

文章编号: 2095-4980(2013)02-0189-10

## 太赫兹雷达成像技术

梁美彦<sup>1a,1b,2</sup>, 邓朝<sup>1a,1b,2</sup>, 张存林<sup>1a,1b,2</sup>

(1.首都师范大学 物理系 a.太赫兹光电子学教育部重点实验室; b.太赫兹波谱与成像北京市重点实验室, 北京 100048;  
2.北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 从体制角度论述了近几年来国内外各大主要研究机构对太赫兹雷达成像的研究情况, 及其应用和未来的发展方向等。太赫兹雷达技术是一项正在蓬勃发展的技术, 由于其波长与机理介于光学与微波之间, 因而可以获取光学和微波所不可探测的信息。太赫兹雷达成像技术的发展为高分辨太赫兹空间遥感奠定了基础。

**关键词:** 太赫兹; 雷达; 成像; 探测

**中图分类号:** TN95

**文献标识码:** A

## THz radar imaging technology

LIANG Mei-yan<sup>1a,1b,2</sup>, DENG Chao<sup>1a,1b,2</sup>, ZHANG Cun-lin<sup>1a,1b,2</sup>

(1a.Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education; 1b.Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;  
2.Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** From the view point of the organization system, this paper discusses the research situation, application and the future development direction of THz radar imaging from the main domestic and international research institutes in recent years. THz radar technology is flourishing at present. It can obtain the information that is undetectable in optics and microwave because its wavelength falls in between them. The development of THz radar imaging technology lays a foundation for high resolution space remote sensing.

**Key words:** THz; radar; imaging; detection

太赫兹(THz)波是指频率在 100 GHz~10 THz 范围的电磁波, 它介于毫米波与红外之间, 称为亚毫米波或者远红外光, 处于从电子学向光子学的过渡区。相对于微波、毫米波, 太赫兹波的波长较短, 更易于实现极大信号带宽和极窄天线波束, 从而获得精细的目标成像<sup>[1-3]</sup>。太赫兹雷达探测系统空间分辨力和角分辨能力较好, 并且具有良好的抗干扰能力, 是国内外太赫兹技术研究的重点课题。因此, 太赫兹雷达技术有望在军事装备的模拟研制上发挥作用。与红外雷达和激光雷达相比, 太赫兹雷达具有良好的穿透烟雾、沙尘的能力, 可以实现全天候工作。基于太赫兹的特点, 太赫兹雷达可以用于探测敌方隐蔽的武器、伪装埋伏的武装人员, 以及烟雾、沙尘中的军事装备。此外, 太赫兹雷达还可远程探测空气中传播的有毒生物颗粒或化学气体。利用强太赫兹辐射穿透地面的特点, 可用来探测地下的雷场分布, 还能进行远程炸弹探测等。太赫兹雷达还是反隐身的利器, 无论是基于形状隐身还是涂料隐身, 甚至基于等离子体隐身, 太赫兹雷达都可以使其现出原形。而这正是目前大部分常规检测方法所做不到的。

太赫兹技术还可用于危险品和藏匿物品的探测成像。因为太赫兹辐射是非电离的, 它可以穿透对其他频率范围不透明的物质, 例如包装材料、衣服甚至墙壁, 这些属性使太赫兹遥感在无损检测和安全检查中得以应用。

太赫兹波与毫米波相比具有较短的波长, 能够提供更高的空间分辨力和允许更小的光学组件<sup>[4]</sup>。但是, 由于大气对流层中含有大量水气等极性分子, 水气转动和振动吸收谱线的展宽效应使得太赫兹波在地面附近无法传播很长距离, 再加上氧气和氮气等分子的吸收<sup>[5]</sup>, 对于地面附近的远距离探测, 300 GHz 以上频率不是理想选择<sup>[6-7]</sup>, 相应观测手段也还存在很大局限<sup>[8]</sup>, 因此, 太赫兹雷达用于远距离成像和探测还需要进行深入的探索。

收稿日期: 2012-12-27; 修回日期: 2013-01-04

基金项目: 国家 973 计划资助项目(2007CB310408)

目前,太赫兹主要应用于中远距离探测和成像,包括对危险品的探测和对藏匿物品的成像。近地太赫兹雷达还处在实验室阶段,因此,近地太赫兹雷达探测和成像引起了广泛的关注。

## 1 国外太赫兹雷达成像研究情况简介

太赫兹雷达是国内外太赫兹技术研究的重要方向之一。近几年,国际上主要的太赫兹雷达实验系统有美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的几部太赫兹雷达成像系统<sup>[9]</sup>、德国应用科学研究所(Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften, FGAN)高频物理与雷达研究中心(High Frequency Physics and Radar Techniques, FHR)的 0.22 THz COBRA ISAR 成像系统<sup>[10]</sup>、美国马萨诸塞大学的 1.56 THz 成像系统、美国西北太平洋国家实验室(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)的 350 GHz 成像系统<sup>[11]</sup>,这些太赫兹近程成像雷达系统都是基于线性调频连续波体制。此外,英国伦敦大学玛丽女王学院(QUEEN MARY University of London)在太赫兹雷达方面也有一定的成就。最近,美国国防部先进研究项目局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)正在进行基于视频合成孔径雷达方面的工作。太赫兹成像系统就成像体制而言可以分为扫描成像、SAR 和 ISAR 成像,在雷达成像方面 RCS 测量是必不可少的。

### 2.1 太赫兹扫描成像体制

#### 2.1.1 美国 JPL 实验室在扫描体制太赫兹成像方面的研究成果

2007 年,美国 JPL 的 R J Dengler, K B Cooper 等成功研制了第一部高分辨力太赫兹成像系统,系统采用调频连续波雷达技术,发射信号带宽 8 GHz,调频周期 0.5 s,通过失真补偿处理,在 4 m 范围内获得了 2 cm 的高距离分辨力<sup>[12-13]</sup>,工作频率为 560 GHz~635 GHz,动态范围约为 60 dB,图 1(a)~1(b)为该成像系统的三维成像结果。

