

太赫兹雷达技术研究进展*

冯伟¹ 张戎² 曹俊诚^{2,†}

(1 江苏大学物理系 镇江 212013)

(2 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)

2013-08-07 收到

† email: jccao@mail.sim.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20131203

Progress in terahertz radar technology

FENG Wei¹ ZHANG Rong² CAO Jun-Cheng^{2,†}

(1 Department of Physics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2 Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

摘要 文章介绍了太赫兹技术的发展和研究现状,概述了太赫兹波的主要特性,着重论述并举例分析了太赫兹波在雷达探测系统中的应用。太赫兹雷达具有优越的反隐形能力,很高的距离分辨率,超大信号带宽,较强环境适应能力,低截获率,强抗干扰性和穿透等离子体能力等诸多优点,在军事上有很强的应用前景,对国防和国家安全具有重要的应用价值。

关键词 太赫兹, 太赫兹雷达, 合成孔径雷达, 太赫兹成像

Abstract An introduction to the state of the art of terahertz (THz) technology is presented. The characteristics of THz waves are described briefly, followed by a detailed review of THz radar systems. Terahertz radar is known to be superior in military applications due to its anti-stealth capability, high resolution, broad bandwidth, adaptability to the environment, low interception rate, and strong anti-interference and plasma penetration abilities. These advantages will lead to potential applications in national defense and security.

Keywords terahertz, THz radar, synthetic aperture radar, THz imaging

1 太赫兹波

太赫兹^[1, 2](terahertz, THz)波通常是指频率为 100 GHz—10 THz (波长约为 3 mm—30 μm)的电磁波,位于微波和远红外光之间,也被称为 T 射

线。相比于其他电磁频段的电磁波,THz 波的特点及应用可概括为:(1) 大约有 50% 的宇宙空间光子能量和大量星际分子的特征谱线在 THz 范围,这对天体物理及宇宙学研究具有重要意义;(2) 大量有机分子的转动和振动跃迁能量以及半导体的子带和微带能量都在 THz 范围,因此 THz 波可用于物质的指纹识别和结构表征;(3) 相比于 X 射线,THz 光子能量小,不会损伤生物组织,适合于生物医学成像;(4) THz 辐射能穿透非金属和非极性材料,如纺织品、纸板、塑料、木料等包装物,可用于隐匿物体的检测,能穿透烟雾和浮

*国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB339803)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2011AA010205)、国家自然科学基金(批准号: 61321492, 61131006)资助项目,国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2011YQ150021), 02 国家科技重大专项(批准号: 2011ZX02707),中国科学院重要方向项目(批准号: YYYJ-1123-1),中国科学院创新团队国际合作伙伴计划资助项目

尘, 对不同环境适应能力强, 可用于火灾和战场等环境的成像及通信应用。

THz波的上述特点决定了THz技术在基础研究、工业应用、生物学、医学以及军事等领域具有重要的应用前景。近年来, 随着THz源和探测器^[3-6]性能的不不断提高, THz应用系统的研究与开发逐渐受到了世界各国的关注, 美国、欧洲和日本尤为重视。在美国, 从上世纪90年代中期开始, 美国国家航空航天局(NASA)、美国国防部高级研究计划局(DARPA)、美国国家科学基金会(NSF)、美国能源部(DOE)、美国国家卫生研究院(NIH)以及多个重要的国家实验室等都对THz科技研究进行了大规模的投入, 并取得诸多成果。

2 太赫兹雷达的特点

在以信息技术为核心的现代化战争中, 信息化的武器装备比例不断提高, 作为一个新的频段资源, THz波技术有很强的军事应用前景, 对国防和国家安全具有重要的应用价值。与传统雷达相比, THz雷达具有很多优点, 其中最重要的一点是其独特的反隐形能力。

隐形技术主要包括无源隐形技术和有源隐形技术两大类。目前人们所说的隐形技术主要是指无源隐形技术, 具体包括隐形外形技术和隐形材料技术。在隐形外形技术中, 隐身飞机采用了多面、多锥体和飞翼式布置以及燕尾设计, 把机身与机翼融为一体, 通过内置发动机和油箱等措施, 将机身的突出部位减少到最低程度, 使整架隐身飞机形成一种平滑的过渡, 以消除角反射效应。对于这种方式的隐形, 超宽带THz雷达的一系列回波将携带不同角度的信息, 并可通过逆合成孔径处理, 进行目标成像, 从而实现隐形飞机目标识别^[7, 8]。隐形材料技术则是根据目标对电磁波的反射和吸收规律, 在目标上采用吸波材料和透波材料, 以吸收和减弱对方侦察系统的雷达回波能量。在目前的技术条件下, 隐形材料一般都是窄带宽的, 而且都是针对常规雷达的频段设计的, 因此它对常规雷达具有很好的隐形能力, 但

是对THz频段却难以进行有效的隐形。已有相关研究测试了X射线波段微波吸收材料在THz波段的吸收特性, 结果表明, 对于频率为0.2—1.5 THz的电磁波透过率在20%—30%, 因此THz波可以较好地透过微波频段的隐形材料, 有利于隐形目标探测。此外, THz雷达系统具有穿透等离子体实现探测的能力, 所以THz雷达能突破等离子体隐身技术。

除了具有很强的反隐形能力, THz雷达还有以下其他优点^[8, 9]:

(1)由于THz波具有更短的波长和更高的定向性, 所以THz雷达具有更高的分辨率和更强的保密性。

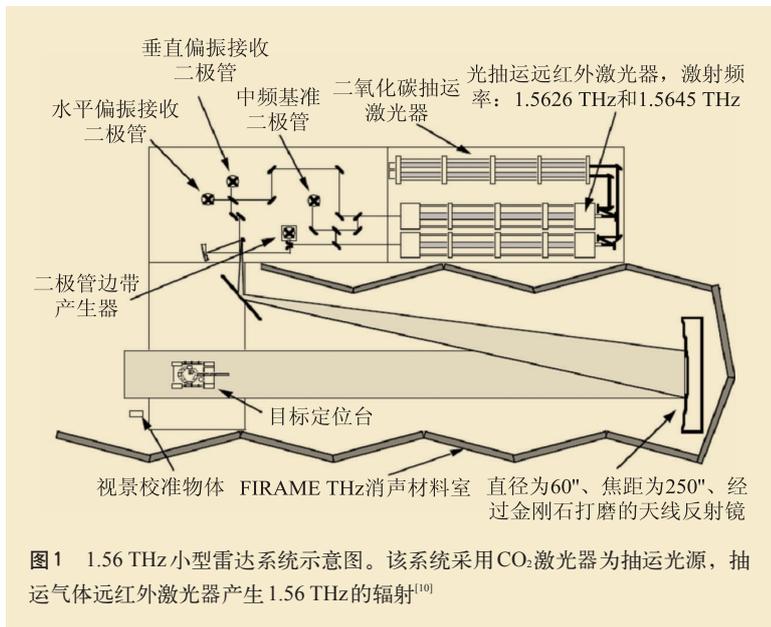
(2)THz雷达脉冲具有很宽的带宽, 因而具有很高的目标成像识别能力, 这是普通微波雷达所不可比拟的。

(3)雷达频率越高, 波束宽度越窄。THz频段提供的极窄天线波束, 可以获得更高的天线增益和更高的角跟踪精度, 因而THz雷达可以获得更好的角分辨率。

(4)现有的电子战干扰手段主要集中在微波频段及红外频段, 对THz频段难以进行有效的干扰, 因此THz雷达系统具有突出的抗干扰能力。同时, THz频段提供的极窄天线波束可以减少干扰机注入雷达主瓣波束的机会, 降低雷达对干扰的灵敏度。

3 太赫兹雷达研究现状

目前国际上关于THz雷达的研究工作已逐步展开, IEEE于2011年新增专题期刊:“太赫兹科学与技术学报”(IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology), THz雷达和通信是其中的一个重要专题领域。阿贡国家实验室(ANL)研发的毫米波雷达监测系统, 可以快速遥感检测低浓度的空气化学成分、气体泄漏和辐射, 并用于国家安全方面; 欧盟的IMSK计划包含了THz雷达方面的研究, 用于区域监控、检查站控制、核生化、辐射和高泄露爆炸物探测等; DotFive计



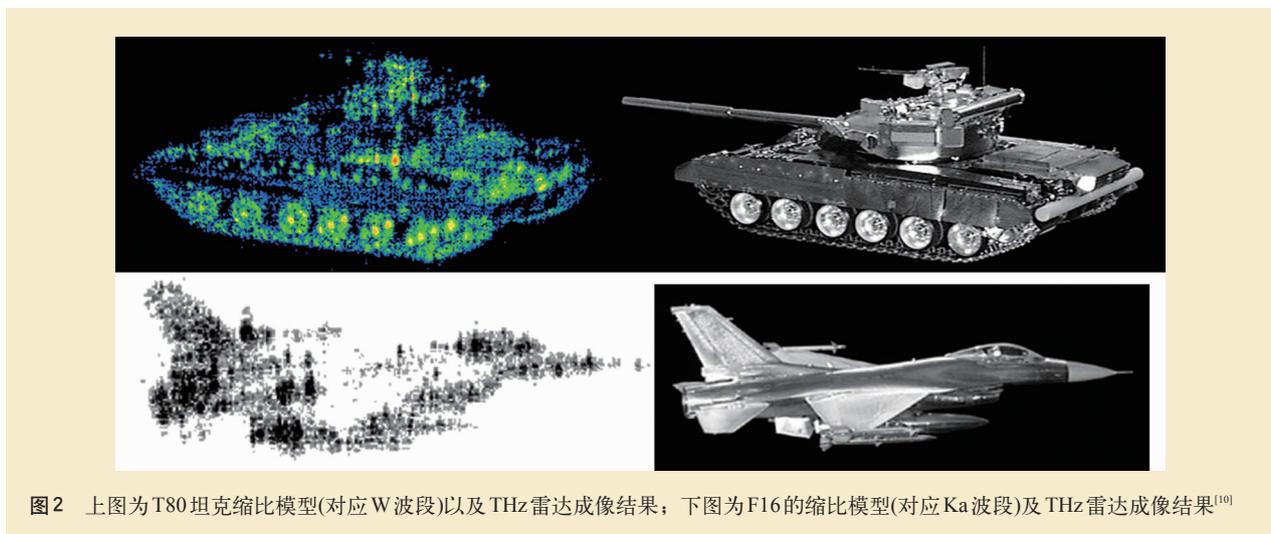
划则包含了汽车雷达的研究，用于长距离防撞预警系统。下面我们将重点介绍几个THz雷达系统，并简单分析THz雷达的发展趋势。

