

## 精确制导前沿成像探测技术\*

罗成高<sup>1</sup>, 邓彬<sup>1</sup>, 程永强<sup>1</sup>, 王文鹏<sup>2</sup>, 王宏强<sup>1</sup>, 王展<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073;

2. 北京遥感设备研究所毫米波遥感技术重点实验室, 北京 100038)

**摘要:**回顾了精确制导技术的发展历程,分析了精确制导成像探测技术发展过程中面临的挑战与未来的主要发展方向。结合太赫兹、量子材料和超材料等前沿技术的发展动态,分别梳理了太赫兹雷达、量子雷达以及超材料雷达三种典型的精确制导前沿成像探测技术的技术背景、发展脉络、基本原理、技术优势。这三种成像探测技术有望为精确制导技术应对未来新型战争形态带来的挑战提供可行的技术途径。研究成果可为未来精确制导技术的深入可持续发展提供参考,并对提升精确制导武器的打击与拦截作战效力具有重大意义。

**关键词:**精确制导;太赫兹;视频合成孔径雷达;量子雷达;超材料;孔径编码

**中图分类号:**TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)05-174-11

## Advanced imaging and detecting technology for precision guidance

LUO Chenggao<sup>1</sup>, DENG Bin<sup>1</sup>, CHENG Yongqiang<sup>1</sup>, WANG Wenpeng<sup>2</sup>, WANG Hongqiang<sup>1</sup>, WANG Zhan<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Science and Technology on Millimeter-Wave Laboratory, Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The history of precision guidance technologies was reviewed, and the challenges and main developing trends of imaging and detecting technologies for precision guidance were illustrated. Combined with the recent developments of the emerging technologies such as terahertz, quantum and metamaterial, the backgrounds, developing venation, basic principles and advantages of three typical advanced imaging and detecting technologies, namely, terahertz radar, quantum radar and metamaterial radar were expounded. These advanced techniques may have the potential to provide feasible approaches for precision guidance technology to overcome the challenges brought by the future new warfare form. The analysis results will provide some positive guidance and is of significance for improving the strike and intercept effectiveness of the precision-guided weapon systems.

**Keywords:** precision guidance; terahertz; video synthetic aperture radar; quantum radar; metamaterial; coded aperture

现代战争中,利用精确制导武器对敌方的高价值要害目标进行“点穴式”打击是现代军事强国一个惯用的攻击手段<sup>[1]</sup>。近年来的历次局部战争和武装冲突中,包括海湾战争、科索沃战争、伊拉克战争以及叙利亚反恐战争,精确制导武器大规模应用于战场,推动了世界新军事变革的快速发展和主要军事强国全面向新世纪信息化部队转型的步伐<sup>[2]</sup>。

精确制导技术已经走过了半个多世纪的发展历程,首次使用是在1943年5月12日,英国空军“自由号”巡逻轰炸机投下1枚声寻的鱼雷,严重破坏了德国U-456号潜艇<sup>[3]</sup>。

20世纪60年代中期出现的激光制导炸弹改

变了对陆地目标精确攻击的局面,在越南战场上得到了大量使用。据统计,整个越南战争期间,美军共投掷激光制导炸弹25 000余枚,炸毁重要目标1800余个,其中还包括普通航弹难以摧毁的桥梁100余座。

随后的20世纪70世纪至80年代又经过冷战军备竞赛、新军事革命等不同历史因素的促进,并经受了实战检验,精确制导系统的体制、方法、技术和应用都得到了很大的发展。

1991年海湾战争爆发,以美国为首的多国部队用8%的精确制导武器摧毁了伊拉克80%的战略和战术目标<sup>[4-5]</sup>。但是,激光制导炸弹在海湾战争中也暴露出容易受云层和战场烟雾、灰尘影

\* 收稿日期:2018-06-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61701513,61571011)

作者简介:罗成高(1987—),男,湖北咸丰人,讲师,博士,E-mail:luochenggao@nudt.edu.cn;

邓彬(通信作者),男,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:dengbin@nudt.edu.cn

响的弱点。随着先进红外焦平面探测器技术和微波、毫米波单片集成电路技术以及高速实时信息处理机技术的发展,以红外成像末制导、主动毫米波雷达末制导和多模复合制导为主流的精确制导技术开始了一个迅速发展的阶段,催生了直接碰撞动能武器,使对包括弹道导弹和卫星等目标的空间目标的精确打击成为现实<sup>[6]</sup>。1999年,以美国为首的北约组织袭击南斯拉夫,精确制导武器的使用量已上升到35%,整个“盟军行动”是“历史上最精确的轰炸战役”<sup>[3]</sup>。

进入21世纪以来,爆发的几次局部战争再次成了精确制导武器的“秀场”,其超视距精确打击能力以及极低的伴随毁伤在战场上不断被证实并强化。2003年的伊拉克战争中,美军首先依托自身空中优势对伊拉克的国防指挥系统和防空系统进行精确打击,迅速瓦解了伊军的抵抗,随后地面部队在几乎没有遇到有效抵抗的情况下完成了对伊拉克的占领。

然而,随着精确制导技术的快速发展,各种反制技术与对抗理论也应运而生,并获得了长足进步。2011年叙利亚内战爆发以来,各种精确打击技术与反制技术轮番上阵,各方势力以IS极端组织武装为打击对象测试自身精确制导武器的实战能力,积累实战经验。2017年以来,以美国为首的西方国家以“反化”为名,先后两次对叙利亚政府军据点实施定点精确打击;同时,俄罗斯也出于自身战略利益考量,在叙利亚部署了S-400等大量先进的防空反导系统。在2018年美英法三国对叙利亚政府军目标实施精确打击的过程中,共发射了100余枚精确制导导弹,但相当数量的导弹均被叙利亚政府军的防空系统拦截或击落。尽管参战双方对精确打击效果与拦截效果各执一词,说法不一,但这是21世纪以来难得的一次精确打击与有效拦截对抗的实战案例,必将引起世界各国军事机构的强烈兴趣,并促使各方对新型作战形态下精确制导技术展开新的研究。

用于精确打击或反导拦截的精确制导武器系统依赖于先进的精确制导技术,而成像探测技术可直观获取目标的外形或基本结构等丰富的目标信息,抑制背景干扰,识别目标及其要害部位,或者实现多目标的实时跟踪,因而成为精确制导技术的重要发展方向。较为典型的精确制导成像探测技术包括电视成像制导、红外成像制导、激光雷达制导、合成孔径雷达制导以及常规相控阵雷达制导等<sup>[7]</sup>。电视成像制导技术利用电视摄像机捕获、识别、定位、跟踪直至摧毁目标,其应用始

