

太赫兹雷达前沿探测成像技术*

王宏强, 罗成高, 邓 彬, 刘 康, 易 俊
(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

摘要: 综述几种典型的太赫兹雷达前沿探测成像技术。首先, 回顾太赫兹雷达技术的发展历程, 分析其实用化进程中面临的挑战; 然后, 分别从太赫兹雷达增程、前视成像探测以及雷达信号处理三个方面展开论述, 梳理太赫兹单光子探测、里德堡原子探测、孔径编码成像、涡旋目标微动探测以及智能信息处理五种典型的太赫兹雷达探测前沿技术的研究背景、基本原理、技术优势等; 最后, 对全文进行总结。研究成果有望为突破太赫兹雷达在作用距离、探测体制等方面的技术瓶颈提供可行的技术途径, 并进一步推动太赫兹探测机理、方法、器件和系统等全面创新发展, 为战场侦察、精确打击以及远程预警等应用提供关键技术支撑。

关键词: 太赫兹雷达; 单光子; 里德堡原子; 孔径编码; 轨道角动量; 深度学习

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2021)04-0001-17

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210419001

引用格式: 王宏强, 罗成高, 邓彬, 等. 太赫兹雷达前沿探测成像技术[J/OL]. 遥测遥控, 2021, 42(4): 1-17[20XX-XX-XX]. <http://ycyk.brit.com.cn/ycyk/article/abstract/20210419001>.

Advanced detecting and imaging technology for terahertz radar

WANG Hongqiang, LUO Chenggao, DENG Bin, LIU Kang, YI Jun

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper gives overviews of several typical advanced detecting and imaging technologies for terahertz radar. Firstly, the history of terahertz radar technology is reviewed, and the challenges encountered in the application process are illustrated. Secondly, for five typical advanced detecting and imaging technologies, namely, single-photon detection, Rydberg atom detection, coded-aperture imaging, vortex micro-motion detection and intelligent information processing, the backgrounds, basic principles and advantages are expounded in depth. Lastly, the main achievements of this paper are summarized. These advanced techniques may have the potential to provide feasible approaches to break through the bottlenecks of the detection range and system design of terahertz radar, and further to promote the innovation and development of the detection mechanism, methods, devices and systems of terahertz technology. In the end, it is expected to provide key technical supports for the development and applications in fields such as the battlefield reconnaissance, precision strike and remote air defense early-warning.

Key words: Terahertz radar; Single-photon; Rydberg atom; Coded-aperture; Orbital angular momentum; Deep learning

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210419001

Citation: WANG Hongqiang, LUO Chenggao, DENG Bin, et al. Advanced detecting and imaging technology for terahertz radar[J/OL]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(4): 1-17[20XX-XX-XX]. <http://ycyk.brit.com.cn/ycyk/article/abstract/20210419001>.

引 言

太赫兹 THz (Terahertz) 波是指频率范围在 0.1 THz~10 THz 之间的电磁波, 位于微波与红外之间, 处于电子学向光子学的过渡频段^[1,2]。太赫兹技术被美国列为“改变未来世界的十大技术”之一, 被日本列为“国家支柱十大重点战略目标”之首。太赫兹科学技术也是后摩尔时代信息技术发展的重要支撑,

*基金项目: 国家自然科学基金 (61971427, 62035014, 61921001, 61871386)

收稿日期: 2021-04-19 网络优先发表日期: 2021-06-22

在宽带通信、雷达、电子对抗、电磁武器、安全检查等领域具有广阔的应用前景。

与微波、毫米波相比, 太赫兹波波长更短、带宽更宽, 用于雷达探测时具有信息能力强、探测精度高等优点, 在目标高分辨成像与精细识别等方面具有重要的应用价值; 与红外、激光相比, 太赫兹波对烟雾、浮尘等具有良好的穿透能力, 对气动光学效应与热环境效应不敏感, 用于雷达探测时视场范围更宽, 搜索能力更好, 可以全天时工作, 可用于复杂环境作战与空间高速运动目标探测^[3]。此外, 太赫兹雷达还具有以下突出优势: 在反隐身方面, 太赫兹波对等离子体具有良好的透过率, 能有效对抗等离子体隐身; 在抗干扰方面, 现有的干扰途径主要集中在微波及红外频段, 难以对太赫兹雷达进行有效干扰, 同时, 太赫兹雷达波束窄, 可减少干扰注入雷达主瓣波束的可能性, 降低雷达对干扰的灵敏度; 在小型化方面, 太赫兹功能器件小, 使系统可以高度集成化、小型化、阵列化, 适合于小型无人机及其集群、卫星、导弹等平台搭载。

随着太赫兹波产生、传输与接收等技术的高速发展, 太赫兹技术进入由原来的“太赫兹空白”向“实际应用”的快速发展过渡期, 太赫兹雷达成为下一代高分辨探测雷达的重要发展方向之一, 受到各方高度关注。

1 太赫兹雷达技术研究现状

鉴于太赫兹雷达在高分辨成像与探测识别方面的突出优势, 其自诞生之日起就受到国内外研究机构的高度关注, 投入了大量人力物力开展核心技术研究。

1991 年, 美国佐治亚理工学院的 Mcmillan 等人研制了一台 225 GHz 脉冲相干雷达, 这是第一部在太赫兹频段实现锁相的相参雷达^[4,5]。从 2007 年开始, 德国弗劳恩霍夫应用研究促进会 FGAN 下属的弗劳恩霍夫高频物理与雷达技术研究中心 FHR 和弗劳恩霍夫应用固体物理研究所 IAF 对太赫兹合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 和逆合成孔径雷达 ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) 成像开展了一系列的研究, 首先研发了 COBRA-220 雷达系统^[6,7], 中心频率为 220 GHz, 使用该系统开展了对自行车、汽车等复杂目标的高分辨 SAR、ISAR 成像实验, 实验结果表明该系统对 135 m 距离处的目标成像分辨率达 1.8 cm。2008 年, 美国加州喷气推进实验室研制了一部主动相参太赫兹雷达, 中心工作频率为 585 GHz, 采用线性调频连续波信号, 扫频带宽为 12.6 GHz, 其 ISAR 成像获得了亚厘米级的分辨率。2013 年, FHR 又研发了 MIRANDA-300 雷达系统, 工作频段为 325 GHz, 带宽达 40 GHz, 分辨率达到 3.75 mm^[8-10]。2010 年, 美国马萨诸塞大学的亚毫米波技术实验室 STL (Submillimeter-wave Techniques Laboratory) 基于太赫兹量子级联激光器 TQCL (Terahertz Quantum Cascade Laser) 实现了一部频率为 2.408 THz 的相干雷达成像系统^[11,12]。该系统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。2011 年, 德国法兰克福大学与丹麦科技大学提出了一种太赫兹阵列雷达成像系统^[13,14], 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 234 GHz~306 GHz。2012 年 5 月, 美国国防部先进研究项目局 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 发布了一项名为视频合成孔径雷达 ViSAR (Video Synthetic Aperture Radar) 的研究项目, 该雷达工作频段为 231.5 GHz~235 GHz, 采用一发四收的天线收发模式, 设计成像帧率为 5 Hz^[15]。2017 年 9 月, DARPA 官网报道称: 利用该系统成功获取了被云层遮蔽的地面目标的实时、全运动视频图像。

2010 年, 西安电子科技大学对太赫兹 SAR 系统进行了详细论证设计, 同年, 中国工程物理研究院开展了无人机机载太赫兹 SAR 概念研究。2011 年, 中国工程物理研究院自主研制了国内首个 140 GHz 高分辨率 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率 ISAR 成像。该系统信号带宽大于 5 GHz, 二维成像分辨率达 3cm×3cm^[16-18]。2012 年, 又设计了 340 GHz 收发前端和 670 GHz 的 ISAR 成像雷达收发链路, 670 GHz 成像雷达采用超外差体制, 天线收发分置, 工作频率为 660 GHz~688.8 GHz, 线性调频带宽为 28.8 GHz, 发射功率为 1 mW, 作用距离为 2 m~8 m, 成像分辨率达 1.3 cm^[19,20]。中科院电子所瞄准安检成像应用, 在太赫兹雷达方面也开展了系列研究。2012 年, 中科院

电子所研制了一部 200 GHz 雷达成像系统,系统带宽达 15 GHz,方位向最高分辨率可达 8 mm^[21,22]。2012 年,电子科技大学研制出 220 GHz 的太赫兹 ISAR 成像系统,基于固态电子学源,发射带宽为 4.8 GHz,实现了对飞机模型目标的高分辨 ISAR 成像。2014 年,进一步搭建了载频为 330 GHz 的成像雷达系统,带宽达到 10.08 GHz~28.8 GHz,并进行了转台成像实验,成像分辨率达到厘米级^[23,24]。此外,该团队在 2016 年利用该系统进行了圆周 SAR 等效成像实验^[25,26],通过成像处理得到了较好的实验结果,这也是国内首个太赫兹频段的圆周 SAR 等效成像实验。2018 年 12 月,参考美国 DARPA 的 ViSAR 体制,中国航天科工二院 23 所采用一发四收方案研制的太赫兹 ViSAR 雷达进行了飞行试验,并成功获取国内首组太赫兹 ViSAR 影像结果。

按照时间先后顺序,对国内外太赫兹雷达系统的发展历程进行梳理,如表 1 所示。

表 1 国内外太赫兹雷达系统发展历程(2021 年)

Table 1 The developing process of THz radar system at home and abroad (2021)

