

文章编号: 2095-4980(2015)06-0843-06

太赫兹成像技术在站开式安检中的应用

成彬彬^{a,b}, 李慧萍^a, 安健飞^{a,b*}, 江 舸^a, 邓贤进^{a,b}, 张 健^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 在日益严峻的公共安全形势下, 太赫兹技术的飞速发展为反恐安检提供了一项新的有效手段。分析了太赫兹波的特点及其在成像安检中应用的潜在优势, 探讨了太赫兹成像安检的主要技术手段, 比较了主动式和被动式成像的优劣, 并总结介绍了用于安检的太赫兹被动成像和主动成像技术的国内外发展现状, 通过对国际主要太赫兹安检成像研究机构的研究历程和近期项目支撑情况的分析, 对太赫兹成像安检技术阵列化、多频段、复合式的发展趋势进行了预测, 并对太赫兹成像技术在安检和反恐中的应用前景进行了展望。

关键词: 太赫兹成像; 隐藏物品检测; 被动成像; 主动成像; 太赫兹收发阵列

中图分类号: TN29

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201506.0843

Application of terahertz imaging in standoff security inspection

CHENG Binbin^{a,b}, LI Huiping^a, AN Jianfei^{a,b*}, JIANG Ge^a, DENG Xianjin^{a,b}, ZHANG Jian^{a,b}

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Terahertz science and technology has been rapidly developed in recent years, which make it a capable way to detect person-borne concealed threats. The advantages of terahertz imaging in standoff security inspecting application are introduced according to the characteristics of terahertz waves. A comparison is made between active and passive imaging, which are two main methods for terahertz personnel screening. Then the current status of terahertz imaging research in concealed objects detection is reviewed and commented. It is concluded that terahertz transceiver array, multi-band data fusion and active/passive composition would be the main techniques in future researches. This prediction is based on the analysis in the researches of main institutes in this field and recent programs in Europe. Some key technologies and main trends related to terahertz security inspection are pointed out.

Key words: terahertz imaging; concealed threats detection; passive imaging; active imaging; terahertz transceiver array

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、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。另一方面, 目前机场“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。发展站开式(stand off)扫描安检技术可以较好地解决上述问题, 其优点表现在^[1]: a) 在检查地点方面, 它可以在简易爆炸装置(Improvised Explosive Device, IED)的爆破半径范围外提供早期的威胁预警; b) 对人群进行扫描时, 该远程传感器可以置于一个有利的地方朝任何方向照射, 使得它具有很好的灵活性; c) 远程 IED 成像系统可以通过隐藏和伪装达到对付隐蔽监视的目的。目前已批量应用的非接触式人体安检技术主要有 X 射线后向散射成像和毫米波成像这 2 种, X 射线后向散射的成像质量好, 但存在人体高能辐射损伤风险, 而毫米波技术受分辨率的限制, 成像质量难以满足需求^[2]。随着太赫兹(Terahertz, THz)源和检测技术发展, 其高分辨力成像技术已成为站开式安检的一个重要候选手段^[3-4]。

收稿日期: 2014-10-27; 修回日期: 2015-02-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划("973"计划)资助项目(2015CB755406); 中国工程物理研究院太赫兹研究专项项目(T201410)

*通信作者: 安健飞 15681917607@163.com

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,并通过对国内外研究现状的调研和分析,总结其发展趋势和面临的挑战,对其中的关键技术进行了分析。

1 太赫兹成像安检技术分析

太赫兹波是频率介于远红外与微波之间的电磁波,其波长范围为 $30\text{ }\mu\text{m}\sim 3\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$,是电磁波谱上未被充分利用的频率资源,一度被称为“太赫兹间隙”(Terahertz Gap)。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成像等近距应用要求的条件。将太赫兹探测技术应用于公共安全检测,具有如下优势:a)太赫兹波具有穿透包装盒、衣服、书包、纸板、陶瓷、塑料等非极性物质与保持一定高分辨力的双重特性,可以实现对人员携带的隐藏物品进行穿透衣物探测和高分辨力成像识别^[5-7];b)按照目前的太赫兹源功率水平和探测灵敏度,已基本可实现在 20 m 以外的距离对目标携带的隐藏物品实现站开式检测,未来这个距离甚至可以达到百米量级,这种非接触式的探测可在爆破半径范围外提供早期的威胁预警;c)与X射线相比,太赫兹光子能量低,在 1 meV 量级,远小于人体皮肤的电离能,不会对人体产生电离损伤,而且太赫兹安检辐射功率在 1 mW 量级,是手机辐射的千分之一,远低于人体安全阈值^[8],不会对操作者或被检查者造成危害。基于太赫兹波的上述特性,其在隐藏武器的探测、安全检查、反恐维稳、重点区域的监测与防护等方面有着潜在的重要应用价值。