于二战期间美国研制的滑翔炸弹。电视成像制导技术制导精度高、隐蔽性好,但不能获取目标距离信息,不能全天时全天候工作。红外成像制导技术利用红外探测器探测目标的红外辐射,获取可视图像进行目标捕获与跟踪制导,具有分辨率高、隐蔽性好等优点,但依赖于目标和环境的辐射特性,不能探测冷目标,且易受红外诱饵干扰。激光雷达制导技术利用激光波束作为信息载体,实现目标的精确测距、测速、成像以及目标跟踪与制导。具有制导精度高、抗干扰能力强、能全天时探测等优点,但易受气候条件影响,难以全天候应用,且波束窄,对空间非合作目标的截获概率和探测效率较低。合成孔径雷达制导技术通过发射宽带信号获取目标的高分辨距离像,利用雷达与目标之间的相对运动形成等效天线孔径实现目标方位向的高分辨,能够全天时全天候探测,具有较高的距离和方位分辨率,但易受电子干扰,依赖于雷达与目标之间的相对运动,需要孔径和采样时间积累,难以实现高帧频凝视前视成像。常规相控阵技术最早出现于20世纪30年代,其天线面阵由多个可独立调控的辐射和接收单元组成,利用电磁波相干原理实现高速电控波束扫描与波形捷变,应用于雷达导引头精确制导领域,具有抗干扰能力强,发射功率大,可同时实现多目标的实时搜索、探测、跟踪以及精确制导等优点。但常规相控阵雷达天线需要大量辐射和接收组件组成大规模天线阵列,系统复杂,成本高昂,难以实现低成本小型化。

在未来新型作战环境下,精确制导成像探测技术所面临的作战目标、环境、任务将会发生显著变化,高速、高机动空中和空间隐身目标大量涌现,强地物杂波广泛分布,有源干扰、无源干扰等先进干扰手段被大量应用,再加上以“蜂群”方式进行攻击的无人机和空面武器,诸多因素使精确制导武器的探测和作战环境日趋严苛,作战性能显著下降,精确制导成像探测技术面临着日益严峻的挑战<sup>[8-10]</sup>。为了适应新的作战目标、任务以及严苛的探测环境,应对新型作战形态对精确制导系统提出的新挑战,精确制导成像探测技术将向高帧率、高分辨率、凝视化、抗干扰、低成本、小型化和数字化等方向发展,而近年来蓬勃发展的前沿热点技术为精确制导成像探测技术向这几大方向的发展提供了有力的技术支撑。美国国防部在2013—2017年科技发展“五年计划”中将超材料技术与量子信息与控制技术等列为未来六大颠覆性基础研究领域。而在2004年,美国将太赫兹

(TeraHertz, THz) 技术列入“改变未来世界的十大技术”, 2006 年又将其列为国防重点学科。近十年来, 美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 先后设立了系列 THz 技术研究项目, 如亚毫米波焦平面成像技术、高频集成真空电子学、THz 作战延伸、THz 电子学等相关项目<sup>[11]</sup>。2012 年推出视频合成孔径雷达 (Video Synthetic Aperture Radar, ViSAR) 计划<sup>[12]</sup>, 2016 年在专门雷达特征解决方案中提出加强亚毫米波目标特性测量雷达研究<sup>[13]</sup>。

因此, 依托 THz、量子和超材料等前沿颠覆性技术发展 THz 雷达、量子雷达以及超材料雷达等新概念前沿精确制导成像技术, 对于推动未来精确制导技术的跨越式发展, 提升精确制导武器的打击与拦截作战效力具有重大战略意义。本文整理概括了精确制导成像技术的主要发展方向以及可采取的典型技术途径, 如表 1 所示, 对几种典型的精确制导成像技术途径进行了深入梳理与分析。

表 1 精确制导成像探测技术主要发展方向与典型技术途径

Tab. 1 Main developing trends and typical technical approaches of imaging and detecting technologies for precision guidance

主要发展方向	典型技术途径
高帧率、高分辨率	THz 雷达精确制导
凝视化、抗干扰	量子雷达精确制导
低成本、小型化、数字化	超材料雷达精确制导

## 1 THz 雷达精确制导成像技术

THz 波通常指频率在 0.1 ~ 10 THz (对应波长 0.03 ~ 3 mm) 之间的电磁波, 其频率介于毫米波与红外之间, 处于宏观电子学向微观光电子学的过渡频段, 具有一些不同于其他频段的特殊性质。THz 频段已成为军事高科技竞争的新的战略制高点, THz 雷达系统具有带宽大、分辨率高、抗干扰、反隐身等优势, 能够实现对目标的精确测速测角、高分辨率成像以及精细结构特征反演, 还能够利用材料在 THz 频段丰富的特征谱线提取目标的“指纹特征”, 是未来成像探测技术的重要发展方向。分别针对空间目标探测、跟踪与拦截, 以及低空作战条件下战场目标的精确识别与打击等应用场景, 积极开展 THz 雷达导引头与 THz

ViSAR 精确制导成像技术研究, 可有效弥补传统微波和光学频段成像制导技术的不足, 助推精确制导成像技术向高帧频、高分辨率方向的发展, 增强“定点清除”式精确制导打击的威慑力。

### 1.1 THz 雷达导引头

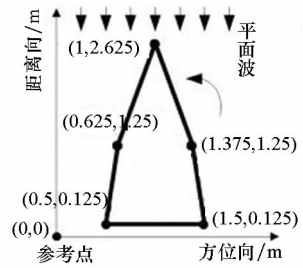
弹道导弹是现代战争中最具威胁性的攻击性武器之一, 它具有较强的突防能力、较大的破坏力以及可以携带多弹头、核弹头或者生物化学弹头的优越性能。但是弹道导弹防御却面临着速度快、干扰多等问题, 难度很大。因而一般通过采用分段和多次拦截的方式提高拦截概率, 包括助推段拦截、中段拦截和末段拦截。对防御系统来说, 越早发现来袭目标, 越容易实施拦截。综合考虑拦截时机和难度, 中段被认为是拦截的主要阶段。中段拦截有两种方式, 其中直接碰撞动能杀伤是弹道导弹的重要发展趋势, 也就是所谓的外大气动能杀伤拦截器 (Exoatmospheric Kill Vehicle, EKV)。目前 EKV 一般采用红外导引头, 红外导引头通过探测目标发动机喷管、尾焰及蒙皮气动加热的红外辐射来获取导引信息, 具有测角精度高、能够成像、大气背景杂波小、重量轻等优势<sup>[14]</sup>, 但也具有一些固有缺陷, 比如采用被动方式、过度依赖目标热辐射、受气动光学效应影响较大等。

而 THz 波具有频率高、带宽极高、烟雾穿透能力强、受气动光学效应影响小等特点, 结合 SAR 或者旋转阵列成像<sup>[15]</sup>等, 开展新型 THz 雷达导引头技术研究, 可以有效填补目前红外导引头的不足, 具有很好的发展前景。