年份	研发机构与雷达名称
1988	美国马萨诸塞大学 215 GHz 高功率非相干脉冲雷达
1991	美国佐治亚理工学院 225 GHz 相干脉冲多普勒测量雷达
1993	美国 STL 远红外激光器雷达
2007	德国 FGAN-FHR COBRA-220 220 GHz 电子学雷达
2008	美国加州喷气推进实验室 585 GHz 主动相参太赫兹雷达
2010	美国 STL 2.408 THz TQCL 雷达
2011	中国工程物理研究院 140 GHz 电子学雷达
2012	中国工程物理研究院 670 GHz 超外差雷达
2012	电子科技大学 220 GHz 电子学雷达
2012	中科院电子所 200 GHz 准光电子学雷达
2013	德国 FGAN-FHR MIRANDA-300 325 GHz 电子学雷达
2014	电子科技大学 330 GHz 电子学雷达
2014	欧盟 TeraScreen 准光雷达
2015	国防科技大学 220 GHz 车载雷达
2016	中国工程物理研究院 340 GHz 准光雷达
2018	航天科工二院 23 所太赫兹视频合成孔径雷达

综上可知,目前国内外研究机构对太赫兹雷达技术均非常重视,投入了大量资源,也取得了阶段性成果。其中,国外研究机构在该领域起步较早,先后发布了一系列重大研究计划予以支持,得益于其在核心器件与芯片领域的优势,国外在太赫兹雷达系统研究方面具有先发优势。近年来,国内在系统与应用方面

进展迅速,研究水平基本与国外持平,但关键器件方面仍存在一定差距。目前,我国固态电子器件在 100 GHz 以下处于产品应用阶段,100 GHz~300 GHz 的器件进入研发阶段,300 GHz 以上频段处于起步阶段。国内外太赫兹固态器件对比情况见表 2。

随着太赫兹技术的发展,太赫兹雷达在器件、系统以及信号处理方

表 2 太赫兹固态器件国内外比对(2021 年)

Table 2 The comparison of THz solid-state devices at home and abroad (2021)

名称	主要指标	国外情况	国内情况
InP HEMT	最高振荡频率	1.5 THz	0.6 THz
低噪声放大器	最高工作频率	1 THz (Gain=9 dB)	0.3 THz (Gain=15 dB)
	噪声系数	11 dB@0.85 THz	11 dB@0.3 THz
功率放大器	最高工作频率	1 THz	0.3 THz
	输出功率	0.93 mW@0.85 THz	3 mW@0.3 THz
固态倍频源	功率	1 mW@0.85 THz	10 μW@0.85 THz
		1 mW@1 THz	尚无报道@1 THz
		5 μW@2.67 THz	尚无报道@2 THz
常温相干检测器	噪声温度	2 770 K@0.87 THz	2 800 K@0.67 THz
		6 000 K@1.5 THz	尚无报道@1 THz
		9 000 K@2.5 THz	尚无报道@3 THz

面均取得了长足进步,但在实用化进程中,尤其是在军事应用中,太赫兹技术仍面临诸多挑战。首先,太赫兹波的大气衰减严重,太赫兹源发射功率较低,接收机灵敏度不够,导致雷达作用距离有限,难以有效支撑远距离成像探测应用;其次,在末制导等近距离应用场景中,现有探测成像体制需要孔径积累,依赖于相对运动,制约了太赫兹雷达技术优势的发挥;最后,太赫兹雷达信号带宽大,采样帧率高,高分辨成像对数据需求量大,信号处理复杂且耗时。上述挑战直接制约了太赫兹雷达技术在高分辨成像与探测识别领域的应用,针对性的解决措施在于聚力攻关核心器件技术,实现太赫兹信号的大功率发射与高灵敏接收;研究太赫兹雷达新体制与新处理方法,实现太赫兹雷达增程、前视成像探测以及智能信息处理;进一步拓展大气层外中远距离以及大气层内近距离应用场景,规避大气衰减对雷达作用距离的制约。围绕上述举措,笔者认为可从以下几个方面开展前沿技术研究,通过前沿理论创新驱动体制优化设计,牵引核心器件发展,并进一步推动太赫兹雷达技术在军事领域的深化应用与长远发展。

2 前沿探测成像技术

2.1 太赫兹雷达增程技术

在实际应用中,根据雷达方程,目标后向散射的回波功率与作用距离四次方成反比,远距离非合作目标的回波信号强度极弱,特别是当前太赫兹雷达发射功率较低,接收机灵敏度不够,回波信号中的目标信息淹没在噪声中难以被有效检测到,常规太赫兹雷达体制难以满足对远距离非合作目标(尤其是隐身目标)及时准确的探测预警需求。太赫兹单光子探测技术与里德堡原子太赫兹探测技术具有极高的探测灵敏度,可以探测到回波信号极弱的微小目标或雷达反射截面积极小的隐身目标,在微弱光电信号探测、雷达增程以及反隐身方面极具应用价值。

2.1.1 太赫兹单光子雷达技术

单光子是传递电磁相互作用的基本粒子。单光子雷达可定义为在低回波强度时,光电转换器件中回波光子产生的平均初始电子数小于 10,且噪声引起的虚警远小于信号光子触发的探测概率的探测成像雷达^[27]。对于单光子雷达,其接收系统接收的是单个或少量数目的光子,接收机灵敏度非常高,相比传统雷达接收机,单光子雷达接收机灵敏度会高出若干个数量级,有望使雷达作用距离大幅提升数倍甚至数十倍,可以探测到回波信号更加微弱的目标。

太赫兹单光子雷达探测技术将太赫兹雷达技术与单光子探测技术有机融合,发射端利用大功率太赫兹源发射经典太赫兹波照射目标,接收端采用单光子探测器接收单光子量级的极弱太赫兹回波信号,再利用时间相关单光子计数法统计,结合相关增强检测技术,实现目标探测^[28]。太赫兹波频率介于微波与红外之间,具有一些不同于其它频段的特殊性质。相对于光学频段,太赫兹雷达能够不受环境光照影响实现全天时工作,且具有更好的穿透性和更宽的波束,容易实现对目标的覆盖;相对于微波频段,太赫兹波具有更高的光子能量,更容易实现单光子的发射与接收。因此,在太赫兹频段开展单光子目标探测技术研究具有重要的军事应用价值和现实意义。

在单光子探测系统中,由于光的量子特性,弱光回波信号在时间上是随机分布的光子流,光子的分布与到达具有随机性与离散性,因此,光子回波到达时间的检测与传统脉冲测距的包络检测和阈值检测方法有较大差别。光子计数是实现微弱信号检测的一种有效途径。然而,单光子探测中的回波信号包含真实目标回波以及噪声,当回波信号的强度下降到光子级别时,目标回波光子与噪声光子难以有效甄别,从而造成虚假计数,形成虚警探测。实际上,回到探测器的目标回波信号是按照特定规律变化的,具有较好的时间相关性;而噪声没有规律,幅值和频率波动随机变化,时间相关性很差。因此,太赫兹单光子雷达系统通过发射和接收太赫兹脉冲序列,进行多次重复测量与相关积累,在设定的距离门宽度内形成光子统计直方图,目标回波光子由于较好的时间相关性可实现叠加增强,集中分布在特定的位置上,而噪声光子却因其随机性,无规律散布在整个距离门内。所以利用时间相关单光子计数方法可将目标真实的距离和形态信息提取出来,可显著提高探测的重复精度和绝对精度,能有效抑制探测虚警率,实现改善雷达系统的检测能力与综合性能的目的^[29,30],典型的时间相关单光子计数过程如图 1 所示。

在光学频段,得益于工作在盖革模式下的雪崩光电二极管 GM-APD (Geiger Mode-Avalanche Photo Diode) 探测器的出现,国内外相关科研机构相继开展了大量单光子激光雷达探测与成像方面的技术研究,并取得了诸多可喜的成果。为了对植被或伪装下的隐藏目标进行探测和分类,从 2001 年开始,由美国 DARPA 领衔开始了 JIGSAW 计划研究,旨在研发一款基于光子计数模式的 32×32 单元 GM-APD 阵列扫描三维成像激光雷达,可在 150 m 的作用距离下实现对目标 5 cm 左右的横向分辨。该系统于 2003 年搭载在 UH-1 直升机上进行了外场机载实验,准确识别出隐藏在树林中的坦克目标^[31,32]。2015 年,中国电子科技集团公司第十四研究所基于光子计数目标检测原理成功研制了基于超导单光子探测器的激光单光子雷达系统,并在青海湖开展了真实大气环境下的目标探测试验,成功探测到 132 km 距离处的目标,验证了单光子探测技术应用于雷达探测的可行性^[33]。2016 年,中国电子科技集团公司第四十四研究所研制出了规格为 32×32 的 InGaAs GM-APD 探测器阵列,哈尔滨工业大学利用该器件搭建了激光成像系统并分别对 720 m 和 11 km 处的建筑进行成像,获得了目标的距离像^[34]。2018 年,华东师范大学成功研制出高速光子计数激光雷达测距系统,该系统利用多重频激光脉冲拓展雷达的最大不模糊距离,在青海湖外场对 21 km 外的目标实现了测距^[35]。