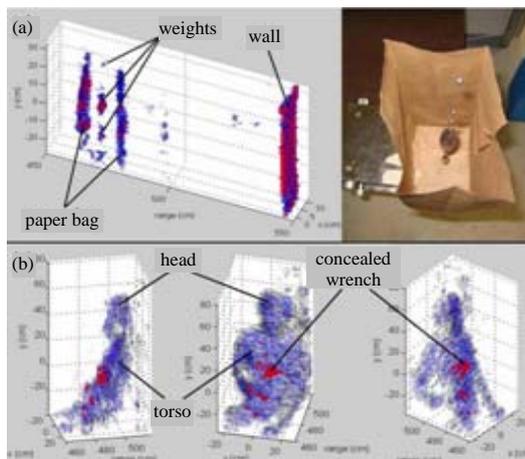


Fig.1 3-D image of fishing weights suspended inside a paper bag. In addition to the metallic weights, both the front & backsides of the bag are visible as well as the wall behind the bag(a); 3-D image of human subject holding a wrench underneath clothing. A fundamental balanced mixer and improved chirp generation scheme were used to obtain these images(b)

图 1 放在纸袋子里鱼钩上的重物的三维成像(a); 隐藏在人衣服里的扳手的三维成像(b)

2011 年,美国 JPL 实验室研制了 0.66 THz~0.69 THz 三维扫描成像系统,成像距离为 25 m,景深为  $25 \pm 1$  m,可以实现非接触探测<sup>[14]</sup>,图 2(a)~2(b)是成像结果。

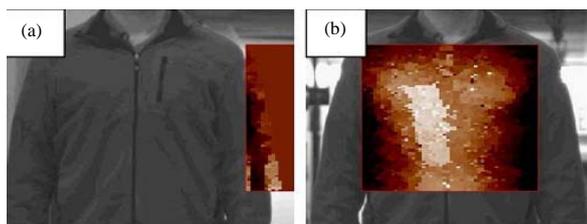


Fig.2 Radar images captured in a 1-Hz frame rate real-time radar imager. Visibly, there is no evidence of three 1-in PVC pipes concealed by a jacket(a);the pipes are visible when the subject moves into the radar field of view(b)

图 2 可见光下看不到 PVC 管隐藏在夹克里(a); 当雷达照射的时候 PVC 管是可见的(b)

2012 年, 美国 JPL 实验室 K B Cooper 等人利用 675 GHz 扫描成像雷达探测隐藏在厚衣服下面的 PVC 管。实验表明, 对厚衣服下面危险品成像的质量取决于雷达信号的载波噪声而不是雷达接收器的热背景噪声, 这说明高能量信号源或者低噪声接收机不会提高雷达穿透力, 以后的研究方向应着眼于通过改善后端电子架构来降低太赫兹相位噪声或者以牺牲分辨力为代价使用低频信号。图 3(a)~图 3(b)中分别是 675 GHz 雷达和它的系统框图<sup>[15]</sup>, 图 4 是对隐藏在不同厚度衣服下面的 PVC 管成像的结果<sup>[16]</sup>。

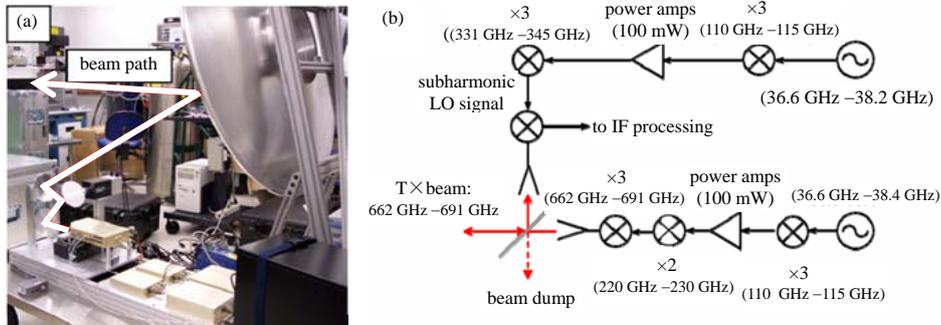


Fig.3 Photograph of JPL's 675 GHz imaging radar(a);simplified radar block diagram(b)  
图 3 675 GHz 成像雷达(a); 雷达的系统简图(b)

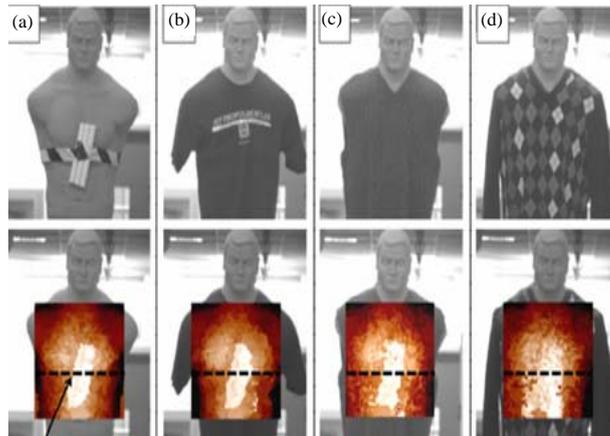


Fig.4 Imaging radar results for various concealing garments. Target photos(top row)with radar imagery overlay(second row) show how well concealed 1 inch diameter PVC pipes can be detected on a mannequin wearing no clothing(a);a T-shirt(b);a heavy wool vest(c);a lambs wool sweater worn over a heavy wool vest(d)  
图 4 不同厚度下 PVC 管的成像结果: 没有穿衣服的结果(a); T 恤下的 PVC 管成像(b); 厚羊绒背心下的成像(c); 羊毛毛衣加厚羊绒背心下的成像(d)

