

涡旋电磁波及其在雷达中应用研究进展

刘 康,黎 湘,王宏强,程永强

(国防科技大学电子科学学院,湖南长沙 410073)

摘 要: 涡旋电磁波因携带有轨道角动量信息,相比于传统电磁波有着更高维度的信息调制自由度,在雷达目标检测和成像领域具有很大的应用潜力. 本文首先介绍了涡旋电磁波基本概念和线极化条件下的辐射场分布特点. 然后给出利用涡旋电磁波进行雷达目标成像和旋转目标检测的工作原理,分析总结了其相对于传统雷达探测技术展现出来的性能优势. 接着综述了电磁涡旋成像和旋转多普勒检测的发展历程与研究现状,特别地,面向雷达目标探测需求对涡旋电磁波产生技术进行较为全面的总结和概括. 最后,展望涡旋电磁波在雷达中应用的发展前景,指出未来发展中的若干关键科学问题.

关键词: 涡旋电磁波; 轨道角动量; 新体制雷达; 电磁涡旋成像; 旋转多普勒检测

中图分类号: P412.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)09-2283-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.034

The Advances of Vortex Electromagnetic Wave in Radar Applications

LIU Kang, LI Xiang, WANG Hong-qiang, CHENG Yong-qiang

(School of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Compared with classical electromagnetic (EM) waves, the vortex electromagnetic wave carrying orbital angular momentum (OAM) has higher dimensional information-modulation freedom, which paves the way to the OAM's applications in radar target detection and imaging. Firstly, the concept of vortex EM wave and the radiation field in linear polarization are introduced. Subsequently, the principles of the vortex-EM-wave-based radar imaging and detection are presented. The advantages over traditional radar detection technology are analyzed and elaborated. Moreover, the development history and research actuality of the EM vortex imaging and the rotational Doppler frequency detection are overviewed. Especially, the generation technique of vortex EM waves for radar detection purposes is summarized. Finally, by viewing the prospects for the applications of vortex EM waves, some scientific problems in the development of vortex-EM-wave-based radar are proposed.

Key words: vortex electromagnetic wave; orbital angular momentum; novel radar paradigm; electromagnetic vortex imaging; rotational Doppler detection

1 引言

作为一种全天时、全天候、远距离的信息获取手段,雷达探测技术在空间监视、对地观测、精确制导等领域有着非常重要的应用^[1,2],已成为诸多国家竞相发展的关键技术. 经过数十年的发展,雷达高分辨成像理论与技术已取得长足进步,部分成果已应用到雷达成像系统中. 尽管成像方法林林总总,但通常都是基于距离-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^[3-5]. 上述成像原理中,方位向分辨率的获得依赖于雷达与目标的横向相对运动,然而在雷达与目标间的横向相对运动很小的一些应用场景中传统的 SAR/ISAR 成像所需的大虚拟孔径无法保证难以成像,严重制约雷达综合探测能力的提升. 目前,针对上述成像问题,典型的解决方案有单脉冲成像技术、利用天线方向图信息的解卷积成像技术等^[6,7],这些方法均属于实孔径成像方法,可在一定程度上改善雷达的角分辨能力,但由于天线波束内不同方位向辐射信号类似,对雷达分辨性能的提升有限,难以实现

高分辨率成像. 上述瓶颈难题限制了雷达成像水平的提升, 迫切需要探索新的雷达体制、成像原理和成像方法.

传统雷达探测技术中信息调制主要在时域、频域或极化域等进行^[8], 通常利用远场平面波近似. 作为信息载体的电磁波除了传统携带信息方式外, 近年来其相位波前信息调制能力也越来越受到关注. 轨道角动量是电磁波的一个重要的尚未加以充分利用的物理量. 当对电磁波加载轨道角动量调制时将形成扭曲的波前分布(涡旋电磁波), 其相位波前呈现出螺旋形的结构^[9], 可在其上调制所需的信息, 提高电磁波的信息传递和信息获取能力. 在涡旋电磁波辐射场照射下, 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, 通过成像处理有望提升雷达对目标的成像分辨能力. 由于涡旋电磁波辐射场具有确定的调制模式, 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成像求解的效率. 因此, 将涡旋电磁波应用于雷达成像, 将为突破雷达凝视成像的原理性瓶颈难题提供一条可行的技术途径. 此外, 在旋转目标检测中^[10], 利用涡旋电磁波可以实现对旋转多普勒的高效检测而不依赖于雷达与目标之间的径向运动.