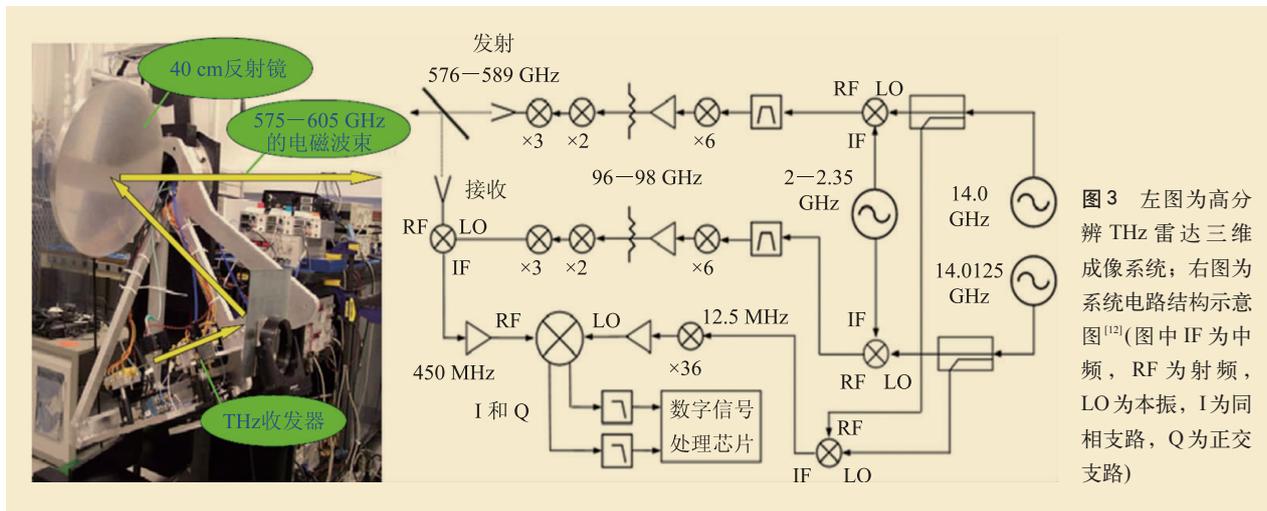
2000年，美国马萨诸塞州立大学亚毫米波技术实验室(STL)与美国陆军国家地面智能中心合作，研制了一套频率为1.56 THz的小型雷达系统^[10]，如图1所示。该雷达系统主要用于测试典型战术目标的缩比模型(按照电磁波的波长比例缩放)，包括T80坦克、F16飞机、BMP-2步兵战车、米格-29飞机等。图2为F16四十八分之一缩比模型和T80坦克缩比模型的成像结果。从缩比模型的测试结果得到了实际目标在W波段的雷达散射截

面(RCS)，说明可以利用THz雷达对毫米波/亚毫米波段的战术目标缩比模型进行探测，从而利用THz雷达可以实现对实际目标的探测和成像。

2006年美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)研制成功了具有高分辨率测距能力的THz雷达成像系统。当目标距离为4 m时，一维测距分辨率大约为2 cm^[11]。2008年，在国际空间THz技术研讨会上，该实验室又报道了改进的三维成像探测系统，其成像分辨率小于0.6 cm，4 m距离上的测距分辨率约为0.5 cm^[12, 13]。相比于传统连续波RF成像系统，该系统可选择性地提取所需目标回波信号，从而排除背景中其他物体反射的信号。图3为该成像系统的结构图。发射端的中心频率为585 GHz，输出功率为0.3—0.4 mW，工作在线性调频连续波模式，带宽为12.6 GHz，调频斜率为250 MHz/ms。接收端混频器的中频为450 MHz，噪声温度约为4000 K。采用该系统可以实现对人体及隐匿物体的三维成像，如图4所示。2010年，JPL在以前工作的基础上，进一步研制了THz频段的快速高分辨雷达，实现了在5 s内对25 m外隐藏武器的探测^[14]。相比于第一代系统，成像速率大大提高，并且成像距离也由原先的4 m扩大至25 m。从图4给出的对人和隐藏物体的三维成

号，从而排除背景中其他物体反射的信号。图3为该成像系统的结构图。发射端的中心频率为585 GHz，输出功率为0.3—0.4 mW，工作在线性调频连续波模式，带宽为12.6 GHz，调频斜率为250 MHz/ms。接收端混频器的中频为450 MHz，噪声温度约为4000 K。采用该系统可以实现对人体及隐匿物体的三维成像，如图4所示。2010年，JPL在以前工作的基础上，进一步研制了THz频段的快速高分辨雷达，实现了在5 s内对25 m外隐藏武器的探测^[14]。相比于第一代系统，成像速率大大提高，并且成像距离也由原先的4 m扩大至25 m。从图4给出的对人和隐藏物体的三维成





像结果中，我们可以清楚地看到，无论物体在衣服里边或是衣服外边，它都能获得几乎相同的成像效果。2012 年，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聚氯乙烯管。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。因此，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率为代价使用低频信号^[15, 16]。另外，在成像速率方面，2012 年，JPL 实验室通过等离子体腐蚀硅技术，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^[17]。随着成像速率以及成像距离的大幅度提升，该系统有望在安全检查和反恐方面得到广泛的应用。

合成孔径雷达(SAR)和逆合成孔径雷达(ISAR)是一种利用合成无线电技术获得高方位分辨率的相干成像雷达，无人机载合成孔径雷达是未来战争中实现“无伤亡”侦察的一种重要手段。THz 合成孔径雷达有以下技术特点^[18]：(1)与传统 THz 成像系统相比，合成孔径处理可取得更高的分辨率；(2) THz 合成孔径雷达目标成像棱角效应明显，有利于目标外形特性提取；(3)在 THz 频段，微