太赫兹单光子能量极低,4.3 THz 的太赫兹波,单个光子能量为 2.9×10^{-21} J,现有室温太赫兹探测器的等效噪声功率 NEP (Noise Equivalent Power) 典型值为 10^{-12} W/√Hz,难以满足单光子雷达探测应用需求。近年来,太赫兹频段低温高灵敏探测器取得了长足发展。超导相变边缘探测器 TES (Transition Edge Sensor)^[36]是一类高灵敏的太赫兹探测器。2015 年,中科院紫金山天文台采用 NbSi 薄膜所制备的超导 TES 探测器,在 288 mK 温度下,根据电流噪声测量结果得到的 NEP 达到 8.0×10^{-17} W/√Hz 的水平,可以满足地面天文观测应用的需求^[37]。2000 年,日本东京大学研究人员在 Nature 上撰文,提出一种基于半导体量子点 QD (Quantum Dot) 的单电子晶体管 SET (Single Electron Transistor) 单光子探测器方案^[38],在强磁场作用下,可实现 1.4 THz~1.7 THz 频段的单光子检测。2002 年,研究人员对上述结构进行了进一步改进,提出了一种双 QD 结构,摆脱了对外加磁场的依赖。器件工作在 500 GHz 附近,在 300 mK 温度下,NEP 达到了 10^{-21} W/√Hz 左右的极低水平,但暗计数率 0.01 s^{-1} 对应的量子效率仅为 0.1%^[39]。超导量子电容探测器 QCD (Quantum Capacitor Detector) 是近年来涌现的一类新型太赫兹单光子探测器,2009 年,美国南加州大学和加州理工大学的研究人员提出利用单超导库珀对箱 SCB (Single Cooper-pair Box) 制作超导 QCD 实现高灵敏度太赫兹波探测的技术方案,通过对噪声来源的分析,理论上最佳 NEP 可达 10^{-21} W/√Hz 量级^[40]。2017 年,加州理工大学的学者通过优化 QCD 的器件设计和测试系统,在 1.5 THz 频段获得了低于 1×10^{-21} W/√Hz 的 NEP,并证实这一探测器可以实现太赫兹单光子计数^[41]。

目前,国内外相关单位在太赫兹单光子探测器方面的研究已初见成效,相信在不久的将来,随着探测器灵敏度、工作温度和响应速率的进一步提升,以及器件向小型化和工程化发展,必将为太赫兹单光子探测技术的发展提供关键器件支撑。

在当前技术条件下,典型的单光子雷达系统实现方案包括直接探测与外差探测两种。直接探测方式是直接将太赫兹回波光功率转换为电信号,通过测量脉冲飞行时间实现目标精确测距,对于相位和多普勒等其他信息却无能为力。因此,直接探测方式难以测量目标的运动状态和外形特征,不能用于目标识别,其主要应用场景为远程预警探测和反隐身。而外差探测通过本振信号与回波信号的光场交叠产生光混频,利用外差等方式接收,可以同时获取回波信号所携带的振幅、频率或多普勒信息,再从中解调出

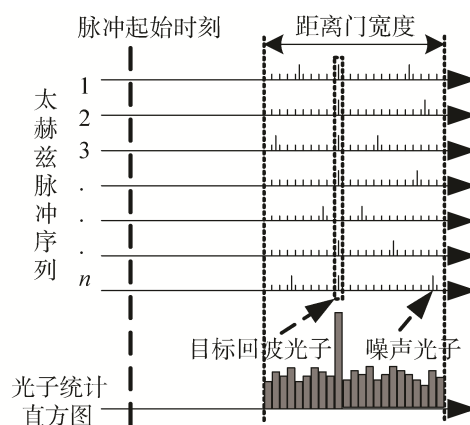


图 1 时间相关单光子计数过程示意图^[29]

Fig. 1 The principle of the time-correlated single-photon counting technique^[29]

目标距离信息或运动特征, 在远程非合作目标预警探测与识别方面具有广阔的应用前景。但外差探测要求本振信号与回波信号具有良好的相干性, 系统实现较为复杂。

需要指出的是, 直接探测与外差探测两种方式可以获取目标的距离和速度信息, 但不能反演目标的三维形态, 这是由于太赫兹波长较长和探测器需要低温冷却, 太赫兹单光子探测器难以实现大规模阵列集成, 不能采用类似激光单光子雷达的阵列探测方式实现目标三维成像。因此, 需要挖掘单光子雷达回波时域特征与目标空间域三维结构特征之间的深层关联, 探索切实可行的太赫兹单光子三维成像方案, 增加单光子雷达的探测信息量。

2.1.2 里德堡原子太赫兹探测技术

里德堡原子是指具有高激发态电子 (主量子数 $n > 10$) 的原子, 其跃迁能级频率处于微波、太赫兹频段。主量子数为 n 的里德堡原子具有很大的电偶极矩 ($\propto n^2$) 与极化率 ($\propto n^7$), 极易与太赫兹波耦合, 对太赫兹电场响应极为敏感^[42], 因此, 能够实现对微弱太赫兹波的有效探测。基于里德堡原子的太赫兹波电场测量具有可溯源、动态范围大、灵敏度高优点, 有望颠覆传统的电磁信息探测体制, 在太赫兹探测、太赫兹雷达与成像领域具有巨大的应用潜力。

基于里德堡原子的太赫兹探测技术将太赫兹技术、量子物理与原子光谱技术相结合, 在精确度、灵敏度方面具有显著优势。由于原子自身十分稳定, 原子测量体系仅通过单次校准过程便可以将电场测量溯源到基本物理常数, 使得其在测量精度上相对于经典测量系统具有显著的优势。此外, 处于里德堡态的原子能够与不同频率的太赫兹波耦合发生能级跃迁, 因此能够对不同频率太赫兹波进行探测, 可以作为宽带的太赫兹波接收天线。当与不同频率的太赫兹波耦合时, 其跃迁概率取决于跃迁电偶极矩。目前, 用于太赫兹波探测的里德堡原子主要为碱金属原子。研究表明碱金属里德堡原子在 0.1 THz~1.5 THz 频段能具有较大的电偶极矩, 极易与太赫兹波耦合^[43], 如图 2 所示。

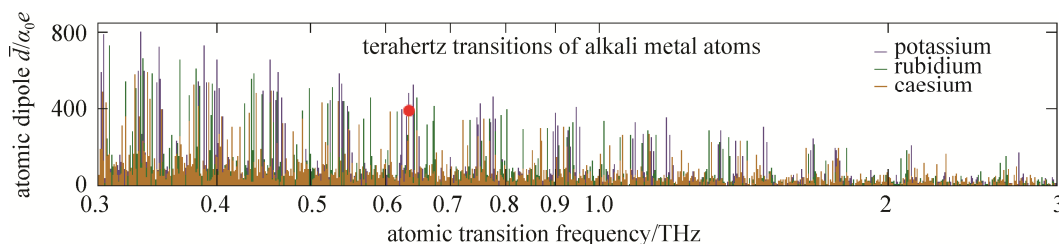


图 2 碱金属里德堡原子太赫兹跃迁频谱^[43]

Fig. 2 Resonant transitions between Rydberg states in the THz band^[43]

近年来, 国内外基于里德堡原子量子干涉效应的太赫兹探测技术已经取得了一些重要的研究成果。2018 年, Durham 大学 Wade 等人利用碱金属铯原子, 基于四能级里德堡原子电子感应透明效应测量了 634 GHz 的太赫兹场强^[44]。对不同的太赫兹场强进行测量, 探测光光谱分裂与太赫兹场强成正比, 验证了利用里德堡原子电磁诱导透明 EIT (Electromagnetically induced transparency) 欧特莱-汤斯 AT (Autler-Townes) 分裂效应测量太赫兹场强的有效性。

2020 年, Durham 大学 Weatherill 等人利用碱金属里德堡原子的自发辐射效应, 实现了太赫兹波到可见光的非相干转换, 从而利用商用相机实现了太赫兹高速成像, 获取了 0.55 THz 频段的视频信号^[45], 其空间分辨率接近衍射极限, 最小探测功率为 $190 \pm 30 \text{ fW} \cdot \text{s}^{-1/2}$, 每秒最大帧数达 3 000 帧, 如图 3 所示。2021 年, 华南师范大学陈志文等人利用碱金属里德堡原子的 EIT-AT 分裂实现了对 0.338 THz 不同强度的电场测量^[46]。

利用里德堡原子实现太赫兹波电场测量的原理如图 4 所示。依次使用探测光和耦合光将原子从基态激发至里德堡态, 探测光频率与 $|1\rangle$ 到 $|2\rangle$ 的能级共振, 耦合光的加入导致了 $|2\rangle$ 到 $|3\rangle$ 的跃迁共振, 从 $|1\rangle$ 到两个缀饰态的激发幅度是相反的, 导致了这两个激发路线上的破坏量子干涉, 使得探测光的透过率增加, 发生 EIT 效应。当太赫兹场与里德堡原子耦合, 第三个缀饰态被引入 EIT 效应中, 导致了电磁感应

透明现象被破坏, 将 EIT 共振分裂成两个, 这就是 EIT 信号的 AT 分裂效应。EIT-AT 分裂效应探测光透过率如图 4 (b) 所示。太赫兹波场强越大, 两个分裂峰之间的频率差越大, 因此, 可以实现对太赫兹场强的探测。

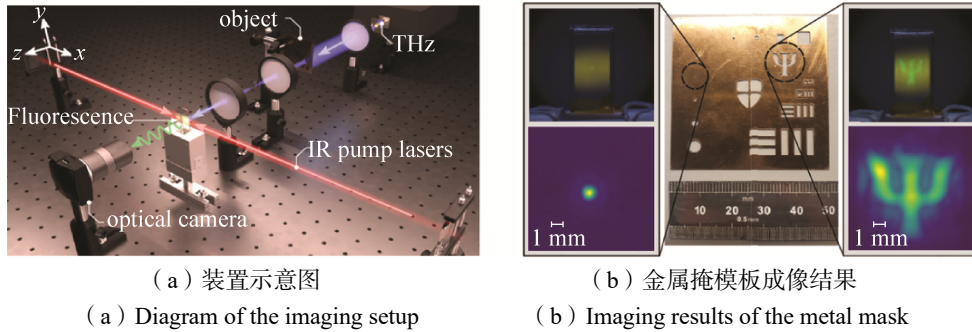


图 3 基于里德堡原子太赫兹超高速成像^[45]

Fig. 3 THz imaging at ultrahigh speed based on Rydberg atom^[45]