在探测速度方面, 由于现在的成像局限于单点成像或者少量像素成像, 2012 年 JPL 实验室通过等离子体腐蚀硅技术, 使设备和精度超过了当前的金属加工, 制造出一个像素间距达到 10 mm 的阵列, 研制了一个间隔为 10 mm×18 mm 的太赫兹二维雷达成像阵列, 从而显著加快了成像速度<sup>[17]</sup>。



Fig.5 Conceptual drawing showing the operation of a sub-millimeter wave imaging system for the detection of concealed explosives or other weapons  
图 5 远距离非接触探测概念图



Fig.6 Photographs of the experimental prototype imaging system  
图 6 实验系统的照片

2.1.2 美国 PNNL 实验室在太赫兹探测成像方面的研究成果

美国 PNNL 实验室开发了主动式毫米波成像技术,最近正在开发高频亚毫米波成像系统用于远距离非接触探测<sup>[18-22]</sup>。350 GHz 主动式成像探测系统基于宽带、超外差混频体制、准光学聚焦系统以及高速圆锥扫描装置,发射功率为 4 mW,扫频带宽 19.2 GHz,探测距离大于 10 m,每 10 s~20 s 获得一幅图像,这几乎是实时的,并能得到 1 cm 的分辨力,以及对隐藏在合作目标中的武器进行探测<sup>[23]</sup>。图 5~图 6 分别是 350 GHz 探测系统的概念图和实物照片。

2.1.3 其他一些机构的太赫兹扫描成像系统结果

2009 年,德国 PRG 公司研制的 0.23 THz~0.32 THz 调频连续波扫描三维成像系统,每秒可以获得 4 000 个点,达到了毫米级的分辨力<sup>[24]</sup>。

2010 年以色列国立中央大学设计了 330 GHz 线性调频连续波太赫兹扫描成像系统,可以对 40 m 以内的隐藏物体进行探测。该系统采用了 2 个喇叭天线透镜,距离向数据采集用 Labview 界面,距离向达到 1 cm 的分辨率,同时,进行了 2-D 和 3-D 模型的重建<sup>[25]</sup>。图 7 是系统的框图,图 8 是在距离 1 m 处对手枪 3-D 图像的重建。

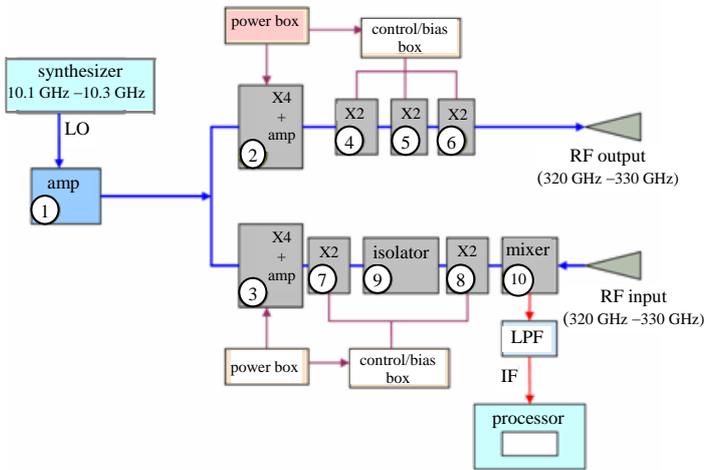


Fig.7 Block diagram of the experimental setup  
图 7 实验系统框图

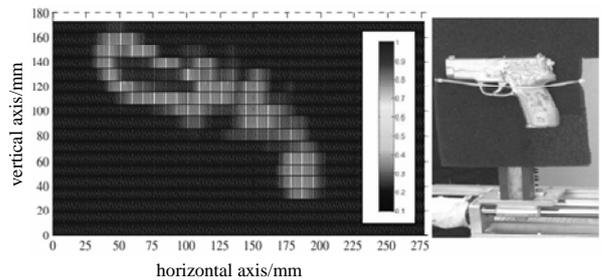


Fig.8 Image reconstruction of a real gun placed on an absorbing background at a distance of about 1 m  
图 8 在距离 1 m 处对手枪三维图像的重建

2012 年,苏格兰圣安德鲁大学研制了 340 GHz 超外差三维扫描成像雷达<sup>[26]</sup>。该雷达采用线性调频连续波体制,带宽 3.6 GHz,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。该项目始于 2008 年,并不断进行改进,目标是实现在 20 m 的距离处理近实时(10 帧/s)的信号。图 9 是 340 GHz 的成像结果,左图为实物照片,右图分别为 4 个不同距离门的成像结果,右图上面一行为共极化成像,下面一行为交叉极化。

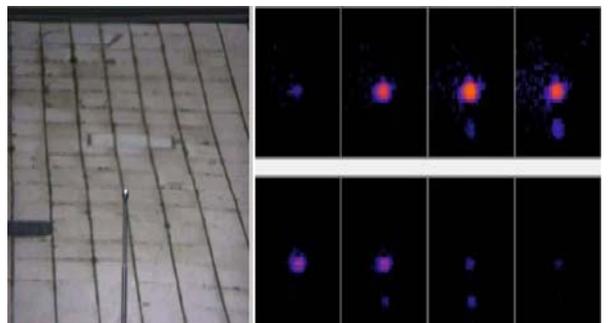


Fig.9 Photo of a 25 mm diameter sphere mounted on an acrylic pole at 20 m range  
图 9 置于 20 m 处塑胶杆上直径 25 mm 的金属小球的成像结果