2 涡旋电磁波与轨道角动量

2.1 电磁场轨道角动量

经典电动力学理论指出^[11], 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 (Spin Angular Momentum, SAM) 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, 而轨道角动量与相位波前的变化情况相对应, 二者均为物理守恒量. 在体积为 V 的自由空间中, 电磁场角动量 \mathbf{J} 可以表示为^[12]

$$\mathbf{J} = \varepsilon_0 \int \mathbf{r} \times \text{Re} \{ \mathbf{E} \times \mathbf{B}^* \} dV \quad (1)$$

其中, \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 分别表示电场矢量和磁场矢量. \mathbf{r} 表示空间中任意一点到场源之间的位置矢量, ε_0 为真空介电常数. $*$ 作用于矢量上表示取复共轭.

根据 Humblet 分解准则^[12], 电磁场角动量可以表示为 $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$, 其中 \mathbf{S} 和 \mathbf{L} 分别表示内禀角动量 (SAM) 和外部角动量 (OAM). 通常情况下, 不同角动量状态可以用模式数 j 来区别, 由下式计算得到:

$$j = \frac{\omega J_z}{(\varepsilon_0/2) \int (|\mathbf{E}|^2 + c^2 |\mathbf{B}|^2) dV} \quad (2)$$

其中 $J_z = \varepsilon_0 \int \text{Re} \{ x (\mathbf{E}_z \mathbf{B}_x^* - \mathbf{E}_x \mathbf{B}_z^*) - y (\mathbf{E}_y \mathbf{B}_z^* - \mathbf{E}_z \mathbf{B}_y^*) \} dV$, $j = l + s$, l 为轨道角动量模式 (拓扑荷) 数, s 为自旋角动量模式数.

电磁波的极化自发现以来, 已经广泛应用于光学和微波通信、雷达目标探测与识别等领域^[13,14]. 近年来, 电磁场轨道角动量由于其特殊的物理性质受到了越来越广泛的关注. 相对于自旋角动量, 轨道角动量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. 因此, 轨道角动量在雷达目标探测和无线通信等方向中具有很大的应用潜力.

2.2 涡旋电磁波基本概念与特点

类比于光学涡旋^[15], 携带自旋角动量和轨道角动量的微波通常称为涡旋电磁波. 一般情况下, 在传统电磁波上加载与空间方位角相关的相位项后即可得到涡旋电磁波 $U(\mathbf{r}, \varphi)$, 如下式所示^[16]:

$$U(\mathbf{r}, \varphi) = A(\mathbf{r}) \times e^{j\varphi} \quad (3)$$

其中 $A(\mathbf{r})$ 表示传统电磁波复振幅, \mathbf{r} 为空间一点至波束轴的位置矢量, φ 是相对于波束轴的空间方位角, l 表示轨道角动量模式数. 由式 (3) 可以看出, 只要采用与空间方位角相关的相位调制方式即可产生出涡旋电磁波.

涡旋电磁波主要特点表现为: 相位波前不再是一个平面, 随着空间方位角的变化而呈现周期性螺旋变化; 存在相位奇点, 在波束轴方向上辐射能量近似为零, 表现出圆环状能量分布结构. 图 1 给出了涡旋电磁波相位波前分布和辐射能量分布情况. 图 1(a) 中颜色从红色变至蓝色再变至红色表示相位变化 2π . 图 1(b) 中红色表示辐射强度最大, 蓝色表示辐射能量为零. 进一步, 图 2 给出了线极化条件下, 不同轨道角动量模式数对应的电场强度矢量随空间位置的变化情况. 假设涡旋电磁波传播方向为垂直于观察窗口指向朝外, “箭头”大小表示场强的瞬时幅度. 结果表明, 相比于经典电磁波, 涡旋电磁波既随时间变化也随着空间方位角的变化而改变. 在某一时刻, 电场强度方向随空间位置的变化周期数等于轨道角动量模式数取绝对值 $|l|$.

3 电磁涡旋雷达探测原理与性能优势

前面小节对涡旋电磁波与轨道角动量基本概念、涡旋电磁波辐射场特性等进行了介绍, 本节将重点对涡旋电磁波在雷达探测中的应用原理和其相对于传统雷达探测技术的性能优势进行分析与总结.

3.1 电磁涡旋成像

基于涡旋电磁波的雷达成像技术基本思想可以表述为: 采用雷达发射携带不同轨道角动量拓扑荷数的宽频涡旋电磁波, 对接收的回波进行成像处理时, 基于涡旋电磁波的拓扑荷数与目标方位角之间的近似对偶关系获取目标方位信息, 利用涡旋电磁波的频率与目