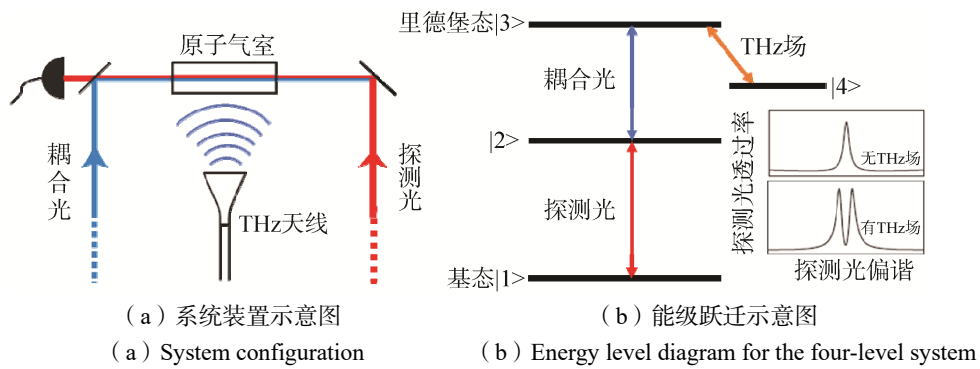


图 4 里德堡原子太赫兹波探测原理^[46]

Fig. 4 The principle of detecting THz wave based on Rydberg atom^[46]

太赫兹波场强可根据拉比频率计算, 其拉比频率表示为

$$\Omega_{\text{THz}} = 2\pi\Delta f \quad (1)$$

其中, Δf 为 EIT-AT 效应里探测光信号分裂的频率差。太赫兹波电场强度可以表示为

$$|E_{\text{THz}}| = \frac{\hbar}{\mu_{\text{THz}}} \Omega_{\text{THz}} = 2\pi \frac{\hbar}{\mu_{\text{THz}}} \Delta f \quad (2)$$

其中, $\hbar$ 为普朗克常量, μ_{THz} 为里德堡原子跃迁偶极矩。

基于里德堡原子的太赫兹探测技术, 具有高灵敏度、可溯源、高空间分辨率以及可实时成像等优点, 有望突破太赫兹技术在太赫兹探测、太赫兹计量、太赫兹高速成像等应用方向面临的瓶颈, 发展出新一代的太赫兹量子器件和新型太赫兹设备。

2.2 太赫兹波前调制前视成像与探测技术

受限于当前太赫兹源的发射功率以及太赫兹波的大气衰减, 太赫兹雷达在大气层内作用距离有限, 难以远距离应用。但由于频率高、波长短和带宽大, 太赫兹雷达具有“时空频”高分辨特性^[3], 在末制导与近炸引信、地面时敏目标探测与跟踪、无人车载雷达等近距离应用方面极具应用价值。在上述应用中, 雷达与目标之间属于前视观测几何, 需要在极短的时间内利用有限的观测孔径实现高分辨高帧率成像与探测。基于常规 SAR 和 ISAR 体制的太赫兹雷达方案依赖于雷达与目标的相对运动, 需要孔径合成时间积累, 难以满足高分辨高帧率前视成像探测的应用需求。近年来涌现出的波前调制前视成像与探测技术为上述应用提供了可行的技术途径。

2.2.1 太赫兹孔径编码高分辨成像技术

太赫兹孔径编码成像技术借鉴了融合波前调制和计算成像的重要思想。利用可编程超材料孔径编码

天线对太赫兹波进行时空二维波前编码调制, 改变太赫兹波空间幅相分布; 然后通过时序采样积分构造成像数学模型, 结合计算求解来获取目标散射系数精确分布, 最终实现高分辨前视成像^[47-49]。其技术特征主要体现在以下三个方面:

① 在信号频段方面, 充分利用太赫兹波的高分辨成像特性, 实现对目标方位向细节特征的精细表征和距离向的高分辨成像;

② 在雷达体制方面, 太赫兹孔径编码成像雷达通过波前编码与计算成像, 将图像重构问题转化为成像模型的数学求解问题, 能够不依赖雷达与目标之间的相对运动实现前视高分辨成像;

③ 在器件材料方面, 可编程超材料的出现为实现太赫兹频段的波前编码调制提供了重要契机, 超材料孔径编码天线无需类似相控阵的大量有源移相组件, 具有低剖面、阵元独立可控、波前灵活调制等诸多优点, 并且重量较小、外形紧凑、易于集成、易于共形、制作成本较低, 因此, 太赫兹孔径编码成像雷达具有实现新一代高性能末制导雷达的重大潜力^[50]。

孔径编码成像技术较早应用于光学成像领域, 主要通过对光学孔径的控制实现光瞳函数编码, 改善系统成像质量^[51]。2008 年, 美国 Rice 大学研究人员将孔径编码思想应用于太赫兹成像, 实现了一种基于单像素探测的太赫兹成像系统^[52]。该系统用单个太赫兹源照射目标, 太赫兹波透过目标后经过随机掩膜板由太赫兹探测器接收, 再利用压缩感知理论对目标图像进行重建。与孔径编码思想类似, 微波关联成像技术利用对雷达阵元发射信号的调制与控制, 在空间上形成具有差异性分布的辐射场激励, 采用二阶(高阶)关联方法实现对目标的前视成像, 能够提升雷达对目标的成像分辨能力^[53,54]。国防科技大学在该领域开展了一系列理论与实验研究^[55-57], 2019 年, 利用自研的 X 波段关联成像雷达系统开展了外场成像实验, 成功获得了 345 m 处角反目标的前视高分辨像^[58], 超分辨倍数达到了 10.7 倍。2013 年, 美国 Duke 大学研究人员首次在 Science 杂志上提出了基于超材料的孔径编码成像方案^[59], 该方案利用不同频率微波通过超材料编码阵列产生不同辐射模式, 在空间形成随机辐射场, 从而实现了 K 波段 10 Hz 帧率的二维高分辨成像。2017 年, Duke 大学研究人员将 12 块频率选择超表面随机放置在 2.1 m×2.1 m 大小的平面上, 每块超表面包含 2 个发射模块和 6 个接收模块, 工作频率范围 17.5 GHz~26.5 GHz, 实现了人体目标高分辨成像^[60]。2014 年, 美国 DARPA 发布了成像雷达先进扫描技术研究项目 ASTIR (Advanced Scanning Technologies for Imaging Radars)^[61], 旨在寻求一种不依赖于 SAR 和 ISAR 成像中目标或平台运动的先进雷达成像技术, 设想使用孔径编码天线和单个发射/接收链路实现高分辨成像, 其本质就是孔径编码成像。2018 年, 在该项目的支持下, 美国休斯研究实验室研制了一种工作在 235 GHz 的编码孔径次反射面阵列 CASA (Coded Aperture Subreflector Array) 天线, 该天线阵列的 1 024 个阵元传感器被封装到 1 平方英寸的射频模块上, 可扩展性强且功耗低, 适用于太赫兹孔径编码雷达高分辨成像。2016 年, 东南大学研究人员提出了一种基于透射式 2-Bit 可编程超表面的微波频段单频、单传感器成像技术^[62]。2020 年, 该团队进一步提出了一种利用 2-Bit 时域编码超表面实现多比特甚至准连续相位调制的时变方案^[63], 并通过研究表明该方案不需复杂的结构设计和控制系统, 在高性能天线、高分辨成像、大容量无线通信以及雷达领域具有重要的潜在应用价值。2018 年, 浙江大学研究人员提出了一种可以根据所需目标尺寸和成像分辨率的要求进行定制的雷达成像系统^[64], 系统工作频率 5.8 GHz, 最佳成像距离为 0.5 m, 天线单元间隔 0.05 m, 分辨率为 0.1 cm。2020 年, 香港中文大学研究人员提出了一种基于硅棱镜的光诱导太赫兹单像素成像系统实现方案, 实验中该系统对树叶目标的成像分辨率为 32×32 像素, 成像视场为毫米尺度^[65]。

图 5 为太赫兹孔径编码成像系统示意图, 该成像系统主要由发射天线、接收天线、发射端和接收端超材料孔径编码天线、上位机控制与处理系统以及信号产生与采集模块组成。超材料孔径编码天线可以仅置于发射端或接收端, 也可以同时置于发射端和接收端, 用于对输入信号的幅度或相位进行离散或连续编码调制。信号产生与采集模块用于产生太赫兹发射信号, 并对目标后向散射回波进行采样接收得到回波数据序列, 最后在上位机控制系统完成高帧率成像处理, 输出高分辨目标图像。

根据所采用的太赫兹信号采集系统的区别,太赫兹孔径编码成像雷达可分为有相位与无相位两种实现方式。有相位太赫兹孔径编码成像雷达使用相干接收机接收包含相位和振幅信息的回波信号^[50],能够提取更为丰富的目标信息,有助于后期的成像处理和目标高分辨重建,具有高分辨率、高帧率、前视成像且易小型化等突出优点,但代价是接收链路相对复杂、组件成本较高。这是由于高频率、大带宽的太赫兹信号的采样接收依赖于复杂的下变频链路,而现阶段对相位的精确测量在太赫兹波段仍比较困难,相关的硬件成本也较高,因此,无相位太赫兹孔径编码成像技术应运而生^[66]。该方法在接收时直接使用非相干探测器对目标散射回波进行采样接收,将回波信号的强度信息直接转化为直流电流或者电压信息,无需采用去斜接收的方式,不受信号带宽以及采样定律的限制,可有效解决有相位太赫兹孔径编码成像系统在接收时面临的难题,简化系统接收链路结构。同时,由于太赫兹非相干探测器易小型化和阵列集成,可进一步采用非相干探测器阵列结合接收端编码方式,从而显著减少孔径编码成像系统的编码采样次数,提升探测成像帧率,对于助推孔径编码成像技术的实用化具有重要意义。