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,利用物体和人体自身产生和反射环境的太赫兹波的差异进行对比成像,其理论基础是普朗克黑体辐射定律^[9];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处理,从而获得目标图像,其基本规律可借助雷达原理进行分析^[10]。主被动成像各有优劣,被动成像结构简单,无辐射安全问题,不存在隐私侵犯,但受环境影响大,例如在室外空旷处的成像效果要远好于室内有其他辐射体的情况;而主动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成像,且主动成像分辨力高,可实现三维(3D)成像,图像更清晰,但系统结构复杂,成本高,所成图像会显示人体生理特征,需要在图像处理中遮挡或模糊化以保护人体隐私^[11]。

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,特别是美国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。然而目前已投入使用的大部分还处于毫米波频段。太赫兹频段的被动成像安检仪已有相应产品问世,例如英国 Digital Barriers 公司的 THRUVISION 系列产品,其应用场景及实物图见图 1^[12],产品工作于 0.25 THz 频段,探测距离 $3\text{ m}\sim 15\text{ m}$,8 通道机械扫描,成像速度可以达到 6 帧/s,已在美国纽约警察局人体隐藏爆炸物检测、亚洲乘客安检、中东和非洲国家政府重点部位监护等场合获得应用^[13]。

太赫兹主动成像样机目前还处于实验室研发阶段,目前采用最多的还是逐点扫描式,这种方法可进行阵列扩展,具有成像速度快的优势,其代表为美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)。JPL 从 2006 年开始,先后研制四代样机,第 1 代产品工作频段为 $576\text{ GHz}\sim 589\text{ GHz}$,发射频率调制连续波配合扫描获得 3D 图像,在 4 m 处的分辨力约为 2 cm ,但成一帧图像时间需要 5 min ($50\text{ 像素}\times 50\text{ 像素}$)^[14],其主要不足为模拟锁相环调频率低,线性度差,以及特氟龙折射镜射线吸收率大,其后向散射产生大量杂波,因此成像效果不理想;第 2 代针对第 1 代的问题进行了改进,一方面将带宽提升为 28.8 GHz ,另一方面采用直接数字式频率合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS)+模拟锁相环,并配合铝制椭圆反射镜,改善了成像效果^[15],但其成一幅图像时间仍需 5 min ($50\text{ 像素}\times 50\text{ 像素}$),第 2 代存在的主要问题为成像速度慢,作用距离近,信号线性度差;第 3 代将频率提升为 $660\text{ GHz}\sim 688\text{ GHz}$ ^[16],并将主反射镜直径增至

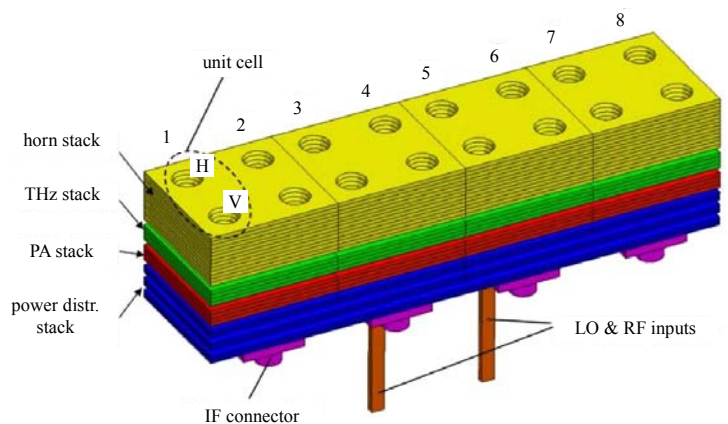


Fig.1 Transceiver array with eight pairs of transmit/receive horns for video frame rate imaging