THz 雷达导引头在中段反导中具有诸多优势。首先, THz 波能够做到带宽极高, 有利于分析物体的光谱性质, 甚至反演物体材料信息, 实现真假弹头识别。其次, 在反隐穿透方面, 在助推段和末段中, 来袭导弹目标的高速运动还将会在弹头外面形成一层等离子体鞘套, 这也对红外导引头的探测与高分辨成像产生严重干扰, 对弹头引起的气动光学效应特别敏感。THz 雷达导引头频率高, 可穿透等离子体鞘套, 对热环境不敏感, 受气动光学效应影响小, 因此 THz 雷达导引头因反隐穿透能力而成为反导拦截的有效手段, 填补目前红外导引头的不足。在目标部位选择方面, 红外导引头在远距离时对弹头的成像结果只是一个点, 只有在近距离时才能分辨弹头上不同的部位, 且助推段和末段成像时还要受到气动光学效应的影响。而 THz 雷达导引头采用雷达高分辨成像技术, 远距离时, 保证信噪比达到一定水平, 即可

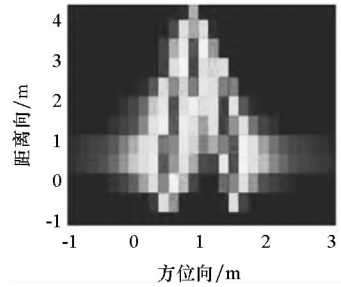
对弹头目标实现成像,成像积累时间极短,将为弹头拦截提供更多的时间余量。成像还对气动光学效应不敏感,稳定的毫米级超高分辨二维成像可以获得弹头目标的详细部位分布,对于选择关键部位进行有效撞击具有重要的意义。最后,在测量精度上,THz 雷达导引头因为工作频率高、波长短,天线波束 3 dB 宽度将非常小,带来了极高的角分辨能力。同时 THz 雷达导引头带宽大,可以实现高精度测距。参考红外导引头的测量精度,THz 雷达导引头在测角精度、测角视场和测距方面均能满足制导要求。由 5 个散射点组成的锥体弹头模型如图 1(a) 所示,其中坐标(0,0)位置既是参考点也是转轴,目标围绕转轴逆时针转动一个小的角度,参考距离设为 20 km,转角设为 0.02 rad。分别给出 X 波段(载频 10 GHz,带宽 300 MHz)和 THz 频段(载频 340 GHz,带宽 10 GHz)的仿真成像结果,如图 1(b)和图 1(c)所示。从仿真结果可以看出:X 频段由于分辨率不够,难以将弹头目标上相距较近的散射点分开;THz 雷达则可以达到很高的分辨率,能够对目标进行精细成像,识别目标的细微结构。这说明 THz 雷达在精确制导成像与探测方面极具技术优势。

现阶段,世界军事强国均有具有代表性的反导拦截系统,如美国的爱国者系列、萨德系统和海基的标准系列,俄罗斯的 S-300、S-400,中国红旗-9 系统。但是这些系统工作频段相比 THz 一般都比较低。比较接近 THz 频段的代表性导引头为美国哈姆导弹的改型——先进反辐射制导导弹(Advanced Anti-Radar Guided Missile, AARGM),主要用于精确打击各种防空阵地(包括预警雷达阵地、地空导弹和高炮武器系统、指挥信息系统等),也可打击无辐射的普通目标,还可用于军用战机实施自卫作战<sup>[17]</sup>。美国于 2002 年正式宣布该项研制计划,2002—2005 年间完成了第一阶段和第二阶段的研制,2006 年进入第三阶段的研制<sup>[18]</sup>。2010 年 7 月 5 日,ATK 公司宣布美国海军已接收首次交付的 AARGM。2015 年 8 月 18 日,美国海军在美国海军航空系统司令部的穆古角海上试验场成功进行了 AARGM 超声速空面战术导弹系统一系列系留和实弹发射试验。2017 年 5 月 31 日,ATK 公司在位于加利福尼亚州北里奇市的生产基地举行了一个仪式,向美国海军交付了第 500 枚 AARGM。AARGM 采用了被动微波/宽带主动毫米波复合导引头,其中主动毫米波导引头用于导弹的末段飞行制导。它能进



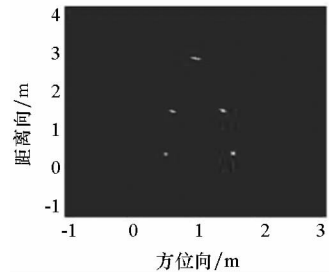
(a) 弹头模型

(a) Warhead model



(b) X 波段雷达成像结果

(b) X-band radar imaging result



(c) THz 雷达成像结果

(c) THz radar imaging result

图 1 弹头模型与雷达成像结果对比<sup>[16]</sup>Fig. 1 Comparison of warhead model and radar imaging result<sup>[16]</sup>

行目标搜索、自动识别、跟踪并且引爆战斗部。相对于传统的单模被动制导方式,AARGM 末段飞行使用主动毫米波雷达制导,攻击过程中即使敌方雷达关机,也能通过主动辐射毫米波信号探测目标,寻找敌方雷达天线或金属反射体的强回波进行攻击,因此具有极强的抗敌方雷达关机能力。此外,由于该雷达具有高分辨自动目标识别能力,能引导导弹精确打击目标的关键部位,提高作战效能<sup>[19]</sup>。相较于毫米波导引头,THz 雷达导引头无疑在制导精度等方面更具优势,也更具发展潜力,但由于大功率 THz 辐射源等器件因素制约,目前国内外均没有 THz 频段的反导拦截设备和技术研究。

鉴于 THz 雷达导引头具有的突出优势,需要大力发展 THz 雷达导引头精确制导技术,研究适用于导引头的 THz 雷达新体制、新方法,掌握 THz

雷达精确测角技术、测距技术以及抗干扰技术,突破小型化大功率 THz 辐射源与高灵敏度 THz 室温相干检测器件技术瓶颈,推动 THz 雷达导引头的小型化、实用化进程,用于解决空间目标的精确探测、跟踪、成像和识别以及成功拦截等问题,为反隐穿透以及打击部位精确选择提供有效技术手段,提高反导拦截成功概率。

### 1.2 THz ViSAR

要保证我军能在小型军事冲突中“能打仗、打胜仗”,则要求我军必须具备对地面高军事价值机动目标进行“定点清除”式的全天候精确制导打击能力,尤其是利用无人机和攻击机等小型低空平台对行进中的队伍、运输物资的车辆、步兵战车及坦克等运动目标实施精确制导打击。对地面目标进行高分辨成像,探测并识别出其中的运动目标,尤其是机动目标,是实现目标精确制导打击的前提条件。