有相位太赫兹孔径编码成像模型可写为

$$\mathbf{S}_r = \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\omega} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{S}_r$ 为相干接收的回波数据矢量,包含相位与振幅信息, $\mathbf{S}$ 为参考信号矩阵, $\boldsymbol{\beta}$ 为目标散射系数矢量, $\boldsymbol{\omega}$ 为加性噪声矢量。对于无相位太赫兹孔径编码成像系统,回波数据矢量 $\mathbf{S}'_r$ 仅包含振幅信息,成像模型表示为

$$\mathbf{S}'_r = |\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\beta}|^2 + \boldsymbol{\omega} \quad (4)$$

下面以无相位太赫兹孔径编码成像为例,进行成像仿真。系统中心频率为 340 GHz,带宽 10 GHz,脉冲宽度为 100 μ s,信噪比设置为 20 dB。成像平面被分割为 W 个网格单元,总共进行了 N 次测量,采用测量数据量 N 和成像区域网格单元数量 W 的比值 N/W 来作为相对测量数据大小,图 6 给出了不同测量数据量下的成像结果。由图 6 可知,由于无相位成像缺失了回波中的相位信息,在相对测量数据较少时,图像重构难度较大,通过增加测量数据量,可有效改善成像质量。仿真结果表明,无相位太赫兹孔径编码成像技术可仅依靠回波信号的强度信息准确地重构出目标图像。

太赫兹孔径编码成像技术具有高分辨、高帧频、前视凝视成像能力,是实现目标探测与识别的重要手段,在雷达末制导、近炸引信和战场侦察等需要凝视成像的诸多领域具有广阔的应用前景。

2.2.2 太赫兹涡旋目标微动特征探测技术

近年来,携带轨道角动量 OAM (Orbital Angular Momentum) 的涡旋电磁波在雷达目标探测与成像领域受到了广泛关注。利用 OAM 获取目标微动信息的研究首先在光学频段展开,当光学涡旋照射到旋转运动目标上时将产生旋转多普勒效应,即出现回波频率发生改变的现象。1998 年, Courtial 等人^[67]开展了旋转多普勒观测实验,研究发现, OAM 波束经过转动平面反射后, OAM 模式数发生微小的改变,这一现象是由旋转多普勒效应引起的,并指出如果能够测量出回波相对入射波的频率改变值,就可以获得目标的转动角速度。2013 年,英国格拉斯哥大学研究小组研究发现,涡旋波入射到转动物体后回波信号将发生一定的频率偏移,且偏移量由物体转动速度和 OAM 决定^[68]。2016 年以来,相关研究团队在

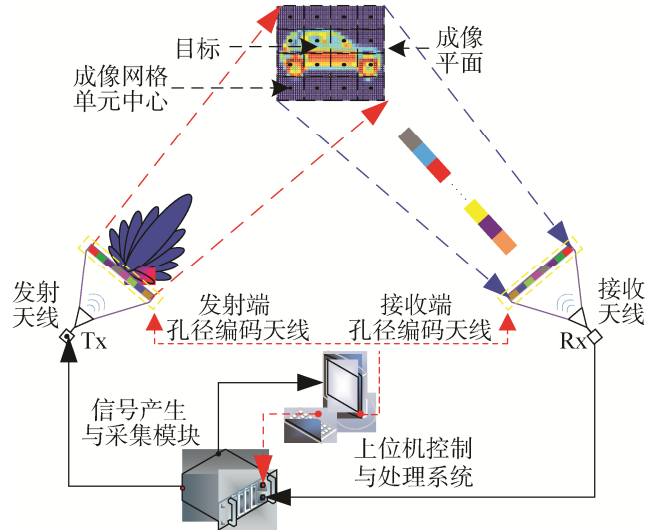


图 5 太赫兹孔径编码成像系统示意图

Fig. 5 The schematic diagram of the THz coded-aperture imaging system

微波频段对旋转多普勒效应进行了理论与实验验证, 采用相位积累的方式测出了旋转目标回波频率^[69,70], 同时实现了旋转目标的二维分辨^[70]。从公开报道来看, 目前关于太赫兹涡旋及其在目标微动探测领域研究相对较少。

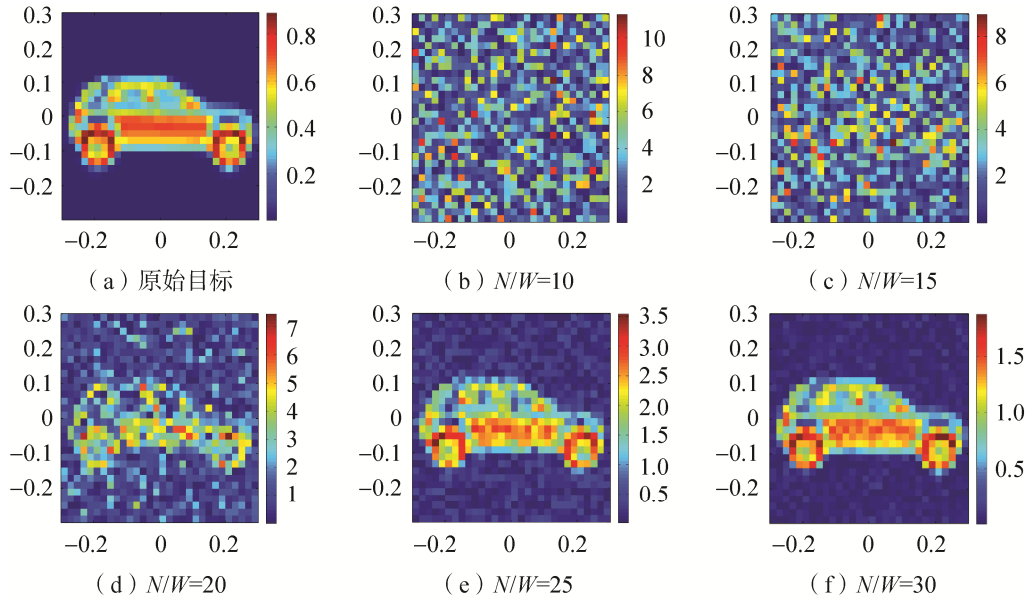


图 6 无相位太赫兹孔径编码成像仿真结果

Fig. 6 The simulation results of the phaseless THz coded-aperture imaging

不同于平面波, 太赫兹涡旋波照射目标时, 由于其波前是连续变化的, 相当于能在短时间内实现二维角度空间连续采样, 从而展现了目标特性空间分集的能力, 有望使目标回波中蕴含更为丰富的目标信息^[71]。一方面, 利用太赫兹涡旋波携带的 OAM 信息, 不依赖雷达-目标间的径向运动, 在前视条件下即可实现对旋转目标的检测。另一方面, 基于 OAM 模式数与多普勒频移之间的线性关系, 可以实现对微弱多普勒信息的高效提取。因此, 基于太赫兹涡旋波的雷达目标探测技术有望实现更为精细的目标多普勒特征提取, 同时获取复杂运动目标的径向多普勒信息和旋转多普勒信息, 在军事和民用领域中具有诱人的应用前景。

典型的太赫兹涡旋波探测目标场景如图 7 所示。假设目标的方位向运动分量为 $v_\phi = r\Omega$, 其中, Ω 是瞬时角速度。太赫兹涡旋波照射目标时, 目标方位向运动分量在不同时刻的激励相位分布不同, 所以, 不同时刻接收到的回波相位差也不同。当目标进行旋转运动时, 目标运动会一直切割方位向相位, 由于旋转运动和太赫兹涡旋波绕轴旋转都是周期性变化的, 因此在回波中会产生一个与方位向相位调制相关的多普勒频移。在时间 t 内, 目标旋转的方位角可以表示为 Ωt , 并且一个周期内涡旋电磁波相位变化为 $2\pi l$, 所以

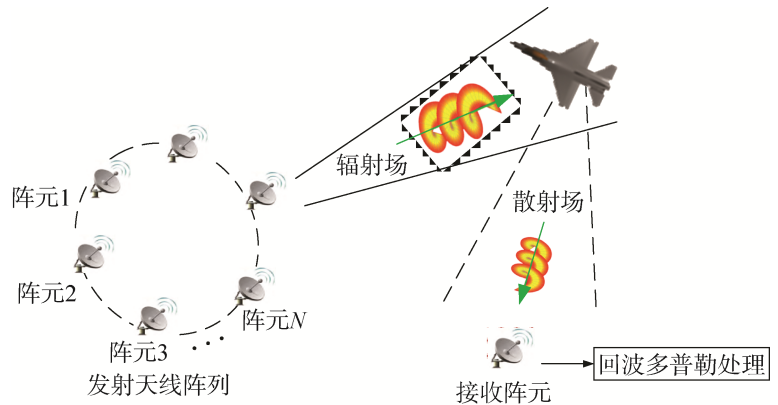


图 7 太赫兹涡旋波探测目标示意图

Fig. 7 The schematic diagram of target detecting based on OAM

$$\frac{1/\Omega}{t} = \frac{2\pi l}{\Delta\phi} \quad (5)$$

由式 (5) 可得, 回波方位向相位差为

$$\Delta\varphi = 2\pi l\Omega t \quad (6)$$

对式 (6) 关于 t 求导, 可以推导出方位向上的频率变化

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d}{dt} \Delta\varphi = l\Omega \quad (7)$$

式 (7) 中, 频率变化量 Δf 即为旋转多普勒频移, 可以看出旋转多普勒与频率无关, 与 OAM 模式数和目标转速成正比。

目前, 国内外关于太赫兹涡旋波产生与微动目标探测技术的研究尚处于起步阶段, 太赫兹频段涡旋波的产生原理需要深入研究, 特别是多 OAM 模式数太赫兹涡旋波的产生方法需要探索, 基于太赫兹涡旋波微动目标探测模型、旋转多普勒分辨率表征以及目标微动特征提取方法也亟待进一步研究。