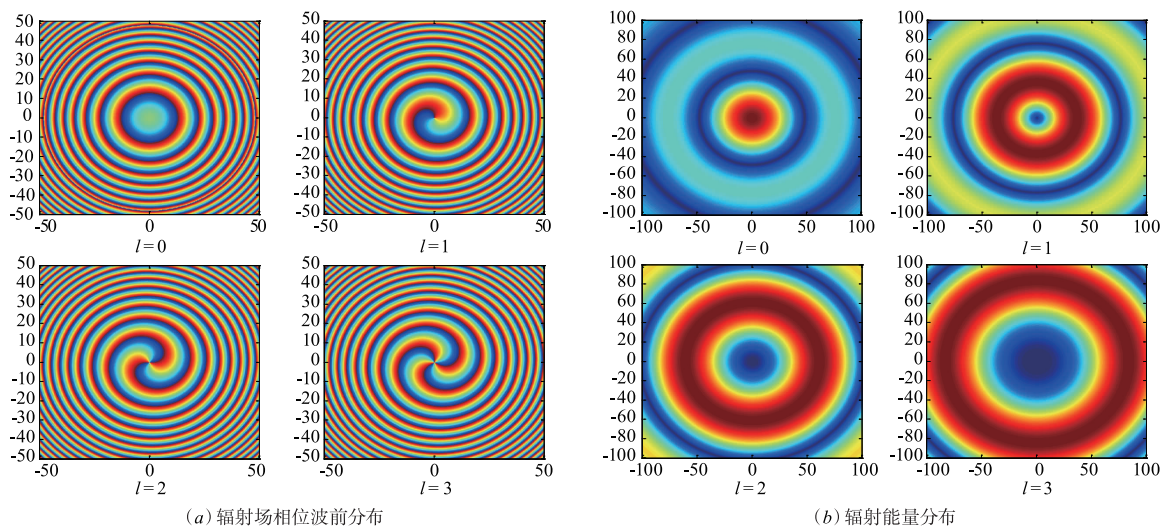


图1 涡旋电磁波相位波前和辐射能量分布情况

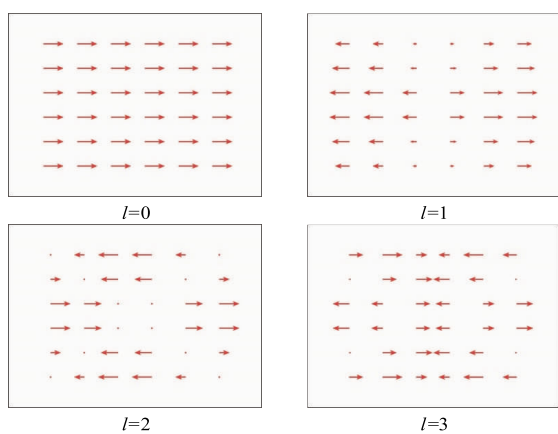


图2 电场强度矢量随空间位置分布情况

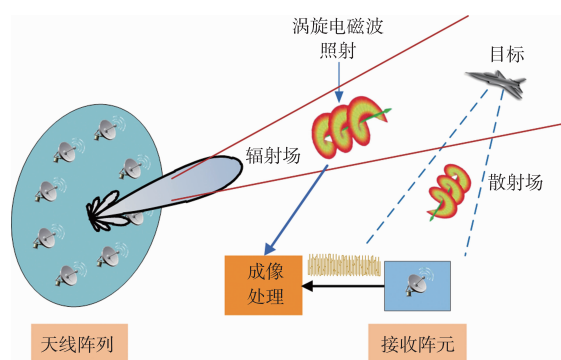


图3 电磁涡旋成像原理示意图^[16]

标距离之间的对偶关系获取目标距离信息,从而实现雷达目标二维成像.图3所示为基于涡旋电磁波的雷达成像工作场景示意图^[16].通常,可以采用均匀排布的圆形阵列经递增式相位调制的方式产生携带不同轨道角动量模式数的涡旋电磁波,该方法主要优点是:灵活方便,易于操控.对于目标回波,可以采用阵列接收并通过与发射信号匹配方式叠加合成总的回波,或者也可以直接采用单天线单元接收.需要说明的是,基于涡旋电磁波的雷达成像技术中信号产生不局限于天线阵列方式,采用其他轨道角动量天线亦可以发射成像所需的探测信号.图4所示为电磁涡旋成像信号处理原理图.其中,发射信号可以采用线性调频信号和频率步进信号等典型波形.由成像原理可知,回波采样数据在频率-拓扑荷域呈现二维矩形分布,因而通过两维傅里叶变换方法即可获取目标的距离-方位向位置信息.

已有研究表明^[16,17],涡旋电磁波非平面相位波前这一特性在雷达成像应用中有望实现波束内分辨能

力,从而提高传统阵列雷达成像分辨能力.图5所示为平面波前和非平面波前目标探测示意图.对比图5(a)和图5(b)可以发现,波束内不同目标处将形成具有差异性分布的电磁激励,使得目标散射回波中蕴含更多的目标信息,从而可以进行信息的解耦与超分辨处理.

