

文章编号: 2095-4980(2019)04-0557-06

## 面向复杂表面物体的 3D 太赫兹成像技术

雷 静<sup>1a,1b,1c,1d,2</sup>, 祁 峰<sup>1a,1c,1d,2</sup>

(1.中国科学院 a.沈阳自动化研究所; b.机器人与智能制造创新研究院; c.光电信息处理重点实验室;  
d.辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 将逆合成孔径雷达(ISAR)技术应用到太赫兹频段, 针对平滑表面物体和复杂表面物体扫描获取原始数据, 并基于快速傅里叶变换对获取的三维数据进行处理, 实现横向和径向的高分辨率太赫兹三维目标重建。通过在波数域对回波信号进行距离迁移补偿处理、插值处理, 以及空域图像阈值去噪处理后, 将目标的反射系数从三维空间中提取出来并保留其空间位置信息, 从而完成三维目标重建。

**关键词:** 太赫兹; 三维目标重建; 逆合成孔径雷达技术; 大曲率目标

**中图分类号:** TN95

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201904.0557

## Towards THz 3D imaging for objects with complex shape

LEI Jing<sup>1a,1b,1c,1d,2</sup>, QI Feng<sup>1a,1c,1d,2</sup>

(1a.Shenyang Institute of Automation; 1b.Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing; 1c.Key Laboratory of Opt-Electronic Information Processing; 1d.The Key Laboratory of Image Understanding and Computer Vision in Liaoning Province, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR) technology is applied to terahertz frequency band, and the original data are obtained by scanning smooth surface objects and complex surface objects. The obtained 3D data are processed based on fast Fourier transform, and the transverse and radial high resolution terahertz 3D target reconstruction is realized. After the spherical wavefront correction of the wavenumber domain echo complex signal to the plane wavefront phase compensation, interpolation processing and spatial image threshold denoising processing, the reflection coefficient of the target is extracted from the three-dimensional space and its spatial position information is retained, so as to complete the reconstruction of the three-dimensional target.

**Keywords:** terahertz; 3D target reconstruction; Inverse Synthetic Aperture Radar technology; target with large curvature

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz(波长在 3~30  $\mu\text{m}$ )范围内产生的电磁波, 该频段介于毫米波与远红外光之间, 是电磁波谱中有待进行全面研究的最后一个频率窗口<sup>[1]</sup>。随着研究的深入, 太赫兹波在传播、穿透、吸收等方面的特殊性质不断被揭示出来<sup>[2]</sup>。太赫兹波由于其光子能量小, 对物质无伤害, 频率高, 脉冲短等这些独特优点, 被广泛应用于遥测遥感、环境监测和医疗诊断<sup>[3]</sup>、射电天文、国土安全、安全检查<sup>[4]</sup>与反恐探测<sup>[5]</sup>、物体无损检测<sup>[6]</sup>、卫星通信和军用雷达等领域<sup>[7]</sup>。而太赫兹成像是太赫兹技术能够准确、有效地应用在各领域的至关重要的保证。

21 世纪初, 美国陆军地面智能中心与美国马萨诸塞大学联合研究, 成功研制了一台载频为 1.56 THz 的逆合成孔径成像雷达(ISAR)系统, 其方位向分辨力达到了 3.5 cm<sup>[8]</sup>。2007~2011 年, 德国的科学应用研究所在太赫兹成像上也有一定建树, 成功研制出了带宽达到 8 GHz 的太赫兹逆合成孔径雷达进行成像的对比试验, 成像的距离为 150 m, 94 GHz 的毫米波雷达分辨力为 3.5 cm, 220 GHz 的太赫兹雷达分辨力为 1.8 cm<sup>[9]</sup>。2011 年 BRAMH A 等利用工作频率为 0.23~0.32 THz 的太赫兹成像系统, 通过层析成像技术获得了目标的太赫兹三维图

收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-01-07

基金项目: 科技部国家重点研究发展计划基金资助项目(2016YFC0102900); 国家自然科学基金资助项目(61605235; 61505089; 61801467; 1804160); 中科院“百人计划”基金资助项目