多普勒特征明显，有利于慢速运动目标的检测。因此，THz 合成孔径雷达成像具有全天候、高分辨以及宽绘制带的特性，它可以大大地提高雷达的信息获取能力，特别是战场感知能力。德国应用科学研究所(FGAN)实验室研制了分辨率为 3.5 cm 的 94 GHz 的高分辨率毫米波成像雷达。之后，在 2007 年，该实验室又研制了一部工作频率为 220 GHz 的太赫兹成像雷达 COBRA-220。COBRA-220 实现了 8 GHz 的大带宽，使得高分辨率 ISAR 成像更容易实现。该实验室分别用这两个试验系统进行了转台目标 ISAR 成

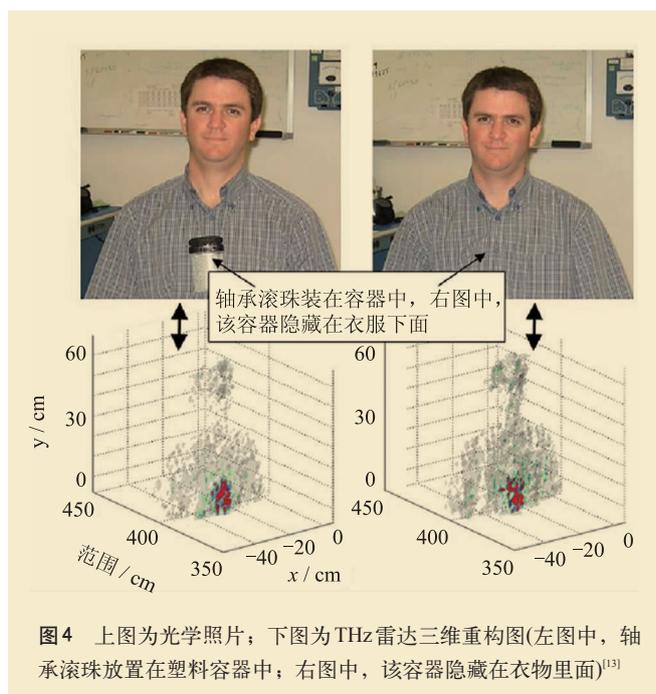




图5 上图左为光学照片, 上图右为自行车在 220 GHz 时的散射点分布; 下图为自行车在 94 GHz 时的散射点分布



图7 (a) 刻有“STL”字样的铝板照片; (b) 将该铝板置于 FedEx 信封中, 采用逆合成孔径雷达成像, 分辨率为 $0.4 \times 0.6 \text{ mm}^{[20]}$

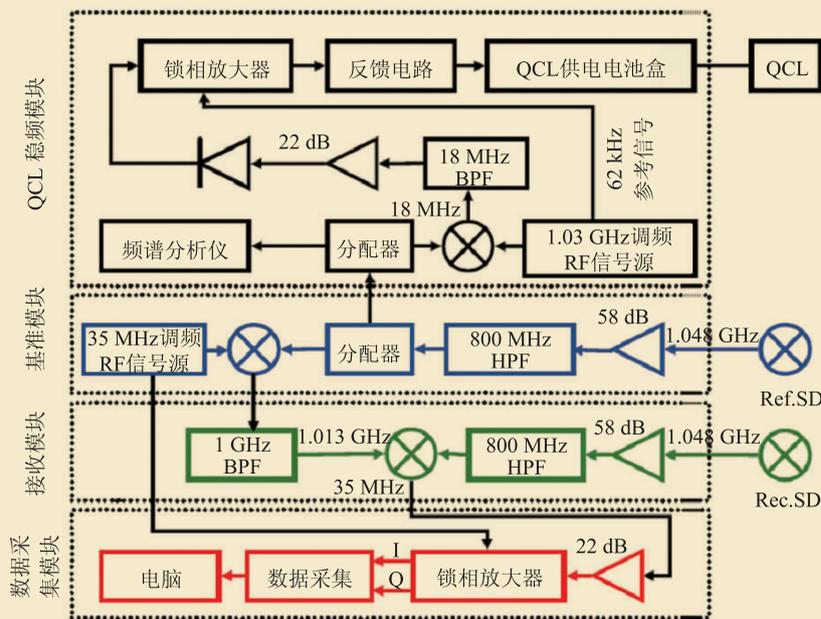
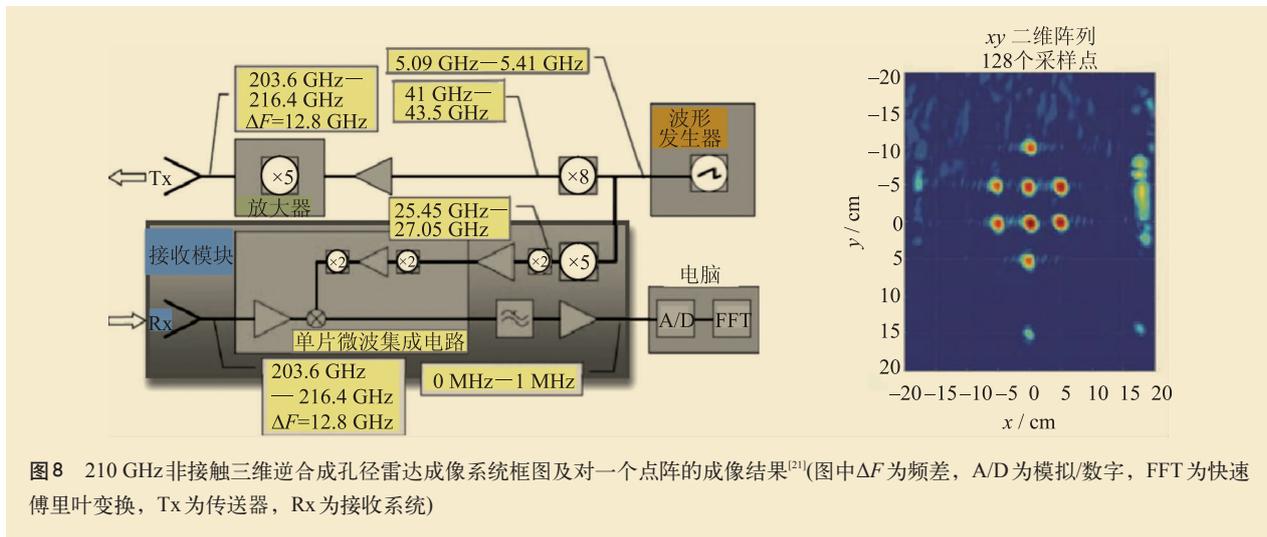