3.2 旋转多普勒检测

基于涡旋电磁波的旋转目标检测基本原理为:通过雷达发射携带有轨道角动量的涡旋电磁波照射旋转目标,对接收的回波进行处理获得旋转多普勒频率偏移信息,轨道角动量模式数与多普勒频率偏移、目标旋转角速度之间的对应关系如式(4)所示,从而可以获取目标的旋转角速度信息.图6给出了旋转目标检测示意图.

$$\Delta f = \frac{(l+s)\Omega}{2\pi} \quad (4)$$

$$\Omega = 2\pi/T$$

其中, Δf 为多普勒频率偏移量, Ω 表示目标旋转角速度, T 为目标旋转周期, s 对应电磁波极化形式(线极化时 $s=0$).

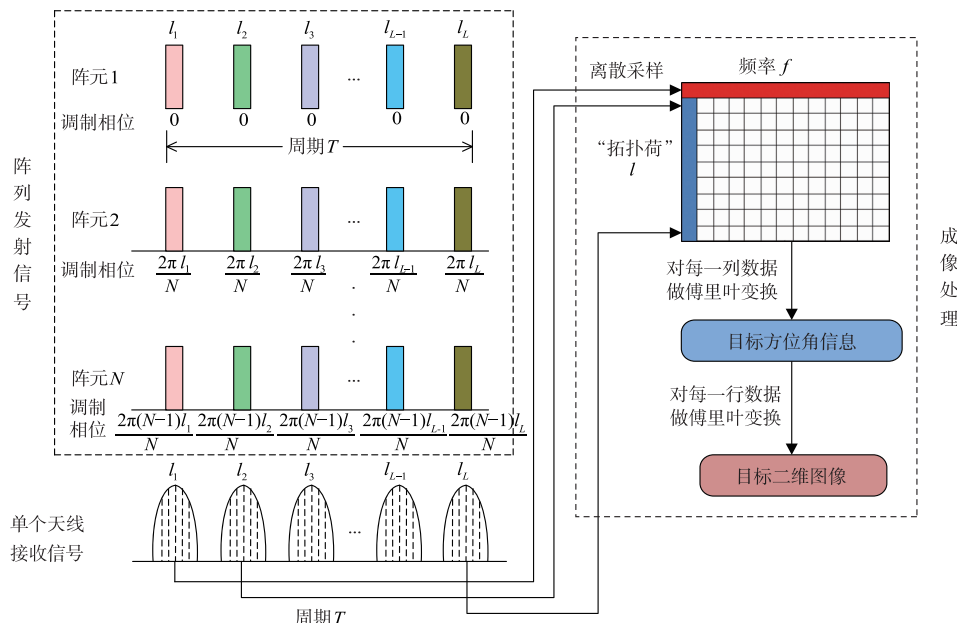


图4 电磁涡旋成像信号处理原理图

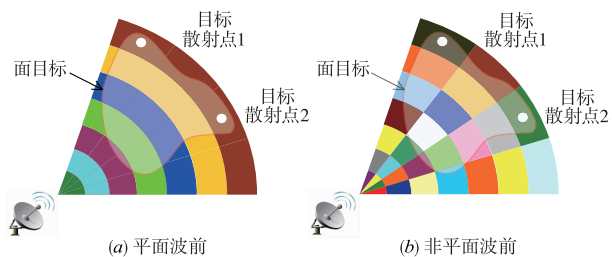


图5 探测信号波前示意图

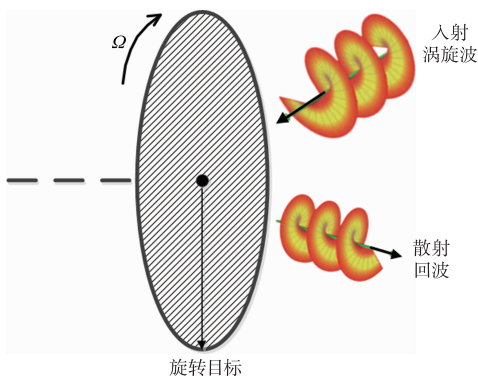


图6 旋转目标检测示意图

从旋转多普勒检测原理可以看出,其性能优势主要体现在:利用电磁场轨道角动量信息,不依赖于目标与“观察者”之间的径向运动,在前视条件下即可实现对旋转目标的检测;基于轨道角动量模式数与多普勒频移之间的线性乘积关系,可以实现对微弱多普勒信息的高效提取等。

3.3 基于涡旋电磁波的雷达系统特点

阵列雷达技术经过多年发展,目前形成两类典型

的代表,即相控阵雷达和 MIMO 雷达.其中,相控阵雷达基于相控阵天线具有的波束快速扫描能力、波束形状的捷变能力和空间功率合成能力、多波束形成能力以及分散布置能力等,实现多目标搜索与跟踪,波束扫描成像以及多辐射源来波方向估计等诸多雷达探测的功能;MIMO 雷达基于多输入多输出的思想,充分开发时间分集、频率分集、极化分集和波形分集等信息调制能力,采用多个发射天线同时发射近似正交的探测信号,在接收端使用多个天线单位同时接收目标回波,利用多个通道的正交特性集中处理收发信号以提取出被探测目标的信息。

