置。由于它采用完全被动式传感器系统, 所以, 在运行过程中不会对人体有任何危害, 其应用场景及实物图如图 3 所示^[9], 它能够“看到”人身体上的大部分的可疑材料, 如金属、陶瓷、塑料、货币、液体, 凝胶和粉末。产品工作在 0.25 THz 波段, 探测距离在 4~10 m, 成像速度可以达到 6 帧/s。

太赫兹主动式成像样机的研究相比被动式要滞后一些, 目前很多都还处于实验室研发阶段。主动式太赫兹成像系统使用大功率相干光照和超



图3 太赫兹人体安检仪 THRUVISION 系列产品

Fig.3 Terahertz human security instrument THRUVISION series products

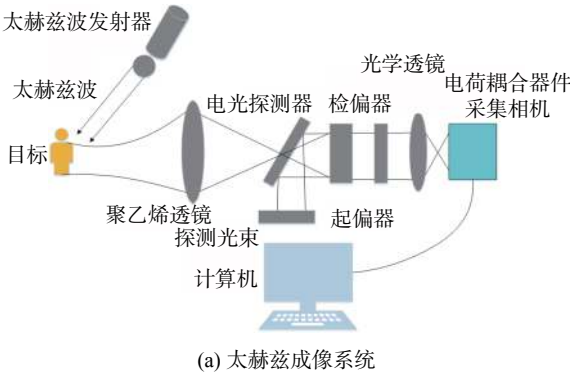
低噪声外差检测，较被动式成像显示出极大的发展前景。目前，主动式太赫兹成像系统还面临诸多操作缺点，例如，要求低温探测器或笨重的激光光源。2007年美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)研制了第一代全固态有源的高分辨率太赫兹成像样机，工作频率在576~589 GHz之间，采用扫频FMCW(调频连续波)雷达技术获取3D图像。典型的采集时间是，每采集一个像素需要100 ms，采集一幅50像素×50像素的图像需要5 min，拥有厘米级的分辨率，它的主要特点是将雷达技术融进了主动式太赫兹成像技术^[10]。2008年，该实验室在第一代成像系统基础上进行改进，在第二代成像系统中第一次使用了超带宽的发射源，将带宽提高到28.8 GHz，使3D图像每一个维度上的分辨率较前一代都提高了，达到了亚厘米级，并且将探测距离范围提高到4~25 m，但是，其缺点是实时帧速率还是比较慢。相比于第一代成像系统，新一代成像系统一方面采用混合式直接数字合成与锁相环合成器代替YIG(Yttrium Iron Garnet)合成器来产生线性调频信号，这是因为

高分辨率需要高线性调频脉冲；另一方面在光束的聚焦和扫描上采用铝离轴椭球面反射镜，取代了第一代的聚四氟乙烯材料的平凸透镜。由于铝离轴椭球面反射镜较低的吸收损耗和反射损耗，使得成像质量得到了很大的改善。但是，在成像速度上，由于信号处理阶段额外的延迟和系统的机械运动，使得获取图像的时间大概为6 min，并没有获得很大的改进^[11]。该实验室在随后第三代的开发过程中重点提高了系统的成像速度，获得更加可靠的成像质量，在这新一代系统中依然采用扫频FMCW(调频连续波)雷达技术获取3D图像，进一步将带宽提高到30 GHz。为了优化成像分辨率，系统采用补偿算法来补偿信号失真^[12]。

2012年，我国首次研制了国内太赫兹安检仪产品样机，实现了以3~5帧/s的速度对人体进行1 m×2 m大尺寸被动成像，分辨率达到2 cm，性能能够替代国外同类产品。2014年，中国研制的太赫兹安检仪亮相在第九届中国国际国防电子展览会上。

2014年上海理工大学的庄松林院士领衔的科研团队掌握了太赫兹源、功能器件等核心技术，研制出具有自主知识产权的94 GHz人体安检仪样机。目前上海理工大学对宽频太赫兹吸收器等功能器件开展了相关研究，并升级了被动式太赫兹多通道成像系统样机，如图4所示。同时对成像系统与目标识别进行了理论研究^[13]。