2.3 太赫兹雷达智能信息处理技术

太赫兹雷达成像中, 较为普遍采用的数学模型为式 (3) 给出的形式。在这一模型下, 传统的成像方式可以表示为线形变换 $\hat{\beta} = S^H S_r$, 这一变换可以利用后向投影的方式实现, 或在满足一定条件时可以利用快速傅立叶变换 FFT (Fast Fourier Transform) 实现; 还可以利用先验信息对 β 施加约束提高成像质量, 其中, 雷达图像自身直接的稀疏性是被利用最广泛的一种先验信息^[72,73]。在此基础上, 成像问题被转化为如下优化问题

$$\hat{\beta} = \arg \min \psi(\beta) \text{ s.t. } \|S_r - S\beta\|_2^2 < \sigma^2 \quad (8)$$

其中, $\psi(\beta)$ 包含了对 β 的先验信息, σ^2 通常为 ω 的方差。发展最为成熟的压缩恢复算法主要分为贪婪追踪类方法^[74,75]、 L_1 正则化方法^[76]、 $L_p(0 < p < 1)$ 正则化方法^[77]以及稀疏贝叶斯方法^[78]。贪婪追踪类方法的主要思想是观察信号与字典矩阵的各列原子进行匹配度测试。 L_1 正则化方法是在优化目标函数中 β 加入 L_1 范数项, 即 $\psi(\beta) = \|\beta\|_1$ 。 L_p 正则化方法主要是基于 L_p 范数和 L_0 范数。稀疏贝叶斯方法则是从统计的角度对成像逆问题进行建模。

虽然稀疏驱动的雷达成像算法相比传统成像方式能显著提高成像质量, 但在实际应用中仍受到明显制约。一方面, 太赫兹雷达对目标的精细解析需要大量数据支撑, 成像过程需要通过大量迭代才能使收敛至较理想的结果, 成像处理极为复杂且耗时; 另一方面, 图像重构质量高度依赖于辐射场推演精度与成像系统建模精度, 而太赫兹波波长短, 对误差敏感, 不可避免地会存在模型失配等误差, 当实际系统与所建模型存在较大偏差时, 成像结果将出现严重退化甚至无法成像; 此外, 上述稀疏类算法的抗噪性能难以满足实际应用需求, 低信噪比条件下算法的稳健性与鲁棒性难以保证。

随着人工智能技术的迅速发展和逐步应用, 以深度学习为代表的智能信息处理技术成为雷达信号处理领域的必然发展趋势, 引起了国内外广泛关注。雷达成像问题事实上可以被看作一种以回波数据为因变量以雷达图像为自变量的回归问题。从这个角度看, 能用于解决这类回归问题的处理方法均有潜力用于雷达成像。深度学习作为一种“普适性”的回归求解器, 其同样有潜力用于雷达成像。由于深度学习的计算结构使其前向传播过程能够被高效地并行实现, 这使得回归深度神经网络在成像精度和效率上优于传统的包含稀疏恢复方法在内的算法。因此, 将深度神经网络引入到太赫兹雷达成像中有利于解决当前雷达成像中存在的问题。

2016 年以来, 深度学习在图像重构、压缩感知等逆问题领域的研究报道呈现出显著的增长趋势。深度网络被推广应用至图像超分辨、信号重构、压缩感知、医学成像等领域, 并均在特定问题中展现出了超出当时最先进方法的性能。同时, 所用深度网络的结构也从起初的多层感知器 MLP (Multi-Layer Perceptron)^[79]、卷积神经网络 CNN (Convolutional Neural Network)^[80]发展到更加复杂和精巧的 U-Net^[81]、ADMM-Net^[82]、AMP-Net^[83]、生成对抗网络 GAN (Generative Adversarial Net)^[84,85]等。

在一些线性成像方法效果并不令人满意的场景中, 雷达增强成像可有效提升成像质量。以客机模型转台成像为例, 雷达系统中心频率为 220 GHz, 带宽 12.8 GHz, 转角范围 $-1.68^\circ \sim 1.67^\circ$, 分别用 FFT 算

法、SPGL1 方法^[86]、实数卷积神经网络 RV-CNN (Real-Valued CNN) 以及复数卷积神经网络 CV-CNN (Complex-Valued CNN) 处理实测数据, 成像结果如图 8 所示^[87]。实测实验表明, 基于卷积神经网络的增强成像方法在分辨率、旁瓣电平等方面较经典的线性成像中具有明显优势, 同时, 由于利用了网络对数据的学习能力, 从结构上摆脱了典型的迭代类成像方法的高计算复杂度, 在计算效率方面较当前主流稀疏恢复方法具有 2~3 个数量级的优势。

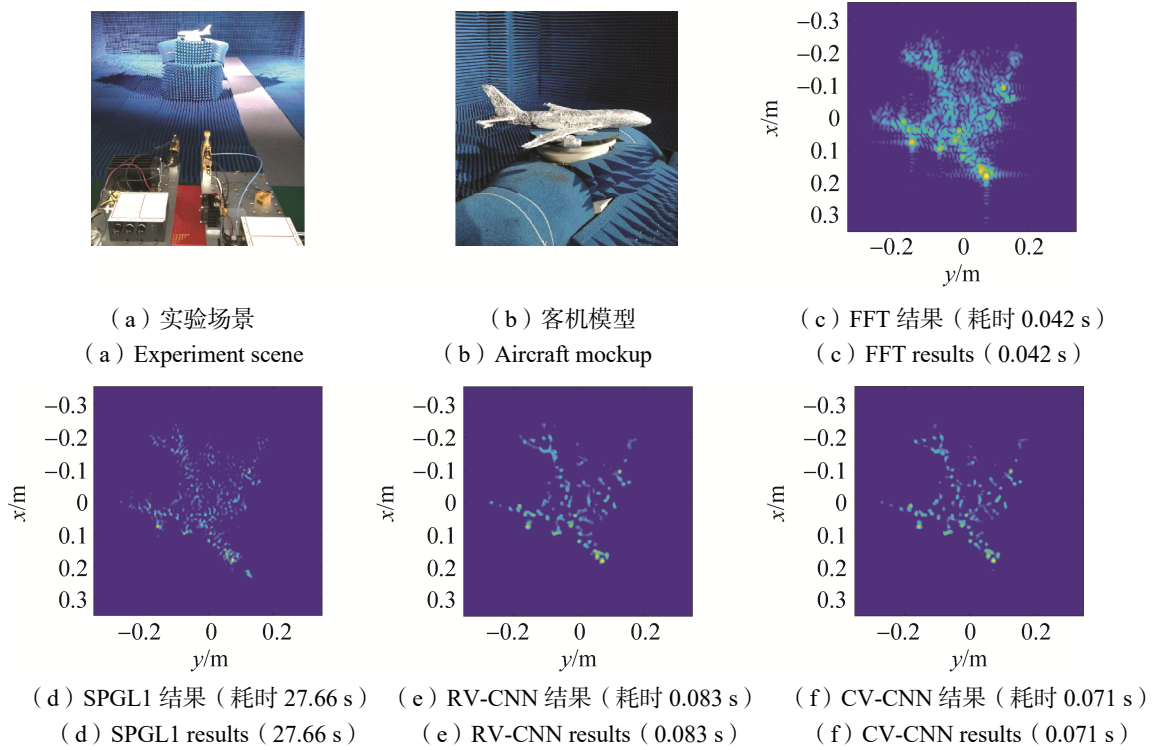


图 8 基于卷积神经网络的太赫兹雷达转台成像结果^[87]

Fig. 8 The turntable imaging results based on CNN^[87]

同样, 得益于其强大的特征学习和信息挖掘能力, 深度学习在太赫兹孔径编码成像方面也极具应用潜力。为了提升孔径编码成像帧率, 可通过网络学习与优化构建离线的端到端成像网络, 实现回波信号到目标图像的直接映射, 成像流程如图 9 所示^[88]。

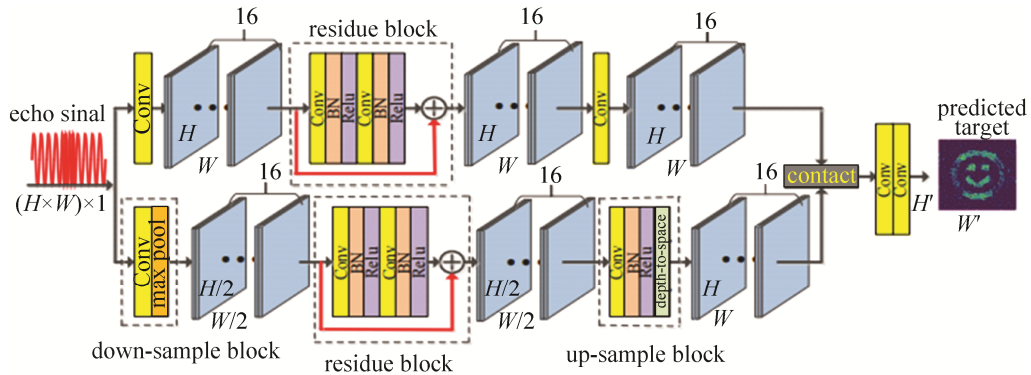


图 9 端到端卷积神经网络太赫兹孔径编码成像流程^[88]

Fig. 9 The end-to-end neural network for terahertz coded-aperture imaging^[88]

系统中心频率为 340 GHz, 带宽 20 GHz, 成像距离 2 m, 分别采用正则化成像算法、稀疏贝叶斯成像算法和基于卷积神经网络的成像算法进行仿真成像, 结果如图 10 所示。可以看出, 当 SNR 优于 10 dB 时, 三种算法都能重构目标, 正则化算法效果最佳; 但随着信噪比下降, 正则化方法成像效果急剧退化,

而稀疏贝叶斯和卷积神经网络算法在 -5 dB 时仍能成像, 其中, 卷积神经网络算法效果略优, 这表明卷积神经网络算法具有优异的抗噪性能。进一步对比三种成像算法的成像时间, 可以看出, 相同条件下卷积神经网络成像算法在成像效率上有明显优势, 若采用 GPU 架构, 优势将更为明显。

