

太赫兹雷达技术研究进展

王瑞君^{1,2} 王宏强¹ 庄钊文¹ 秦玉亮¹ 邓彬¹

(¹ 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)
(² 中国人民解放军空军 95876 部队, 甘肃 山丹 734100)

摘要 与微波雷达和红外探测器相比,太赫兹技术应用于雷达将带来高距离分辨率、强穿透力、低截获率与强抗干扰能力等众多优势,是目前太赫兹技术的主要应用方向之一。在分析太赫兹雷达特点与优势的基础上,介绍了目前主要太赫兹雷达系统的研究与进展情况,并进一步对太赫兹雷达涉及的目标散射特性技术与成像技术研究进行了进展回顾与评述,由此指出了太赫兹雷达研究中的一些关键技术与主要研究内容。结合太赫兹雷达在空间目标探测与反导拦截中的应用,仿真分析了太赫兹拦截导引头的关键性能指标,为太赫兹雷达技术的应用发展提供参考与借鉴。

关键词 成像系统;太赫兹;雷达;散射特性;合成孔径;固态器件

中图分类号 TN95 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.040001

Research Progress of Terahertz Radar Technology

Wang Ruijun^{1,2} Wang Hongqiang¹ Zhuang Zhaowen¹ Qin Yuliang¹ Deng Bin¹

(¹ School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)
(² 95876 Air Force Troop, the People's Liberation Army, Shandan, Gansu 734100, China)

Abstract Radar in terahertz regime has great advantages compared with microwave radar and infrared detector, such as high range resolution, strong penetrating ability, low intercept probability and strong anti-interference ability, etc. On the basis of analysis of characteristics and advantages of terahertz radar, research progress of terahertz radar systems reported recently is introduced first. Then, study of target scattering characteristics and radar imaging technologies in terahertz regime is reviewed and commented. Some of the key technologies and main research directions related to the terahertz radar are pointed out correspondingly. Key parameters of terahertz radar system are analyzed and simulated concerned with military applications of space target detecting and radar seeker, which helps to provide reference for the application development of terahertz radar.

Key words imaging systems; terahertz; radar; scattering characteristic; synthetic aperture; solid-state device

OCIS codes 110.2970; 040.2235; 110.1220; 110.2350; 290.5820

1 引言

太赫兹技术是目前信息科学技术研究的前沿与热点领域之一,受到世界各国研究机构的高度关注,并且开展了许多基础研究与应用研究方面的工作,这一新型技术的科学价值预示着它具有蓬勃的生命力和美好发展前景^[1,2]。太赫兹波是指频率范围为 0.1~10.0 THz 的电磁波,波长范围为 0.03~3.00 mm,介于微波频段与红外之间,兼具二者的优点^[3]。太赫兹技术应用于雷达中将为现代军事探测技术提供独特的优势^[4,5]。首先,太赫兹波相比微波波长更短,对目标散射特性刻画能力更强;太赫兹雷达的载频频率高,更容易发射大带宽信号,从而具有极高的分辨率特性,可以实现更小尺寸目标的探测、更高分辨率的雷达成像、更

收稿日期: 2012-11-29; **收到修改稿日期**: 2013-01-06; **网络出版日期**: 2013-03-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61171133)和国家自然科学基金青年科学基金(61101182)资助课题。

作者简介: 王瑞君(1986—),男,博士研究生,主要从事雷达信号处理方面的研究。E-mail: wandering_jun@163.com

导师简介: 庄钊文(1958—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事雷达信号处理方面的研究。

E-mail: zhuangzhaowen@nudt.edu.cn

精确的目标运动与物理参数反演。其次,太赫兹频段易于实现极窄的天线波束。在相同天线尺寸下太赫兹波的波束要比毫米波、微波的波束窄得多;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和角跟踪精度,同时,极高的角分辨率也大大提高了多目标识别和分辨的能力。第三,相比激光,太赫兹波穿透烟雾、浮尘、沙土的能力更强,且对空间高速运动目标的气动光学效应与热环境效应不敏感,因此太赫兹雷达可用于复杂环境作战与空间高速运动目标探测;相比微波雷达,基于固态电子学器件的太赫兹雷达收发系统容易小型化,适合于星载与弹载平台。

太赫兹雷达技术的研究主要在太赫兹低频段(0.1~3.0 THz)基于电子学方法开展,而在太赫兹高频段(1~10 THz)主要基于太赫兹光电子学方法开展光谱分析与辐射探测等研究。太赫兹雷达技术涉及到太赫兹电子学研究中的许多共性基础研究问题:太赫兹波在自由空间、大气、水、金属等媒质中的信道传播特性以及与目标相互作用的散射特性;太赫兹全固态与电真空辐射源、功放、波导等器件;宽带复杂信号理论和超高速实时信号处理技术等。本文主要从太赫兹雷达系统实现、太赫兹频段目标散射特性、太赫兹雷达成像三个方面概述了太赫兹雷达关键技术研究进展情况,然后总结了太赫兹雷达研究的关键技术与主要内容,最后针对太赫兹雷达技术的空间监视与反导拦截应用,仿真分析了系统的关键性能指标。

2 太赫兹雷达系统

与传统雷达系统的组成与实现相类似,目前报道的太赫兹雷达系统主要基于太赫兹电真空器件源、太赫兹固态电子学器件源以及太赫兹量子级联激光器源等方式实现,并采用外差式接收方式。其中太赫兹电真空器件以其高功率输出优势在太赫兹雷达系统发展中具有重要意义^[6],全固态电子学器件以其相对先进的工艺技术成为目前太赫兹雷达实验系统收发设备的主要构成。

最早关于太赫兹雷达的报道是1988年马萨诸塞大学的McIntosh等^[7]基于当时真空器件扩展相互作用振荡器(EIO)的发展在215 GHz的大气窗口附近实现了一部高功率非相干脉冲雷达。随后在1991年佐治亚理工学院的McMillan等^[8]为美国军方提出并实现了225 GHz脉冲相干实验雷达,同样采用脉冲扩展相互作用振荡器作为发射机,发射脉冲峰值功率达到60 W,全固态接收机基于1/4次谐波混频器实现。这是当时第一部在如此高的频段实现锁相的相参雷达。但是受限于真空器件本身,无法实现大带宽信号的发射,只能利用该雷达进行目标的多普勒回波测量。太赫兹雷达由于波长非常短,因此多普勒特征将非常明显,可以基于多普勒特征识别目标的不同运动部件。图1为225 GHz脉冲相干雷达以及测得的履带坦克不同部位的多普勒回波。

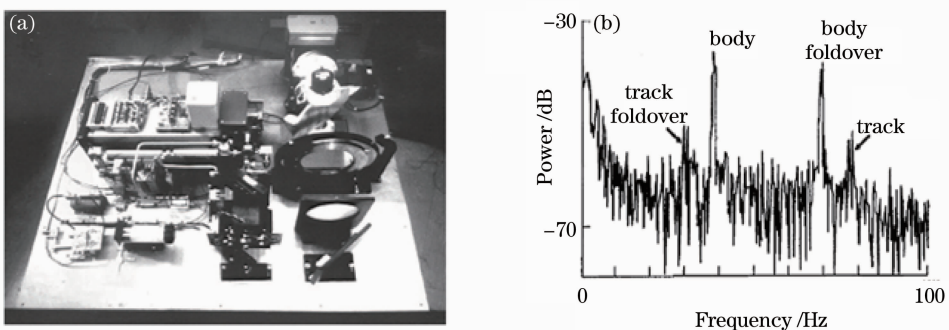


图1 225 GHz 脉冲雷达与测量结果。(a)雷达实物图;(b)履带坦克多普勒回波测量结果

Fig.1 A 225 GHz pulsed radar and measured result. (a) Photo of radar; (b) Doppler return waveform from a tracked vehicle

上述雷达系统受限于发射机体积与信号体制等因素未能进一步走向实用。此后一段时期,太赫兹技术发展仍然面临可实用太赫兹源与太赫兹探测技术的问题。当传统电子学器件源的发射频率增加至太赫兹频段时,可获得的发射功率急剧下降,作用距离受限,同时太赫兹波在大气中传输损耗严重,这些都使得太赫兹雷达技术进展缓慢。20世纪90年代末,美国弗吉尼亚大学的Crowe等^[9,10]在GaAs肖特基二极管倍频技术方面获得突破,使得基于固态电子学倍频源的太赫兹雷达技术向前迈进了一大步。2004年,Crowe所在的VDI公司从弗吉尼亚大学分离,成为业界目前在固态电子学倍频源方面的主要代表,并合作参与了太赫

兹国际天文观测项目 ALMA 和 SOFIA,为其提供太赫兹频段本振源^[11]。

美国加州喷气推进实验室(JPL)在 GaAs 肖特基二极管倍频技术方面也处于领先地位。2008 年,JPL 基于固态电子器件二极管倍频器与混频器研制了一部 580 GHz 的相参主动太赫兹雷达^[12];信号体制采用调频连续波(FMCW)技术,调频带宽将近 20 GHz,可以实现距离向上的高分辨,方位向上利用窄波束扫描实现厘米级别的分辨率。通过波束在二维空间上对目标区域进行连续扫描,能将目标快速映射到三维空间中,实现快速高分辨成像。随后 JPL 对该雷达进行了改进^[13],用一个混合的 DDS/PLL 合成器代替 YIG 合成器产生线性调频信号,使其频率稳定性能更好,同时新系统的波束聚焦与扫描通过安装在双轴旋转台上的偏轴椭球反射镜来完成,进一步提高了光学效率。系统可对 4~25 m 远的隐藏目标进行三维(3D)成像,最高分辨率小于 1 cm,通过对隐藏在衣服下面的手枪进行成像,能够将人体表面的衣服与人体皮肤在距离向上分辨开来,而隐藏在衣服里面的枪支自然轮廓清晰。这样的成像效果主要归功于以下三个原因:1)将近 30 GHz 的巨大带宽带来距离向高分辨率;2)相位的稳定性为相参信号处理提供了保证;3) 675 GHz 的载频能很轻易地穿透衣服。为实现更高分辨率和更高帧速的隐蔽目标成像,同时使成像系统在现实生活中更加实用化,JPL 在 2011 年实现了中心频率 675 GHz 的太赫兹成像雷达^[14],带宽达 29 GHz,作用距离达 25 m。该系统采用了两种方法实现更高帧速的成像:一种通过时分复用多径技术将单波束变成双波束先后照射目标^[15],成像时间缩短一半;另一种方法通过设计前端集成阵列收发器实现多像素点同时扫描成像^[16],成像时间大大缩短。图 2 为 675 GHz 雷达的结构组成框图以及对衣服下隐藏的三个直径 1 inch(1 inch=2.54 cm)的 PVC 管的成像。