近年来，太赫兹成像安检技术更是向着阵列化、多频段、复合式的发展方向。一方面，阵列化有助于提升成像帧速率；另一方面，通过多频段、复合式来提高探测和识别能力。



(a) 太赫兹成像系统



(b) 太赫兹安检仪

图4 太赫兹成像系统及太赫兹安检仪

Fig.4 Terahertz imaging system and terahertz security instrument

3 太赫兹图像处理技术研究现状

目前由于探测器性能等原因，实际获得的连续太赫兹波图像特别是被动式太赫兹图像具有以下特点：

- a. 受探测灵敏度和电噪声等因素影响，太赫兹成像分辨率相对较低；
- b. 受光波衍射干涉的影响，图像中存在明显的条纹；
- c. 由于空气中水分对太赫兹波的吸收、大气衰减等，使得太赫兹图像对比度低、边缘模糊。

这些特点给连续太赫兹波图像的处理工作带来了许多困难。目前国内外的学者已经开始针对太赫兹图像中的各种干扰因素进行研究，去除噪声，提高图像质量，并分割识别出太赫兹图像中的可疑目标物，提高太赫兹人体安检仪的实用性。

在提高太赫兹图像质量方面，国内外学者对去除图像噪声和提高图像分辨率进行了研究，如滤波和复原。当前研究主要运用的算法有空域或频域滤波、高斯滤波^[14]、维纳局部滤波^[15]，以及这些技术的综合应用，还有后面发展起来的各种复杂的滤波方法，如各向异性扩散滤波^[16]、基于全变分模型的图像滤波^[17]、小波滤波、非局部均值 NLM(NL-means)算法^[18]等。这些滤波方法在一定程度上提高了太赫兹图像的质量。

徐利民等^[19]综合运用“十”字和 45 °“十”字中值滤波、高斯卷积、频域增强等方法实现对太赫兹图像的去噪、增强。文献[20]利用边缘保护的棒式滤波器方法对太赫兹图像的振幅和相位图像分别进行了滤波处理，然后再进行基于模糊规则的图像融合。通过简单的滤波与融合方法，能够在噪声特性不确定的情况下利用太赫兹图像对复合材料缺陷进行有效的检测。文献[21]利用小波变换的方法对连续太赫兹波图像中出现的条纹进行滤除，并使用小波复原技术得到没有条形噪声的图像。文献[22]针对目前连续太赫兹波图像存在干涉条纹、对比度较低、图像较模糊等特点，分别从去除条纹、提高图像对比度及增强图像边缘等角度研究了连续太赫兹波图像的增强算法。文献[23]针对太赫兹系统面阵成像图像模糊的特点，应用 NLM 算法对太赫兹图像进行了去噪处理，这种滤波效果优于均值滤波效果。

另一方面，为了提高太赫兹图像的分辨率，很多学者也开展了相关研究。文献[24]在前人研究基

础上提出了一种基于马尔可夫随机场理论的被动式太赫兹图像复原算法，对原始图像进行去噪和增强的预处理之后，在贝叶斯分析的基础上增加马尔可夫约束项进行图像复原。结果表明，该算法可以在被动式太赫兹图像的噪声滤除和边缘信息保持上取得较好的平衡，从而大幅度地提高了太赫兹安检图像的目标分辨能力。第二炮兵工程大学的谢云宇等^[25]利用超分辨率重建模型，采用基于梯度下降的最大后验概率法实现了超分辨率图像的重建，并将超分辨率重建技术应用于太赫兹领域，重建图像降低了图像的噪声，并且在不改变成像系统硬件的基础上，提高了太赫兹图像的分辨率。Wang 等^[26]提出改进的凸集投影分形插值技术来提高分辨率。文献[27]提出了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。