图 1 8 发 8 收太赫兹阵列,具有实现视频成像帧速率的潜力

1 m, 且在光路中增加一个小平面镜代替主反射面完成旋转扫描, 并采用极化复用技术, 使成像速度得到极大提升, 达到 1 帧/s, 系统采用算法补偿信号非线性度, 在 25 m 处获得了优于 1 cm 的成像分辨; 第 3 代已基本具备应用条件, 但是 JPL 认为成像速度还需获得进一步的提升, 其设想的改进措施为形成 8 发 8 收阵列, 见图 1, 从而获得近视频帧率的成像速度; JPL 的第 4 代一开始采用收发阵列技术, 其报道的 0.34 THz 频段 2 发 2 收的阵列^[17]形成的主动扫描成像系统, 在 16.5 m 处的分辨力约 1.8 cm, 成像帧速率可达到每秒 4 帧^[18], 使太赫兹视频帧速率成像技术又向前迈进了一大步, 其样机及成像结果见图 2。

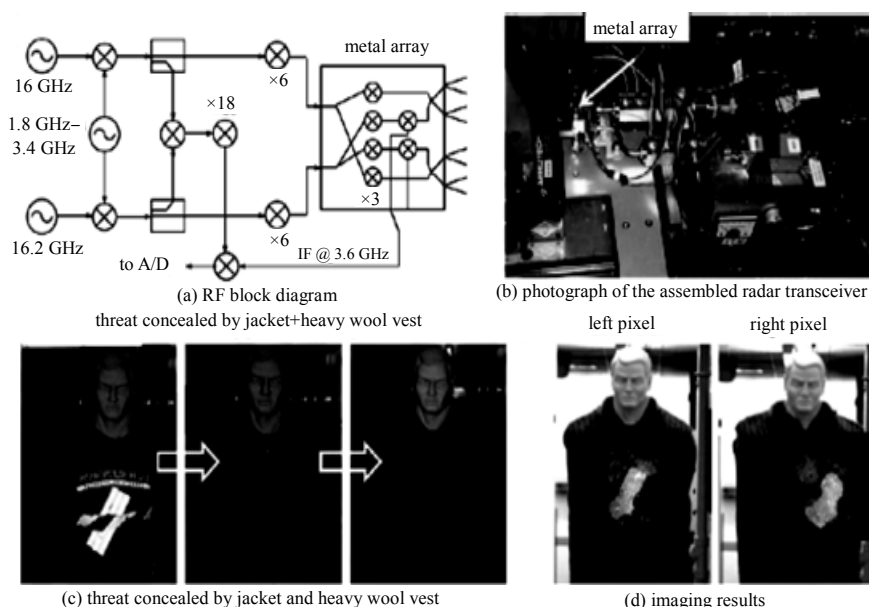


Fig.2 The fourth generation security inspection system based on terahertz imaging in JPL
图 2 JPL 第四代太赫兹安检成像系统

除了 JPL, 国外还有其他诸多单位开展扫描式成像研究, 美国 PNNL(Pacific Northwest National Laboratory)开发了 0.35 THz 频段主动扫描式太赫兹成像技术^[19-20], 其特色是采用圆锥扫描装置, 具有高速扫描的潜质, 但图像处理会相对复杂, 该装置发射功率为 4 mW, 扫频带宽为 19.2 GHz, 在 10 m 的距离上分辨力约为 1 cm, 成像时间 10 s 以上, 还有较大改进空间。2009 年德国 RPG 公司 0.23 THz~0.32 THz 调频连续波扫描三维成像系统, 分辨力达到毫米量级, 成像速度约为 1 帧/s(4 000 像素)^[21]; 2010 年以色列国立中央大学设计的 330 GHz 线性调频连续波太赫兹成像系统, 可以对 40 m 以内的隐藏物进行探测, 纵向成像分辨力达到 1 cm^[22]。2012 年, 苏格兰圣安德鲁大学研制了 340 GHz 超外差三维成像雷达, 该雷达发射共极化、接收共极化和交叉极化用于处理和显示, 其目标是实现在 20 m 处获得 10 帧/s 的成像帧速率^[23]。