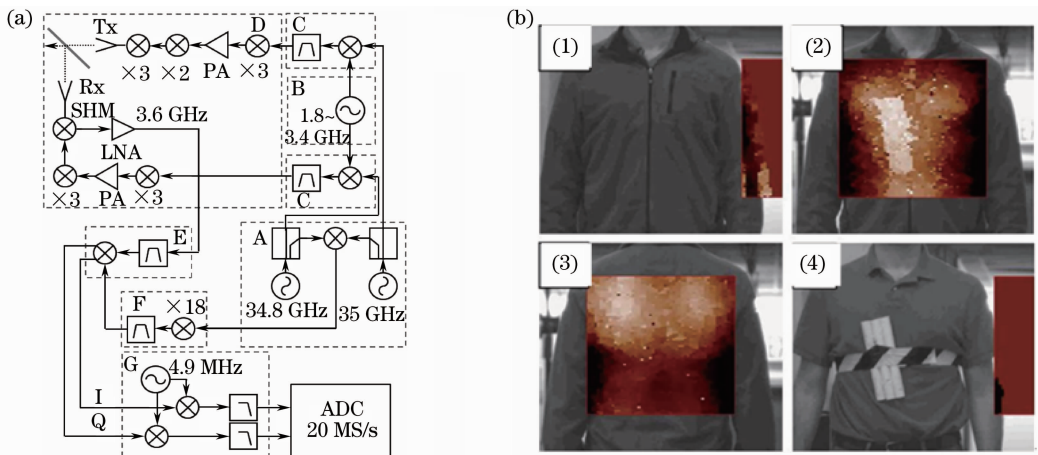


图 2 675GHz 雷达框图与成像结果。(a)组成结构框图;(b)隐藏目标的躯干成像结果

Fig. 2 Block diagram of 675 GHz radar and imaging result. (a) Block diagram; (b) radar images of body with concealed pipes

美国马萨诸塞大学亚毫米波技术实验室(STL)在 2010 年基于太赫兹量子级联激光器(TQCL)实现了一部 2.408 THz 相干雷达成像系统^[17],它利用光抽运分子激光器作为本振并将 TQCL 锁频到其上,保证发射与接收信号的相位稳定性,接收端与参考通道采用一对肖特基二极管混频器,保证系统实现对旋转目标的相干成像。图 3 为该雷达系统组成原理图以及对 1/72 的缩比 T80BV 坦克模型的逆合成孔径雷达(ISAR)成像结果。

欧洲以德国为首最早开展了相关系统研究,包括瑞典、丹麦、英国、以色列、荷兰等国的研究机构也纷纷基于不同方式建立了太赫兹雷达试验系统。2008 年,德国高频物理与雷达技术研究所(FGAN-FHR)在 94 GHz 毫米波雷达 COBRA 的基础上研制了基于固态电子学器件的 220 GHz FMCW 特征测量实验雷达^[18]。该雷达系统的关键组成部件包括低噪放大器、110 GHz 二倍频器与功率放大器等。测试试验对自行车与卡车等目标进行散射中心分布测量,获得了分辨率为 1.8 cm 的二维(2D)像,如图 4(c)所示。以色列撒玛利亚 Ariel 大学 2010 年基于 VDI 公司的固态电子学器件搭建了一部 330 GHz FMCW 太赫兹雷达实验系统用于隐藏目标探测与成像^[19],并通过采用高增益天线进行收发,成像距离可达 40 m,基于测量结果实现了对硬币与隐藏手枪的二维和三维图像重建。瑞典查尔姆斯科技大学在 2010 年基于倍频链路和外差接收链路实现了一部 340 GHz、相对带宽 6.5% 的太赫兹成像雷达^[20],并利用非线性算法进行了成像。在 2011

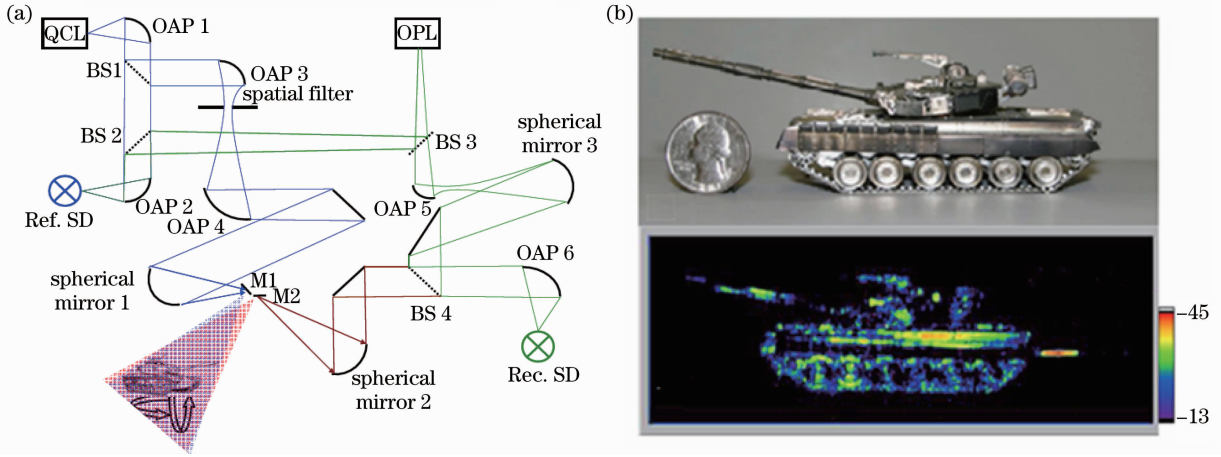


图3 2.4 THz 成像雷达框图与成像结果。(a)收发原理图；(b)1/72 的缩比坦克模型二维成像结果

Fig. 3 Schematic of 2.4 THz imaging radar and its result. (a) TQCL-based THz transmitter/receiver system; (b) azimuth/elevation image of the 1/72 scale model tank

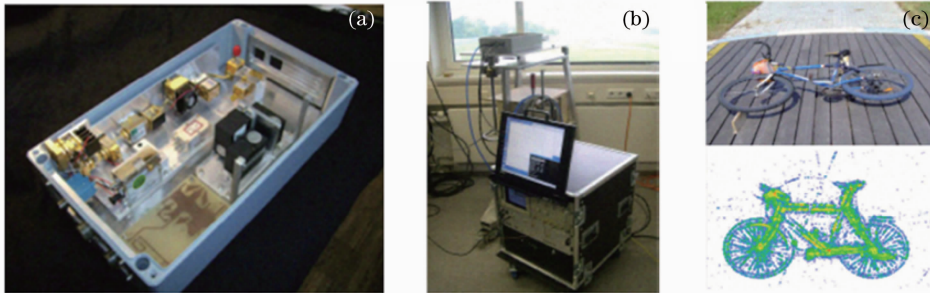


图4 KOBRA 雷达系统及成像结果。(a)收发前端；(b)主控系统；(c)自行车的 ISAR 成像

Fig. 4 KOBRA radar and imaging result. (a) Transmitter/receiver front-end; (b) data acquisition and control; (c) ISAR image of a bicycle

年他们与德国夫琅禾费应用固体物理研究所(IFA)合作研制成功频率 220 GHz 的单片集成的外差低噪接收机与发射机模块^[21],并且在收发模块上融合了基于 $0.1 \mu\text{m}$ 砷化镓异质结场效应晶体管技术的片上集成天线。该集成收发模块可在主被动雷达成像与高速数据通信等方面产生重要应用。

国内近几年有多家单位均开展了太赫兹雷达应用技术研究,并且在短时间内取得了一些重要成果。以中国工程物理研究院为首,在 2011 年基于倍频发射链路和谐波混频接收方法实现了 140 GHz 成像雷达实验系统,这也是国内首部实现成像功能的固态电子学太赫兹实验雷达^[22],目前正在进一步研制演示 670 GHz 全固态成像实验雷达。2012 年中国科学院电子学研究所设计实现了一种 0.2 THz 聚焦波束扫描成像系统,可对人体携带的隐藏目标进行成像^[23]。北京理工大学则基于脉冲步进频信号体制研制了 0.2 THz 成像雷达系统,并完成了分辨率与距离实验测量^[24]。东南大学基于返波管搭建了连续太赫兹波透射与反射成像系统,实现了对不同类型目标的高分辨率成像^[25]。哈尔滨工业大学也在阵列成像系统建设方面取得了进展^[26,27]。太赫兹成像雷达系统均采用大带宽信号实现距离向高分辨,难点之一在于保证带宽范围内的频率调制线性度,因为这将决定接收信号是否具有稳定的相位而利于相干处理和成像分辨性能。因此,研究不同的信号调制方式如线性调频、步进频与编码信号等在太赫兹雷达中的应用具有重要意义。

太赫兹雷达体制发展的另一个趋势是阵列天线收发的成像系统^[28],包括采用小型化单片集成电路(MMIC)的收发阵列和稀疏布置的多发多收天线阵列。阵列天线的宽辐射特性将会产生一个相对较大的视场,并且带来更高的空间分辨率,基于孔径合成技术可以快速的实现太赫兹雷达实时高分辨成像。德国法兰克福大学与丹麦科技大学合作在太赫兹阵列雷达的理论研究与实验系统建设方面取得了进展,他们基于固态电子学信号源提出一种太赫兹阵列雷达成像系统^[29],水平方向利用线性收发阵进行扫描,垂直方向进行机械扫描,系统机械布置如图 5 所示。系统的线性阵列由 8 个发射阵元与 16 个接收阵元构成,工作频段为

220~320 GHz,对线性接收阵列接收的数据基于后向投影算法进行合成图像重建,在2 ms内可以完成128 pixel×128 pixel的图像聚焦。德国的SynView公司在基于全固态太赫兹雷达成像系统SynViewScan的基础上也进一步提出采用多收多发天线与合成重建方法实现太赫兹实时成像^[30]。