2.2 太赫兹雷达成像体制

太赫兹雷达体制成像与扫描成像不同,不是采用单点或整列扫描的方式,而是通过对回波的二维压缩处理成像,其主要方式有 SAR 成像和 ISAR 成像。

2.2.1 JPL 在太赫兹雷达体制成像方面的研究成果

2008 年, K B Cooper 等人在 0.6 THz 雷达系统的基础之上,成功研制了 0.58 THz 三维成像雷达系统<sup>[27]</sup>。该系统工作中心频率 585 GHz,仍旧采用 LFM CW 信号,扫频带宽为 12.6 GHz,扫频周期 100 ms。该系统 ISAR 成像获得了亚厘米级的分辨力<sup>[2]</sup>。图 10 是 0.58 THz 雷达对人体图像的重建,左图是对暴露在人体外的放在塑料容器里的滚珠进行成像,右图把容器隐藏在衣服下面进行成像。

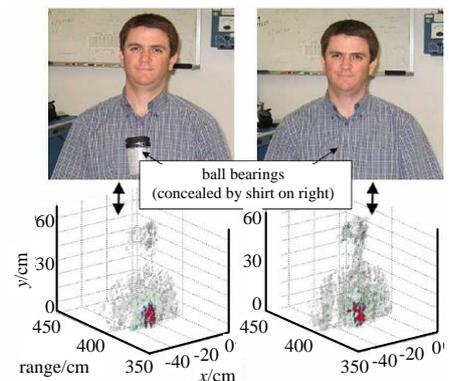


Fig.10 3-D THz radar image reconstruction of a person  
图 10 0.58 THz 系统对人体三维图像的重建

### 2.2.2 德国 FGAN 研究中心在太赫兹雷达方面的研究成果

2008 年,德国应用科学研究所(FGAN)高频物理与雷达技术实验室 H Essen、A Wahlen 等人成功研制了 COBRA-220 雷达成像系统,这套系统工作频率为 220 GHz,基于 LFM CW 雷达体制,脉宽 120 ms,扫频带宽 8 GHz,功率 20 mW,在 200 m 距离上实现了 1.8 cm 的距离分辨力。图 11 是这部雷达的 ISAR 成像结果。同时,这部雷达被用于拖拉机的成像,并与 94 GHz 的分辨力进行了对比,成像分辨力分别是 3.5 cm 和 1.8 cm(如图 12,左图为拖拉机 94 GHz 的散射点分布,右图为 220 GHz 情况下的结果)<sup>[28]</sup>。



Fig.11 Photo and accumulated ISAR image of a car at 220 GHz  
图 11 轿车 220 GHz 照片和 ISAR 成像

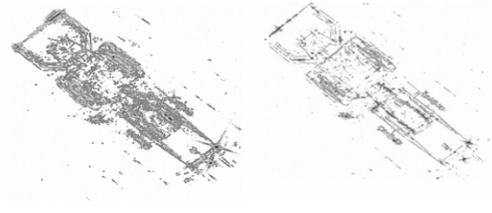


Fig.12 Accumulated scattering centre distributions for a tractor at 94 GHz and 220 GHz  
图 12 拖拉机在 94 GHz 和 220 GHz 的散射点分布

### 2.2.3 美国麻萨诸塞大学卢维尔分校亚毫米波实验室在太赫兹雷达成像方面的研究成果

2008 年美国麻萨诸塞大学卢维尔分校亚毫米波实验室开发了基于 1.56 THz 的成像系统,可以对隐藏在人体内的危险品进行探测,探测距离只有 2.5 m,可以以每秒 2 帧的速率对 0.5 m × 0.5 m 的场景进行可视化,如图 13 所示<sup>[29]</sup>。麻萨诸塞大学早在 2003 年就开始对三类军用设备 1/35 的缩比模型进行了微波 ISAR 成像,并在此基础上,先后尝试了 325 GHz 和 1.5 THz 的高分辨率成像。最近的报道是 2010 年亚毫米波实验室 Andriy A、Danylov 等人用 2.4 THz 量子级联激光器作为发射机对坦克 T-80BV 的 1/72 模型进行了太赫兹逆合成孔径雷达成像,结果达到了 0.4 mm × 0.6 mm 的高分辨力<sup>[30]</sup>。图 14 是 2.4 THz 对 T-80BV 坦克 1/72 缩比模型的成像结果,上图是模型照片,下图是 2.4 THz 方位高度成像,图像分辨力 0.4 mm × 0.6 mm,校准对象(二面体)位于图像右侧。



Fig.13 Sample images of a person with cable tie gun hidden under jacket, color scale is in dB  
图 13 隐藏在人衣服里的手枪的成像,结果以分贝表示

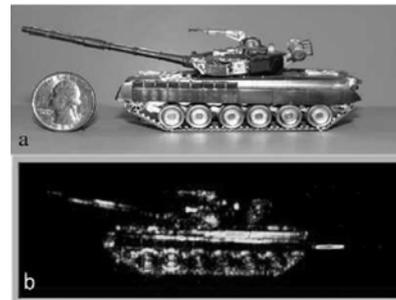


Fig.14 2.4 THz azimuth/elevation imagery of the scale model tank with pixel resolution of 0.4 mm × 0.6 mm  
图 14 坦克模型的 2.4 THz 方位高度成像,图像分辨力为 0.4 mm × 0.6 mm

### 2.2.4 瑞典国防研究署在太赫兹 ISAR 成像方面的研究成果

2010 年,瑞典国防研究署设计了 210 GHz 雷达系统进行非接触三维 ISAR 成像,该系统采用扫频信号,扫频带宽是 12.8 GHz,可以达到 1.2 cm 的分辨力。系统如图 15 所示。该系统实现的是 3-D 成像,因此数据量可以达到 14 GB,一幅图像的扫描时间是 10 min~20 min。成像结果如图 16 所示<sup>[31]</sup>。