主动成像的另外一种方式是(逆)合成孔径式, 其研究的代表单位是德国 Fraunhofer(FHR)。2013 年, FHR 在 MIRANDA 94 基础上推出 MIRANDA 300^[24], 在 0.26 THz~0.3 THz 频段获得了 3.75 mm 的分辨力, 成像时间约为 10 min, 由于掌握了太赫兹低噪放技术^[25], 其利用 5 dBm 的发射功率实现了 140 m 以上的探测距离。其实物照片及成像结果见图 3。尽管其产品介绍中宣称可用于安检^[26], 但分析可知其安检上应用存在一定的缺陷: a) 检测过程中需要目标配合, 并按要求旋转, 或者成像装置本身转动; b) 成像时间太长。

这种方式的优势在于可以获得很高的成像分辨力。2010 年, 瑞典国防研究署设计了 210 GHz 三维合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)系统, 用于非接触式扫描成像, 分辨力 1.2 cm 的成像时间约为 10 min~20 min^[27]。

中科院电子所将扫描和综合相结合, 开发出一套工作于 0.2 THz 的扫描+SAR 工作方式的成像系统, 见图 4, 可实现对目标的三维成像^[28-29]。

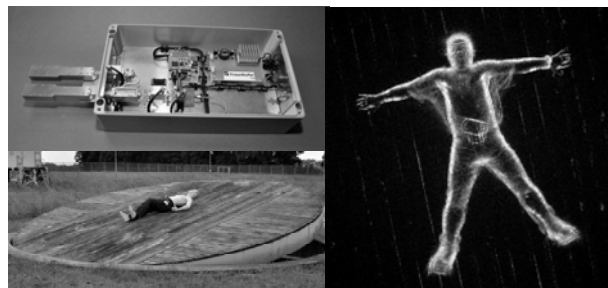


Fig.3 ISAR imaging results by MIRANDA 300 radar in Fraunhofer
图 3 FHR 的 MIRANDA 300 雷达及其 ISAR 成像结果

3 太赫兹成像安检技术发展趋势

成像速度和成像分辨力是太赫兹成像安检技术的重要指标,随着太赫兹技术的发展,高频段器件已逐步达到实用化的水平,随着频段的提高,成像分辨力已基本可满足应用需求,然而成像速度距离视频帧速率(约 30 帧/s)的要求还有较大差距,特别是主动式成像,目前的成像帧速率水平在 4 Hz 左右。而提升成像帧速率的一个重要方法就是阵列化技术。从 JPL 的四代样机发展过程也可以看出,阵列技术将是其主攻方向。欧洲也逐步将阵列技术的研究提上日程。2013 年,欧洲第七框架计划安全专题支持了名为 TeraSCREEN 的研究项目,研究周期为 42 个月,经费 480 万欧元,对 94 GHz 的被动成像系统进行改造,改造后的成像安检系统为主被动复合方式,被动采用 3 个频段: 360 GHz, 220 GHz, 94 GHz, 主动采用一个频段: 360 GHz, 成像分辨力为 4.1 mm(3 m 处), 成像帧率为 4 Hz。主动子系统采用多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)方式,利用 16 发 16 收形成 255 阵元的虚拟收发阵列。在其报告中指出,采用多频段的目的是: a) 不同物质在不同频段处有不同的反射、透射和散射特性。多频段有利于目标的物质特性; b) TeraSCREEN 是在原有 94 GHz 基础上更改的,增加了 220 GHz 和 360 GHz 的探测器,有利于提高空间分辨力。其整套系统具有: (1) 利用被动成像识别目标的物理特性(金属或非金属); (2) 结合主动成像对目标形状的探测,采用信息融合技术实现自动识别危险目标^[30-31]。其原理见图 5。

由此可以看出,阵列化、多频段、主被动复合将是太赫兹成像安检技术的发展趋势。一方面提升成像帧速率,另一方面,通过多频段多模式的信息融合提高探测和识别能力。其关键技术为太赫兹收发阵列及其集成技术、多频段数据的融合与识别技术等。