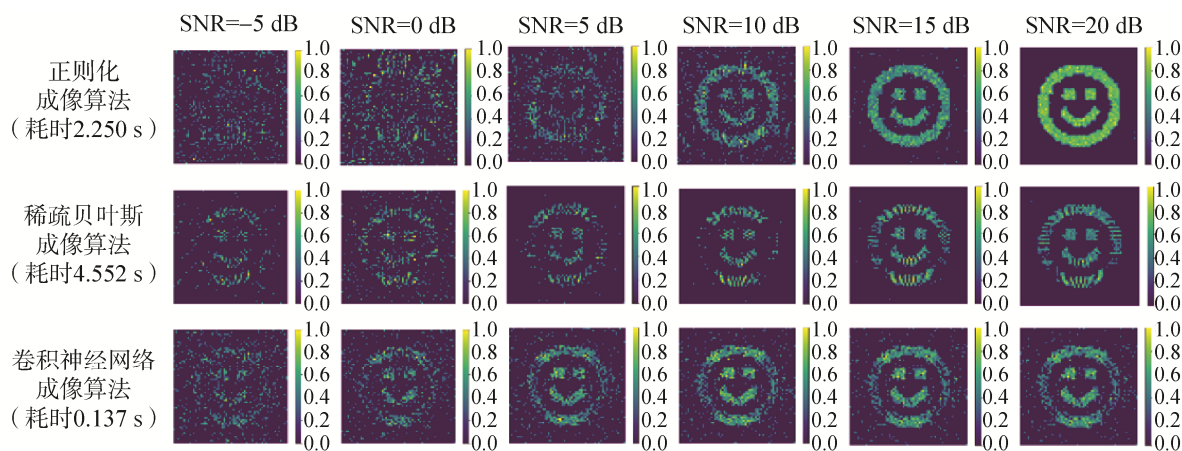


图 10 不同信噪比条件下不同成像算法的成像结果对比^[88]

Fig. 10 The comparison of reconstruction results for various methods under different signal to noise ratio^[88]

基于深度学习的太赫兹雷达智能信息处理技术可有效规避大规模回波数据处理带来的效率低下问题, 提升成像帧率, 改善信号处理对系统误差和噪声的容忍度, 提高算法稳健性, 对于突破现有雷达信号处理技术面临的瓶颈问题具有重要意义。因此, 有必要在深度学习网络的特征与先验挖掘能力、场景和目标的泛化性、训练集生成等方面开展更深入的研究, 进一步推动太赫兹雷达技术的智能化发展。

3 结束语

太赫兹雷达具有“时空频”高分辨特性, 在战场侦察、目标精细识别等方面具有重要的应用价值。本文回顾了太赫兹雷达技术的发展历程, 分析了当前太赫兹雷达技术实用化进程中面临的挑战, 梳理了关键举措, 并指出, 通过在雷达增程、波前调制前视成像探测以及智能信息处理等方面开展前沿技术研究, 有望突破当前太赫兹雷达面临的技术瓶颈、牵引太赫兹领域核心器件发展、抢占太赫兹雷达军事应用战略制高点, 为战场侦察、精确打击以及远程预警等应用提供关键技术支撑。

参考文献

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910–928.
- [2] HORIUCHI N. Terahertz technology: endless applications[J]. Nature Photonics, 2010, 4(3): 140.
- [3] 王宏强, 邓彬, 秦玉亮. 太赫兹雷达技术[J]. 雷达学报, 2018, 7(1): 1–21.
WANG Hongqiang, DENG Bin, QIN Yuliang. Review of terahertz radar technology[J]. Journal of Radars, 2018, 7(1): 1–21.
- [4] MCMILLAN R W, TRUSSELL C W, BOHLANDER R A, et al. An experimental 225 GHz pulsed coherent radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39(3): 555–562.
- [5] COOPER K B, DENGLER R J, CHATTOPADHYAY G, et al. A high-resolution imaging radar at 580 GHz[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2008, 18(1): 64–66.
- [6] ESSEN H, WAHLEN A, SOMMER R, et al. High-bandwidth 220 GHz experimental radar[J]. Electronics Letters, 2007, 43(20): 1114–1116.
- [7] ESSEN H, WAHLEN A, SOMMER R, et al. Development of a 220 GHz experimental radar[C]// 2008 German Microwave Conference, Hamburg, 2008: 1–4.
- [8] CARIS M, STANKO S, PALM S, et al. 300 GHz radar for high resolution SAR and ISAR applications[C]. Radar Symposium, 2015: 577–580.
- [9] STANKO S, PALM S, SOMMER R, et al. Millimeter resolution SAR imaging of infrastructure in the lower THz region

- using MIRANDA-300[C]// Microwave Conference, 2017: 1505–1508.
- [10] PALM S, SOMMER R, CARIS M, et al. Ultra-high resolution SAR in lower terahertz domain for applications in mobile mapping[C]// Microwave Conference, 2016: 205–208.
- [11] DANYLOV A A, GOYETTE T M, WALDMAN J, et al. Coherent imaging at 2.4 THz with a CW quantum cascade laser transmitter[C]. Terahertz Technology and Applications III, San Francisco, CA, United States, 2010.
- [12] 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.
- [13] MOLL J, SCHOPS P, KROZER V. Towards three-dimensional millimeter-wave radar with the bistatic fast-factorized back-projection algorithm-potential and limitations[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012, 2(4): 432–440.
- [14] FRIEDERICH F, SPIEGEL W V, BAUER M, et al. Thz active imaging systems with real-time capabilities[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2011, 1(1): 183–200.
- [15] WALLACE B H. Visar, video synthetic aperture radar[EB/OL]. [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).
- [16] 成彬彬, 江舸, 杨陈, 等. 0.14 THz 高分辨力成像雷达信号处理[C]// 全国太赫兹科学技术与应用学术交流会, 2013: 1577–1581.
- [17] 江舸, 成彬彬, 张健. 基于 0.14 THz 成像雷达的 RCS 测量[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(1): 19–23.
- [18] CHENG B, JIANG G, WANG C, et al. Real-time imaging with a 140 GHz inverse synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2013, 3(5): 594–605.
- [19] 成彬彬, 江舸, 陈鹏, 等. 0.67 THz 高分辨力成像雷达[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(1): 7–11.
CHENG Binbin, JIANG Ge, CHEN Peng, et al. 0.67 THz high resolution imaging radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(1): 7–11.
- [20] 陈鹏, 成彬彬. 0.67 THz ISAR 成像雷达收发链路设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(2): 163–167.
CHENG Peng, CHENG Binbin. TR link design of a 0.67 THz ISAR imaging radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(2): 163–167.
- [21] SUN Z, LI C, GU S, et al. Fast three-dimensional image reconstruction of targets under the illumination of terahertz gaussian beams with enhanced phase-shift migration to improve computation efficiency[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2014, 4(4): 479–489.
- [22] LI C, GU S, GAO X, et al. Image reconstruction of targets illuminated by terahertz gaussian beam with phase shift migration technique[C]// International Conference on Infrared, Millimeter, & Terahertz Waves, 2013: 1–2.
- [23] 张彪, 皮亦鸣, 李晋. 采用格林函数分解的太赫兹逆合成孔径雷达近场成像算法[J]. 信号处理, 2014, 30(9): 993–999.
ZHANG Biao, PI Yiming, LI Jin. Terahertz inverse synthetic aperture radar near-field imaging algorithm using Green's function decomposition[J]. Journal of Signal Processing, 2014, 30(9): 993–999.
- [24] YAO G, PI Y. Terahertz active imaging radar: preprocessing and experiment results[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2014, (1): 1–8.
- [25] HU R, MIN R, PI Y. A video-SAR imaging technique for aspect-dependent scattering in wide angle[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(12): 3677–3688.
- [26] LIU T, PI Y, YANG X. Wide-angle csar imaging based on the adaptive subaperture partition method in the terahertz band[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2017, (99): 1–9.
- [27] SEITZ P, THEUWISSEN A J P. Single-Photon Imaging[M]. New York: Springer, 2011: 9–11.
- [28] 罗成高, 刘康, 王宏强, 等. 太赫兹单光子雷达探测技术[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(5): 054202.
LUO Chenggao, LIU Kang, WANG Hongqiang, et al. Terahertz single-photon radar detection technology[J]. SCIENTIA SINICA: Physica, Mechanica & Astronomica, 2021, 51(5): 054202.
- [29] MILSTEIN A B, JIANG L A, LUU J X, et al. Acquisition algorithm for direct-detection ladars with Geiger-mode avalanche photodiodes[J]. Applied Optics, 2008, 47(2): 296–311.
- [30] 王傲游, 陶宇亮, 李旭, 等. 高重频光子计数激光雷达样机设计及测距试验[J]. 激光与红外, 2017, 47(7): 803–807.
WANG Aoyou, TAO Yuliang, LI Xu, et al. Design and test of high repetition frequency photon counting lidar prototype[J].