像<sup>[10]</sup>。2012 年中国科学院电子研究所研制出一套成像装置, 该装置实现了在两个维度上分别进行扫描和合成孔径, 该装置工作频率为 0.2 THz, 发射带宽 15 GHz, 成像分辨力达到了 2~3 cm<sup>[11]</sup>。本文应用并优化逆合成孔径雷达技术, 发射宽带步进太赫兹脉冲扫描目标, 分别对具有规整平滑表面和大曲率表面的目标进行成像实验, 进一步从实验设计和算法处理上进行优化, 实现了空间横向和径向的高分辨目标重建。其中平面目标是为了验证算法正确性, 目的是今后做大曲率表面物体的三维重建, 以适应太赫兹成像技术的实际应用。

## 1 逆合成孔径雷达算法

合成孔径算法最初用于机载雷达, 雷达的横向分辨力与天线的孔径大小成反比, 天线孔径越小, 横向分辨力越高, 发射信号带宽越大, 径向分辨力越高。太赫兹三维成像中, 由于信号波段可实现大带宽, 故采用合成孔径雷达成像<sup>[12-15]</sup>技术实现高分辨力的目标图像重建。

成像系统构成如图 1 所示, 将目标固定至二维移动平台上在  $x, y$  方向上均匀移动。天线位置为  $(x', y', z_0)$ , 在目标每个移动位置  $(x, y)$  处都均匀采样  $N$  个频点的回波信号, 包含相位和幅度信息。设回波复数信号  $s(x', y', \omega)$ , 从天线平面到目标点位置的距离为:

$$d = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z - z_0)^2} \quad (1)$$

回波信号可表示为散射点的反射系数与相位程乘积的积分:

$$s(x', y', \omega) = \iiint f(x, y, z) \exp(-j2k\sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z - z_0)^2}) dx dy dz \quad (2)$$

式中:  $f(x, y, z)$  表示目标散射点  $(x, y, z)$  处的反射系数函数;  $k$  表示波数,  $k = \omega/c$ ,  $\omega$  为角频率,  $c$  为光速。

在式(2)中忽略电磁波传递过程中幅度的衰减(对近场成像结果的影响较小)。其中指数项表示球面波, 可以用相位补偿的方法, 将球面波前补偿为平面波前。式(1)中的指数项可分解空间各个方向上的平面波的叠加:

$$\exp(-j2k\sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z - z_0)^2}) = \iint \exp(-j2k\sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z - z_0)^2}) dk_x dk_y \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 可得:

$$s(x', y', \omega) = \iint F(k_x, k_y, k_z) \exp(jk_z z_0) \exp(jk_x x' + jk_y y') dk_x dk_y = FT_{2D}^{-1} \{ F(k_x, k_y, k_z) \exp(jk_z z_0) \} \quad (4)$$

简化后得:

$$s(x', y', \omega) = \iint F(k_x, k_y, k_z) \exp(jk_z z_0) \exp(jk_x x' + jk_y y') dk_x dk_y = FT_{2D}^{-1} \{ F(k_x, k_y, k_z) \exp(jk_z z_0) \} \quad (5)$$

$(x, y, z)$  与  $(x', y', \omega)$  有对应关系, 故将式(5)变换为:

$$FT_{2D} [s(x, y, \omega)] = S(k_x, k_y, \omega) = F(k_x, k_y, k_z) \exp(jk_z z_0) \quad (6)$$

在自由空间或均匀电介质中的平面波的色散关系为:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = (2k)^2 \quad (7)$$

最终可得:

$$f(x, y, z) = FT_{3D}^{-1} \left\{ FT_{2D} \left[ STOLT \left( s(x', y', \omega) \exp(-jz_0 \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}) \right) \right] \right\} \quad (8)$$

式中  $STOLT(\cdot)$  为插值处理, 将不均匀分布的  $k_z$  轴向插值使其在  $z$  向波数轴数据均匀分布。

获取  $f(x, y, z)$ , 用阈值处理将背景点去除, 保留目标的  $f_{\text{target}}(x, y, z)$  信息。

根据扫描平面上每个坐标点处采样得到的复数回波信号  $s(x, y, \omega)$ , 通过上述波数域处理, 获得目标散射点的散射函数  $f_{\text{target}}(x, y, z)$ , 即根据该信息重建出目标反射面的三维图像。