图6 THz 合成孔径雷达成像系统示意图^[20](图中 QCL 为量子级联激光器, RF 为射频, HPF 为高通滤波器, BPF 为带通滤波器, I 为同相支路, Q 为正交支路)

像试验, 两部雷达采用相同的天线, 目标距离为 150 m, 试验结果显示, 94 GHz 时分辨率为 3.5 cm, 220 GHz 时分辨率为 1.8 cm。显然太赫兹雷达能够获得更高的成像分辨率, 同时可以获取更多的目标图像细节信息^[19], 如图 5 所示。2010 年, 美国马萨诸塞州立大学亚毫米波技术实验室(STL)进行了逆合成孔径雷达成像实验^[20]。该系统采用 THz 量子级联激光器(QCL)为发射器, THz QCL 的工作频率为 2.4 THz, 光学抽运分子激光器为本地振荡源, 采用两个肖特基二极管混频器分别用作接收器和参考信号通道, 从而获得高分辨的缩比模型

及隐匿物体的图像。图 6 和图 7 分别为系统结构的示意图和信封中隐匿物体的 THz 成像结果。另外, 在 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 12.8 GHz 带宽的扫频信号, 其分辨率可以达到 1.2 cm, 数据量可达到 14 GB, 一幅图像的扫描时间是 10—20 min, 系统及成像结果如图 8 所示^[21]。2012 年, 美国国防部高级研究计划局(DARPA)开始进行基于视频合成孔径雷达(video synthetic aperture radar, ViSAR)方面的工作, ViSAR 系统具有透过云层对目标进行定位的能力, 在提供

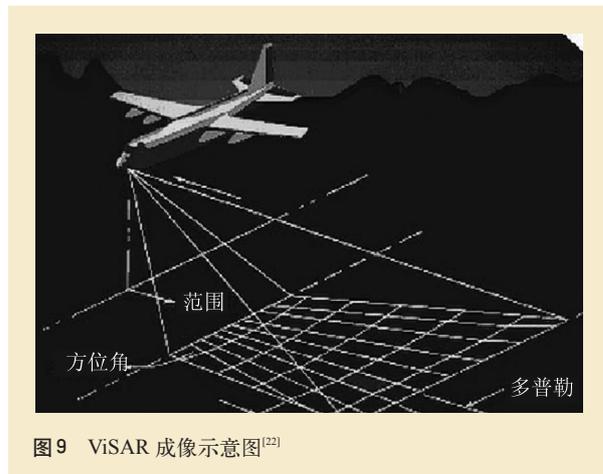


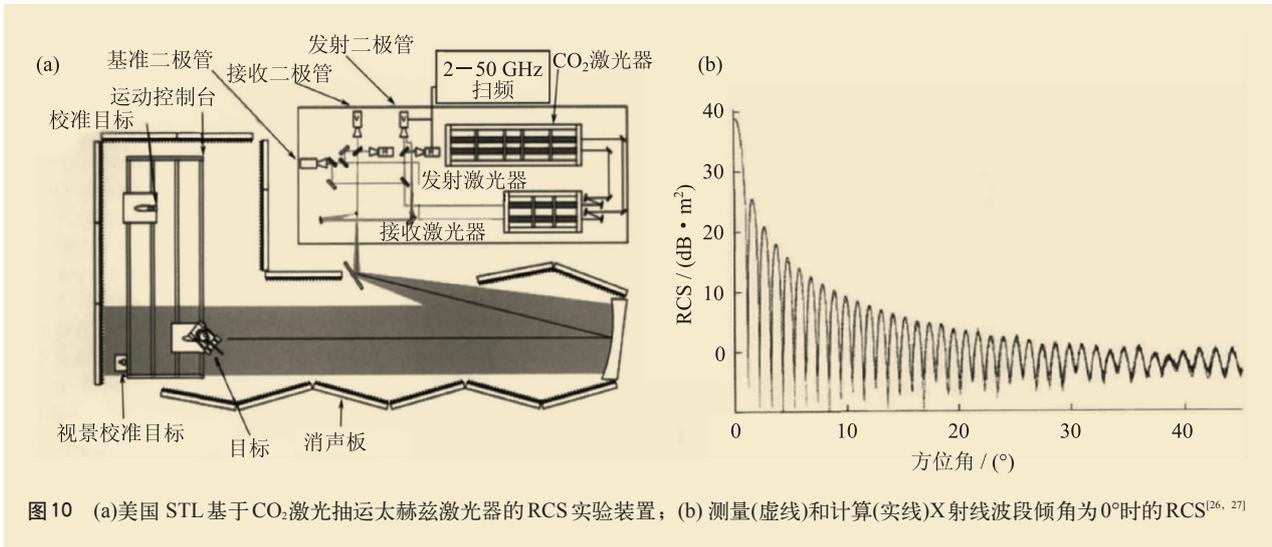
高清晰度和高帧图像的同时,能够降低尺寸、重量和功率。为了支持定位机动目标,ViSAR系统需要有100 m直径的监视范围,以5帧/s的速率得到近似0.2 m的合成孔径雷达成像分辨率,其成像示意图如图9所示。最近,中国科学院电子研究所将太赫兹雷达扫描成像和SAR/ISAR成像2种体制相结合,在0.2 THz频率上研制出一维扫描、另一维合成孔径的成像装置^[22]。中国工程物理研究院太赫兹研究中心在2012年研制出载频为0.14 THz、带宽为5 GHz的极高分辨率的太赫兹雷达成像系统样机,系统采用Ka波段毫米波信号二倍频后,作为样机收发链路的谐波混频本振,以线性调频连续波信号作为发射信号,利用该太赫兹雷达进行了成像试验,并得到了一维距离像与ISAR成像结果,实现了3 cm的高分辨率,其ISAR像清晰,反映了目标的细微特征^[23]。在此基础上,他们又研制出0.67 THz成像雷达实验平台,成像分辨率达到1.3 cm,验证了太赫兹雷达的高分辨成像能力^[24]。