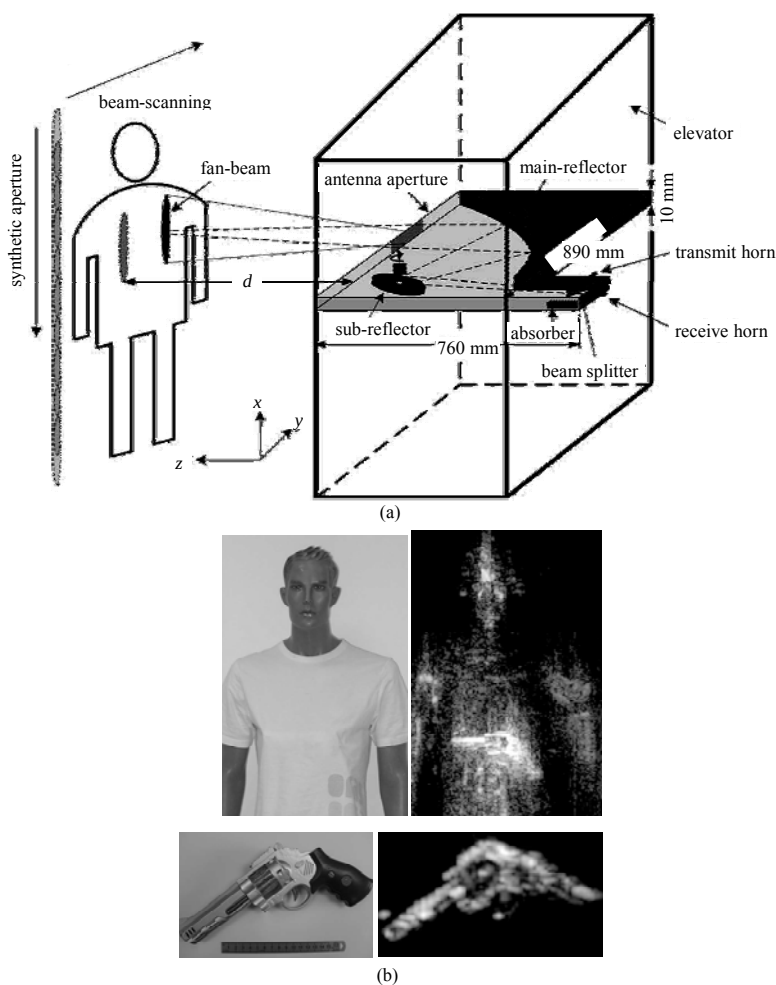


Fig.4 A 0.2 THz system combining screen and SAR with its imaging results
图 4 中科院电子所 0.2 THz 扫描+SAR 系统及其成像结果

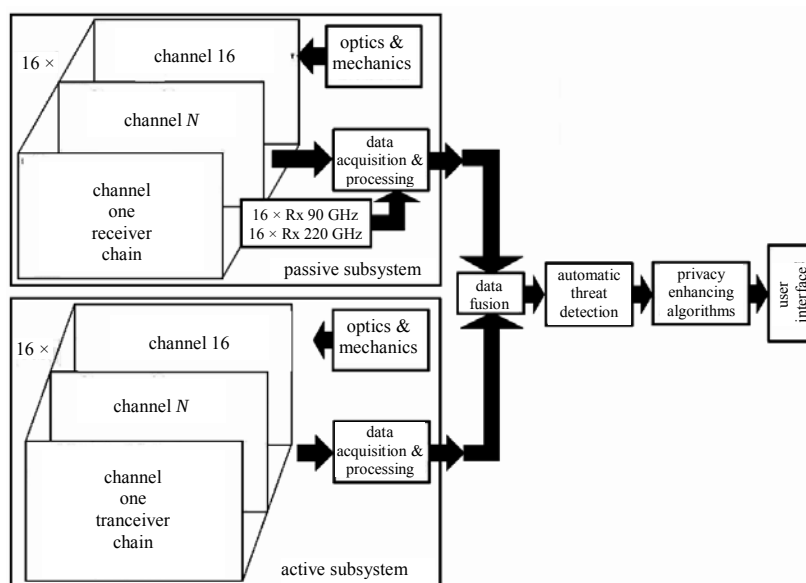


Fig.5 Conceptual frame of TeraSCREEN with multi-band detection and active/passive composition
图 5 TeraSCREEN 多频段、主被动复合成像安检原理框图