## 2 实验

### 2.1 实验装置

太赫兹扫描平台用矢量网络分析仪作为收发装置, 收发天线可选  $S_{11}$  或  $S_{21}$  模式, 分别为单站式天线收发一

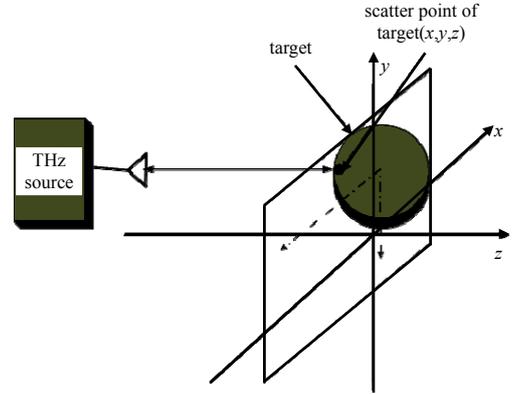


Fig.1 Principle diagram of synthetic aperture imaging for near field THz wave

图 1 THz 波的合成孔径成像原理图

体和双站式收发隔离扫描模式。目标在二维移动平台上做方位向的二维移动，每次移动后停驻完成一次太赫兹脉冲的信号收发并存储回波信号。现场实验图如图 2 所示，本次实验扫描目标实物图如图 3 所示。

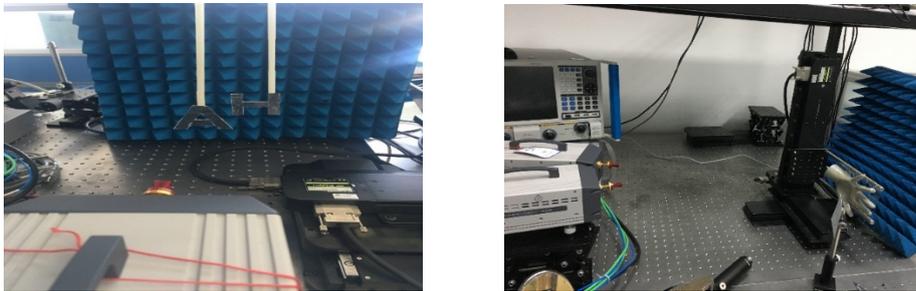


Fig.2 Experiment field photos of two sets of target objects  
图 2 两组目标实验现场照片

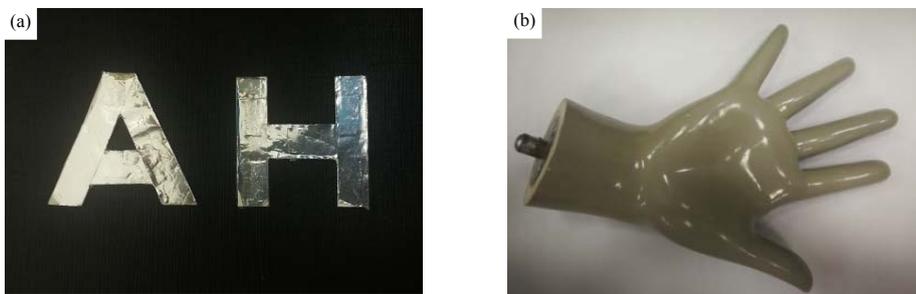


Fig.3 (a) photo of target letters A and H; (b) photo of target model of plastic hand  
图 3 (a) A 和 H 字母目标的照片; (b) 塑料手模的目标照片

实验设置的太赫兹频率为 270~290 GHz，频率采样点数为 201 个，频率间隔为 100 MHz，目标移动范围根据自身大小进行设计。图 3(a)所示的目标为金属锡箔材料包裹的字母 A 和 H，二者在三维空间中交错放置，横向尺寸大小为 120 mm×80 mm，距离向分别距离目标 66 mm 和 133 mm。而图 3(b)所示为塑料手型模型，仿真人体手型，掌心略有凹陷，表面的曲率较大。手模方位向大小约为 180 mm×120 mm。实验中最近处距离收发天线 350 mm。