4 太赫兹雷达目标散射特征分析现状

太赫兹雷达成像是一个典型的电磁逆散射问题,太赫兹雷达目标散射特性的研究是太赫兹雷达成像的前提。通过对各种目标的雷达散射截面(RCS)的测量,不仅可以了解目标基本散射特

性,检验理论分析的结果,而且可以获得大量的目标特征数据,建立目标RCS数据库。太赫兹RCS测量始于20世纪末,主要针对球、圆柱体等标准体和飞机、坦克等缩比模型。2000年,美国利用输出波长为820 nm飞秒激光器组成的太赫兹时域光谱系统,进行了导体和介质圆柱的0.2—1.4 THz辐射的RCS的测量,太赫兹入射波和接收的散射回波的夹角 $\theta=13^\circ$ ^[25]。2004年,美国STL利用两支CO₂激光抽运气体太赫兹激光器构成的逆合成孔径激光雷达系统,进行了坦克、飞机模型的0.35 THz和1.56 THz成像实验,研究了边长为2.54 cm的立方体和1:16坦克缩比模型1.56 THz目标散射特性^[10, 26]。图10给出了该实验室利用0.35 THz测量(虚线)和理论计算(实线)X射线波段倾角为0°时的RCS值,缩



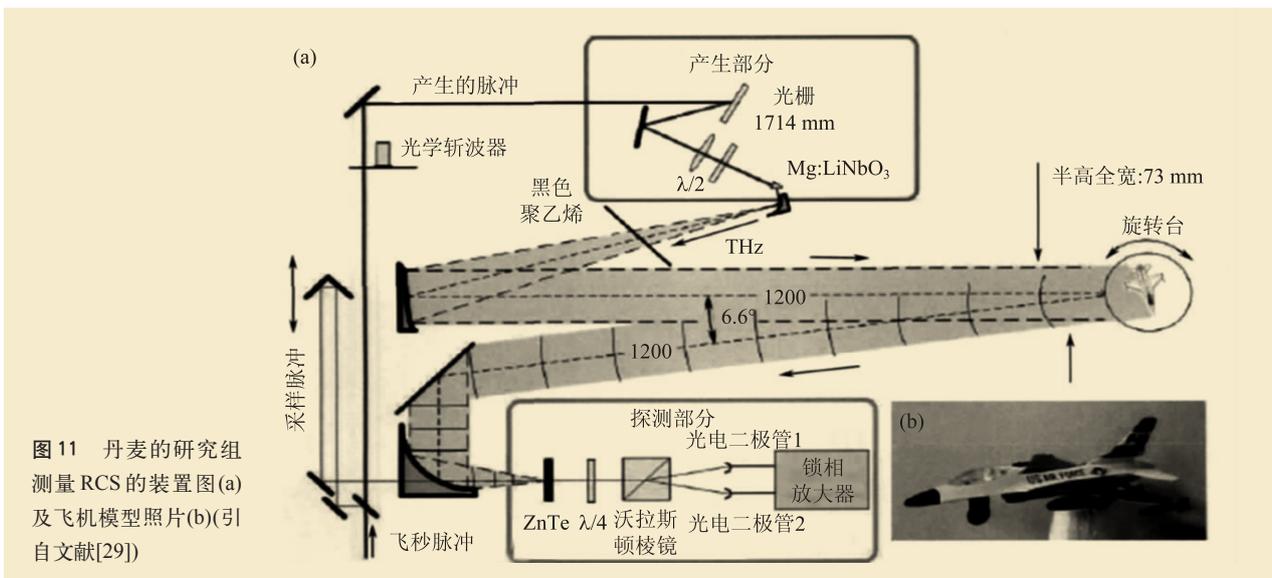


比因子为 1 : 35, 此立方体等价于 X 射线波段时的 RCS 值为 38.8 dB·m² 目标。另外, 2010 年, 他们利用 0.35 THz 还研究了圆柱体的周期性粗糙和瑕疵对太赫兹散射的影响, 实验证明, 亚微米量级粗糙度目标能够通过太赫兹成像加以观察^[27]。2009 年, 德国布伦瑞克太赫兹通信实验室 Jansen 等人也利用飞秒激光器组成的光纤耦合太赫兹时域光谱系统进行了 15 mm×15 mm 金属板的 0.3, 0.5, 1 THz 的 RCS 测量, 入射角为 -35°(散射面法线方向为 0°角, 顺时针旋转取负, 逆时针旋转取正), 散射角 35°^[28]。2010 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, 进行了缩比为 1 : 150 的 F-16 飞机金属模型的 RCS 测量,