在太赫兹图像目标自动分割方面。冯艳萍^[28]利用 THz 图像的特点，采用阈值分割和边缘检测等数字图像处理技术将可疑物分割出来，然后提取可疑物区域的有效特征来确定是否为枪支(图 5)。Yue 等^[29]使用形态学分类算法和双边轮廓算法，以较低的时间成本对人体轮廓进行精度较高的分割和提取。Tong 等^[30]描述了从模糊的太赫兹图像进行检测和分割隐藏对象的有效和实时的算法。耶鲁大学的 Shen 等^[31]提出了一种多级阈值方法来分割出太赫兹图像中的可疑物目标(图 6 和图 7)，这种方法是基于高斯混合模型和图像边缘强度等值线的几何分析所提出的，并且还介绍了随机游走算法在太赫兹图像分割上的效果。Lee 等^[32]提出了多级期望最大化方法将隐藏的可疑物从太赫兹图像中分离出来(图 8)，其方法是采用混合高斯模型对图像直方图建模后，首先使用一次 EM 算法(期望最大化算法)分别将身体区域从图像中分割出来，在此基础上再使用 EM 算法将可疑物目标区域从身体区域分割出来。庞培法布拉大学的 Martínez 等^[33]提出了基于区域的主动活动模型来分割可疑物目标(图 9)，这种方法对噪声和灰度强度的不均匀性具有很好的鲁棒性。



图 5 对太赫兹图像分割结果图

Fig. 5 Graph of the terahertz image segmentation result



图 6 采用多级阈值对太赫兹图像分割结果图

Fig. 6 Graph of the terahertz image segmentation result with multi-level thresholds

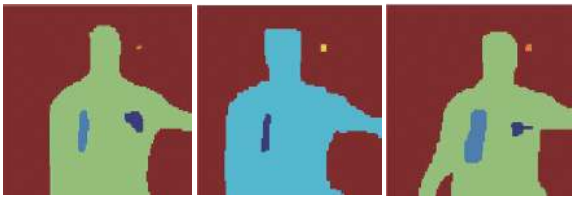
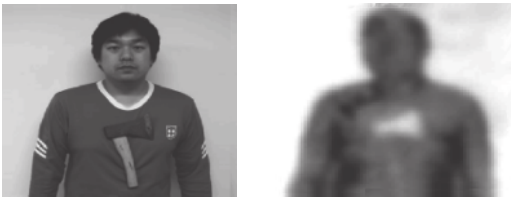


图 7 采用随机游走算法对太赫兹图像分割结果图

Fig. 7 Graph of the terahertz image segmentation result using random walk algorithm



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

图 8 期望最大化算法对太赫兹图像分割结果图

Fig.8 Graph of the terahertz image segmentation result using expectation-maximization algorithm

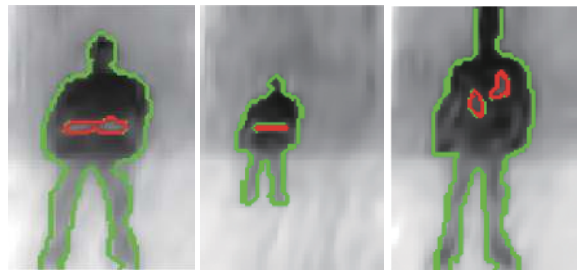


图 9 区域分割算法对太赫兹图像分割结果图

Fig. 9 Graph of the terahertz image segmentation result using region segmentation algorithm

4 结论与展望

随着对太赫兹技术研究的不断深入，研究中产生的衍生品如辐射源、检测器等关键器件已基本可满足人体成像安检的需求。太赫兹人体成像安检技术正在向阵列化、多频段、复合式方向发展。另外，太赫兹图像处理算法也取得了诸多研究成果，若能与太赫兹安检仪硬件相互配合，可实现对人员携带的炸药、毒品等的自动有效监测，大大降低人力消耗。太赫兹成像安检技术不仅可应用于机场、

地铁、车站等的安检，而且可扩展应用于广场、集会场所，以及需要对恐怖分子进行监视与预警的重要部门，具有重要的经济效益和社会价值。

参考文献：

[1] HU B B, NUSS M C. Imaging with terahertz waves[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(16): 1716–1718.

[2] CHEN L, ZHU Y M, ZANG X F, et al. Mode splitting transmission effect of surface wave excitation through a metal hole array[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(3): e60.

[3] ZHANG X C, SHKURINOV A, ZHANG Y. Extreme terahertz science[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 16–18.

[4] 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.

[5] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2010, 22(6): 703–707.