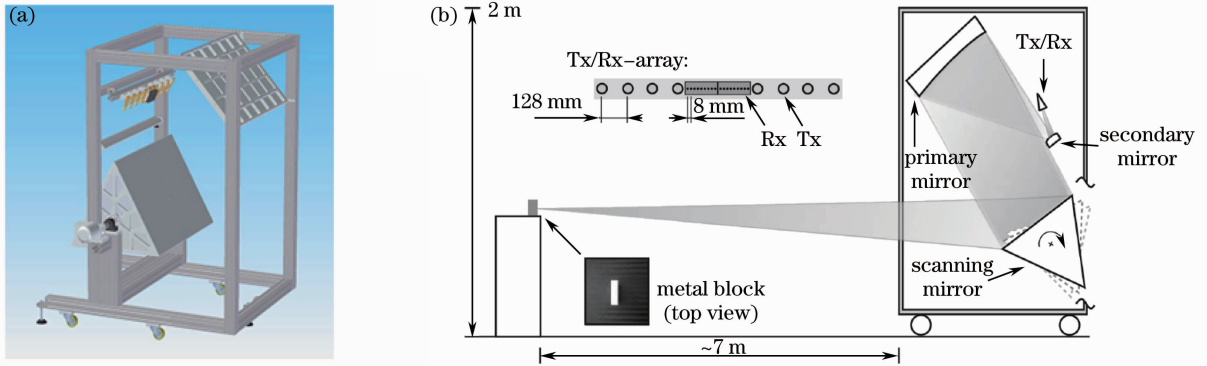


图5 线阵扫描合成孔径成像雷达。(a)结构示意图;(b)工作示意图

Fig. 5 Linear-array scanning synthetic-aperture imaging system. (a) Experimental setup; (b) schematic of workflow

到目前为止,太赫兹雷达探测与成像所研究目标大多为静止目标。对于运动目标情况,无论在太赫兹雷达系统体制研究还是信号处理技术研究方面都只有少量文献报道,这也与太赫兹技术及其在雷达中的应用总体发展水平有关。2010年,中国台湾的研究人员利用光纤传播太赫兹波以及太赫兹光纤定向耦合器作为干涉仪实现了宽带扫频的太赫兹雷达^[31],能对纸箱内活动的小白鼠进行实时的定位与成像,距离向通过大扫频带宽实现高分辨,方位向通过窄波束扫描实现高分辨,系统具有简单紧凑、易于实现和光纤传输使系统对环境不敏感等优势。

纵观太赫兹雷达系统的发展历程与目前进展水平,总体仍处于试验系统演示论证阶段,虽然有少量的近距离安检系统已经实现商业化应用,但太赫兹雷达系统发展才刚刚起步。在解决紧凑型高功率源和高灵敏度探测器的技术难题后,必将在公共安全与军事应用领域产生更大的影响。

3 太赫兹频段目标散射特性

太赫兹频段目标散射特性研究是太赫兹技术应用于雷达的技术基础,是太赫兹主动雷达系统军事用途想定、战技指标确定以及信号体制与检测识别等关键技术研究的依据。由于太赫兹波波长极短,对于物理尺寸在厘米或米量级的军事目标,它在太赫兹频段具有极大的电尺寸,但与近红外及激光频段相比电尺寸又很小,因而必然会呈现出与微波频段和激光频段明显不同的散射特性。太赫兹频段目标散射特性技术也引起了国内外研究者的广泛重视,对太赫兹频段目标散射特性研究主要采用数值计算与实验测量两种方法。目前国外的研究以实验测量方法为主,包括对典型军事目标的缩比模型、粗糙表面的介质目标等进行测量,并将实测数据与数值计算或解析方法的结果进行比较。国内则由于太赫兹技术发展晚于国外,因此实验测量系统的建设也相对滞后,以理论计算与仿真为主,同时包括首都师范大学、天津大学、东南大学、哈尔滨工业大学、中国电子科技集团公司第41研究所、国防科学技术大学与上海航天局第802所等多家单位正在逐步搭建太赫兹目标特性测量系统。基于太赫兹实验测量系统进行太赫兹散射特性研究的主要方式包括利用抛物面型或全息图型紧缩场进行缩距测量,利用时域系统测试目标的瞬态响应,以及利用极窄脉冲高分辨系统和逆合成孔径技术进行目标闪烁点识别的二维和三维成像测量等。

美国马萨诸塞大学STL从1993年开始承担美军方专门雷达特征解决方案(ERADS)工程,同时开展太赫兹器件和系统的研发,为美国国防部提出目前和未来的雷达特征获取需求。STL搭建了多部分别基于抽运气体激光源和全固态电子学源的太赫兹抛物面紧缩场测量系统^[32~36],工作频点包括160 GHz、240 GHz、350 GHz、524 GHz、1.56 THz,并利用太赫兹紧缩场测量系统对军用卡车、坦克的缩比模型等目标进行了测量和成像。为了获得逼真的测量结果,STL还对模型材质与不同背景(沙地、森林等)在太赫兹频段与微波频段的参数关系进行了测试研究^[37]。2010年,STL利用160 GHz与350 GHz全极化紧缩场测量系统分别

对表面光滑圆柱、表面周期粗糙的导体与介质涂层圆柱、带细小刻痕圆柱以及光滑焊接圆柱进行了测量和成像^[38],通过成像可以观测到不同特征引起的目标二维像变化,揭示了太赫兹波识别目标细微结构特征的能力。图6为1.56 THz 紧缩场测量系统及其对1/16 缩比卡车模型的高分辨二维成像,分辨率达到1.1 mm,从成像结果可以轻松识别出卡车的各个关键散射部位。

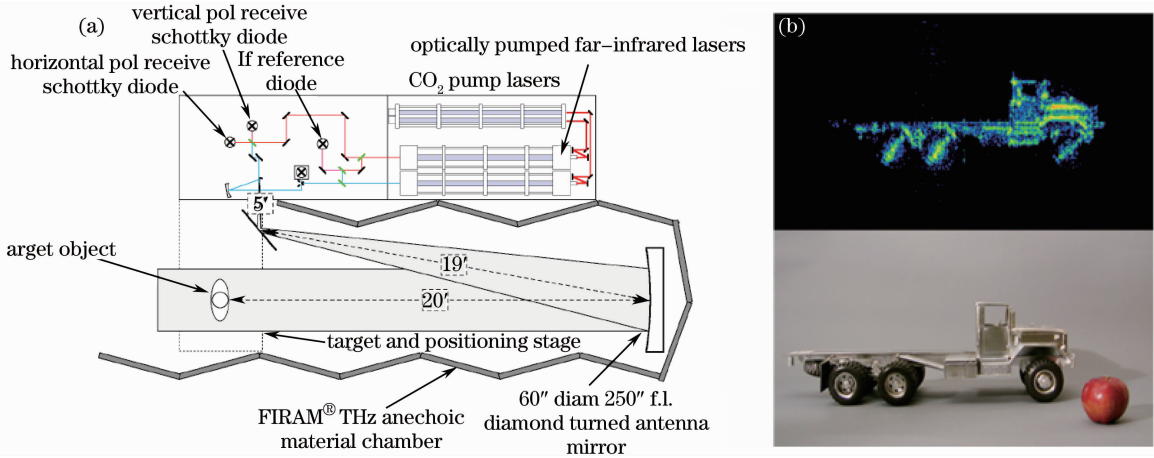


图6 1.56 THz 紧缩场测量系统与测量结果。(a)组成结构图;(b)缩比卡车模型的二维成像结果

Fig. 6 1.56 THz laser-based transceiver and measured results. (a) Schematic of configuration; (b) azimuth/elevation image of a scale model truck

抛物面型紧缩场系统利用抛物面反射镜在很近的距离将球面波变为平面波,对反射镜表面精度要求比较高,采用全息衍射器件作为替代,可以降低其精度要求。芬兰赫尔辛基科技大学建立了全息图型太赫兹紧缩场系统对缩比模型进行雷达散射截面(RCS)测量^[39]。该系统工作频率310 GHz,准单站配置,静态场区域直径12 cm。通过对标准体(金属球和平板)的测试,验证了相位全息图型RCS紧缩场测量的可行性,并将导弹模型的测量结果与计算结果进行了对比验证,如图7所示。

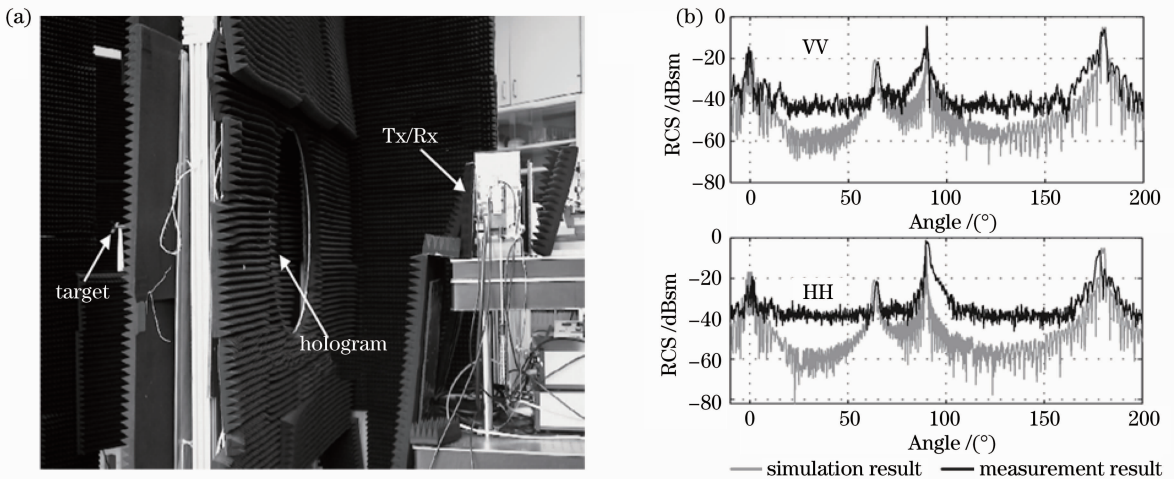


图7 相位全息图型太赫兹紧缩场系统与测量结果。(a)系统结构图;(b)导弹模型不同极化 RCS 测量与仿真结果比较

Fig. 7 Phase-hologram-based compact range system and measurement result. (a) Structure of the facility; (b) measured and simulated data of the missile target RCS at different polarization

基于太赫兹时域系统的目标散射特性测量研究在20世纪末就已经开展。1997年美国俄克拉荷马州立大学的Cheville等^[40~42]基于太赫兹时域系统开始测量研究太赫兹目标散射特性,并分别基于非准直波束时域系统和准直波束时域系统对石英圆柱、氧化铝球^[40]、氧化铝圆柱^[41]、飞机模型^[42]等不同目标进行测量,从得到的目标时域脉冲散射响应可以清晰地观测到目标不同类型散射特征信号,如镜面反射波、表面爬行波、轴向反射波等。德国布伦瑞克太赫兹通信实验室Jansen等^[43]在2009年基于光纤耦合太赫兹收发器搭建了一套太赫兹频段RCS时域测量系统,如图8所示,在发射器与接收器前均采用透镜进行波束准直,通过将金