如图 11, 12 所示, 在目标处, 太赫兹脉冲的半高全宽(FWHM)为 73 mm, 目标散射到探测器的传输距离总共为 1430 mm, 入射波和接收的散射回波夹角为 6.6°。这是迄今为止利用太赫兹时域光谱系统测量 RCS 频率范围最大, 且目标最复杂的一次实验研究^[29]。

5 太赫兹雷达信号处理及成像算法的研究现状

典型太赫兹成像系统采用的信号有: Synview 公司的 230—320 GHz 线性调频信号; 美国 JPL 的 659—688 GHz 线性调频信号; 德国 FGAN 的



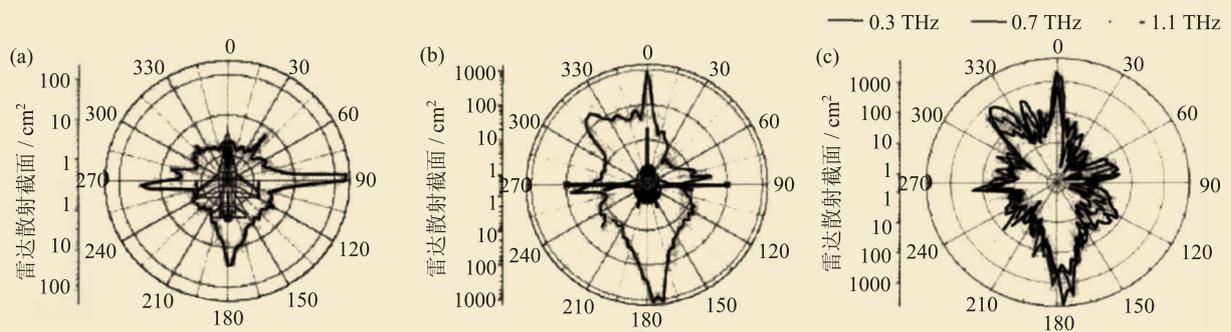


图12 取对数后的RCS方位图 (a)水平转动的频率平均RCS方位图; (b)垂直转动的频率平均RCS方位图; (c) 0.3 THz, 0.7 THz, 1.1 THz时RCS方位图^[29]

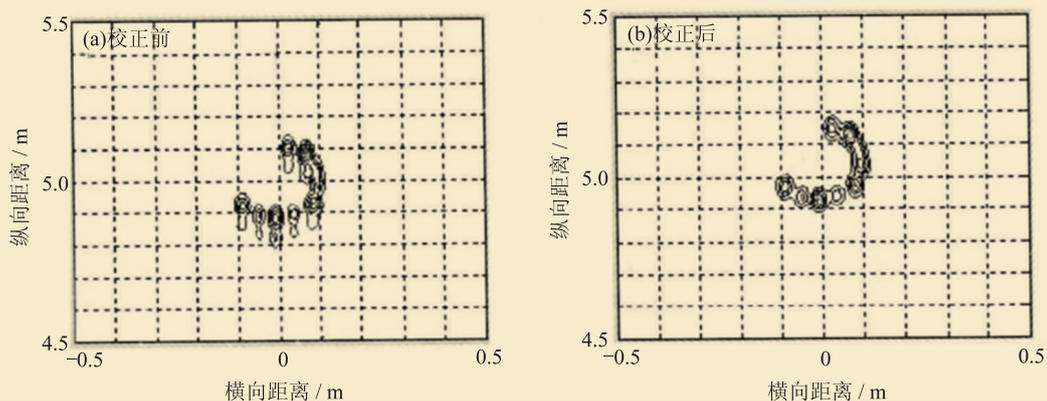


图13 字母“C”ISAR像校正前后成像效果^[30]

206—214 GHz 线性调频信号; 极短脉冲信号等。针对大带宽时的宽积信号, 后端数字信号处理成为系统瓶颈, 可以采用宽带线性调频信号 Stretch 处理方式, 通过混频的方式, 降低对采样带宽和数字处理的要求, 同时需要对信号进行预失真补偿。预失真补偿就是人为地加入一个特性与原系统的非线性失真恰好相反的系统, 进行互相补偿, 使系统不存在稳定性问题, 并有较大的频带宽度。在国外预失真补偿技术已经实用化但没有见到补偿方法的具体报道; 在国内预失真补偿技术尚处于理论研究成果向实际应用过渡阶段^[30, 31]。

合成孔径雷达成像具有比微波成像更高的图像分辨率, 但高分辨率会导致合成孔径雷达成像时散射点抖动问题严重, 不能简单采用距离—多普勒(RD)算法。目前合成孔径成像算法从信号处理的角度可分为三大类: RD算法, Keystone 走动