### 2.3 雷达散射截面(RCS)的测量

2010 年,丹麦技术大学利用飞秒激光器组成的太赫兹时域光谱系统对 F-16 飞机金属模型的 1/150 的缩比模型进行了太赫兹波 RCS 测量。图 17 是其装置及飞机模型照片,模型长 10 cm,翼展 6.7 cm,采用的波段为 0.1 THz ~ 2 THz。图 18 是不同方位 RCS 的测量结果。图 19 是不同频率的 RCS 图<sup>[32]</sup>。

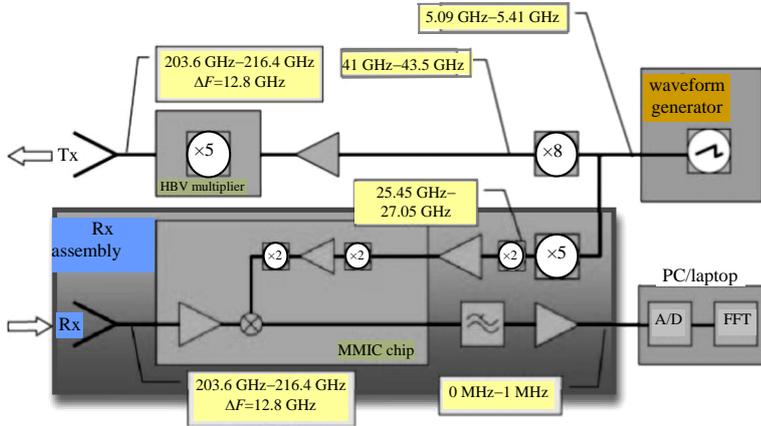


Fig.15 Block diagram of the 210 GHz system  
图 15 210 GHz 系统框图

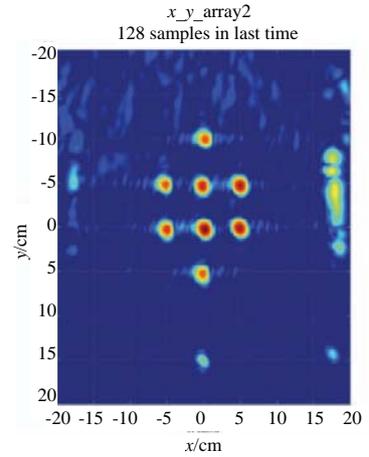


Fig.16 Photograph and ISAR results  
图 16 SAR 对一个点阵的成像结果

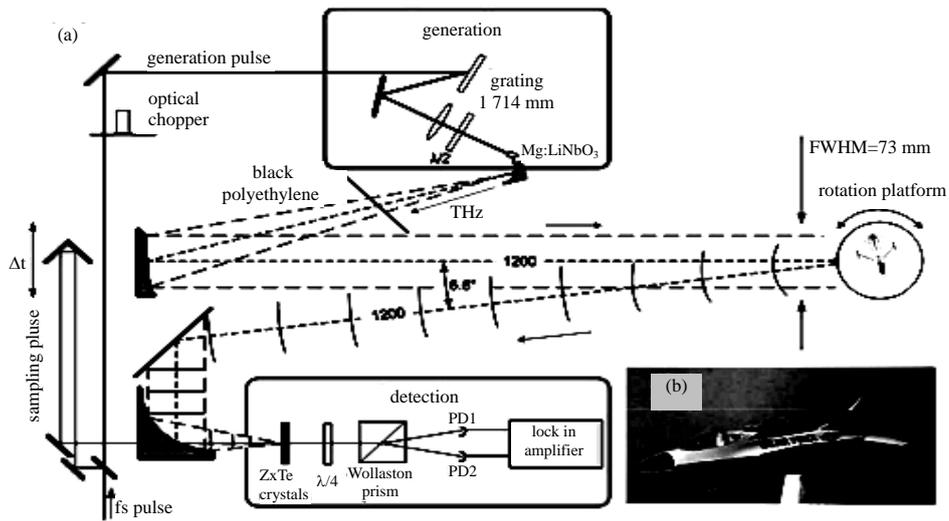


Fig.17 Schematic diagram of the THz RCS setup(a);10 cm-long 1:150-scale metal model of aircraft fighter F-16(b)  
图 17 RCS 测量装置图

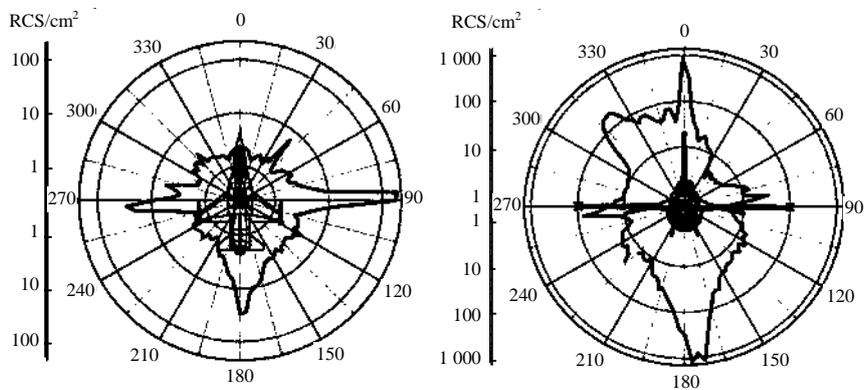


Fig.18 Logarithm of the instantaneous amplitude of THz waveforms scattered from the F-16 scale model for different polar(left) and azimuthal angles of their frequency-averaged RCS(right)  
图 18 F-16 缩比模型的 THz 波散射振幅 RCS 图:取对数后不同极角方向 RCS(左);方位角方向平均 RCS(右)