相比于上述相控阵和 MIMO 两类雷达,电磁涡旋探测与成像雷达具有以下特点。

(1) 信号调制方式和目的不同

传统相控阵雷达技术在进行相位调制时,原理为补偿各阵元由于空间位置原因而与参考点之间产生的相位差,从而达到调整合成波束指向的目的;但是对于电磁涡旋探测与成像雷达,采用的是与阵元方位角位置相联系的递增式相位调制方式,从而实现对相位波前结构的调制和操控.此外,随着 OAM 天线技术的发展,电磁涡旋成像技术可以不再局限于阵列实现方式.不同于相控阵雷达和电磁涡旋探测与成像雷达,MIMO 雷达在工作过程中没有合成波束。

(2) 目标分辨原理不同

无论是传统相控阵雷达还是 MIMO 雷达,在目标探测过程中都是基于平面波近似条件,雷达接收的回波均为目标对平面波的散射,而涡旋电磁波具有螺旋形结构的相位波前,波前的连续变化使得涡旋电磁波

具有对雷达目标在方位向进行分辨的能力。

(3) 系统复杂度不同

大型相控阵雷达系统, 特别是有源相控阵, 其系统组成通常比较复杂, 成本极其昂贵; MIMO 雷达虽然可以利用“分集”信息提升目标探测性能, 但是成像过程中数据量大、处理复杂, 且应用系统实现难度大。相对而言, 电磁涡旋探测与成像雷达可以基于现有成熟的相控阵技术进行雷达系统设计, 但其阵列规模相比于传统相控阵雷达系统来说相对较小; 成像处理可以采

用傅里叶变换、逆投影等方法, 现实应用中易于实现。

4 涡旋电磁波在雷达探测中的研究现状

前文已经对涡旋电磁波在雷达目标检测和成像应用中的原理和性能优势进行了精炼与介绍, 下文将对涡旋电磁波在微波/毫米波段应用的起源、发展与现状进行综述。主要包括: 涡旋电磁波产生、OAM 无线通信、电磁涡旋成像以及旋转目标检测等。图 7 描述了涡旋电磁波及其应用的发展历史。