ViSAR 系统是指图像帧率满足对地面运动目标持续跟踪需求的 SAR 系统。ViSAR 系统可逐帧显现观测区域的渐变静态影像,形成视觉上的活动图像,可更直观感知目标的动态,具有可全天时全天候工作、高分辨高识别能力以及慢动目标检测能力,能够对感兴趣时敏目标进行高分辨成像、识别和跟踪,并与武器系统交联实现火控与精确制导打击。而 THz 雷达系统相比传统的微波/毫米波雷达可获得更高的距离分辨率、速度分辨率和角分辨率,具有带宽大、波长短、分辨率高、抗干扰等优势。将二者有机结合,发展 THz ViSAR 精确制导成像技术,可解决目前常规 SAR 对地观测时存在的成像帧速率低、地面机动目标探测困难和无法跟踪等问题,填补低能见度条件下地面运动目标精确成像跟踪手段空白,增强“定点清除”式精确制导打击的威慑力。

2012 年 5 月 1 日,美国 DARPA 公布了 ViSAR 招标书。2012 年 7 月 31 日,罗斯罗普·格鲁曼公司宣称在 DARPA 的 THz 电子学计划的支持下研制出世界上第一个工作频率达到 0.85 THz 的固态接收机。计划的负责人约翰·阿尔布雷克特宣称:“相干信号处理能力达到 0.85 THz 为 DARPA 的 ViSAR 等应用系统研究提供技术支持”。2012 年 12 月 19 日,DARPA 发布了《ViSAR 系统设计和发展计划》。2017 年 9 月 28 日,DARPA 官网报道,DARPA 开发的 ViSAR 雷达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<sup>[20-21]</sup>。

THz ViSAR 系统的基本组成主要包括天馈分

机、收发分机、伺服控制分机、信号处理分机、数据处理与目标分类分机以及显示与控制分机等,如图 2 所示。雷达发射机的作用是产生受到调制的大功率、宽频带、高稳定射频信号载波,并经过馈线由天线向空间辐射;雷达接收机的作用是放大、变频、检波和预处理雷达回波,接收机灵敏度必须能够满足目标检测的需求;天线的功能是把能量集中于确定的波束内,并将波束指向设定的方向,将发射的能量辐射到空间,接收的能量经传输线送到接收机;伺服机构是系统的一个关键部分,伺服系统通过控制系统使天线按要求扫描,完成天线波束移动以使瞄准误差为零的任务;信号处理分机的作用是消除不需要的杂波信号,获取需要的目标信号,进行平台非期望运动补偿,实现地面场景和动目标的高分辨实时 SAR 成像处理;数据处理与目标分类分机用于对信号处理分机输出的目标位置信息和 SAR 图像序列进行进一步数据处理,提取目标特征,对地面动目标进行跟踪和识别;显示与控制分机用于实现整个雷达系统的同步与控制,并实时显示 ViSAR 成像结果。

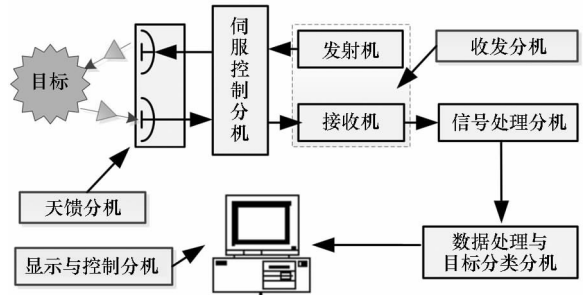


图 2 THz ViSAR 系统框图

Fig. 2 Block diagram of THz ViSAR system

THz ViSAR 系统可采用的工作模式主要有两种:条带快速浏览模式可在情报信息支持下,对潜在目标区域采用条带式成像方法,以确保能够以足够宽的成像视场对潜在目标区域进行覆盖搜索,在检测和鉴别目标后转入跟踪模式;而聚束重点目标跟踪模式可对目标所在区域采用聚束式成像方法,实现高成像分辨率和高帧率,以保证对运动目标的持续精确跟踪制导。

THz ViSAR 系统装配于攻击机、低空无人机或直升机上,用于低能见度条件下对地面运动目标实现视频高分辨成像,对车辆、小股部队、等运动目标进行视频监控,并最终实现持续稳定跟踪与精确制导打击。根据我国军事应用的需求,结合国内毫米波与 THz 技术领域的研究现状,分阶段开展 THz ViSAR 雷达系统和关键技术的研究,重点突破小型化的电真空大功率放大器、固态功

率放大器、低噪声接收机、THz 单片集成多功能电路以及 THz 天馈组件等基础器件瓶颈,掌握高精度 THz ViSAR 运动补偿和运动目标快速检测成像核心关键技术,研制 THz ViSAR 雷达成像系统,开展实验研究。尽快形成低空飞行平台的高分辨率高帧率对地侦察能力,为提升我军在低能见度条件下的精确制导打击能力提供技术支持。

## 2 量子雷达精确制导成像技术

最初的量子成像是通过纠缠态光子系统实现的。纠缠光子对中的一个光子被置于接收系统中,另一个光子朝目标发射,然后被目标反射后由雷达系统接收,利用纠缠光场或电磁场的涨落统计关联特性,从而可以利用系统内部光子与接收光子的关联处理实现目标探测<sup>[22-27]</sup>。而在光学三维成像技术中,常通过阵列调制方式对辐射场的幅度或相位实现空间调制,获取目标的三维信息,从而实现高分辨三维成像<sup>[28-29]</sup>。借鉴光学量子成像以及阵列调制成像的基本思想,近年来我国积极开展了微波量子成像技术研究。微波量子成像利用阵列调制方式产生随机辐射电磁场(对电磁波幅度、频率、相位等物理量的随机调制)替代光学量子成像中的随机涨落光场,增大微波辐射信息在空间分布上的差异性,使同一波束的目标能被差异信息标度,从而为分辨同一波束内的目标提供了可能<sup>[30-32]</sup>。

除了对电磁波幅度、频率、相位等物理量进行随机调制,也可以寻求其他调制方式或可调制物理量,实现微波量子成像。经典电动力学理论指出,电磁场不仅具有线动量,同时也具有角动量。电磁场线动量通常与平动相联系,而角动量通常与转动相对应。其中,角动量又可以分为两个部分:自旋角动量和轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)。自旋角动量与电磁场的极化相对应,而 OAM 与相位波前的变化情况相对应,二者均为物理守恒量。近年来, OAM 由于其特殊的物理性质受到了广泛关注。相对于自旋角动量, OAM 理论上具有无限的拓扑荷数,能够提供更为丰富的信息调制自由度。

将电磁场 OAM 信息应用于微波量子成像,即实现了一种新的雷达成像技术——基于 OAM 调制的量子成像,从而在传统电磁波幅度、频率、相位、极化等维度之外,增加了一个新的调制维度,提高电磁波的信息传递和信息获取能力。其基本原理如图 3 所示,当对电磁波加载 OAM 调制时将形成扭曲的波前分布,其相位波前呈现螺旋