## 2.4 DARPA 在视频合成孔径雷达(Video Synthetic Aperture Radar, ViSAR)方面的计划

2012 年 5 月,美国 DARPA 准备开发 ViSAR 项目,这个项目的总体目标是能够透过云层、灰尘和其他遮蔽物进行 ViSAR 成像,并能够定位机动目标(图 20)。ViSAR 系统具有透过云层对目标的定位能力,就如同红外目标系统在天气晴朗时提供的定位能力。视频 ViSAR 在提供高清高帧图像的同时能够降低尺寸、重量和功率(SWAP)。

为了支持定位机动目标,ViSAR 系统需要在 100 m 直径的监视范围,以 5 帧/s 的速率得到近似 0.2 m 的 SAR 分辨力。ViSAR 系统还必须能够探测和跟踪移动车辆并对其进行重新定位,并将图像返回到适当的位置上。

权衡考虑帧速率和空气的吸收,选择极高频 EHF 波段中的 231.5 GHz~235 GHz 频段。ViSAR 目标的实现需要 4 项关键技术:第 1 项关键技术是需要紧凑的适航 EHF 波段发射和接收器(>18 个月),第 2 项技术是紧凑的适航 EHF 波段介质功率放大器(18 个月),第 3 项是 EHF 波段情景模拟(15 个月),第 4 项是 EHF 波段操作的先进算法(9 个月)。总体项目预计在 2 年内完成。

## 3 国内太赫兹雷达研究情况简介

2011 年中国工程物理研究院自主研制了国内首个 0.14 THz 高分辨力逆合成孔径雷达(ISAR)系统,通过宽带 ISAR 进行实时成像处理,获得了太赫兹高分辨力 ISAR 成像。该 ISAR 雷达系统信号带宽 $\geq 5$  GHz,二维成像分辨率达  $3\text{ cm}\times 3\text{ cm}$ 。2012 年设计了 0.34 THz 收发前端和 0.67 THz 的 ISAR 成像雷达收发链路,0.67 THz 成像雷达采用超级外差体制,信号形式采用大带宽的 LFM 信号,天线收发分置,工作频率 660 GHz~688.8 GHz,线性调频带宽 28.8 GHz;调频周期  $100\ \mu\text{s}$ ,发射功率 1 mW;作用距离 2 m~8 m,成像分辨力  $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ <sup>[33-34]</sup>。同时,中物院还将太赫兹 SAR 和无人机相结合,进行了成像分析<sup>[35]</sup>。

2012 年中国兵器工业 209 所研制了 0.89 THz 激光器用于探测隐身目标<sup>[36]</sup>。

2012 年中科院电子所设计了 0.2 THz 聚焦波束扫描成像系统,实现了对模特和人体隐藏危险武器的探测,并进行了太赫兹准光高斯波束下三维图像的重建。系统采用 0.2 THz 波纹喇叭发射束腰半径 2.7 cm 的高斯波束,空间采样间隔 2 mm,扫频带宽 15 GHz,成像分辨力  $2\text{ cm}\sim 3\text{ cm}$ <sup>[37]</sup>。

2012 年首都师范大学和北京理工大学设计了 0.2 THz 频率步进雷达信号系统,系统采用频率步进信号,作用距离小于 15 m,功率 8 mW,可以实现一维距离成像(图 21),距离向分辨率可达 4 cm(图 22)。

## 4 总结与展望

太赫兹科学技术已经被国际科学界公认为是一个具有战略意义的领域,并将逐渐成为高新科技产业技术的必争之地。太赫兹雷达目前虽然存在源功率低、探测器灵敏度有限、水分吸收严重<sup>[38]</sup>等问题,但是可以通过选择在大气窗口来减少衰减,当上升到一定高度以后,水蒸汽对太赫兹的影响变小,太赫兹传输距离相应增大,特别在对流层之外,水蒸汽含量几乎为零,大气的影也随随之变小,在很宽的频带内已不存在大气衰减。置于大气对流层外机载或星载平台上的太赫兹雷达与微波雷达相比具有下列技术优势:

1) 相对微波雷达,太赫兹雷达具有更高的空间分辨力、时间分辨力,并具有更强的保密性。高分辨力可以获取更丰富的目标信息,可以探测更小的目标并实现更精确的定位<sup>[39]</sup>。

2) 太赫兹频段雷达更容易实现极窄的天线波束。因为天线口径与频率成反比,所以雷达频率越高,波束宽度越窄。太赫兹频段提供的极窄天线波束可以获得更高的天线增益、更高的角跟踪精度,从而提高了多目标识别

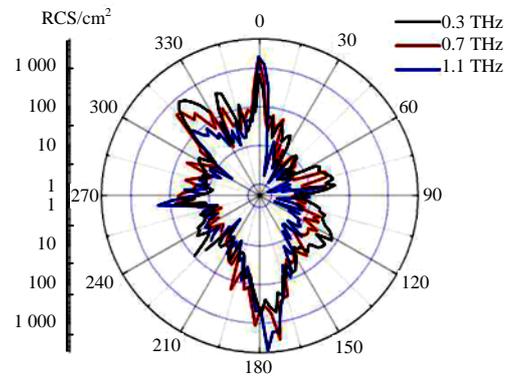


Fig.19 Frequency-resolved azimuthal RCS of a metal model of the fighter aircraft F-16 at frequencies 0.3 THz, 0.7 THz and 1.1 THz. The presented data are averaged within a frequency interval of  $\pm 20$  GHz  
图 19 不同频率方位角方向的 RCS 图