### 2.2 平面目标成像算法验证

针对表面平整的目标——字母 A 和 H，进行成像算法验证。原始数据三维散点图如图 4 所示，在径向上会出现目标像重叠以及假象问题。如果对原始数据直接用逆合成孔径算法进行重建，结果中径向仍会出现 A 和 H 的相互影响以及自身在不同距离上出现假象，如图 5 所示。

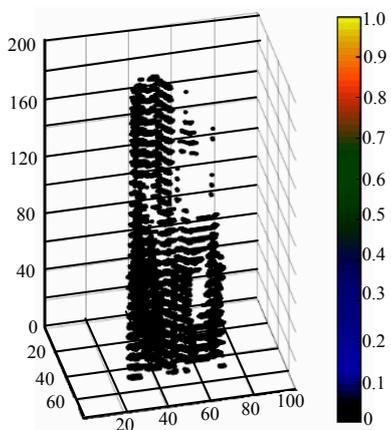


Fig.4 3-D scatter plot of original data  
图 4 原始数据三维散点图

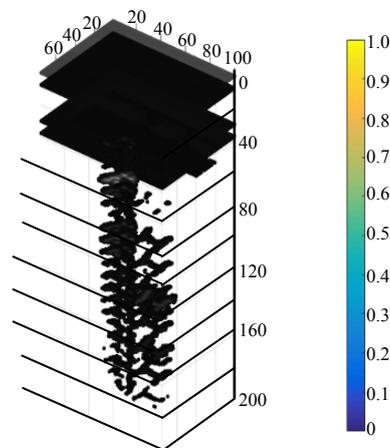


Fig.5 Three dimensional scatter plot after direct reconstruction of original data  
图 5 原始数据直接重建后三维散点图

对原始数据重建前，需要进行径向归一化处理，消除因不同频率脉冲发射功率不同产生的回波强度不同的影响，再在重建后对图像进行阈值处理，消除不同距离上因目标回波旁瓣产生的假象。

将原始数据变换到频域, 利用相位补偿将球面波前校正为平面波前, 产生数值聚焦的效果, 字母 A 和 H 的横向重建图像更加清晰完整。聚焦前后二维效果图如图 6 所示。对聚焦后数据在频域距离向插值为均匀分布后, 再利用逆傅里叶变换数据到空域, 将非目标距离处的模糊假象, 利用阈值滤去, 得到数据中只包含清晰准确的目标图像。其三维径向切片图如图 7 所示。

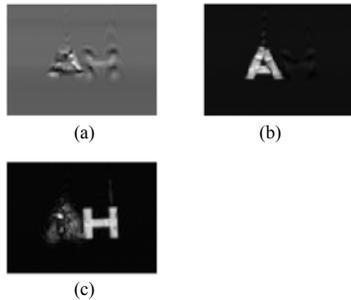


Fig.6 (a) unfocused image of data; (b) focused image of letter A; (c) focused image of letter H

图 6 (a) 未聚焦图片; (b) 字母 A 的聚焦图片; (c) 字母 H 的聚焦图片

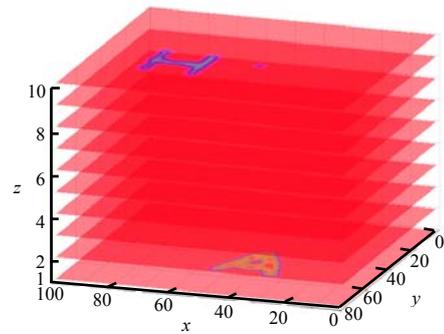


Fig.7 Two-dimensional focusing effect  
图 7 三维重建后径向切片

将重建数据中的背景点滤去, 保留目标点的位置及反射系数信息, 得到图 8 所示的三维散点重建图。经过图像阈值处理过的重建结果中不仅能直观清晰地得到目标的形状位置三维图像, 而且可准确地估算出目标字母 A 和 H 之间的径向距离。径向分辨力理论值为:  $\Delta z = c / (2B) = (3 \times 10^8) / (2 \times 20 \times 10^9) = 7.5 \text{ mm}$ ,  $B$  为带宽。