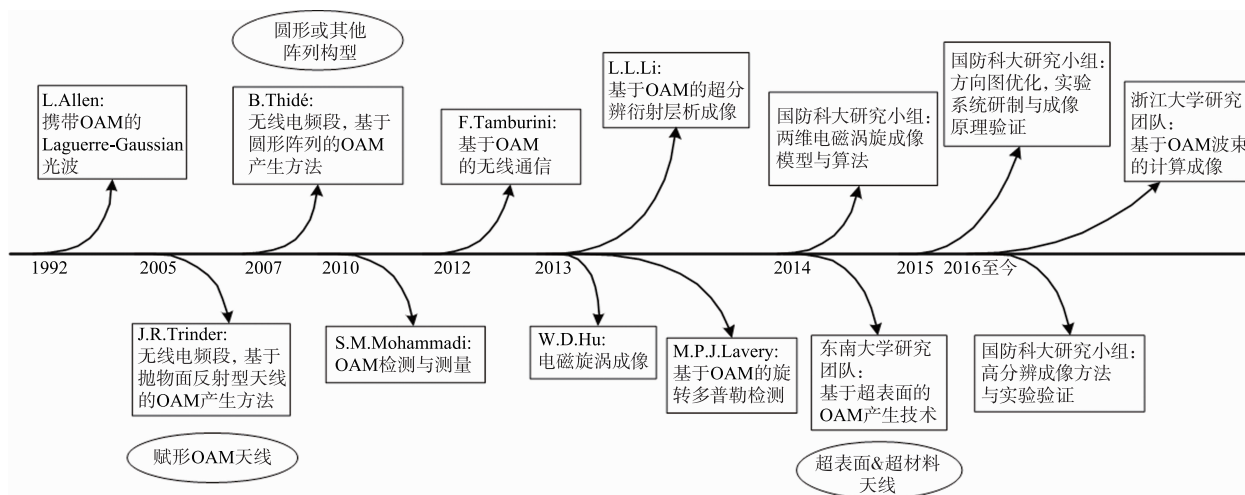


图7 涡旋电磁波的发展历史

1992年, L. Allen 等人^[15]关于拉盖尔-高斯光束的研究发现: 受空间方位角调制的光束不仅具有自旋角动量而且携带轨道角动量, 其相位波前不再是平面, 而是绕着传播方向旋转, 呈现螺旋形结构。此时, 光轴上存在相位奇点, 光束中心场强恒为零, 形成涡旋状, 因此称为光学涡旋。随后, 光学涡旋波在量子操控、光学通信以及量子探测等领域迎来了蓬勃的发展^[18-20]。2005年, J. R. Trinder^[21]设计抛物面反射型天线在无线电频段产生了携带 OAM 的电磁波。此后, 关于 OAM 天线的研究主要包括: 螺旋形抛物面^[22]、螺旋型相位平板^[23]、圆极化贴片天线^[24, 25]、行波圆形环形天线^[26]等。2007年, B. Thidé^[9]提出了采用均匀分布的圆形阵列产生无线电频段涡旋电磁波的方法, 对辐射场特性进行了分析与研究, 为轨道角动量在雷达及无线电通信领域的应用奠定了重要的基础。接着, S. M. Mohammadi 等人^[12, 27]提出相位梯度法和单点测量法对辐射场局部轨道角动量状态进行测量与估计, 为辐射场质量分析与评价提供了有效的方法。

2012年, F. Tamburini 等人^[28]在意大利威尼斯河两岸开展了首次基于轨道角动量的无线通信实验, 验证了轨道角动量在无线通信中应用的技术可行性。实验中采用螺旋形抛物面天线产生拓扑荷数为 1 的涡旋电

磁波, 同时另一个八木天线产生传统电磁波, 在同一载频 ($F = 2.14\text{GHz}$) 上发送不同的调频信号, 成功实现了长达 442 米的无线传输。然而, 目前关于轨道角动量调制能否增加无线通信中的信道容量这一问题存在诸多争议^[29-32], 有待进一步理论论证与实验验证。

2013年, 涡旋电磁波在雷达成像与目标探测领域获得了快速的发展, 其中, 胡卫东等人^[33]首次提出了电磁涡旋成像这一概念, 结合 Bessel 函数的频谱特性, 分析了轨道角动量拓扑荷数与方位角变量之间的近似对偶关系, 利用逆投影和滤波-傅里叶变换方法进行了成像处理, 指出了涡旋电磁波对雷达目标具有方位向成像的潜力, 为新体制雷达设计、目标识别技术的发展提供了方向性指导。同年, L. L. Li^[34]将涡旋电磁波应用到衍射层析成像技术中, 获得了超瑞利极限的高分辨成像结果(如图 8 所示), 推动了亚波长成像技术的发展。M. P. J. Lavery^[10]利用涡旋电磁波实现了对旋转目标的检测, 该方法不依赖于雷达与目标之间的径向运动即可实现对旋转多普勒信息的高效检测。文献^[35]研究了无线电频段 ($f = 20\text{GHz}$) 涡旋电磁波检测旋转多普勒频移的方法, 并开展了原理验证实验, 平均检测误差为 0.36%。2014年以来, 国内东南大学、西安电子科技大学、浙江大学等研究小组^[36, 37]结合超表面和超材

料技术设计多种涡旋电磁波产生天线,拓宽了涡旋电磁波产生方法及其应用场景.国防科技大学研究团队^[16,17,38,39]在电磁涡旋成像算法、辐射场优化设计与质量评价以及电磁涡旋成像实验验证等方面开展了大量的研究工作.其中,文献[16]基于线性调频信号推导建立了电磁涡旋二维成像模型,实现了二维高分辨成像;文献[17]提出了“多发多收”和“多发单收”两种观测

模型下的电磁涡旋成像方法;文献[38,39]提出了基于功率谱估计的电磁涡旋高分辨成像方法.此外,文献[40~42]开展了电磁涡旋成像原理验证实验并提出了实验测量数据成像处理方法,获得了良好的目标重构结果,促进了涡旋电磁波在雷达探测领域的应用与发展.

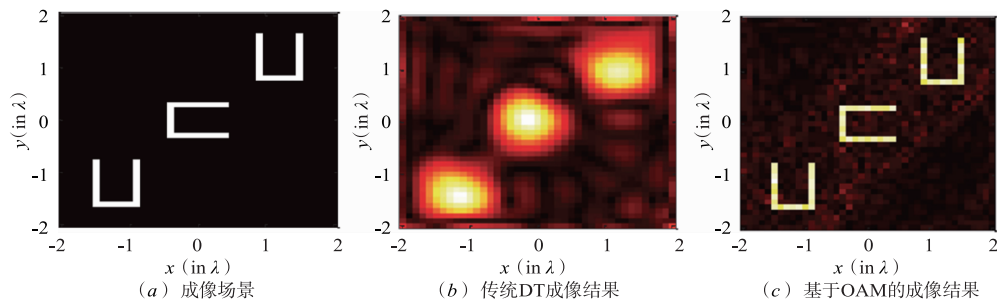


图8 基于OAM的衍射层析成像结果^[34]

5 总结与展望

基于涡旋电磁波的雷达探测技术研究是一项综合的、复杂的研究工作,涉及涡旋电磁波产生与信号设计、目标电磁散射特性、成像与检测算法等多项理论和技术.当前基于涡旋电磁波的雷达探测技术中目标检测与成像模型需要进一步优化,快速稳健的信号处理方法、雷达目标散射特性等诸多机理性问题有待深入研究,相关理论、技术与系统实现的研究方兴未艾.本文基于对涡旋电磁波在雷达中应用的研究与认识,思考总结一些开放性问题及其发展趋势如下.