4 结论与展望

随着太赫兹技术的飞速发展,其辐射源、检测器等关键器件已基本可满足成像安检的需求。在成像系统构建上,国内外尝试了多种不同的成像体制,主动式成像系统近年来逐渐占据研究的主导地位,然而要解决主动成像系统的实用化问题,还必须提升其成像速度,而阵列化技术是解决成像速度的一个有效途径,其关键技术为太赫兹收发阵列设计与集成技术。另外,为了获得较好的成像效果和识别能力,包含不同传感器技术的探测系统可能是反IED的有效策略,若能与光谱技术相互配合,还可实现对人员携带的炸药、毒品等的有效监测。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、要害部门对恐怖分子等非合作目标的监视与预警,具有重要的经济效益和社会价值。

参考文献:

- [1] Dengler R J, Cooper K B, Llombart N, et al. Toward real-time penetrating imaging radar at 670 GHz[C]// 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Boston, MA: [s.n.], 2009: 941–944.
- [2] 赵自然. 人体安检新技术的分析与探讨[J]. 中国安防, 2012(3): 33–36. (ZHAO Ziran. Analysis and study on new technologies for personnel security detection[J]. China Security & Protection, 2012(3): 33–36.)
- [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, AP-55(11): 2944–2956.
- [4] Wallace H B. Analysis of RF imaging applications at frequencies over 100 GHz[J]. Applied Optics, 2010, 49(19): E38–E47.
- [5] Weg C am, Spiegel W von, Henneberger R, et al. Fast active THz cameras with ranging capabilities[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 30(12): 1281–1296.
- [6] Sheen D M, Hall T E, Severtsen R H, et al. Standoff concealed weapons detection using a 350 GHz radar imaging system[C]// Proceedings of SPIE. Orlando, Florida, USA: [s.n.], 2010, 7670: 767008-1–767008-12.
- [7] Arusi R, Pinhasi Y, Kapilevitch B, et al. Linear FM radar operating in the terahertz regime for concealed objects detection[C]// 2009 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems. Tel Aviv: [s.n.], 2009: 1–4.
- [8] IEEE draft standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz-amendment: specifies ceiling limits for induced and contact current, clarifies distinctions between localized exposure and spatial peak power density[Z]. IEEE Int. Committee on Electromagnetic Safety C95.1, 2005.
- [9] May T, Zieger G, Anders S, et al. Safe VISITOR: VISible, Infrared and Terahertz Object Recognition for security screening application[C]// Proceedings of SPIE. Orlando, FL, United States: [s.n.], 2009, 7309: 73090E-1–73090E-8.
- [10] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. Fast, high-resolution terahertz radar imaging at 25 meters[C]// Proceedings of SPIE. Orlando, FL, United States: [s.n.], 2010, 7671: 76710Y-1–76710Y-8.
- [11] 桑伟, 岳胜利. 毫米波成像技术在人体安全检查领域的应用[J]. 中国安防, 2013(4): 83–87. (SANG Wei, YUE Shengli. Application of millimeter-wave imaging in personnel security detection[J]. China Security & Protection, 2013(4): 83–87.)
- [12] David Haskett. Extra sensory perception: see the threat more clearly with terahertz, a technical comparison of the ThruVision solution[EB/OL]. [2013](2014-10-05). <http://www.digitalbarriers.com/ThruVision/DB-ThruVision-Tech-FinalP v1.01.pdf>.
- [13] John Woollhead. Annual report and accounts[EB/OL]. [2013-05-28] (2014-10-05). <http://www.digitalbarriers.com/ThruVision/Annual-Report-2013.pdf>.
- [14] 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.
- [15] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. Penetrating 3-D imaging at 4 and 25 meter range using a submillimeter-wave radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(12): 2771–2778.
- [16] 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.
- [17] Theodore Reck, Jose Siles, Cecile Jung, et al. Array technology for terahertz imaging[C]// Proceedings of SPIE. Baltimore: [s.n.], 2012: 836202-1–836202-8.
- [18] Cooper K B, Theodore A Reck, Cecile Jung-Kubiak, et al. Transceiver array development for submillimeter-wave imaging radars[C]// Proceedings of SPIE. Baltimore, Maryland, USA: [s.n.], 2013, 8715: 87150A-1–87150A-8.
- [19] David M Sheen, Douglas L McMakin, Jeffrey Barber, et al. Active imaging at 350 GHz for security applications[C]// Proceedings of SPIE. Orlando, FL, United States: [s.n.], 2008: 69480M-69480M-10.