重建结果中 A 和 H 在径向上相距 9 个距离单位, 每个距离单位代表 7.5 mm, 则二者相距  $7.5 \times 9 = 67.5 \text{ mm}$ 。这 and 实际距离 67 mm, 相差 0.5 mm, 表明径向信息在误差范围内符合实际值, 满足理论分辨力要求。

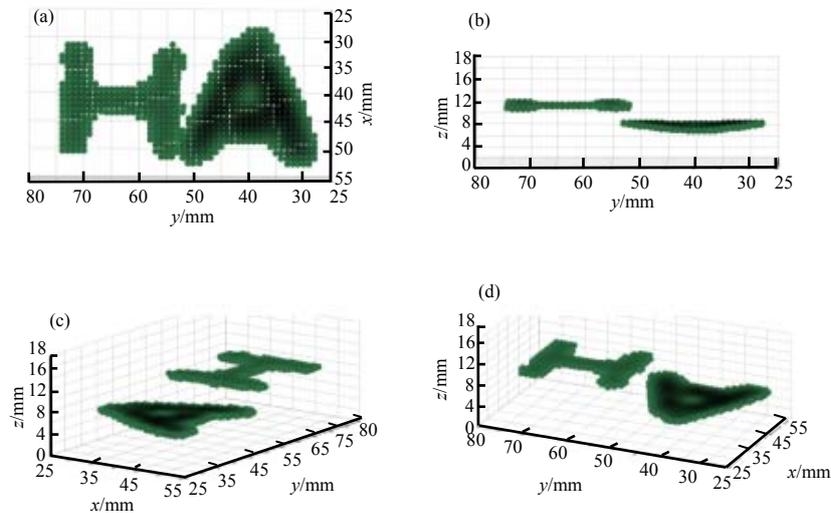


Fig.8 Three-dimensional reconstruction of scattered point images with different angles  
图 8 不同角度的三维重建散点图

### 2.3 大曲率表面塑料手模成像结果

塑料手模的表面曲率较大, 在单站天线收发一体的模式下, 接收的回波信号动态范围小, 图 9 为单站扫描模式下, 手模的二维聚焦结果。重建结果中从颜色棒表示的数值也可以看出目标处的幅值过小, 有效信息不够完整。与背景区分度小, 难以完整重建手模。

经分析后, 改进扫描方式为双站式收发天线分开的模式, 增大获取原始回波数据的动态范围。成像结果如图 10 所示。图 10(a)为未处理原始数据的二维成像图, 图中的手型目标完全未聚焦成像, 而经过一步数值上球面波校正为平面波的处理后, 图 10(b)中手型目标能够非常清晰地成像, 且支撑手模的两根横向金属支架也能完整地呈现于图像中。由于手指和手掌连接部位的曲率过大, 部分信息无法完全接收, 导致手型成像的细节部分不够充分。

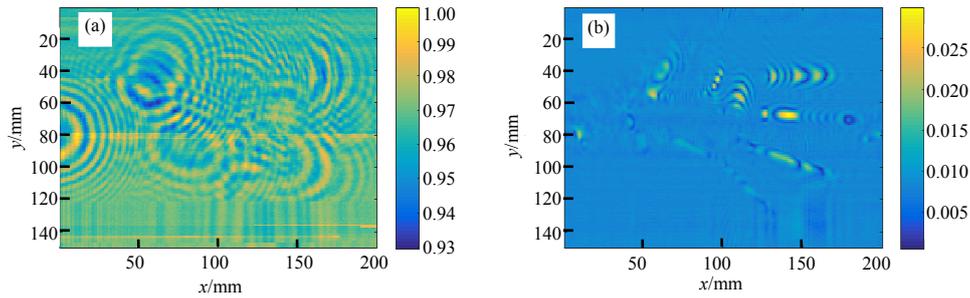


Fig.9 (a) 2D image of raw data by scanning mode of  $S_{11}$ ; (b) 2D focused image by numerical processing by scanning mode of  $S_{11}$   
图 9 (a)  $S_{11}$  扫描模式下的原始数据的二维成像图; (b)  $S_{11}$  扫描模式下的数值处理后的聚焦二维图像