5.1 稳定低成本的辐射源

采用电磁场轨道角动量调制产生具有非平面相位波前的辐射场分布,加强辐射场的空间差异性及时空正交性,是实现波束内目标分辨的关键.基于涡旋电磁波的雷达成像技术,要求探测过程中能够遍历较多的拓扑荷数,并获得相应模态下的目标回波,如何产生丰富的轨道角动量调制辐射花样是涡旋电磁波辐射场产生的一个关键技术.此外,大气湍流对涡旋电磁波辐射场传播的影响分析与校正也是辐射场产生需要考虑的一个重要问题.目前看来,采用先进的阵列技术、超材料技术,结合信号波形设计方法等有望解决这一难题.

5.2 稳健高效的目标重构技术

携带轨道角动量的电磁波相位波前不再是平面,准确的目标回波数学模型的建立是一项关键技术.针对特定的回波模型,高效稳健的目标散射点分布信息提取即目标重构方法需要开展系统性研究.此外,涡旋电磁波辐射方向图和相位分布的非理想性会影响到成像和检测处理,因此突破二者影响的信号处理方法是

另一个需要解决的科学问题.结合涡旋电磁波辐射场特点,建立准确的成像方程,并借助于压缩感知、稀疏重构等信号处理手段,有望解决上述问题.

5.3 涡旋电磁波照射下目标散射特性

目标散射特性是雷达探测与识别的基础^[43].目前,涡旋电磁波与目标相互作用机理尚不清楚,目标对涡旋电磁波的散射特性、目标对OAM态的调制作用等诸多科学问题亟待解决.雷达目标散射特性的研究成果有望给涡旋电磁波在雷达探测中应用带来新的思路和解决方案.

以上几个方面基本问题,具有很大的学术研究价值,将对涡旋电磁波在雷达中应用产生重要的推动作用,为新体制雷达技术的快速发展提供借鉴和参考.

参考文献

- [1] 王小谟,张光义.雷达与探测:信息化战争的火眼金睛[M].北京:国防工业出版社,2008.
Wang X M, Zhang G Y. Radar and Detection [M]. Beijing: National Defense Technology Industry Press, 2018. (in Chinese)
- [2] 肖怀铁,刘康,范红旗.量子雷达及其目标探测性能综述[J].国防科技大学学报,2014,36(6):140-145.
Xiao H T, Liu K, Fan H Q. Overview of quantum radar and target detection performance [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(6): 140-145. (in Chinese)
- [3] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-20.
- [4] Berizzi F, Mese E D, Diani M, Martorella M. High-resolu-