属球与平板的测量结果与理论数据进行对比验证了该系统测量的可行性。随后进一步分析了测量中目标角度失准与偏移以及非平面波前对测量结果的影响^[44]。2012年他们基于新的光纤耦合天线与双圆测角器改进了该紧缩场测量系统^[45],使其能够灵活完成不同角度配置的双站 RCS 测量,获得了 1/250 的旋风 200 与 F-117 缩比模型随频率与角度变化的 RCS,并且对比分析了旋风战机在挂弹前后的 RCS 变化以及 F-117 战机垂直尾翼展开前后的 RCS 变化,可以看出,目标局部结构变化对太赫兹 RCS 存在明显影响。2010 年丹麦科技大学的 Iwaszczuk 等^[46]基于飞秒激光器建立了一套太赫兹时域脉冲系统,该系统光路中使用一对抛物面反射镜将太赫兹波束展宽并校准,实现了远场条件的目标测量,并获得了 1/150 缩比 F-16 飞机模型的不同姿态角 RCS 结果。太赫兹极窄脉冲允许的距离向亚毫米分辨能力使得在每个角度的时域回波可以完全把目标上不同部件区分开来,在获得多角度测量数据后,利用加窗滤波逆投影算法实现了对目标的高分辨成像,并可以从成像结果明显识别出飞机上的不同类型散射部件,如机翼、机尾、导弹等。

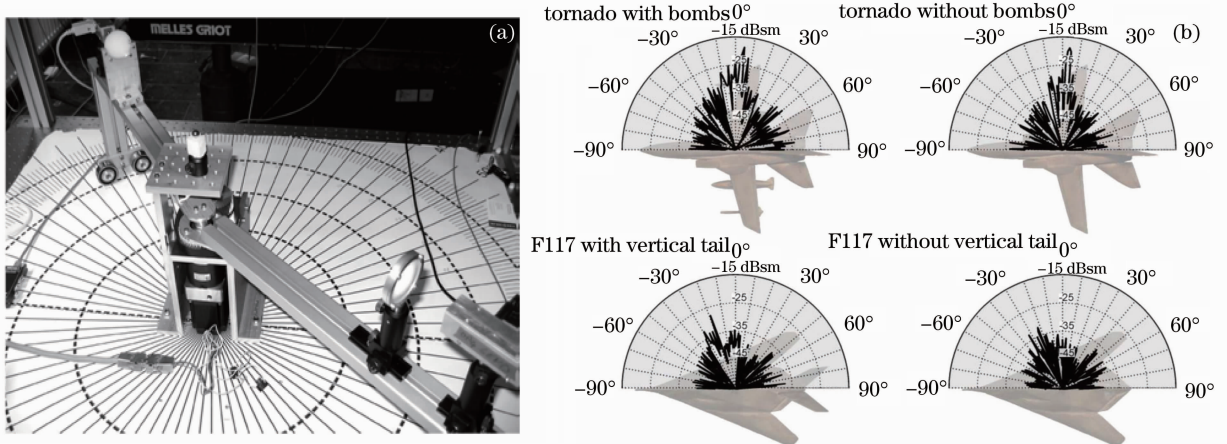


图 8 光纤耦合太赫兹时域系统与测量结果。(a)系统组成图;(b)旋风 200 与 F-117 模型的 RCS 测量结果

Fig. 8 Fiber coupled terahertz time-domain spectrometer and its results. (a) Structure of the system;

(b) measured RCS of scale model aircraft Whirlwind 200 and F-117

太赫兹频段目标散射特性研究的另一个重点是针对太赫兹波在测量介质目标的特征谱、介电常数等参数时,目标表面的不同粗糙特性对散射能量分布和参数测量的影响,为此测量了不同粗糙表面的散射能量分布,并用解析模型去解释这一现象。其中美国的华盛顿大学与波特兰大学基于 T-4000 系统做了许多测量研究并建立了颗粒性粗糙面的太赫兹散射模型^[47,48],利用小波变换方法提取了被测目标的特征频谱^[49]。德国的 Jansen 等^[50]则基于时域系统实验测量研究了太赫兹通信中信道介质粗糙表面引起的漫反射效应。在太赫兹 RCS 测量中,由于太赫兹波长极短,所以实际目标表面大多具有与太赫兹波波长相比拟的粗糙起伏幅度,因此研究测量金属粗糙表面的太赫兹散射行为非常重要。STL 利用傅里叶变换红外光谱仪测量了不同粗糙度铝表面的太赫兹反射频谱,并用基尔霍夫近似(KA)理论模型验证了实验测量结果^[51]。国内在太赫兹散射特性测量研究方面,天津大学的杨洋等^[52]初步探讨了球型目标在太赫兹频段与微波频段/激光频段的雷达散射截面,指出了球型目标太赫兹雷达散射截面的具体研究内容和研究方式等,最近又对粗糙铜盘的散射行为进行了测量研究^[53];哈尔滨工业大学的李琦等^[54,55]则研究了高斯光圆柱太赫兹雷达散射截面的影响。

太赫兹频段目标散射特性研究的数值计算方法主要包括全波数值方法、高频近似方法和粗糙面经典解析方法等。在太赫兹频段下,典型军事目标(飞机、舰船、导弹等)将具有极大电尺寸,利用全波数值方法是难以实现电磁计算的,所以数值计算方法在太赫兹频段下的应用受到了很大的限制,只能用于尺寸较小的体目标或太赫兹窄波束下面目标的散射特性计算分析。美国的 Sundberg 等^[56]基于时域有限差分方法(FDTD)对颗粒型粗糙表面的太赫兹散射进行了建模与计算,并用测量数据验证了理论模型。国内以东南大学^[57,58]为首包括浙江大学^[59]在内,研究实现了基于高频近似方法——弹跳射线法(SBR)的太赫兹频段目标电磁散射计算方法,对包括立方体、平板、圆柱、圆锥、角反射器在内的标准体目标以及导弹模型进行了计算,并与数值方法(MFLMA)计算结果进行比较,验证了所实现高频方法计算的准确性,随后又基于电磁散射计算数据

对仿真目标进行了二维 ISAR 成像,获得了太赫兹频段下目标的高分辨成像结果^[60]。典型的粗糙面散射理论计算方法是在微波频段研究地面或海面的散射特性基础上所建立的解析解方法,在太赫兹频段的适用性也有部分学者进行了研究,包括美国 STL 的 Jagannathan 等^[61]、波特兰大学的 Zurk 等^[62]、德国的 Jansen 等^[50]针对不同类型的粗糙表面,基于微扰法或基尔霍夫近似模型解释了实验测量结果。

结合国内外关于太赫兹频段目标散射特性技术的研究情况可以看出,在太赫兹的低频段,测量结果与数值仿真结果较好地保持了一致,这说明在该频段范围,导体目标的太赫兹散射没有出现明显的微观效应从而影响高频电磁理论对其电磁散射的描述。但是随着太赫兹频率继续增加,导体目标的电导率不再近似为无穷大,金属目标内部的微观电子运动对宏观散射行为的影响会增大,因此需要在建立精确散射测量系统的基础上,进一步研究太赫兹频段目标的物理散射机理,并建立理论或经验模型描述与修正经典电磁散射理论,与实验测量结果进行比较研究。

4 太赫兹雷达成像技术

太赫兹雷达的主要优势之一在于其可以实现高分辨成像,穿透衣服或包装探测隐藏的目标,可在公共安全、无损检测与国防侦察等方面发挥重要作用^[63,64]。最近关于太赫兹雷达成像技术的进展与报道不断出现,特别是基于电子学方法与光纤耦合时域光谱系统的太赫兹实时成像技术,这得利于太赫兹信号源的发展和系统结构设计水平的提高,以及图像重建算法的改进。太赫兹雷达成像的主要方式包括二维机械扫描成像、孔径合成聚集成像(包括实孔径与虚拟孔径)、逆合成孔径雷达成像与焦平面阵列成像等。下面分别对这四种方式加以讨论。

4.1 机械扫描成像

太赫兹机械扫描成像是通过光路系统控制太赫兹波束对目标进行光栅扫描,并对扫描数据进行处理获得目标图像,缺点在于扫描时间与成像处理时间共同导致成像速度缓慢。典型太赫兹机械扫描成像雷达是美国 JPL 的 600 GHz 实验雷达^[13]与 675 GHz 实验雷达^[14]。在 600 GHz 雷达系统中,太赫兹波束经反射镜聚焦成一个斑点后对目标进行逐点扫描,在 4 m 的距离完成对人体躯干的扫描成像需要约 5 min。在 675 GHz 雷达系统中,通过设计如图 9 所示的快速光路扫描结构,实现了 1 Hz 的成像速率,快速扫描的关键部件是一个直径 13 cm 的轻质旋转平面反射镜,在俯仰方向上快速旋转的同时在方位方向以稍慢速度旋转扫描。太赫兹机械扫描成像方式本身的特点决定其只能应用在实验室的试验测量系统或对实时性要求不高的成像系统中,但是这样的成像系统对于太赫兹雷达中的一些关键技术如宽带扫频技术、外差式接收技术、成像算法、雷达信号体制等均具有论证与演示意义。

4.2 合成孔径成像

太赫兹合成孔径成像包括分布式实孔径合成成像和虚拟孔径合成成像两种方式。通常的实孔径阵列合

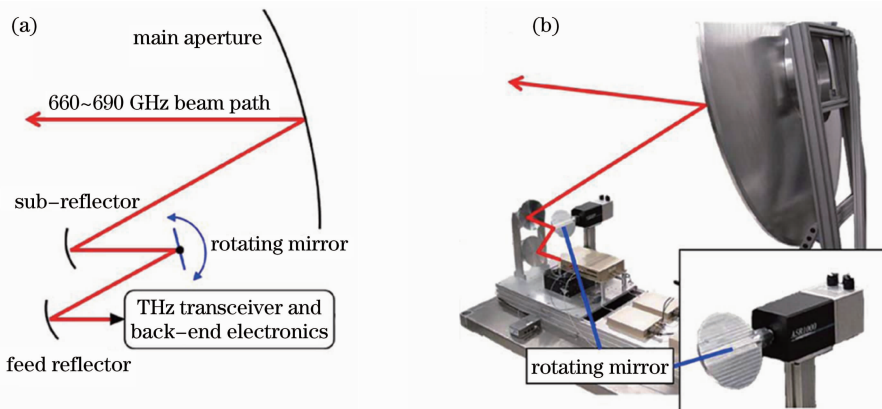


图 9 快速光路扫描结构。(a)光束扫描路径示意图;(b)快速光路扫描装置图

Fig.9 Fast optics scanning system. (a) Schematic of beam scanning path including the critical fast rotating mirror; (b) photograph of the radar optics along with an inset showing the fast-scanning mirror mounted on rotary stage