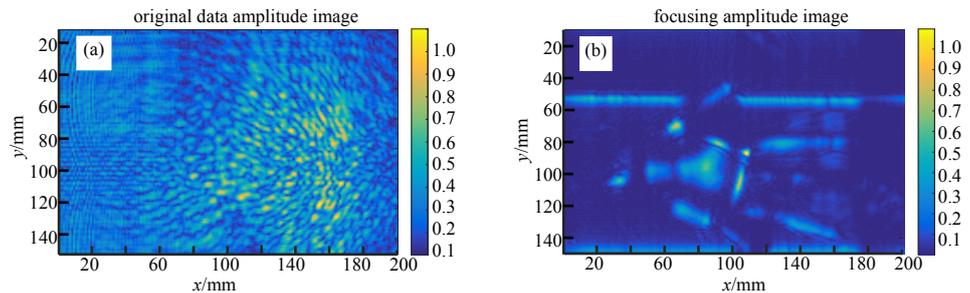


Fig.10 (a) 2D image of raw data by scanning mode of  $S_{21}$ ; (b) 2D focused image by numerical processing by scanning mode of  $S_{21}$   
图 10 (a)  $S_{21}$  扫描模式下的原始数据的二维成像图; (b)  $S_{21}$  扫描模式下的数值处理后的聚焦二维图像

三维成像结果如图 11 所示。图 11(a)为  $S_{11}$  模式下的三维重建结果，掌心部分完全缺失，手指部分也呈间断不连续状态。而图 11(b)为  $S_{21}$  模式下的三维重建结果，成像完整性大大提升，清晰地呈现出目标的形状轮廓和空间位置，局部细节不够完整，有所缺失，有待进一步优化扫描方式和处理算法解决。

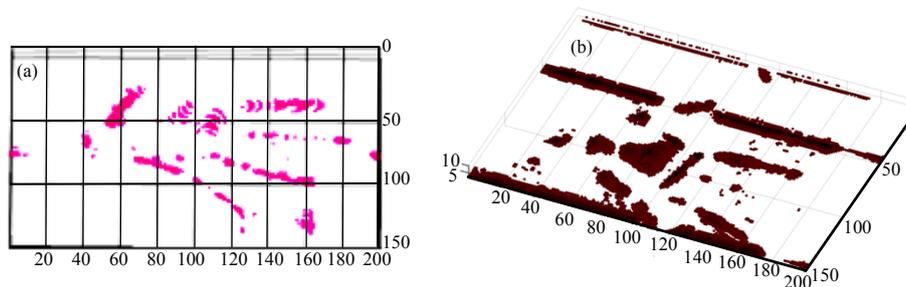


Fig.11 (a) 3D reconstructed image of hand model by scanning mode of  $S_{11}$ ; (b) 3D reconstructed image of hand model by scanning mode of  $S_{21}$   
图 11 (a)  $S_{11}$  扫描模式下的手型模型的三维成像图; (b)  $S_{21}$  扫描模式下的手型模型的三维成像图

### 3 结论

太赫兹成像应用中，目标的形状、材质可能各不相同，适用的扫描方式及算法处理对应用效果影响甚重。本文中实现的 SAR 重建算法不仅能对目标进行二维信息重建，而且距离向的信息也能够兼顾获取，实现高分辨的三维成像目标，并且在应对不同曲率表面的目标方面，本文探索了扫描方式不同对成像结果的影响。曲率过大的目标选取接收信号动态范围高的扫描方式，获取更丰富的回波信息，将会极大提高成像效果。另外，本文中也对逆合成孔径算法进行了相应改进，加入了归一化、图像增强、阈值去噪去模糊等图像处理方法，完整高效地重建出三维图像。双站/多站扫描方式对探索复杂形状物体的太赫兹三维成像具有重要意义。

#### 参考文献：

- [ 1 ] WOOLARD D L, BROWN R, PEPPER M, et al. Terahertz frequency sensing and imaging: a time of reckoning future applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(10): 1722–1743. DOI:10.1109/jproc.2005.853539.
- [ 2 ] 张栋文, 袁建民. 太赫兹技术概述[J]. 国防科技, 2015, 36(2): 12–16. (ZHANG Dongwen, YUAN Jianmin. Introduction to terahertz technology[J]. National Defense Science & Technology, 2015, 36(2): 12–16.) DOI:10.13943/j.issn1671-4547.2015.02.03.