形的结构,雷达波束内不同目标处将形成具有差异性分布的辐射场激励,目标散射回波中将蕴含更多的目标信息,通过关联处理有望提升雷达对目标的成像分辨能力。由于 OAM 调制辐射场具有确定的调制模式(相位分布),且理论上可以产生无穷多种相互正交的调制模式,在实现高分辨率成像的同时可以提高关联成像求解的效率<sup>[33-38]</sup>。

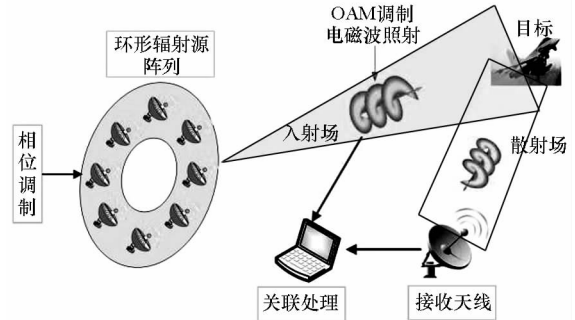


图3 基于 OAM 调制的量子雷达成像原理示意图<sup>[39]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of the imaging principle of quantum radar based on OAM modulation<sup>[39]</sup>

传统雷达成像技术大多基于距离-多普勒原理,该原理通过发射宽带信号获得距离向高分辨率,通过雷达与目标的相对运动形成大的虚拟合成孔径获得方位向高分辨率。但在某些军事应用场景中,无法保证方位向高分辨成像所需的大虚拟孔径,难以成像。例如反舰导弹、空地导弹和防空导弹等在进行末段寻的制导时,雷达导引头与目标处于凝视前视观测几何条件,雷达与目标间的横向相对运动很小,难以获得大虚拟孔径,将严重制约导弹的目标识别能力和抗干扰能力的提升。而基于 OAM 调制的量子雷达成像技术的最大优势是不依赖于雷达与目标之间的相对运动,利用辐射场的时空随机涨落特性(即探测信号的时空差异性)进行目标分辨,可以在凝视观测条件下突破传统理论中天线口径对分辨率的限制,具有分辨率高、抗干扰能力强、探测载荷轻等优点,可以实现全天时全天候成像,在末制导导引头前视成像与精确制导领域具有传统成像制导手段无法比拟的优势,具有巨大的潜在应用价值。

基于 OAM 调制的量子雷达制导成像技术作为一类正在探索的全新成像技术,其突破孔径成像系统衍射极限的高分辨原理已经得到了初步的验证。然而,电磁场 OAM 的调制机理与调制方法、基于 OAM 调制的目标信息高精度反演等科学问题尚有待深入研究,其典型军事应用场景也需深入论证。因此,很有必要积极推动基于

OAM 调制的量子雷达精确制导成像技术相关研究,促进新体制雷达精确制导成像技术的发展,为量子技术在军事领域获得更加广泛的应用奠定基础,大大补充和完善现有的精确制导成像手段。

### 3 超材料雷达精确制导成像技术

超材料的出现始于 21 世纪的物理学领域,对于 metamaterial 一词,目前尚未有一个严格的、权威的定义,各种不同的文献给出的定义也各不相同,但一般文献中都认为 metamaterial 是“具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料”。因此,所谓电磁超材料,可认为是将具有特定几何形状的宏观基本单元周期或非周期性地排列或者植入基体材料内(或表面)所构成的一种人工电磁材料<sup>[40-44]</sup>。2014 年,崔铁军等正式提出了可编程超材料的概念<sup>[45]</sup>,基于可编程超材料的新型电磁超表面天线,可实现对电磁波在时-空-频-极化等多维电磁物理空间的实时操控,不需要类似常规相控阵的大量有源移相组件,可显著降低器件成本,其重量仅相当于传统雷达天线的 1/3 ~ 1/2,尺寸相当于传统雷达天线的 1/5 ~ 1/3,可大幅降低系统运输、安装与调试成本。基于超材料技术,开展超材料相控阵雷达制导成像技术以及超材料孔径编码雷达成像制导技术研究,可为小型无人机和导弹等平台精确制导作战提供一条新的技术途径<sup>[46-47]</sup>。

#### 3.1 超材料相控阵雷达

常规相控阵雷达具有灵活、快速的天线波束扫描能力、天线波束形状捷变能力、空间功率合成能力、天线与雷达平台的共形能力、多波束形成能力、自适应空域滤波与自适应空-时处理能力,可极大地增大雷达导引头的作用距离、抗干扰能力等性能指标,过去 20 年获得了广泛的应用。但常规相控阵天线由收发组件、波束控制模块、传统天线阵列等构成,且阵元数量多,造成传统相控阵天线体积大、散热要求高、制作成本高昂。雷达终端作为导弹、卫星、无人机等平台的有效载荷,其外形尺寸和重量对于平台本身的综合性能指标具有重要影响。过大的外形尺寸将显著增加装备的体积与飞行重量,降低武器平台对弹药、燃料或其他传感设备的装载能力,增大雷达反射面积,缩短武器装备的作战半径,增加被敌方探测系统捕获的风险。因此,尽管常规相控阵雷达具有诸多优点,也难以在小型无人机、弹载或星载等对雷达载荷体积和重量有着严苛要求的系统中获得普遍应用。

将可编程超材料技术与低剖面的微波介质板及二极管开关等相结合,研发出一系列新型的超材料相控阵天线,可实现对电磁波的灵活调控。超材料相控阵天线在天线单元设计时即嵌入了相位、幅度、极化、频率等调制功能,即在天线上集成了幅相控制功能,从而可以将传统收发组件、波束控制模块功能通过对超材料的控制来实现,极大降低了体积、功耗和成本,并实现了相控阵天线整体的“超低剖面”<sup>[48-51]</sup>。同时,超材料相控阵天线还可将电磁模拟信号数字化,智能实时地调整材料的电磁信息特性,以适应或改变周围电磁环境。将超材料相控阵天线应用于雷达系统可显著提高雷达系统的数字化程度,通过与新型信息处理手段有机融合,有助于提升武器装备雷达载荷智能化水平。新型超材料相控阵天线具有低剖面、波束扫描、多波束切换、波束灵活可控等诸多优点,并且重量较小、外形紧凑、易于集成、易于共形、制作成本较低,在显著降低系统复杂度和成本的前提下能够实现相控阵的所有功能,在目标探测与精确制导领域具有重大潜力<sup>[52]</sup>。