成成像优势是没有机械活动构件,对高速数据获取有利,从而利用一次“快拍”数据即可对目标进行成像处理,缺点是大量的阵列天线,图像重构的计算量巨大,存在各阵元的相位一致性难以保证的问题。合成孔径成像的另外一个优点是目标可以直接成像,并且在一定的距离向(景深)范围内保持分辨率相同,不像一般光学成像系统中存在一个焦平面。德国与丹麦研究人员提出的太赫兹阵列雷达成像系统在水平方向采用线性阵列实现孔径合成而在垂直方向采用机械扫描方式^[29],二者结合完成对视场内目标的回波录取与成像处理,系统可以实现实时图像获取,并可以对运动目标成像。2012年,Moll等^[65]提出了一种基于双站快速分解后向投影算法(BiFFBP)的图像重建方法,将其应用于上述调频连续波太赫兹成像雷达,相比全局后向投影算法(GBP)获得了较好的成像效果,图10为对图中左下金属块的成像结果。但是该系统在提高成像质量、降低旁瓣水平、提高图像动态范围、增加距离分辨率、实现三维图像重建方面仍然存在改进的余地。

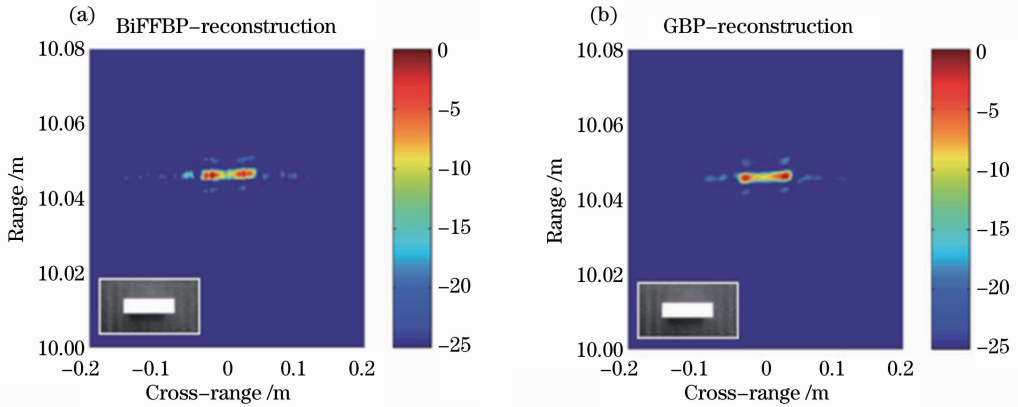


图10 金属块的合成孔径重建图像。(a)基于BiFFBP算法;(b)基于GBP算法

Fig. 10 Synthetic-aperture reconstructed images of a metal block. (a) With BiFFBP algorithm; (b) with GBP algorithm

借鉴微波频段相控阵与合成孔径成像系统概念,丹麦科技大学基于集成光电导收发器提出了一种可以实现合成图像重建的宽带多阵元太赫兹雷达系统^[66],发射与接收天线分别由32个阵元的平面阵列组成,如图11(a)所示。每个发射阵元天线依次发射信号,所有接收阵元天线同时接收目标散射信号。对于远场目标,每对发射-接收(Tx-Rx)阵元提供的回波信号与等效位置在该Tx与Rx中点的单站系统提供的回波信号一样,这样有效孔径大小变成实际发射天线孔径的一半,方位向的角度分辨率提高一倍。基于合成孔径成像算法可实现快速成像,避免了耗时的光栅扫描。如图11(b)所示,在中心频率550 GHz,带宽900 GHz条件下仿真获得了三个点目标的成像结果。

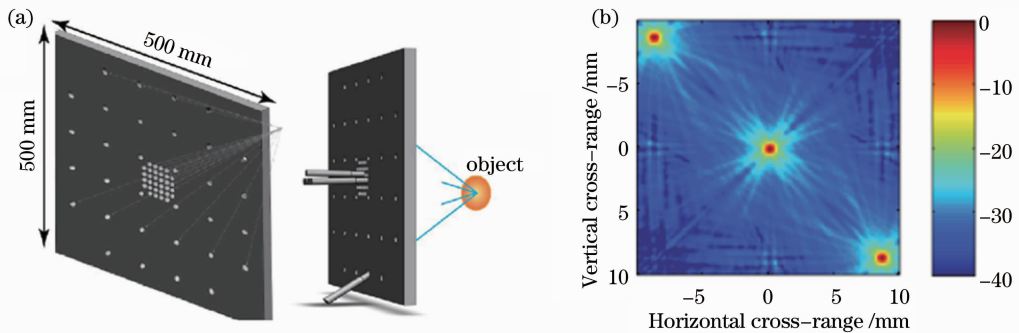


图11 太赫兹阵列收发结构与成像结果。(a)太赫兹收发阵列天线示意图;(b)点目标的仿真重建图像

Fig. 11 Terahertz array transceiver and imaging result. (a) Sketch of the planar array imaging structure of emitters and detectors illuminating a target; (b) cross-range slice of 3 simulated point targets reconstructed with back-projection

文献^[67]实现了与微波合成孔径雷达(SAR)相近的太赫兹合成孔径雷达成像,通过对基于电子学器件的太赫兹成像系统SynViewScan进行改造,将系统中的光学聚焦镜去掉,太赫兹发射天线直接发射光束照射目标,不同扫描位置的回波包含了目标的相位与幅度信息,合成孔径算法将所有测量位置的数据进行相干处理重建目标图像。与利用聚焦光学器件成像相比,可以在距离向(景深)上实现更大范围与更高分辨

率的成像。

太赫兹干涉阵列合成孔径成像也是一种重要的太赫兹成像方法,具有较高的空间分辨率,且普遍采用可大大减少阵元数量的阵列稀疏技术,适用于机载与星载的射电天文成像应用。Su等^[68]研究了太赫兹干涉阵列的合成孔径成像方法以及探测器阵列配置对成像分辨率与质量的影响,并搭建了由一个发射器与四个探测器构成的干涉成像系统,对不同形状的扩展目标进行了二维图像重建。随后又进一步实现了该太赫兹干涉成像系统的视频速率成像^[69],每帧图像仅用时16 ms。

在太赫兹合成孔径成像的仿真研究方面较早就有人开展了工作,比利时的Heremans等^[70,71]将微波合成孔径处理技术扩展到太赫兹成像,通过仿真验证了太赫兹时域合成孔径重建算法,指出合成孔径成像获得的分辨率至少比传统波束扫描分辨率提高两倍。美国特拉华大学的Zhang等^[72]利用单周期太赫兹脉冲进行成像,提出了基于虚拟孔径的合成聚焦技术与相干加权方法来获得在大景深(距离向)范围具有高空间分辨率的图像,克服了通常成像方式存在的高空间分辨率与大聚焦景深的矛盾。随后又提出了基于稀疏阵列的太赫兹脉冲成像方法^[73]。稀疏太赫兹阵列对于成像应用来说可以显著降低阵列复杂度,同时可以获得大的成像视场,但稀疏阵列会带来严重的栅瓣效应,影响成像质量,研究发现可以由相邻阵列单元发射信号的时间相干性获得的自适应加权因子压制图像中的栅瓣效应,再由整个稀疏阵列发射信号的空间相干性获得的加权因子进一步提高成像质量,同时利用 56×56 阵元的二维太赫兹稀疏阵列实验验证了该方法可以实现30 dB的栅瓣压制效果。

4.3 逆合成孔径雷达成像

ISAR成像是一种针对非合作目标的转台成像方式,在微波雷达中广泛被应用。转动目标被波束完全照射时,利用经典的二维傅里叶变换分别对距离向与方位向进行聚焦获得目标图像。但是在太赫兹雷达成像应用中,ISAR成像由于受成像视场大小与远场条件限制,通常只能对物理尺寸很小的目标进行成像,且有时需要采用近场ISAR成像方式。文献^[74]对太赫兹逐点扫描成像雷达进行改进,将系统光路中直径40 cm的反射镜用一个直径更小的替换,从而实现对整个目标的覆盖照射,然后采用ISAR成像方法,对FMCW信号回波进行距离压缩实现距离向高分辨,再利用目标转台的旋转实现方位向高分辨。与波束逐点扫描成像相比,ISAR成像所需时间减小,适合于高动态场景成像。为达到理论上的分辨率水平,同样在成像过程中需要进行运动补偿与相位校正。美国STL在其多个频点(160 GHz、350 GHz、2.4 THz)的散射测量系统中均采用了ISAR成像方式获得目标的高分辨图像^[21,39],成为研究目标散射特征的重要方法。德国的220 GHz太赫兹实验雷达也利用ISAR成像方式实现了对实物卡车、自行车与人体的高分辨成像^[17]。太赫兹波波长短的特点和ISAR成像特点的结合显示出太赫兹逆合成孔径雷达在隐蔽、小型等目标的监视与高分辨成像方面具有美好应用前景。随着太赫兹雷达功率的提高和作用距离的增加,ISAR成像将会成为太赫兹快速监视成像的最佳实现方式之一。

4.4 焦平面阵列成像

太赫兹焦平面阵列被期盼为具有高灵敏度、快速响应、室温工作、既可用于功率探测亦可实现外差探测的接收阵列。美国麻省理工学院的Lee等^[75]与法国Tauk等^[76]在太赫兹焦平面阵列发展方面做了奠基性工作。美国DARPA早在2004年的TIFT计划和2005年的SWIFT计划中就将太赫兹焦平面成像阵列技术列为重点研究内容。一部工作频率650 GHz、基于单片集成硅的场效应晶体管焦平面阵列太赫兹系统已经实现了快速成像^[77]。目前硅基晶体管焦平面阵列以及III-V族化合物材料的晶体管焦平面阵列成为太赫兹接收器的研究热点。太赫兹焦平面阵列成像同样无需大量的信号处理,即可实现实时成像,可以用于对实时性要求较高的军事侦察、场面监控、安全检查和导引头制导等领域。