- tion ISAR imaging of maneuvering targets by means of the range instantaneous Doppler technique: modeling and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Imaging Processing*, 2001, 10(12): 1880 – 1890.
- [5] 贾高伟,常文革. 圆周 SAR 子孔径频域成像处理方法研究[J]. *电子学报*, 2016, 44(3): 497 – 504.
- Jia G W, Chang W G. Fourier-Based Sub-aperture imaging algorithm for circular synthetic aperture radar [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(3): 497 – 504. (in Chinese)
- [6] 吴迪,朱岱寅,朱兆达. 机载雷达单脉冲前视成像算法[J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(3): 462 – 468.
- Wu D, Zhu D Y, Zhu Z D. Research on nomopulse forward-looking imaging algorithm for airborne radar [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(3): 462 – 468. (in Chinese)
- [7] 杨凯新. 机载雷达前视高分辨成像方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- Yang K X. Research on the forward-looking high-resolution imaging for airborne radar [D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (in Chinese)
- [8] 王雪松,庄钊文,肖顺平,曾勇虎. 极化信号的优化接收理论:完全极化情形[J]. *电子学报*, 1998, 26(6): 42 – 46.
- Wang X S, Zhuang Z W, Xiao S P, Zeng Y H. The theory on optima reception of polarized signals: The purley polarized case [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(6): 42 – 46. (in Chinese)
- [9] Thidé B, et al. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(8): 087701.
- [10] Lavery M P J, et al. Detection of aspinning object using light's orbital angular momentum [J]. *Science*, 2013, 341(6145): 537 – 540.
- [11] Jackson J D. *Classical Electrodynamics* [M]. New York: Wiley, 1998.
- [12] Mohammadi S M, et al. Orbital angular momentum in radio—a system study [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(2): 565 – 572.
- [13] 肖顺平,王雪松,郭桂蓉. 基于极化谱的飞机目标识别[J]. *电子学报*, 1997, 25(12): 60 – 64.
- Xiao S P, Wang X S, Guo G R. Aircraft target recognition based on polarization spectrum [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1997, 25(12): 60 – 64. (in Chinese)
- [14] 肖顺平,庄钊文,王雪松,郭桂蓉. 目标动态极化结构特征提取与识别[J]. *电子学报*, 1998, 26(3): 48 – 52.
- Xiao S P, Zhuang Z W, Wang X S, Guo G R. Dynamic polarization structure feature extraction and target recognition [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(3): 48 – 52. (in Chinese)
- [15] Allen L et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185 – 8189.
- [16] Liu K, et al. Study on the theory and method of vortex-electromagnetic-wave-based radar imaging [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2016, 10(9): 961 – 968.
- [17] Liu K, et al. Orbital-angular-momentum-based electromagnetic vortex imaging [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 711 – 714.
- [18] Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A. Superposition of the orbital angular momentum for applications in quantum experiments [J]. *Journal of Optics B: Quantum Semiclassical Optics*, 2002, 4(2): S47 – S51.
- [19] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161 – 204.
- [20] Tamburini F, et al. Overcoming the Rayleigh criterion limit with optical vortices [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(16): 163903.
- [21] Trinder J R. Parabolic reflector [P]. US Patent: WO2005069443A1, 2005.
- [22] Tamburini F, et al. Experimental verification of photon angular momentum and vorticity with radio techniques [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(20): 204102.
- [23] Hui X, et al. Ultralow Reflectivity spiral phase plate for generation of millimeter-wave OAM beam [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 966 – 969.
- [24] Barbuto M, et al. Circular polarized patch antenna generating orbital angular momentum [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2014, 148: 23 – 30.
- [25] Zhang Z T, et al. Generation of multiple orbital angular momentum (OAM) modes with a circularly polarized multimode patch antenna [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 521 – 524.
- [26] Zheng S L, et al. Transmission characteristics of a twisted radio wave based on circular traveling-wave antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(4): 1530 – 1536.
- [27] Mohammadi S M, et al. Orbital angular momentum in radio: Measurement methods [J]. *Radio Science*, 2010, 45(4): RS4007.
- [28] Tamburini F, et al. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: First experimental test [J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(3): 033001.
- [29] Edfors O, Johansson A J. Is orbital angular momentum (OAM) based radio communication an unexploited area? [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(2): 1126 – 1131.

- [30] Tamagnone M, Craeye C, Carrier J P. Comment on ‘Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: First experimental test’ [J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14: 118001.
- [31] Tamburini F, et al. Reply to comment on ‘Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: First experimental test’ [J]. *New J Physics*, 2012, 14: 118002.
- [32] 孙学宏, 李强, 庞丹旭, 曾志民. 轨道角动量在无线通信中的研究新进展综述 [J]. *电子学报*, 2015, 43 (11): 2305 – 2314.
Sun X H, Li Q, Pang D X, Zeng Z M. New research progress of the orbital angular momentum technology in wireless communication: A survey [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43 (11): 2305 – 2314. (in Chinese)
- [33] 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 G R, Hu W D, Du X Y. Electromagnetic vortex based radar target imaging [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35 (6): 71 – 76. (in Chinese)
- [34] Li L L, Li F. Beating the Rayleigh limit: Orbital-angular-momentum-based super-resolution diffraction tomography [J]. *Physical Review E*, 2013, 88 (3): 033205.
- [35] Zhao M Y, 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] Cheng L, et al. Generation of electromagnetic waves with arbitrary orbital angular momentum modes [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4814.
- [37] Yu S, et al. Design, fabrication, and measurement of reflective metasurface for orbital angular momentum vortex wave in radio frequency domain [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108 (12): 121903.
- [38] Liu K, et al. Generation of OAM beams using phased array in the microwave band [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagations*, 2016, 64 (9): 3850 – 3857.
- [39] Lin M T, et al. Super-resolution orbital angular momentum based radar targets detection [J]. *Electronic Letters*, 2016, 52 (13): 1168 – 1170.
- [40] Liu K, et al. Super-resolution radar imaging based on experimental OAM beams [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110 (16): 164102.
- [41] Liu K, et al. High-resolution electromagnetic vortex imaging based on sparse Bayesian learning [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17 (21): 6918 – 6927.
- [42] Yuan T, et al. Electromagnetic vortex-based radar imaging using a single receiving antenna: theory and experimental results [J]. *Sensors*, 2017, 17 (3): 630.
- [43] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
Huang P K, Yin H C, Xu X J. *Radar target characteristics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)

作者简介



刘康(通信作者) 男, 1990年10月生于江苏泗阳. 现为国防科技大学电子科学学院讲师. 主要从事电磁涡旋理论、雷达信号处理、量子雷达与目标特性研究.
E-mail: liukang1117@126.com