采用超材料相控阵天线的新型雷达工作原理如图 4 所示,雷达系统主要包括超材料相控阵天线、系统主机、信号产生模块以及接收天线等核心部件。信号产生模块产生发射信号,并以线馈(也可以采用空馈)方式送入超材料相控阵天线,超材料单元根据应用需求对输入的信号进行幅相编码调控,产生特定的照射波束,并能够实现快速数字波束扫描与波束形状捷变等功能,可对特定目标空域进行不间断高速扫描探测。当目标被波束照射时,其后向散射回波被接收天线接收,在系统主机中完成信号处理,提取出目标的距离与角度信息。由于超材料相控阵天线无须机械移动即可实现快速数字波束扫描,照射波束不断重复扫描目标区域,更新目标的方位与距离坐标时具有极高的刷新速率,从而可实现多目标的实时跟踪制导。

超材料相控阵雷达的关键之处在于超材料相控阵天线对电磁波的智能操控,其中融合了电磁场与波以及材料等不同领域的知识,蕴含着大量的问题有待研究,比如具有多自由度的复杂超材料人工原子与外场耦合的物理机制、具有特殊宏观排列方式的新型超材料中电磁波的传播规律、超材料与电磁波的近场或准近场空时分布之间的映射关系等。此外,在精确制导、多目标探测与跟踪等应用领域,还需要根据载荷平台的需求,对天线阵列构型以及阵元尺寸、间距、规模等进行优化

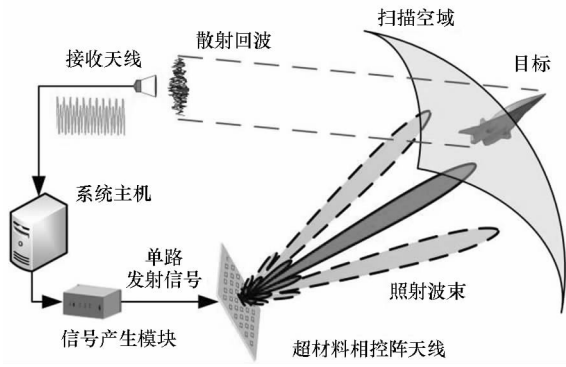


图4 超材料相控阵雷达工作原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the imaging principle of metamaterial phased array radar

设计,建立超材料相控阵天线优化设计数学模型,对超材料单元进行大规模阵列互联,在物理上实现大规模、高可控自由度的、能够处理高容量的有源超材料低剖面相控阵天线。在未来新型作战形态下,大力发展超材料相控阵雷达制导技术,推动雷达载荷的小型化、轻量化、低成本以及智能化,对于提升装备的战场生存、隐身突防、精确制导与打击等综合作战能力极具战略价值。

### 3.2 超材料孔径编码雷达

传统雷达成像技术的难题可以归结为“依赖于目标运动而又受限于目标运动”,实际上这一约束源于它的成像方式,即方位向分辨率从多普勒频率获得。由于高的多普勒分辨率需要一定角度的数据支撑域,因此需要合成孔径中的长积累时间或实孔径中的大规模雷达阵列来实现较大方位角的空间采样。又由于多普勒频率处理的要求,需要对目标进行均匀的空间采样,即要求目标匀速运动或匀速转动。

基于超材料的孔径编码雷达成像技术借鉴融合了量子雷达成像技术与计算成像技术的重要思想,通过可编程超材料孔径编码天线对孔径内电磁波束进行时空二维随机编码,改变目标区域电磁波空间幅相分布,构造成像数学模型,并通过计算求解该数学模型来最终获取目标散射系数精确分布<sup>[53-54]</sup>。其工作原理如图5所示,在探测区域内,所形成的雷达信号具有显著的空间起伏特性,理想条件下,可以实现在时间-空间分布上的不相关。通过探测信号随机空间分布对目标进行空间采样,构造成像数学模型,再借助计算机强大的计算能力将图像重构问题转化为成像模型的数学求解问题,有望利用有限的孔径,在极短的时间内获得超出同口径传统雷达衍射极限的分辨率。在此基础上,将THz技术与超材料孔径编码成像

技术相结合,还可进一步提高成像系统的分辨性能。THz频段(载频340 GHz,带宽20 GHz)超材料孔径编码雷达在前视凝视观测几何条件下对某型隐身飞机目标的高分辨仿真成像结果如图6所示。由图6(b)可见,仿真成像结果很好地还原了原始目标的轮廓和局部细节信息,能够为目标精准识别和打击部位选择提供重要技术支撑。

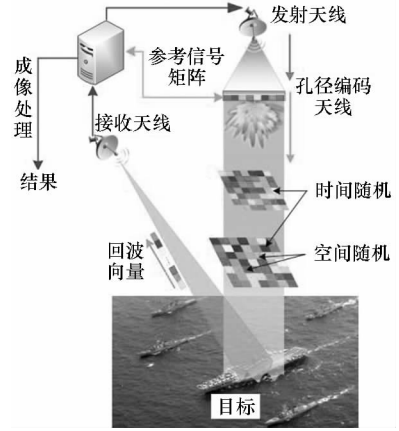


图5 超材料孔径编码雷达工作原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the imaging principle of metamaterial coded-aperture radar



(a) 隐身飞机 (a) Stealth aircraft (b) 成像结果 (b) Imaging result

图6 隐身飞机及其成像结果对比

Fig. 6 Comparison of stealth aircraft and imaging result

2013年,Hunt等提出基于超材料天线的微波编码成像技术<sup>[55]</sup>。2014年8月,美国DARPA发布了成像雷达先进扫描技术研究项目,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三维成像技术,拥有比相控阵低的系统复杂度和比机械扫描高的成像速率,视频帧速率大于10 Hz<sup>[56]</sup>。2015年,美国Notre Dame和Virginia Diodes Inc.的研究人员提出了一种光诱导孔径编码成像技术<sup>[57-58]</sup>,通过数字光处理投影机实时地将数字Hadamard掩模投影到硅晶片上,从而对入射到硅晶片上的THz波束(500~750 GHz)透过率实现高速实时编码。2016年,Li等提出了一种基于透射式2 bit可编程超表面的适用于微波频段的单传感器、单频孔径编码成像



技术<sup>[59]</sup>。该技术利用计算机控制现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)驱动可编程超表面产生“0”和“1”的随机编码,对入射波束进行随机调制。研究人员还通过演示实验对该方案的可行性进行了实验验证。2017年,Chen等对孔径编码成像雷达技术的编码策略进行了深入研究<sup>[60]</sup>,对比分析了不同编码位置、不同编码对象以及不同编码方式各自的特点,并开展了仿真成像研究,研究结果对孔径编码成像系统的设计与开发具有重要的指导意义。2018年,Chen等又提出了一种接收端孔径编码成像系统实现方案<sup>[61]</sup>,可有效提升孔径编码制导雷达的探测成像距离。

超材料孔径编码雷达不需要利用多普勒频率进行方位向分辨,从而不依赖于雷达与目标的相对运动即可实现高分辨、高帧频、全天时全天候、前视凝视成像。同时,超材料孔径编码雷达的波束控制不需要大规模的移相器阵列,体积、重量、功耗和成本大大降低,在精确制导打击与反导拦截方面具有巨大的潜在应用价值。