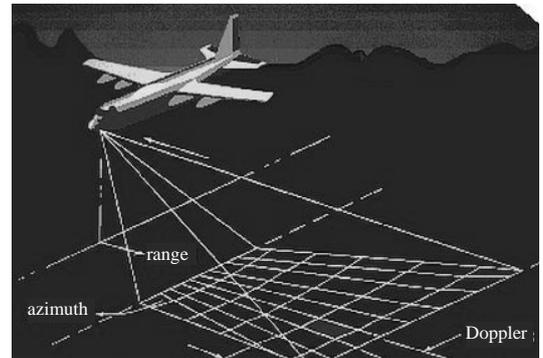


Fig.20 Schematic diagram of ViSAR  
图 20 ViSAR 成像示意图

能力。

3) 太赫兹雷达系统抗干扰能力强。现有的电子干扰手段主要针对微波和红外频段,对太赫兹频段难以进行有效干扰。同时,太赫兹雷达极窄天线波束可以减少干扰信号注入雷达主瓣波束的机会,极高的天线增益也抑制了旁瓣干扰。

4) 太赫兹雷达具有很好的反隐身能力。现有的隐身手段主要集中在微波频段,对太赫兹频段难以进行有效的隐身。常规的窄带微波雷达无法有效探测雷达截面很小的隐形飞机。太赫兹雷达频率成分丰富,可使隐形飞机的窄带吸波涂层失去作用。

5) 由于太赫兹远离等离子体共振频率 $\omega_p$ ,太赫兹雷达系统具有穿透等离子体探测目标的能力。太赫兹波能在等离子体中传播而不会被吸收,所以等离子体隐身技术在太赫兹雷达面前也无能为力。另外根据太赫兹能够穿透等离子体的特性,可以将其应用到航天飞机、宇宙飞船发射或回收过程当中,用于解决“黑障”问题,这是别的波段所无法做到的<sup>[40]</sup>。

雷达主要是用来定位空中或地面目标,超宽带太赫兹雷达以其高的分辨力、强烟雾穿透力、低截获概率、强抗干扰性、优秀的反隐身和可穿透等离子体能力,有望成为未来高精度雷达的发展方向之一。此外,太赫兹在精确制导方面也具有重大意义。

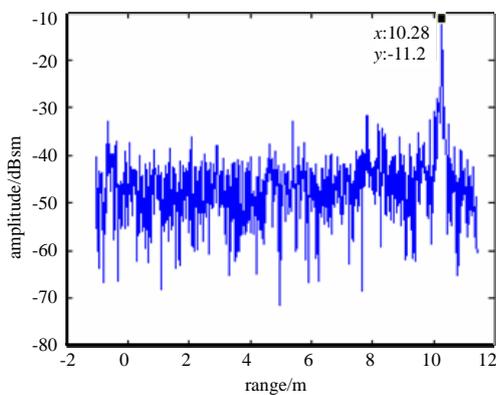


Fig.21 THz radar 1-D experimental results  
图 21 一维距离像实验结果

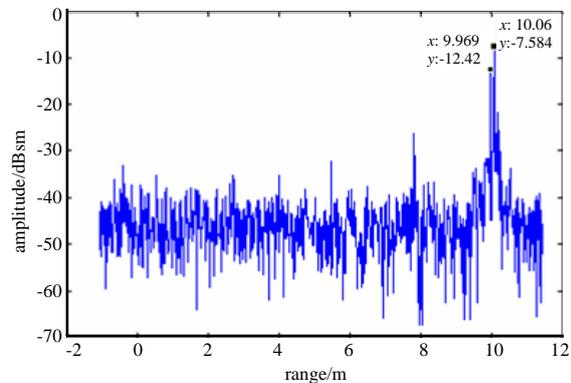


Fig.22 Range resolution experimental result of THz radar  
图 22 一维距离分辨力实验结果

#### 参考文献:

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] Cooper K B,Dengler R J,Llombart N,et al. Fast,high-resolution terahertz radar imaging at 25 meters[C]// Proceedinds of SPIE. Orlando:[s.n.], 2010,7671:76710Y-1-76710Y-8.
- [ 3 ] 郑新,刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用(I)[J]. 微波学报, 2010,26(6):1-6. (ZHEN Xin,LIU Chao. Recent Development of THz Technology and Its Application in Radar and Communication System(I)[J]. Journal of Microwaves, 2011,26(6):1-6.)
- [ 4 ] Kellarev A,Sheffer D. Terahertz Physics, Devices, and Systems V:Advance Applications in Industry and Defense[C]// Proceedinds of SPIE. Orlando,FL: [s.n.], 2011,8023:802302-802309.
- [ 5 ] Tretyakov M Yu, Koshelev M A,Vilkov I N,et al. Resonator spectroscopy of the atmosphere in the 350-500 GHz range[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013,114:109-121.
- [ 6 ] Phillips Dane J,Tanner E A, Everitt H O,et al. Infrared/Terahertz Double Resonance Spectroscopy Remote Sensing[C]// 2011 36th International Conference on Infrared,Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz). USA:[s.n.], 2011:1-2.
- [ 7 ] Kellarev A,Sheffer D. Terahertz Physics, Devices, and Systems V:Advance Applications in Industry and Defense[C]// Proceedinds of SPIE. Orlando,FL: [s.n.], 2011,8023:802302-802309.
- [ 8 ] Appleby R,Wallance H B. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region[J]. IEEE Trans. on Antennas Propag, 2007,55(11):2944-2956.
- [ 9 ] Bryllert T,Cooper K B,Denglerretal R J,et al. A 600 GHz imaging radar for concealed objects detection[C]// 2009 IEEE Radar Conference. Pasadena,CA:[s.n.], 2009:1-3.