目前太赫兹雷达成像仍有许多困难需要克服,单个太赫兹信号源输出的有用功率非常低,限制了整个系统工作的动态范围,虽然低噪放大器技术取得了进步,但相比微波雷达100 dB以上的动态范围,太赫兹成像雷达的动态范围限制在40~70 dB。同时太赫兹成像雷达的结构也是需要进一步研究的内容,特别是标准化,是开发太赫兹雷达通用成像算法的基础。同时实时成像也是太赫兹成像雷达面临的一个主要问题,需要基于灵活的系统结构设计、先进信号处理技术的应用以及高效成像算法的开发等措施来解决,其中大数据量引起的成像算法的巨大开销是目前太赫兹成像雷达存在的主要瓶颈之一。为此近年来兴起的压缩感知理论

与稀疏成像理论被引入到太赫兹成像中来^[78],促进了太赫兹雷达成像技术的发展。

5 太赫兹雷达技术研究的主要内容

5.1 太赫兹电子学器件

对于雷达来说需要探测远距离目标,而在地面太赫兹波衰减严重,因此太赫兹雷达最先可能应用于空间或机载平台,这要求太赫兹雷达发射机具有功率高、体积小与重量轻等特点。固态电子学器件集成度高,易于实现小型化单片集成电路,是太赫兹雷达发射机与接收机的构成基础。另一方面部分真空电子学器件如行波管放大器和扩展互作用速调管放大器等均可实现小型化,目前开发功率高、带宽大、重量轻、体积小、实用型的电真空放大器件是一个重要研究方向^[79]。电真空放大器件与固态器件的结合将实现紧凑型高功率太赫兹雷达发射机。

固态电子学器件是指基于半导体材料的二极管与三极管实现的功能器件,如基于肖特基二极管的倍频器和混频器、基于晶体管技术的低噪放大器、功率放大器以及 CMOS 集成电路和太赫兹单片集成电路(TMIC)等。其中倍频器链路源是目前诸多太赫兹试验系统信号源的主要选择之一。美国 JPL 通过自己的 GaAs 薄膜技术、设备制造工艺技术和低温冷却技术成功实现了 2.7 THz 的全固态源。美国 VDI 公司常温工作的 GaAs 肖特基二极管倍频器已达到商业应用水平,最高工作频率高达 1.5 THz。另一种倍频技术异质结双极晶体管(HBV)倍频器主要用来设计高阶奇次谐波倍频器,比如三倍频和五倍频器,适合于高功率产生,但转换效率与工作频率都比较低^[80]。美国 DARPA 已经于 2008 年完成 SWIFT 项目支持的 330 GHz 主动电子学器件如振荡器、低噪放大器和功率放大器的研发演示^[81],目前交由美国陆军研究实验室继续支持该项目的后续应用研究。基于晶体管的太赫兹固态放大器技术在过去几年发展迅速,2012 年,美国 NG 公司基于 30 nm InP HEMT 晶体管研制成功了 0.65 THz 的固态功率放大器,输出功率 1.7 mW,基于 InP HBT 的截止频率则达到 520 GHz。同时基于 InP HEMT 晶体管技术的太赫兹频段低噪声放大器最高工作频率已经达到 670 GHz^[82],增益为 8 dB,噪声系数 13 dB。太赫兹低噪放大器作为太赫兹雷达接收机的重要组成部分,对于改善接收机灵敏度和作用距离具有重要作用。

美国 DARPA 在 2009 年启动了太赫兹电子学计划开发 0.67 THz、0.85 THz 和 1.03 THz 三个频点的集成接收与发射模块。其中固态功率放大器(SSPA)+电真空高功率放大器(VE-HPA)模块在 2012 年取得重要进展,NG 公司分别在 0.67 THz 和 0.85 THz 实现了 108 mW 和 141 mW 的功率输出^[83,84],带宽高达 15 GHz。之前 NG 公司已经成功研制出 0.67 THz 和 0.85 THz 的固态接收机,这为美方太赫兹雷达走向实用奠定了基础条件。太赫兹电真空器件研究的另外一个重点是 220 GHz 折叠波导行波管(FWG-TWT)放大器,主要受美国 DARPA 的 HiFIVE 基金项目资助,目标是在 220 GHz 频率获得 50 W 功率放大,带宽大于 5 GHz。

随着国内外各机构在研的太赫兹信号源项目的进展及相关混频器、低噪放大器件技术的突破,高功率、大带宽、紧凑型与可实用的太赫兹源将逐步应用于雷达系统,并进一步推动太赫兹雷达的军事化应用进程。

5.2 太赫兹雷达收发阵列

考虑到太赫兹雷达的成像视场小与成像速度慢等不利因素,研究集成的太赫兹收发阵列或配置不同布阵的收发阵列是太赫兹雷达的一个热点。美国 JPL 研究了集成天线的外差式收发阵列,并利用微机械加工等纳米制造技术实现了一个 600 GHz 接收机前端^[85],该前端集成了 100 GHz 本振、InP 功率放大器、基于 GaAs 肖特基二极管的三倍频器、次谐波混频器、中频配置电路与直流偏置电路,整个接收器集成封装大小仅为 20 mm×25 mm×3 mm。这一结构可以轻松地用来进一步实现外差式阵列接收机设计,也为多频点成像阵列和波束控制外差式接收阵列的实现提供了可能性。太赫兹雷达孔径合成阵列配置也是太赫兹成像雷达一个值得关注的研究方向,合成孔径技术可以实现快速相干成像,而改进合成孔径成像质量的主要努力方向集中在优化收发阵元的分布方面。

5.3 太赫兹雷达成像算法

雷达成像中典型的后向投影算法存在计算量与成像质量之间的矛盾。对于运动目标,SAR 与 ISAR 成像算法往往需要进行运动补偿与相位校正,耗费大量的成像时间。同样地,在太赫兹实时成像中成像算法运

行占据了成像的很大一部分时间,使其成为实时成像的一个瓶颈,因此研究适用于不同成像方式的快速成像算法至关重要。基于稀疏表示和压缩感知的雷达成像是一种可以有效减少成像复杂性的方法,并被广泛研究。对于目前的太赫兹雷达成像系统,成像算法与成像系统结构密切相关,在太赫兹雷达结构标准化问题没有解决之前,成像算法往往具有最优实用性,其中针对太赫兹成像雷达的孔径合成重建算法是一个重点研究的领域。

5.4 太赫兹雷达目标散射特性测量与计算

太赫兹频段介于微波与红外之间,目标的散射特性也必然与微波频段和红外存在区别。研究太赫兹频段下目标散射特性测量方法与电磁散射计算理论已引起国内外的广泛关注,其中基于高分辨二维成像与三维成像进行目标散射特征识别与提取是一种可行的研究方法,因为太赫兹成像本身具有高分辨率优势。此外,太赫兹波散射与目标粗糙特性、介质参数、几何特性、物理特性等性质之间存在的关系也是需要具体加以研究的内容。对太赫兹频段目标散射特性的准确理解有利于太赫兹技术在安检成像、无损检测、雷达与通信等领域的深入应用。

5.5 视频合成孔径雷达

2012年5月美国 DARPA 发布了一项名为“视频合成孔径雷达(ViSAR)”的研究项目^[86],目标是研发一种工作在太赫兹低频段的高分辨率、全动态视频合成孔径雷达,可装置在各种航空平台上穿透云层对地面进行成像,其工作有效性与晴天工作的红外传感器相当。该系统还同时具备地面运动目标指示(GMTI)能力,以探测移动目标并对其进行定位,目前工作频段选定为 231.5~235.0 GHz。DARPA 确定了该系统研究的四方面关键技术:1)该频点紧凑型机载发射机与接收机;2)该频点紧凑型机载功率放大器;3)系统场景仿真与数据测试系统;4)系统实时成像的高级算法实现。视频 SAR 结合了太赫兹波的穿透性、高频率带来的高成像帧速、小孔径天线和 SAR 成像运动补偿简单等优势,无论在太赫兹军事背景应用还是在关键技术方面均将成为研究热点。

6 太赫兹雷达的空间应用及关键指标分析

基于太赫兹波以及太赫兹波应用于雷达所具有的特点与优势,太赫兹雷达在军事中产生了许多可能的应用方向,包括复杂战场环境作战、反隐身、空间目标监视与精确制导等。太赫兹雷达的地面军事应用必须正视大气衰减严重、辐射功率低以及技术优越性等问题。正如太赫兹技术早期发展受益于在射电天文与空间科学研究中的优势,这里主要针对太赫兹雷达在空间目标探测和拦截导引头两个可能应用的方面进行阐述。

目前空间目标探测、监视与识别主要依靠天基红外系统与地基宽带微波雷达,空间目标拦截主要依靠红外导引头。从空间碎片、诱饵等目标群中可靠识别弹头和卫星等空间目标是空间监视和导弹防御需要解决的重点问题。空基太赫兹雷达可以实现对空间目标的远距主动探测、精确测距测速测角、高分辨率成像、精细结构特征反演,而且可以利用材料在太赫兹频段丰富的特征谱线提取目标的“指纹特征”,可以弥补现有微波和红外探测系统的不足,是空间态势感知系统的有力补充。太赫兹拦截导引头相比红外导引头可穿透等离子体鞘套,对热环境不敏感,受气动光学效应小,在远距离即可进行高分辨成像,选择目标关键部位打击;同时太赫兹拦截导引头相比毫米波导引头也将带来高分辨成像、高精度跟踪、强抗干扰能力以及阵列化实现体积小等优势,可以更轻易地实现精确制导与打击。

太赫兹雷达应用于空基或弹载平台,其核心部分由发射机与接收机组成,目前面临如何采用小型化的太赫兹发射机实现有效水平的功率输出,并采用低噪高灵敏度接收机实现目标信号检测的问题。下面针对弹载太赫兹导引头应用条件,结合目前器件发展水平,对其作用距离等性能指标进行仿真分析。根据美国 DARPA 与其他相关报道的最新进展,当前不同频段太赫兹电子学器件信号源的功率水平如表 1 所示。由于弹载太赫兹收发系统的安装空间有限,通过级联功率放大提高发射功率来增加作用距离是比较难以实现的,但是可以通过脉冲压缩与脉冲积累技术获得等效功率得益,从而增加作用距离。