孔径编码雷达成像制导技术已经获得了国内外研究机构的广泛关注,部分研究人员已经开展了初步研究<sup>[62]</sup>,但总体上仍处于起步阶段,仍然面临成像模型过于简单、编码方案单一、目标超分辨重建难度较大以及超材料孔径编码天线技术有待突破等关键问题。同时,孔径编码雷达作用距离精确评估和分辨率定量表征技术也有待进一步研究。相信随着超材料技术的高速发展与日趋成熟,其对电磁波的操控能力将更加智能、灵活和稳定,其成本也必将大幅降低。届时,将为超材料相控阵雷达制导技术与孔径编码雷达制导技术的迅速发展提供强大推动作用,为精确制导雷达技术的小型化、低成本和智能化提供切实可行的技术解决方案,促进我国雷达精确制导技术的跨越式发展,产生巨大的军事与经济效益。

## 4 结论

在新型战争形态下,精确制导武器的作战目标、使命任务以及战场环境将发生显著变化,这将给精确制导成像探测技术带来前所未有的挑战,并促使精确制导成像探测技术向高帧率、高分辨率、抗干扰、低成本、小型化和数字化等方向发展。依托 THz、量子 and 超材料等前沿技术发展 THz 雷达导引头、THz ViSAR、量子雷达、超材料相控阵雷达以及超材料孔径编码雷达等前沿精确制导成像探测技术,对于推动未来精确制导技术的跨越

式发展,促进前沿技术与精确制导技术的交叉融合创新具有重要意义。

## 参考文献(References)

- [1] 姜广顺, 杨召甫, 吴千秋. 精确制导弹药的作战效能分析[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(5): 48-51. JIANG Guangshun, YANG Zhaofu, WU Qianqiu. An analysis of operational efficiency of precision-guided munitions[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(5): 48-51. (in Chinese)
- [2] 杨树谦. 精确制导武器和技术[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(6): 1-3. YANG Shuqian. Precision guided weapon and technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(6): 1-3. (in Chinese)
- [3] 梁薇, 张科. 精确制导武器发展及其关键技术[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(12): 5-7, 12. LIANG Wei, ZHANG Ke. Development and key technologies of precise-guidance weapon[J]. Fire Control & Command Control, 2008, 33(12): 5-7, 12. (in Chinese)
- [4] 姚秀娟, 彭晓乐, 张永科. 几种精确制导技术简述[J]. 激光与红外, 2006, 36(5): 338-340. YAO Xiujuan, PENG Xiaole, ZHANG Yongke. Brief descriptions of precision guidance technology[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(5): 338-340. (in Chinese)
- [5] 杨树谦. 精确制导技术发展现状与展望[J]. 航天控制, 2004, 22(4): 17-20. YANG Shuqian. Development and prospect of PGM technology[J]. Aerospace Control, 2004, 22(4): 17-20. (in Chinese)
- [6] 高晓冬, 王枫, 范晋祥. 精确制导系统面临的挑战与对策[J]. 战术导弹技术, 2017(6): 62-69, 75. GAO Xiaodong, WANG Feng, FAN Jinxiang. The challenges and development paths for precision guidance system[J]. Tactical Missile Technology, 2017(6): 62-69, 75. (in Chinese)
- [7] 黄世奇, 禹春来, 刘代志, 等. 成像精确制导技术分析与研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2005(5): 20-25. HUANG Shiqi, YU Chunlai, LIU Daizhi, et al. Analysis and research on imaging precision guidance technology[J]. Missiles and Space Vehicles, 2005(5): 20-25. (in Chinese)
- [8] 陈浩川, 张彬, 张振华. 精确制导多体制探测技术新进展[J]. 遥测遥控, 2017, 38(6): 23-29. CHEN Haochuan, ZHANG Bin, ZHANG Zhenhua. New development of multi-system and multi-band detection technology for precision guidance[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017, 38(6): 23-29. (in Chinese)
- [9] 陈定昌, 袁起, 范金荣. 精确制导武器发展趋向[J]. 现代防御技术, 2000, 28(4): 41-47, 57. CHEN Dingchang, YUAN Qi, FAN Jinrong. The development thread of the precision guided weapon[J]. Modern Defence Technology, 2000, 28(4): 41-47, 57. (in Chinese)
- [10] 范金荣. 21世纪前20年精确制导技术发展预测[J]. 现代防御技术, 2003, 31(1): 30-33. FAN Jinrong. A prediction of precision guidance technology in the earlier 20 years of the 21st century[J]. Modern Defence