- Laser & Infrared, 2017, 47(7): 803–807.
- [31] MARINO R M, DAVIS W R. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2005, 15(1): 23–35.
- [32] VAIDYANATHAN M, BLASK S, HIGGINS T, et al. Jigsaw phase III: a miniaturized airborne 3-d imaging laser radar with photon-counting sensitivity for foliage[J]. In Proceedings of SPIE 6550, Laser Radar Technology and Applications XII. Orlando: SPIE, 2007.
- [33] 金林. 量子雷达研究进展[J]. 现代雷达, 2017, 39(3): 1–7.
JIN Lin. Research progress of quantum radar[J]. Modern Radar, 2017, 39(3): 1–7.
- [34] 孙剑峰, 姜鹏, 张秀川. 32×32 面阵 InGaAs Gm-APD 激光主动成像实验[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1206006-1–1206006-5.
SUN Jianfeng, JIANG Peng, ZHANG Xiuchuan, et al. Experimental research of 32×32 InGaAs Gm-APD arrays laser active imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 1206006-1–1206006-5.
- [35] DU B C, PANG C K, WU D, et al. High-speed photon-counting laser ranging for broad range of distances[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 4198.
- [36] 史生才, 李婧, 张文, 等. 超高灵敏度太赫兹超导探测器[J]. 物理学报, 2015, 64(22): 28501-1–28501-12.
SHI Shengcai, LI Jing, ZHANG Wen, et al. Terahertz high-sensitivity superconducting detectors[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(22): 28501-1–28501-12.
- [37] ZHANG W, ZHONG J Q, MIAO W, et al. Characterization of a superconducting NbSi transition edge sensor for TeSIA[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 1–4.
- [38] KOMIYAMA S, ASTAFIEV O, ANTONOV V, et al. A single photon detector in the far-infrared range[J]. Nature, 2000, 403(6768): 405–407.
- [39] ASTAFIEV O, KOMIYAMA S, KUTSUWA T, et al. Single photon detector in the microwave range[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(22): 4520–4522.
- [40] SHAW M D, BUENO J, DAY P, et al. Quantum capacitance detector: a pair-breaking radiation detector based on the single Cooper-pair box[J]. Physical Review B, 2009, 79(144511): 1–10.
- [41] ECHTERNACH P M, PEPPER B J, RECK T. Single photon detection of 1.5 THz radiation with the quantum capacitance detector[J]. Nature Astronomy, 2018, 2: 90–97.
- [42] GALLAGHER T F, RYDBERG ATOMS[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 38–49.
- [43] WADE C G, ŠIBALIĆ N, DE MELO N R, et al. Real time near-field terahertz imaging with atomic optical fluorescence[J]. Nature Photonics, 2017, 11: 40–43.
- [44] WADE C G. Terahertz wave detection and imaging with a hot Rydberg vapour[M]// Springer Theses. Switzerland, 2018: 55–63.
- [45] DOWNES L A, MACKELLAR A T, WHITING D J, et al. Full-field terahertz imaging at kilohertz frame rates using atomic vapor[J]. Physical Review X, 2020, 10(1): 011027-1–011027-7.
- [46] 陈志文, 余圳跃, 廖开宇, 等. 基于 Rydberg 原子天线的太赫兹测量[J]. 物理学报, 2021, 70(6): 060702-1–060702-11.
CHEN Zhiwen, SHE Zhenyue, LIAO Kaiyu, et al. Terahertz measurement based on Rydberg atomic antenna[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(6): 060702-1–060702-11.
- [47] 邓彬, 陈硕, 罗成高, 等. 太赫兹孔径编码成像研究综述[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(3): 302–310.
DENG Bin, CHEN Shuo, LUO Chenggao, et al. Review of terahertz coded-aperture imaging[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(3): 302–310.
- [48] CHEN S, LUO C G, DENG B, et al. Study on coding strategies for radar coded-aperture imaging in terahertz band[J]. Journal of Electronic Imaging, 2017, 26(5): 053022-1–053022-5.
- [49] LUO C G, DENG B, WANG H Q, et al. High-resolution terahertz coded-aperture imaging for near-field three-dimensional target[J]. Applied Optics, 2019, 58(12): 3293–3300.
- [50] 陈硕. 太赫兹孔径编码三维成像技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- [51] LLULL P, LIAO X J, YUAN X, et al. Coded aperture compressive temporal imaging[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 10526–10545.

- [52] CHAN W L, CHARAN K, TAKHAR D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 121105-1–121105-3.
- [53] 郭桂蓉, 胡卫东, 杜小勇. 基于电磁涡旋的雷达目标成像[J]. *国防科技大学学报*, 2013, 35(6): 71–76.
GUO Guirong, HU Weidong, DU Xiaoyong. Electromagnetic vortex based radar target imaging[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35(6): 71–76.
- [54] 李东泽. 雷达关联成像技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2014.
- [55] CHENG Y Q, ZHOU X L, XU X W, et al. Radar coincidence imaging with stochastic frequency modulated array[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2016, 11(2): 414–427.
- [56] YUAN T Z, WANG H Q, CHENG Y Q, et al. Experimental results of radar imaging based on orbital angular momentum modulation[C]// *Proceedings of SPIE*, 2016, 10033: 100333K-1–100333K-5.
- [57] LI D Z, LI X, QIN Y L, et al. Radar coincidence imaging: an instantaneous imaging technique with stochastic signals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(4): 2261–2277.
- [58] CAO K C, CHENG Y Q, LIU K, et al. Off-grid microwave coincidence imaging based on directional grid fission[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(12): 2497–2501.
- [59] HUNT J, DRISCOLL T, MROZACK A, et al. Metamaterial apertures for computational imaging[J]. *Science*, 2013, 339: 310–313.
- [60] GOLLUB J N, YURDUSEVEN O, TROFATTER K P, et al. Large metasurface aperture for millimeter wave computational imaging at the human-scale[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42650.
- [61] WALLACE H B. Advanced scanning technology for imaging radars (ASTIR)[R]// DARPA, Approved for Public Release, Distribution Unlimited, DISTAR Case #23357, 2014.
- [62] LI Y B, LI L L, XU B B, ET al. Transmission-type 2-bit programmable metasurface for single-sensor and single-frequency microwave imaging[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23731.
- [63] ZHANG L, WANG Z X, SHAO R W, et al. Dynamically realizing arbitrary multi-bit programmable phases using a 2-bit time-domain coding metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 68(4): 2984–2992.
- [64] ZHOU T Y, SHEN F Z, XU K W, et al. Microwave imaging customized on demand under random field illumination[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 67(3): 1148–1156.
- [65] STANTCHEV R I, YU X, BLU T, et al. Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2535-1–8.
- [66] 彭龙. 太赫兹孔径编码无相位成像技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- [67] COURTIAL J, DHOLAKIA K, ROBERTSON D A, et al. Measurement of the rotational frequency shift imparted to a rotating light beam possessing orbital angular momentum[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(15): 3217–3219.
- [68] MARTIN P J LAVERY, FIONA C SPEIRITS, STEPHEN M BARNETT, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum[J]. *Science*, 2013, 341: 537–540.
- [69] ZHAO M Y, GAO X L, XIE M T, et al. Measurement of the rotational Doppler frequency shift of a spinning object using a radio frequency orbital angular momentum beam[J]. *Optics Letter*, 2016, 41(11): 2549–2552.
- [70] LIU K, LI X, GAO Y, et al. Microwave imaging of spinning object using orbital angular momentum[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122: 124903.
- [71] LIU K, CHENG Y Q, YANG Z C, et al. Orbital-angular-momentum-based electromagnetic vortex imaging[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 711–714.
- [72] XU G, XING M, ZHANG L, et al. Bayesian inverse synthetic aperture radar imaging[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1150–1154.
- [73] ALONSO M T, LOPEZ-DEKKER P, MALLORQUI J J. A novel strategy for radar imaging based on compressive sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(12): 4285–4295.
- [74] MALLAT S G, ZHANG Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397–3415.
- [75] TROPP J A, GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655–4666.

- [76] EWOUT V D B, FRIEDLANDER M P. Probing the pareto frontier for basis pursuit solutions[J]. Siam Journal on Scientific Computing, 2008, 31(2): 890–912.
- [77] GORODNITSKY I F, RAO B D. Sparse signal reconstruction from limited data using FOCUSS: a re-weighted minimum norm algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 45(3): 600–616.
- [78] TIPPING M E, SMOLA A. Sparse Bayesian learning and the relevance vector machine.[J]. Journal of Machine Learning Research, 2001, 1(3): 211–244.
- [79] HARMELING S, SCHULER C J, BURGER H C. Image denoising: can plain neural net-works compete with BM3D?[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012: 2392–2399.
- [80] CHEONG J Y, PARK I K. Deep CNN-based super-resolution using external and internal examples[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(8): 1252–1256.
- [81] JIN K H, MCCANN M T, FROUSTEY E, et al. Deep convolutional neural network for inverse problems in imaging[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(9): 4509–4522.
- [82] YANG Y, LI H, XU Z, et al. Deep ADMM-Net for compressive sensing MRI[C]. 30th Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2016), Barcelona, Spain, 2016:1-9.
- [83] BORGERDING M, SCHNITER P, RANGAN S. AMP-inspired deep networks for sparse linear inverse problems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 65(16): 4293–4308.
- [84] YANG G, YU S, DONG H, et al. DAGAN: deep De-Aliasing generative Adversarial networks for fast compressed sensing MRI reconstruction[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2017, 99: 1.
- [85] DAVE A, VADATHYA A K, MITRA K. Compressive image recovery using recurrent generative model[C]// IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2017: 1702–1706.
- [86] EWOUT V D B, FRIEDLANDER M P. Probing the Pareto Frontier for basis pursuit solutions[J]. Siam Journal on Scientific Computing, 2008, 31(2): 890–912.
- [87] GAO J K, DENG B, QIN Y L, et al. Enhanced radar imaging using a complex-valued convolutional neural network[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(1): 35–39.
- [88] GAN F J, LUO C G, LIU X Y, et al. Fast terahertz coded-aperture imaging based on convolutional neural network[J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(8): 2661.

[作者简介]

- 王宏强 1970 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹雷达、空间目标探测与成像。
- 罗成高 1987 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为太赫兹雷达、孔径编码雷达和光学三维显示。
- 邓 彬 1981 年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹雷达技术与雷达成像。
- 刘 康 1990 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达前视成像与电磁涡旋。
- 易 俊 1992 年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹先进探测技术。

(本文编辑: 傅 杰)