- [10] Essen H,Wahlen A,Sommer R,et al. High-bandwidth 220 GHz experimental radar[J]. Electronics Letters, 2007,43(20): 1114–1116.
- [11] Sheen D M,Hall T E,Severtsen R H,et al. Active wideband 350 GHz imaging system for concealed-weapon detection[C]// Proceedings of SPIE. Orlando,FL:[s.n.], 2009.
- [12] Dengler R J,Cooper K B,Chattopadhyay G,et al. 600 GHz Imaging Radar With 2 cm Range Resolution[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu:[s.n.], 2007:1371–1374.
- [13] Chattopadhyay G,Cooper K B,Dengler R,et al. A 600 GHz Imaging Radar for Contraband Detection[C]// 19th International Symposium on Space Terahertz Technology. Groningen:[s.n.], 2008:300–303.
- [14] 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):169–182.
- [15] Cooper K B,Dengler R J,Llombart N. Impact of frequency and polarization diversity on a terahertz radar's imaging performance[C]// Passive Millimeter-Wave Imaging Technology XIV. Orlando:[s.n.], 2011.
- [16] Cooper K B, Trabert J F,Dengler R J. Carrier Noise-Limited Penetration in THz Radar Imaging[C]// 2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). Montreal:[s.n.], 2012:1–3.
- [17] Reck T,Siles J,Jung C,et al. Array Technology for Terahertz Imaging[C]// Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XV, Proceedings of SPIE. Baltimore:[s.n.], 2012.
- [18] Sheen D M,McMakin D L,Jeffrey B,et al. Active imaging at 350 GHz for security applications[C]// Proceedings of SPIE, Orlando:[s.n.], 2008.
- [19] Sheen D M,McMakin D L,Hall T E. Cylindrical millimeter-wave imaging technique for concealed weapon detection[C]// Proceedings of SPIE. Orlando:[s.n.], 1997:242–250.
- [20] Sheen D M,McMakin D L,Hall T E. Combined illumination cylindrical millimeter-wave imaging technique for concealed weapon detection[C]// Proceedings of SPIE. Orlando:[s.n.], 2000:52–60.
- [21] 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.
- [22] Sheen D M,McMakin D L,Hall T E. Cylindrical millimeter-wave imaging technique and applications[C]// Proceedings of SPIE. Orlando:[s.n.], 2006.
- [23] Sheen D M,Hall T E,Severtsen R H,et al. Standoff concealed weapon detection using a 350 GHz radar imaging system[C]// Proceedings of SPIE. Orlando:[s.n.], 2010.
- [24] Spiegel W V,Weg C A,Henneberger R,et al. Active THz-imaging system with improved frame rate[C]// Proceedings of SPIE. Orlando:[s.n.], 2009.
- [25] Kapilevich B,Pinhasi Y,Arusietal R. 330 GHz FMCW Image Sensor for Homeland Security Applications[J]. J. Infrared Milli. Terahz Waves, 2010,31:1370–1381.
- [26] Robertson D A,Marsh P N,Bolton D R,et al. 340 GHz 3-D radar imaging test bed with 10 Hz frame rate[C]// Proceedings of SPIE. Baltimore:[s.n.], 2012.
- [27] 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.
- [28] Essen H,Wahlen A,Sommeretal R,et al. Development of a 220-GHz Experimental Radar[C]// 2008 German Microwave Conference. Hamburg-Harburg:[s.n.], 2008:1–4.
- [29] Goyette T M,Dickinson J C,Linden K J,et al. 1.56 Terahertz 2-frames per second standoff imaging[C]// Proceedings of SPIE. San Jose:[s.n.], 2008.
- [30] Danylov A A,Goyette T M, Waldman J,et al. Terahertz inverse synthetic aperture radar(ISAR) imaging with a quantum cascade laser transmitter[J]. Optics Express, 2010,18(15):16264–16272.
- [31] Svedina J A M,Rudnera S,Thordarsson G,et al. An experimental 210 GHz radar system for 3-D stand-off detection[C]// 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves,2010. Rome:[s.n.], 2010:1–2.
- [32] Iwaszczuk K,Heiselberg H,Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements[J]. Optics Express, 2010,18(25): 26399–26408.
- [33] 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.)
- [34] 佚名. 中国工程物理研究院太赫兹通信和雷达技术取得重要突破[J]. 信息与电子工程, 2012,10(1):封三.

- [35] 林华. 无人机载太赫兹合成孔径雷达成像分析与仿真[J]. 信息与电子工程, 2010,8(4):373-382. (LIN Hua. Analysis and simulation of UAV terahertz wave synthetic aperture radar imaging[J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(4):373-382.)
- [36] 赵刚,高恒,杨闯,等. 0.89 THz 激光器及其在等离子体诊断及隐身目标探测中的应用[C]// 第一届全国太赫兹科学技术与应用学术交流会论文集. 四川绵阳:[s.n.], 2012:524-528.
- [37] 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论文集. 四川绵阳:[s.n.], 2012:591-596.
- [38] Armstrong C M. The Truth About Terahertz[J]. IEEE spectrum, 2012,49(9):36-41.
- [39] Cooper K B,Dengler R J,Nuria L,et al. Penetrating 3D 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.
- [40] 郑新,刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用(II)[J]. 微波学报, 2011,27(1):1-5. (ZHEN Xin,LIU Chao. Recent Development of THz Technology and Its Application in Radar and Communication System[J]. Journal of micro-waves, 2011,27(1):1-5.)

#### 作者简介:



梁美彦(1984-),女,山西省太原市人,北京理工大学博士研究生,主要从事太赫兹雷达和遥感方面的研究.email:norways\_forest@163.com.

邓朝(1982-),男,山西省运城市人,北京理工大学在读博士,主要从事太赫兹安检仪的设计和研发.

张存林(1961-),男,北京市人,教授,主要从事太赫兹光谱与成像技术和太赫兹频谱仪的研究.