- Technology, 2003, 31(1): 30-33. (in Chinese)
- [11] Albrecht J D, Rosker M J, Wallace H B, et al. THz electronics projects at DARPA: transistors, TMICs, and amplifiers [C]//Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2010: 1118-1121.
- [12] Wallace H B. Video synthetic aperture radar (ViSAR) [R]. USA: DARPA, 2012.
- [13] 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. (in Chinese)
- [14] 杨俊彦, 吴建东, 宋敏敏. 红外成像制导技术发展展望[J]. 红外, 2016, 37(8): 1-6, 28.  
YANG Junyan, WU Jiandong, SONG Minmin. Development and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. Infrared, 2016, 37(8): 1-6, 28. (in Chinese)
- [15] Jang Y W, Deng B, Qin Y L, et al. A fast terahertz imaging method using sparse rotating array [J]. Sensors, 2017, 17(10): 2209.
- [16] 杨琪, 邓彬, 蒋彦雯, 等. 基于调频连续波的太赫兹频段转台成像方法研究[J]. 空间电子技术, 2013(4): 25-28, 64.  
YANG Qi, DENG Bin, JIANG Yanwen, et al. Study of terahertz rotating platform imaging algorithm based on FMCW [J]. Space Electronic Technology, 2013(4): 25-28, 64. (in Chinese)
- [17] Taylor D P. AARGM moves forward [J]. Sea Power, 2014, 57(6): 72.
- [18] 包强, 牟超峰, 左樊龙, 等. 美国中远程反辐射导弹 AARGM [J]. 飞航导弹, 2013(3): 23-26.  
BAO Qiang, MOU Chaofeng, ZUO Fanlong, et al. Medium-range advanced anti-radiation guided missile of the United States [J]. Winged Missiles Journal, 2013(3): 23-26. (in Chinese)
- [19] 王治堂, 杜飞飞. 美国 AGM-88E 反辐射导弹的发展及对抗技术研究 [J]. 电子对抗, 2017(3): 34-37, 48.  
WANG Zhitang, DU Feifei. Research on the development and countermeasure technique of American AGM-88E anti-radiation missiles [J]. Electronic Warfare, 2017(3): 34-37, 48. (in Chinese)
- [20] 韩长喜. DARPA 成功验证 ViSAR 对被云层遮蔽地面运动目标实时清晰成像能力 [J]. 现代雷达, 2017, 39(11): 100.  
HAN Changxi. DARPA has successfully demonstrated ViSAR's ability to visualize ground moving target through clouds in real time [J]. Modern Radar, 2017, 39(11): 100. (in Chinese)
- [21] Wallace H B. Development of a video SAR for FMV through clouds [J]//Proceedings of the SPIE, 2015, 9479: 94790L.
- [22] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. Physical Review A, 1995, 52(2): R3429-R3432.
- [23] Abouraddy A F, Saleh B E A, Sergienko A V, et al. Role of entanglement in two-photon imaging [J]. Physical Review Letters, 2001, 87(12): 123602.
- [24] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source [J]. Physical Review Letters, 2002, 89(11): 113601.
- [25] Cheng J, Han S S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(9): 93903.
- [26] Gatti A, Brambilla E, Bache M, et al. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation [J]. Physical Review Letters, 2004, 93(9): 93602.
- [27] Gatti A, Bondani M, Lugiato L A, et al. Comment on "Can two-photon correlation of chaotic light be considered as correlation of intensity fluctuations?" [J]. Physical Review Letters, 2007, 98(3): 39301.
- [28] Luo C G, Xiao X, Martínez-Corral M, et al. Analysis of the depth of field of integral imaging displays based on wave optics [J]. Optics Express, 2013, 21(25): 31263-31273.
- [29] Luo C G, Deng H, Li L, et al. Integral imaging pickup method with extended depth-of-field by gradient-amplitude modulation [J]. Journal of Display Technology, 2016, 12(10): 1205-1211.
- [30] 王东进, 马远鹏, 陆广华, 等. 微波凝视成像关联方法: CN102141617A [P]. 2011-08-03.  
WANG Dongjin, MA Yuanpeng, LU Guanghua, et al. A microwave staring correlated imaging method: CN102141617A [P]. 2011-08-03. (in Chinese)
- [31] Guo Y Y, He X Z, Wang D J. A novel super-resolution imaging method based on stochastic radiation radar array [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(7): 74013.
- [32] 李东泽. 雷达关联成像技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2014.  
LI Dongze. Radar coincidence imaging technique research [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [33] 刘康. 电磁涡旋成像理论与方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.  
LIU Kang. Study on the theory and method of electromagnetic vortex imaging [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [34] 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. (in Chinese)
- [35] 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 Letters, 2016, 41(11): 2549-2552.
- [36] Li L L, Li F. Beating the Rayleigh limit: orbital-angular-momentum-based super-resolution diffraction tomography [J]. Physical Review E, 2013, 88(3): 33205.
- [37] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum [J]. Science, 2013, 341(6145): 537-540.
- [38] Cheng L, Hong W, Hao Z C. Generation of electromagnetic waves with arbitrary orbital angular momentum modes [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 4814.
- [39] Liu K, Chen Y Q, Li X. Study on the theory and method of vortex-electromagnetic-wave-based radar imaging [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2016, 10(9): 961-968.
- [40] Cui T J, Smith D R, Liu R P. Metamaterials-theory, design,

- and applications [M]. USA: Springer Publishing Company, 2009.
- [41] Marqués R, Martín F, Sorolla M. *Metamaterials with negative parameters: theory, design, and microwave applications*[M]. USA: John Wiley & Sons, 2007.
- [42] 于相龙, 周济. 智能超材料研究与进展[J]. 材料工程, 2016, 44(7): 119–128.  
YU Xianglong, ZHOU Ji. Research advance in smart metamaterials[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(7): 119–128. (in Chinese)
- [43] 王霞, 张冉冉, 吕浩, 等. 超材料的发展及研究现状[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 119–126.  
WANG Xia, ZHANG Ranran, LYU Hao, et al. Development and research actuality of meta-materials [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 37(2): 119–126. (in Chinese)
- [44] 王友转. 全球超材料研究文献计量分析[J]. 科技情报开发与经济, 2015, 25(9): 124–126.  
WANG Youzhan. Bibliometric analysis on the metamaterial research papers around the world[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2015, 25(9): 124–126. (in Chinese)
- [45] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218.
- [46] Yan X, Liang L J, Yang J, et al. Broadband, wide-angle, low-scattering terahertz wave by a flexible 2-bit coding metasurface[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 29128.
- [47] 张磊, 刘硕, 崔铁军. 电磁编码超材料的理论与应用[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 1–12.  
ZHANG Lei, LIU Shuo, CUI Tiejun. Theory and application of coding metamaterials[J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 1–12. (in Chinese)
- [48] Wan X, Jia S L, Cui T J, et al. Independent modulations of the transmission amplitudes and phases by using Huygens metasurfaces[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 25639.
- [49] Cui T J, Liu S, Li L L. Information entropy of coding metasurface [J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(11): e16172.
- [50] Edalati A, Sarabandi K. Wideband, wide angle, polarization independent RCS reduction using nonabsorptive miniaturized-element frequency selective surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(2): 747–754.
- [51] Liang L J, Wei M G, Yan X, et al. Broadband and wide-angle RCS reduction using a 2-bit coding ultrathin metasurface at terahertz frequencies [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 39252.
- [52] Wan X, Qi M Q, Chen T Y, et al. Field-programmable beam reconfiguring based on digitally-controlled coding metasurface[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 20663.
- [53] 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. (in Chinese)
- [54] 陈硕, 罗成高, 邓彬, 等. 太赫兹孔径编码成像分辨率性能研究[J]. 雷达学报, 2018, 7(1): 127–138.  
CHEN Shuo, LUO Chenggao, DENG Bin, et al. Research on resolution of terahertz coded-aperture imaging[J]. Journal of Radars, 2018, 7(1): 127–138. (in Chinese)
- [55] Hunt J, Driscoll T, Mrozack A, et al. Metamaterial apertures for computational imaging[J]. Science, 2013, 339(6117): 310–313.
- [56] Wallace H B. *Advanced scanning technology for imaging radars (ASTIR)* [R]. USA: DARPA, 2014.
- [57] Shams M I B, Jiang Z, Qayyum J, et al. Characterization of terahertz antennas using photoinduced coded-aperture imaging[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2015, 57(5): 1180–1184.
- [58] Kannegulla A, Jiang Z, Rahman S M, et al. Coded-aperture imaging using photo-induced reconfigurable aperture arrays for mapping terahertz beams[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, 4(3): 321–327.
- [59] 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.
- [60] 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, 2: 053022.
- [61] Chen S, Luo C G, Deng B, et al. Three-dimensional terahertz coded-aperture imaging based on single input multiple output technology[J]. Sensors, 2018, 18(1): 303.
- [62] Li L L, Cui T J, Ji W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms [J]. Nature Communications, 2017, 8: 197.