根据目前太赫兹频段低噪放大器、谐波混频器、中频放大器等器件的水平,不同频点接收机噪声系数与灵敏度如表 2 所示。目标雷达散射截面值取典型弹头目标 RCS 为 -9.2 dBsm,雷达天线口径 500 mm,系统损耗约 14 dB。在空间中,特别是在空间目标与中段弹头工作的 80 km 以上高空,已经没有水汽、氧气等,且

温度与气压均明显下降,根据典型大气衰减模型进行计算可知大气衰减对太赫兹雷达作用距离产生的影响基本上可以忽略。

表 1 当前太赫兹电子学发射机功率水平

Table 1 Power performance of terahertz transmitter at present

Frequency /GHz	220	340	480	550	670	850
Power /W	50	20	10	1	0.108	0.141
Bandwidth /GHz	>5	8	10	10	>15	>14

表 2 接收机噪声系数与灵敏度水平

Table 2 Noise figures and sensitivity of radar receivers

Frequency /GHz	220	340	480	550	670	850
Noise figure /dB	9.5	10	12.3	13.2	17.8	34.7
S_{\min} /dBmW	-93.7	-93.2	-90.9	-90	-85.4	-68

依据雷达方程,在脉压与脉冲多普勒(PD)体制下,不同频点太赫兹雷达的作用距离-检测曲线分别如图 12(a),(b)所示,其中脉压体制在各频点的脉压比分别为 59、59、60、60、61.8、61.8 dB,PD 脉冲积累数目为 256,虚警概率为 10^{-6} 。

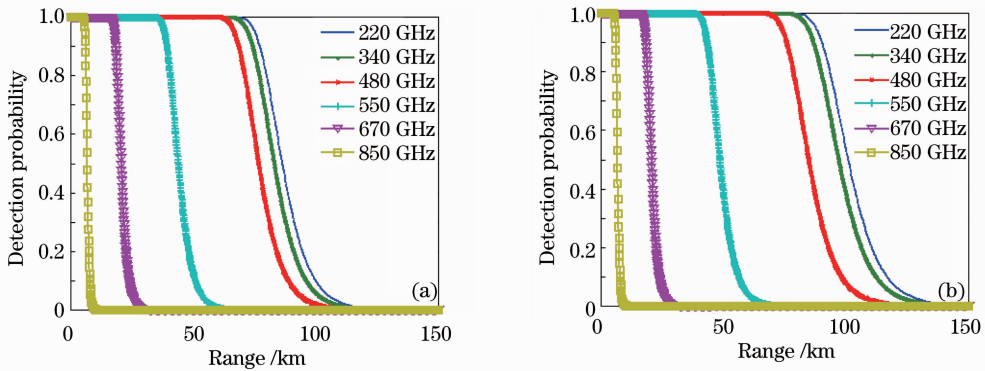


图 12 太赫兹雷达作用距离-检测概率曲线。(a)脉压体制下;(b)PD 体制下

Fig. 12 Simulated curves of range-detection probability for (a) pulse-compressed radar and (b) pulse-Doppler radar

通过仿真结果可以看出,在几个较低频点(220、340、480 GHz)太赫兹雷达可以获得远距离探测能力。未来一段时间接收机灵敏度的改善是可以预期的目标,特别是低噪放大器技术的发展。这样的作用距离指标对于空间目标高分辨成像,特别是对于太赫兹导引头进行目标拦截具有重要指导意义,同时太赫兹雷达的窄波束特性将会获得极高的测角精度,大带宽将会获得极高的成像分辨率,这均使得太赫兹导引头具有潜在可行的应用价值。

7 结束语

太赫兹雷达技术的发展在军事应用领域和公共安全领域无疑都已引起令人瞩目的新变化。随着辐射功率大、重量轻、体积小、实用型的太赫兹信号源技术的进步,外差式探测技术和微机械加工制作工艺的发展,太赫兹雷达真正应用于军事用途不是一件遥远的事情。但关于太赫兹雷达研究的问题不仅仅在于文中阐述的方面,对于太赫兹雷达的结构体制、信号形式、数据采集、目标特性、数据处理等方面都需要深入研究,进而充分发挥太赫兹雷达相比微波雷达和红外探测器存在的优势,实现更小目标的更精确探测、更高分辨率成像与更细致的目标特征识别。

参 考 文 献

- 1 H. B. Liu, H. Zhong, N. Karpowicz *et al.*. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications [J]. *Proc. IEEE*, 2007, **95**(8): 1514~1527

- 2 A. G. Davies, A. D. Burnett, W. Fan *et al.*. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs [J]. *Materials Today*, 2008, **11**(3): 18~26
- 3 P. H. Siegel. Terahertz technology [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3): 910~928
- 4 W. Withayachumnankul, G. M. Png, X. X. Yin *et al.*. T-ray sensing and imaging [J]. *Proc. IEEE*, 2007, **95**(8): 1528~1558
- 5 R. Appleby, H. B. Wallace. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region [J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 2007, **55**(11): 2944~2956
- 6 Wang Minghong, Xue Qianzhong, Liu Pukun. Review of THz vacuum electronic devices and development [J]. *J. Electronics & Information Technology*, 2008, **30**(7): 1766~1772
王明红, 薛谦忠, 刘濮鲲. 太赫兹真空电子器件的研究现状及其发展评述[J]. *电子与信息学报*, 2008, **30**(7): 1766~1772
- 7 R. E. McIntosh, R. M. Narayanan, J. B. Mead *et al.*. Design and performance of a 215 GHz pulsed radar system [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1988, **36**(6): 994~1001
- 8 R. W. McMillan, Jr. C. W. Trussell, R. A. Bohlander *et al.*. An experimental 225 GHz pulsed coherent radar [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1991, **39**(3): 555~562
- 9 T. W. Crowe, J. L. Hesler, W. L. Bishop *et al.*. Integrated GaAs diode technology for millimeter and submillimeter wave components and systems [C]. MRS Spring Meeting, 2001. 63~68
- 10 T. W. Crowe, W. L. Bishop, D. W. Porterfield *et al.*. Opening the terahertz window with integrated diode circuits [J]. *IEEE Solid-State Circuits*, 2005, **40**(10): 2104~2110
- 11 T. W. Crowe, B. Foley, S. Durant *et al.*. Instrumentation for metrology from MMW to THz [C]. 4th UK/EU-China Workshop on Millimeter Wave and Terahertz Technology, 2011
- 12 K. B. Cooper, R. J. Dengler, G. Chattopadhyay *et al.*. A high-resolution imaging radar at 580 GHz [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, 2008, **18**(1): 64~66
- 13 K. B. Cooper, R. J. Dengler, N. Llombart *et al.*. Penetrating 3-D imaging at 4- and 25-m range using a submillimeter wave radar[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2008, **56**(12): 2771~2778
- 14 K. B. Cooper, R. J. Dengler, N. Llombart *et al.*. THz imaging radar for standoff personnel screening [J]. *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, 2011, **1**(1): 169~182
- 15 N. Llombart, K. B. Cooper, R. J. Dengler *et al.*. Time-delay multiplexing of two beams in a terahertz imaging radar [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2010, **58**(7): 1999~2007
- 16 G. Chattopadhyay, C. Lee, C. Jung *et al.*. Integrated arrays on silicon at terahertz frequencies [C]. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, 2011. 3007~3010
- 17 A. A. Danylov, T. M. Goyette, J. Waldman *et al.*. Terahertz inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging with a quantum cascade laser transmitter [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 16264~16272
- 18 B. Kapilevich, Y. Pinhasi, R. Arusi *et al.*. 330 GHz FMCW image sensor for homeland security applications [J]. *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2010, **31**(11): 1370~1381
- 19 X. Dahlba, R. Ck, T. Rubaek *et al.*. A 340 GHz CW non-linear imaging system [C]. 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2010. 1~2
- 20 M. Abbasi, S. E. Gunnarsson, N. Wadefalk *et al.*. Single chip 220-GHz active heterodyne receiver and transmitter MMICs with on-chip integrated antenna [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2011, **59**(2): 466~478
- 21 H. Essen, M. Hagelen, W. Johannes *et al.*. High resolution millimeter wave measurement radars for ground based SAR and ISAR imaging [C]. IEEE Radar Conference, 2008
- 22 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
蔡英武, 杨 陈, 曾耿华 等. 太赫兹极高分辨率雷达成像试验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(1): 7~9
- 23 S. Gu, C. Li, X. Gao *et al.*. Three-dimensional image reconstruction of targets under the illumination of terahertz Gaussian beam: theory and experiment [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **99**: 1~9
- 24 Hu Weidong, Zhang Meng, Sun Houjun *et al.*. Research on pulsed imaging technology at 220 GHz [C]. 1st Nationwide Conference on Terahertz Sciences, Technology and Application, 2012. 570~574
胡卫东, 张 萌, 孙厚军 等. 220 GHz 频率步进脉冲成像技术研究[C]. 第一届全国太赫兹科学技术与应用学术交流会, 2012. 570~574
- 25 G. Chen, J. Pei, F. Yang *et al.*. Terahertz-wave imaging system based on backward wave oscillator [J]. *IEEE Trans.*