- [20] David M Sheen, TE Hall, RH Severtsen, et al. Standoff concealed weapon detection using a 350 GHz radar imaging system[C]// Proceedings of SPIE. Orlando, FL, United States:[s.n.], 2010:767008.
- [21] Spiegel W V, Weg C A, Henneberger R, et al. Active THz-imaging system with improved frame rate[C]// Proceedings of SPIE. Orlando, FL, United States:[s.n.], 2009:3712299336.
- [22] Kapilevich B, Pinhasi Y, Arusi R, et al. 330 GHz FMCW image sensor for homeland security applications[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010, 31(11):1370–1381.
- [23] Robertson D A, Marsh P N, Bolton D R, et al. 340 GHz 3D radar imaging test bed with 10 Hz frame rate, passive and active millimeter-wave imaging XV[C]// Proceedings of SPIE. Baltimore:[s.n.], 2012:836206–1–836206–11.
- [24] Stephan Stanko, Michael Caris, Alfred Wahlen, et al. Millimeter resolution with radar at lower terahertz[C]// 14th International Radar Symposium (IRS). Dresden, Germany:[s.n.], 2013:235–238.
- [25] Tessmann A, Massler H, Lewark U, et al. Fully integrated 300 GHz receiver S-MMICs in 50 nm metamorphic HEMT technology[C]// 2011 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). Waikoloa, USA:[s.n.], 2011:1–4.
- [26] Stephan Stanko. The ultra-high resolution radar MIRANDA 30[EB/OL]. [2013] (2014–10–05). <http://www.fhr.fraunhofer.de/en/businessunits/systems-for-security-and-protection.html>.
- [27] Svedina J, Rudnera S, Thordarsson G, et al. An experimental 210 GHz radar system for 3D stand-off detection[C]// 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Rome, Italy:[s.n.], 2010:1.
- [28] GU Shengming, LI Chao, GAO Xiang, 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.
- [29] GU Shengming, LI Chao, GAO Xiang, et al. Three-dimensional image reconstruction of targets under the illumination of terahertz Gaussian beam—theory and experiment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(4): 2241–2249.
- [30] Naomi E Alexander, Byron Alderman, Fernando Allona, et al. TeraSCREEN: Multi-frequency multi-mode terahertz screening for border checks[C]// Proceedings of SPIE. Baltimore, Maryland, USA:[s.n.], 2014, 9078:907802–1–907802–12.
- [31] Naomi Alexander, Fernando Allona. High throughput passive mm-wave (Body) security scanners in FP7-Alfa imaging involvement[C]// 2nd EUCDE. Rome:[s.n.], 2013:PP29AA11.

作者简介:



成彬彬(1981–), 男, 湖北省随州市人, 博士, 副研究员, 主要从事太赫兹雷达与成像方面的研究. email: wwwcb-2@163.com.

安健飞(1979–), 男, 吉林省双辽市人, 博士, 助理研究员, 主要从事太赫兹雷达系统设计与雷达成像方面的研究. email: 15681917607@163.com.

李慧萍(1973–), 女, 陕西省富平县人, 本科, 高级工, 主要从事无线电装接技术.

江 舸(1982–), 男, 四川省乐山市人, 在读博士研究生, 助理研究员, 主要从事太赫兹成像机理及信号处理.

张 健(1968–), 男, 四川省大竹县人, 博士生导师, 研究员, 主要从事电子学系统、无线通信、太赫兹技术研究.

邓贤进(1973–), 男, 四川省安岳县人, 博士, 研究员, 主要研究方向为电子学系统遥测、遥控, 毫米波固态功率合成、太赫兹通信技术、高速信号处理等.