- [ 3 ] 祁峰,汪业龙. 利用太赫兹技术实现皮肤癌早期精确诊断[J]. 中国医学物理学杂志, 2016,33(12):1195–1198. (QI Feng,WANG Yelong. Terahertz technology utilized to achieve early accurate diagnosis of skin cancer[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016,33(12):1195–1198.) DOI:10.3969/j.issn.1005–202X.2016.12.002.
- [ 4 ] KROZER V,LÖFFLER T,DALL J,et al. Terahertz imaging systems with aperture synthesis techniques[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010,58(7):2027–2039. DOI:10.1109/tmmt.2010.2050246.
- [ 5 ] 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. DOI:10.1109/tmmt.2012.2221738.
- [ 6 ] 李斌,王大勇,周逊,等. 基于面阵式探测器连续太赫兹波三维层析成像[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(1):21–25. (LI Bin,WANG Dayong,ZHOU Xun,et al. A continuous-wave terahertz 3D computed tomography using a pyroelectric array detector[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(1):21–25.)
- [ 7 ] 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. (YAO Jianquan. Introduction of THz wave and its applications[J]. Journal of Chongqing University and Telecommunications(Natural Science Edition), 2010, 22(6):703–707.) DOI:10.3979/j.issn.1673–825X.2010.06.003.
- [ 8 ] GOYETTE T M,DICKINSON J C,WALDMAN J,et al. A 1.56 THz compact radar range for W-band imagery of scale-model tactical targets[J]. Proceedings of SPIE–The International Society for Optical Engineering, 2000(4053):615–622.
- [ 9 ] ESSEN H,BIEGEL G,SOMMER R,et al. High resolution tower-turntable isar with the millimetre wave radar cobra(35/94/220 GHz)[C]// Synthetic Aperture Radar European Conference,VDE. Friedrichshafen,Gemany:[s.n.], 2008:1–4.
- [10] BRAHM A,BAUER M,HOYER T,et al. All-electronic 3D computed THz tomography[C]// 2011 36th International Conference on Infrared,Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW–THz). Houston,TX:[s.n.], 2011:3–4.
- [11] 高翔,李超,谷胜明. 0.2 THz 聚焦波束扫描成像系统的设计[C]// 第一届全国太赫兹科学技术与应用学术交流会. 北京:[s.n.], 2012:591–596. (GAO Xiang,LI Chao,GU Shengming. Design of 0.2 THz focused beam scanning imaging system[C]// The first National Terahertz Conference on Science,Technology and Application. Beijing:[s.n.], 2012:591–596.)
- [12] CUMMING I G,WANG F H. Digital processing of synthetic aperture radar data algorithms and implementation[M]. Translated by HONG Wen. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2007.)
- [13] 林华. 无人机载太赫兹合成孔径雷达成像分析与仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010,8(4):373–377. (LIN Hua. Analysis and simulation of UAV terahertz wave synthetic aperture radar imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010,8(4):373–377.)
- [14] 蔡英武,杨陈,曾耿华,等. 太赫兹极高分辨力雷达成像试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(1):7–9. (CAI Yingwu, YANG Chen,ZENG Genghua,et al. Experimental research on high resolution terahertz radar imaging[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(1):7–9.)
- [15] ESSEN H,WAHLEN A,SOMMER R,et al. High-bandwidth 220 GHz experimental radar[J]. Electronic Letters, 2007,43(20): 1114–1116.

#### 作者简介:



雷 静(1990–)女, 合肥市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹三维成像算法研究.email:leijing@sia.cn.

祁 峰(1981–), 男, 沈阳市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为信息系统集成.