- Terahertz Science and Technology, 2012, **2**(5): 504~512
- 26 Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui *et al.*. Preliminary study on THz confocal imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100402
丁胜晖, 李琦, 姚睿等. 太赫兹共焦成像的初步研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(s1): s100402
- 27 Yao Rui, Ding Shenghui, Li Qi *et al.*. Improvement of 2.52 THz array transmission imaging system and resolution analysis [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0111001
姚睿, 丁胜晖, 李琦等. 2.52 THz 面阵透射成像系统的改进及分辨率分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0111001
- 28 V. Krozer, T. Löffler, J. Dall *et al.*. Terahertz imaging systems with aperture synthesis techniques [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2010, **58**(7): 2027~2039
- 29 F. Friederich, W. Spiegel, M. Bauer *et al.*. THz active imaging systems with real-time capabilities [J]. *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, 2011, **1**(1): 183~200
- 30 H. Quast, T. Löffler. 3D-terahertz-tomography for material inspection and security [C]. 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009
- 31 Y. Huang, T. Tseng, C. Kuo *et al.*. Fiber-based swept-source terahertz radar [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(9): 1344~1346
- 32 M. J. Coulombe, T. Horgan, J. Waldman. A 160 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements [C]. Proceedings of Antenna Measurements and Techniques Association (AMTA), 1996. 239
- 33 G. B. Demartinis, J. C. Michael, M. H. Thomas. A 240 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements [C]. Proceedings of Antenna Measurements Techniques Association (AMTA), 2010. 3~8
- 34 T. M. Goyette, J. C. Dickinson, W. J. Gorveatt *et al.*. X-band ISAR imagery of scale-model tactical targets using a wide bandwidth 350 GHz compact range [C]. *SPIE*, 2004, **5427**: 227~236
- 35 M. J. Coulombe, T. Horgan, J. Waldman. A 524 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements [C]. Proceedings of Antenna Measurements and Techniques Association (AMTA), 1997
- 36 T. M. Goyette, J. C. Dickinson, J. Waldman *et al.*. 1.56 THz compact radar range for W-band imagery of scale-model tactical targets [C]. *SPIE*, 2000, **4053**: 615~622
- 37 A. J. Gatesman, A. Danylov, T. M. Goyette *et al.*. Terahertz behavior of optical components and common materials [C]. *SPIE*, 2006, **6212**: 62120E
- 38 A. Jagannathan, A. J. Gatesman, T. Horgan *et al.*. Effect of periodic roughness and surface defects on the terahertz scattering behavior of cylindrical objects [C]. *SPIE*, 2010, **7671**: 76710E
- 39 A. Lonnqvist, J. Mallat, A. V. Raisanen. Phase-hologram-based compact RCS test range at 310 GHz for scale models [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(6): 2391~2397
- 40 R. A. Cheville, R. W. McGowan, D. R. Grischkowsky. Late-time target response measured with terahertz impulse ranging [J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1997, **45**(10): 1518~1524
- 41 R. W. McGowan, R. A. Cheville, D. R. Grischkowsky. Experimental study of the surface waves on a dielectric cylinder via terahertz impulse radar ranging [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2000, **48**(3): 417~422
- 42 R. A. Cheville, D. Grischkowsky. Time domain terahertz impulse ranging studies [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(14): 1960~1962
- 43 C. Jansen, N. Krumbholz, R. Geise *et al.*. Scaled radar cross section measurements with terahertz-spectroscopy up to 800 GHz [C]. 3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009. 3645~3648
- 44 C. Jansen, N. Krumbholz, R. Geise *et al.*. Alignment and illumination issues in scaled THz RCS measurements [C]. 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009. 1~2
- 45 R. Gente, C. Jansen, R. Geise *et al.*. Scaled bistatic radar cross section measurements of aircraft with a fiber-coupled THz time-domain spectrometer [J]. *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, 2012, **2**(4): 424~431
- 46 K. Iwaszczuk, H. Heiselberg, P. U. Jepsen. Terahertz radar cross section measurements [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26399~26408
- 47 S. C. Henry, S. Schecklman, G. P. Kniffin *et al.*. Measurement and modeling of rough surface effects on terahertz spectroscopy [C]. *SPIE*, 2010, **7601**: 760108
- 48 L. M. Zurk, B. Orłowski, G. Sundberg *et al.*. Terahertz scattering from a rough granular surface [C]. IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest), 2007. 4929~4932
- 49 M. H. Arbab, D. P. Winebrenner, E. I. Thorsos *et al.*. Retrieval of terahertz spectroscopic signatures in the presence of rough surface scattering using wavelet methods [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(18): 181903
- 50 C. Jansen, S. Priebe, C. Moller *et al.*. Diffuse scattering from rough surfaces in THz communication channels [J]. *IEEE*

Trans. Terahertz Science and Technology, 2011, **1**(2): 462~472

- 51 A. Jagannathan, A. J. Gatesman, R. H. Giles. Characterization of roughness parameters of metallic surfaces using terahertz reflection spectra [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(13): 1927~1929
- 52 Yang Yang, Yao Jianquan, Song Yukun *et al.*. Radar scattering cross section in different wave band for spherical targets [J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(5): 552~556
杨洋, 姚建铨, 宋玉坤等. 球型目标在不同波段的雷达散射截面[J]. 激光与红外, 2011, **41**(5): 552~556
- 53 Yang Yang, Yao Jianquan, Zhang Jingbing *et al.*. Experimental research of terahertz scattering on rough copper surface [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, in press
杨洋, 姚建铨, 张镜冰等. 粗糙铜表面对低频太赫兹波的散射实验研究[J]. 红外与毫米波学报, 待出版中
- 54 Li Qi, Xue Kai, Li Huiyu *et al.*. Advances in research of terahertz radar cross section measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(6): 060001
李琦, 薛凯, 李慧宇等. 太赫兹雷达散射截面测量研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(6): 060001
- 55 Li Huiyu, Li Qi, Xia Zhiwei *et al.*. Influence of Gaussian beam on conductor cylinder terahertz radar cross section [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s1): s111002
李慧宇, 李琦, 夏志伟等. 高斯光圆柱太赫兹雷达散射截面的影响[J]. 中国激光, 2012, **39**(s1): s111002
- 56 G. Sundberg, L. M. Zurk, S. Schecklman *et al.*. Modeling rough-surface and granular scattering at terahertz frequencies using the finite-difference time-domain method [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(10): 3709~3719
- 57 X. J. Zhong, T. J. Cui, Z. Li *et al.*. Terahertz-wave scattering by perfectly electrical conducting objects [C]. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007. 5571
- 58 L. Zhuo, J. C. Tie, J. Z. Xing *et al.*. Electromagnetic scattering characteristics of PEC targets in the terahertz regime [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2009, **51**(1): 39~50
- 59 Y. Tao, H. Lin, H. Bao. Adaptive aperture partition in shooting and bouncing ray method [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 2011, **59**(9): 3347~3357
- 60 Z. Li, T. J. Cui. High frequency methods for simulation of high resolution imaging in terahertz regime [J]. *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2010, **31**(3): 349~357
- 61 A. Jagannathan, A. J. Gatesman, R. H. Giles. Characterization of roughness parameters of metallic surfaces using terahertz reflection spectra [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(13): 1927~1929
- 62 L. M. Zurk, B. Orłowski, G. Sundberg *et al.*. Electromagnetic scattering calculations for terahertz sensing [C]. *SPIE*, 2007, **6472**: 64720A
- 63 Zhu Dechong, Zhang Liangliang, Zhao Yaqin *et al.*. Terahertz broadband spectroscopic investigations of amino acid [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111008
祝德充, 张亮亮, 赵亚芹等. 氨基酸的超宽带太赫兹光谱[J]. 中国激光, 2011, **38**(s1): s111008
- 64 Zhao Shusen, Chen Sijia, Shen Jingling. Identification of terahertz absorption spectra of illicit drugs using support vector machines [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 752~757
赵树森, 陈思嘉, 沈京玲. 用支持向量机识别毒品的太赫兹吸收光谱[J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 752~757
- 65 J. Moll, P. Schops, V. Krozer. Towards three-dimensional millimeter wave radar with the bistatic fast-factorized back-projection algorithm; potential and limitations [J]. *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, 2012, **2**(4): 432~440
- 66 F. Eichhorna, L. Hgstedt, J. C. D. Burona *et al.*. A multi element THz imaging system [C]. 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2010
- 67 A. Keil, T. Hoyer, J. Peuser *et al.*. All-electronic 3D THz synthetic reconstruction imaging system [C]. 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011
- 68 K. Su, Z. Liu, R. B. Barat *et al.*. Two-dimensional interferometric and synthetic aperture imaging with a hybrid terahertz/millimeter wave system [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(19): E13~E19
- 69 Z. Liu, K. Su, D. E. Gary *et al.*. V Video-rate terahertz interferometric and synthetic aperture imaging [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(19): 3788~3795
- 70 R. Heremans, M. Vandewal, M. Acheroy. Synthetic aperture imaging extended towards novel THz sensors [C]. IEEE Sensors Conference, 2008. 438~441
- 71 R. Heremans, M. Vandewal, M. Acheroy. Space-time versus frequency domain signal processing for 3D THz imaging [C]. IEEE Sensors Conference, 2009. 739~744

- 72 Z. Zhang, T. Buma. Adaptive terahertz imaging using a virtual transceiver and coherence weighting [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 17812~17817
- 73 Z. Zhang, T. Buma. Adaptive image reconstruction for sparse arrays using single-cycle terahertz pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(10): 1680~1682
- 74 J. A. Trischman, J. R. Bennett, K. A. Melendez *et al.*. Inverse synthetic aperture radar imaging at 580 GHz [C]. 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008. 1~2
- 75 A. W. M. Lee, Q. Hu. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal plane array [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2563~2565
- 76 R. Tauk, F. Teppe, S. Boubanga *et al.*. Plasma wave detection of terahertz radiation by silicon field effects transistors: responsivity and noise equivalent power [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(25): 253511
- 77 D. Glaab, S. Boppel, A. Lisauskas *et al.*. Terahertz heterodyne detection with silicon field-effect transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(4): 042106
- 78 M. Duarte, M. Davenport, D. Takhar *et al.*. Single-pixel imaging via compressing sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, **25**(2): 83~91
- 79 J. H. Booske, R. J. Dobbs, C. D. Joye *et al.*. Vacuum electronic high power terahertz sources [J]. *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, 2011, **1**(1): 54~75
- 80 G. Chattopadhyay. Technology, capabilities, and performance of low power terahertz sources [J]. *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, 2011, **1**(1): 33~53
- 81 R. Vesna, S. Lorene, W R D *et al.*. A 330-GHz MMIC oscillator module [C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2008. 395~398
- 82 W. R. Deal, K. Leong, V. Radisic *et al.*. Low noise amplification at 0.67 THz using 30 nm InP HEMTs [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2011, **20**(7): 368~370
- 83 J. C. Tucek, M. A. Basten, D. A. Gallagher *et al.*. A 100 mW, 0.67 THz power module [C]. 13th International Vacuum Electronics Conference, 2012. 31~32
- 84 M. A. Basten, J. C. Tucek, D. A. Gallagher *et al.*. A 0.85 THz vacuum-based power amplifier [C]. 13th International Vacuum Electronics Conference, 2012. 39~40
- 85 G. Chattopadhyay, N. Llombart, L. Choonsup *et al.*. Terahertz array receivers with integrated antennas [C]. IEEE International Workshop on Antenna Technology, 2012. 319~322
- 86 H. B. Wallace. Video Synthetic Aperture Radar (ViSAR)[R/OL]. DARPA,2012(2001-04-30), [http://www.darpa.mil/Our_Work/STO/Programs/Video_Synthetic_Aperture_Radar_\(ViSAR\).aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/STO/Programs/Video_Synthetic_Aperture_Radar_(ViSAR).aspx)