校正算法和极坐标格式(PFA)算法。RD算法是将非均匀采样的扇形支撑区近似为均匀采样的矩形支撑区, 直接应用傅里叶变换成像, 在小转角的假设下, 这种近似是合理的。Keystone 走动校正算法是将非均匀采样的扇形支撑区近似为梯形支撑区, 通过插值得到矩形支撑区域上的采样点, 然后利用傅里叶变换重构目标像。极坐标格式算法是利用目标回波数据的方位信息可以完全地消除散射中心点的越距离单元走动(越距离单元走动是指散射点总的径向走动量大于一个距离单元宽度), 其成像精度也是最好的。近期中国工程物理研究院电子工程研究所开发了基于CPU+GPU+FPGA的硬件架构和成像处理算法, 算法以距离—多普勒为原型, 引入L类维格纳分布变换提高横向分辨率, 用Keystone变换方法对越距离单元走动进行校正(图13), 开发了系统非线性补偿算

法,并且在载频0.14 THz、带宽5 GHz雷达样机上进行了逆合成孔径雷达成像试验,获得了3 cm×3 cm的成像分辨率和实时成像能力,验证了信号处理方法的有效性^[30]。

6 结束语

随着THz源和探测器性能的不不断提高,THz技术在军事领域的应用正逐步深入。目前,世界

各国均在大力发展自己的THz技术。由于THz波自身的优点,相比传统雷达,THz雷达分辨率高,适应环境能力以及反隐形和抗干扰能力都很强。本文介绍了当今THz雷达的研究现状,列举了一些THz雷达系统并进行了相关分析,对THz雷达的信号处理及算法也进行了概述。目前的研究趋势是,从低频到高频,从一维到多维,从扫描到快速,最终开发出成熟的THz雷达系统,这对国防和国家安全具有重要意义。

参考文献

- [1] Siegel P H. IEEE Trans. Microw. Theory Techn.,2002,50:910
- [2] Tonouchi M. Nature Photon.,2007,1: 97
- [3] Williams B S. Nature Photon.,2007,1: 517
- [4] Cao J C. Phys. Rev. Lett.,2003,91: 237401
- [5] 曹俊诚. 功能材料与器件学报,2003,9: 111
- [6] Liu H C, Luo H, Song C Y *et al.* IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.,2008,14: 374
- [7] 徐军,罗积军,李喜来等. 光学技术,2006,32: 513
- [8] 梁美燕,邓朝,张存林. 太赫兹科学与电子信息学报,2013,11: 189
- [9] 郑新,刘超. 微波学报,2011,27: 1
- [10] Goyette T M, Dickinson J C, Waldman J *et al.* A 1.56THz Compact Radar Range for W-band Imagery of Scale-model Tactical Targets. In: Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers. 2000. 4053: 615
- [11] Dengler R J, Cooper K B, Chattopadhyay G *et al.* 600 GHz Imaging Radar with 2 cm Range Resolution. IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu,2007. 1371
- [12] Chattopadhyay G, Cooper K B, Dengler R *et al.* A 600 GHz Imaging Radar for Contraband Detection. In: Proceedings of 19th International Symposium on Space Terahertz Technology. Groningen,2008. 300
- [13] Cooper K B, Dengler R J, Chattopadhyay G *et al.* IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.,2008,18: 64
- [14] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N *et al.* Proc. SPIE,2010, 7671: 76710Y-1
- [15] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N. Impact of frequency and polarization diversity on a terahertz radar's imaging performance. Passive Millimeter-Wave Imaging Technology XIV. Orlando,2011
- [16] Cooper K B, Trabert J F, Dengler R J. Carrier Noise-Limited Penetration in THz Radar Imaging. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Montreal,2012
- [17] Reck T, Siles J, Jung C *et al.* Array Technology for Terahertz Imaging Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XV. In: Proc. SPIE. Baltimore,2012
- [18] 林华. 信息与电子工程,2010,8: 373
- [19] Essen H, Biegel G, Sommer R *et al.* High Resolution Tower-Turntable ISAR with the Millimetre Wave Radar COBRA (35/94/220GHz). Germany: FGAN-FHR,2008. 1
- [20] Danylov A A, Goyette T M, Waldman J. Opt. Express,2010,18: 16264
- [21] Svedina J A M, Rudner S, Thordarsson G *et al.* An experimental 210 GHz radar system for 3-D stand-off detection. 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves,2010. Rome:[s.n.],2010. 1
- [22] Gu S M, Li C, Gao X *et al.* IEEE Trans. Microw. Theory Techn., 2012,60: 3877
- [23] 蔡英武,杨陈,曾耿华等. 强激光与粒子束,2012,24: 7
- [24] 成彬彬,江舸,陈鹏等. 太赫兹科学与电子信息学报,2013,1: 7
- [25] McGowan R W, Cheville R A, Grischkowsky D R. IEEE Trans. Microw. Theory Techn., 2000,48: 417
- [26] Goyette T M, Dickinson J C, Gorveatt W J. Proc. SPIE,2004, 5427: 227
- [27] Jagannathan A, Gatesman A J, Horgan T *et al.* SPIE, 2010, 7671: 76710E
- [28] Jansen C, Krumbholz N, Geisb R *et al.* Alignment and illumination issues in scaled THz RCS measurements. 34th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2009
- [29] Iwaszczuk K, Herselberg H, Jepsen P U. Opt. Express, 2010, 18: 26399
- [30] 成彬彬,江舸,杨陈等. 强激光与粒子束,2013,6: 1577
- [31] 刘磊,周峰,陶明亮等. 强激光与粒子束,2013,6: 1469