[6] TRIBE W R, NEWNHAM D A, TADAY P F, et al. Hidden object detection: security applications of terahertz technology[C]//*Proceedings of the SPIE, Terahertz and*

- Gigahertz Electronics and Photonics III. 2004, 5354: 169-176.
- [7] SHUR M. Terahertz technology: devices and applications [C]//Proceedings of ESSDERC '05. Grenoble: ESSDERC, 2005: 13-21.
- [8] KOWALSKI M, KASTEK M, WALCZAKOWSKI M, et al. Passive imaging of concealed objects in terahertz and long-wavelength infrared[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(17): 3826-3833.
- [9] 成彬彬, 李慧萍, 安健飞, 等. 太赫兹成像技术在站开式安检中的应用[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(6): 843-848.
- [10] COOPER K B, DENGLER R J, CHATTOPADHYAY G, et al. A high-resolution imaging radar at 580 GHz[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008, 18(1): 64-66.
- [11] 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.
- [12] COOPER K B, DENGLER R J, LLOMBART N, et al. THz imaging radar for standoff personnel screening[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 169-182.
- [13] 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.
- [14] LINDENBAUM M, FISCHER M, BRUCKSTEIN A. On Gabor's contribution to image enhancement[J]. *Pattern Recognition*, 1994, 27(1): 1-8.
- [15] Yaroslavsky L P. Digital picture processing[M]. New York: Springer-Verlag 1985.
- [16] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(7): 629-639.
- [17] RUDIN L I, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[C]//Proceedings of the Eleventh Annual International Conference of the Center for Nonlinear Studies on Experimental Mathematics: Computational Issues in Nonlinear Science. Los Alamos, New Mexico, USA: Elsevier North-Holland, Inc., 1992: 259-268.
- [18] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A review of image denoising algorithms, with a new one[J]. *Multiscale Modeling & Simulation*, 2005, 4(2): 490-530.
- [19] 徐利民, 范文慧, 刘佳. 太赫兹图像的降噪和增强[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(10): 2865-2870.
- [20] HOUSHMAND K, TIZHOOSH H R. Filtering and fusion of THz images for defect detection in composite materials [C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 2008: 1301-1305.
- [21] YU F, HUI M, SONG Q, et al. The application of the wavelet transform to the continuous wave Terahertz imaging[C]//Proceedings of 2007 Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronics Conference. Shanghai, China: IEEE, 2007: 502-504.
- [22] 李海涛. 连续太赫兹波图像增强算法的研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2008.
- [23] 李琦, 夏志伟, 丁胜晖, 等. 采用非局部均值的连续太赫兹图像去噪处理[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 517-522.
- [24] 孙骁, 赵源萌, 邓朝, 等. 基于马尔可夫约束的被动式太赫兹图像复原[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 207-212.
- [25] 谢云宇, 胡昌华, 师彪, 等. 超分辨率重建技术及其在太赫兹图像中的应用[J]. *系统仿真技术*, 2013, 9(4): 306-309.
- [26] WANG X, WU J, WANG J, et al. Super-resolution analysis for passive microwave images using FIPOCS [C]//Proceedings of the SPIE, Fifth International Conference on Machine Vision: Computer Vision, Image Analysis and Processing. 2013, 8783: 878305.
- [27] 徐英, 洪治. 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.
- [28] 冯艳平. 人体隐蔽携带刀具、枪支危险物的 THz 图像识别[D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [29] YUE G Y, YU Z H, LIU C, et al. Identification and annotation of hidden object in human terahertz image [M]//KIM K, JOUKOV N. Information Science and Applications 2017. Singapore: Springer, 2017.
- [30] TONG H X, PEI S W, JIANG L H, et al. A low-power-consumption and high efficiency security system for automatic detection of concealed objects in human body [C]//Proceedings of the 7th International Green and Sustainable Computing Conference. Hangzhou, China: IEEE, 2016: 1-5.
- [31] SHEN X L, DIETLEIN C R, GROSSMAN E, et al. Detection and segmentation of concealed objects in terahertz images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(12): 2465-2475.
- [32] LEE D S, YEOM S, SON J Y, et al. Automatic image segmentation for concealed object detection using the expectation-maximization algorithm[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10659-10667.
- [33] MARTÍNEZ O, FERRAZ L, BINEFA X, et al. Concealed object detection and segmentation over millimetric waves images[C]//Proceedings of 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2010: 31-37.