

轨道角动量通信技术研究

郑凤^{1,2}, 陈艺戩^{3,4}, 冀思伟^{1,2}, 段高明^{1,2}, 郁光辉^{3,4}

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 网络体系构建与融合北京市重点实验室, 北京 100876;
3. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518055; 4. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 广东 深圳 518055)

摘要: 鉴于轨道角动量 (OAM) 不同模式之间良好的正交性, 该技术在无线通信中的应用是近年来新兴的、具有较大通信容量提升潜力的热点技术方向之一。基于 OAM 的无线通信技术能有效提升频谱利用率, 但同时面临着诸多挑战。首先介绍了 OAM 技术在无线通信领域的研究现状与进展, 结合 OAM 的基本原理, 对比分析了 OAM 与 MIMO 技术之间的关系, 并对“OAM 是否提供一个新的维度?”的争议给出结论。然后总结了 OAM 的产生与接收方法, 并概述其相应的关键技术与应用领域。最后深入分析了该技术在实际应用中的挑战, 进而提出其未来的发展趋势和后续的研究方向。期望对该领域的研究起到参考和帮助作用。

关键词: 轨道角动量; 模态正交; 无线通信; 多输入多输出

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020108

Research on orbital angular momentum communication technology

ZHENG Feng^{1,2}, CHEN Yijian^{3,4}, JI Siwei^{1,2}, DUAN Gaoming^{1,2}, YU Guanghui^{3,4}

1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. Beijing Key Laboratory of Network System Architecture and Convergence, Beijing 100876, China

3. ZTE Corporation, Shenzhen 518055, China

4. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China

Abstract: As the good orthogonality between the different modes of orbital angular momentum (OAM), the application of OAM technology in wireless communication has gained increasing popularity in recent years with great potential for capacity improvement. OAM-based wireless communication technology can effectively improve spectrum utilization, but also brings some challenges. Firstly, the research status and progress of OAM technology in the field of wireless communication were introduced and the relationship between OAM and MIMO technology was compared and analyzed combined with the basic principle of OAM. Moreover, the dispute “Does OAM provides a new dimension?” was concluded. Then, the generation and reception methods of OAM were summarized. The key techniques and application fields were overviewed. Finally, the challenges of the technology in practical application were analyzed and the future development trends and follow-up research directions were point out, which would provide a reference and help for the research in this field.

Key words: orbital angular momentum, modal orthogonality, wireless communication, multiple input multiple output

1 引言

虽然无线通信技术目前已经达到了一个新的高度, 但其一直是以信号的频率、相位、幅度等形式利用电磁波辐射的线性动量承载信息传输的。即使是考虑多天进一步利用多发多收特性来进行空间复用,

也仍然只是线动量的一些组合利用, 一些更前沿的研究正在关注采用最新的角动量技术来扩展无线通信的维度或者提升现有维度的效率。

根据经典电动力学理论, 电磁辐射实际上还可以携带角动量。角动量分为两部分, 分别是自旋角动量 (SAM, spin angular momentum) 和描述螺旋相

收稿日期: 2020-01-08; 修回日期: 2020-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61801047)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61801047)

位结构的轨道角动量 (OAM, orbital angular momentum)。如表 1 所示, 不同于电磁波辐射的线性动量 (LM, linear momentum), 角动量有着完全不同的性质。因此利用角动量的通信技术与利用线性动量的通信技术存在明显区别。

OAM 作为电磁波所携带的角动量的一种, 是微观粒子沿传播方向做圆周运动形成的, 与粒子的空间分布有关, 宏观表现为携带波前相位因子 $\exp(il\varphi)$ (l 表示 OAM 模态, φ 表示发射相位角)^[1-2] 的涡旋波束。OAM 模态表示绕光束闭合环路一周线积分为 2π 整数倍的个数。不同整数模态值的涡旋波束之间是相互正交的, 因此两束不同模态的涡旋波可以独立地传播。理论上同一频率的电磁波拥有无穷多种模式, 且携带不同本征模式的 OAM 波束之间相互正交。因此基于 OAM 的无线通信理论上在同频率波段可以传输无穷多信息。

目前, 偏振和极化已经在通信中被广泛应用。近年来, 利用电磁波传输轨道角动量进行无线通信越来越受到人们的关注, 其增加信道容量的潜力也得到了广泛的探索。2011 年, 科学家们首次利用涡旋电磁波不同模式在同一频率的条件下进行无线通信, 并取得了成功, 作为一项新型无线通信技术, 该技术被《自然》^[3-4] 誉为具有革命性的创新技术。

本文首先介绍了基于 OAM 复用的基本原理, 回顾了 OAM 技术的发展历程以及在无线通信中的应用进展, 然后对 OAM 与多输入多输出 (MIMO, multiple input multiple output) 的关系进行了总结, 并介绍了无线通信中 OAM 波束的产生与接收方法, 分析了 OAM 用于无线通信的主要技术问题, 最后对 OAM 通信的未来发展趋势进行了展望。

2 OAM 基本原理及发展

2.1 OAM 模态

携带轨道角动量的电磁波可以采用螺旋相位前端和环形的强度分布这 2 个主要的特征来进行描述。如图 1 所示, 考虑一个圆柱坐标系 (ρ, φ, z) , 依次表示径向距离、方位角、高度。

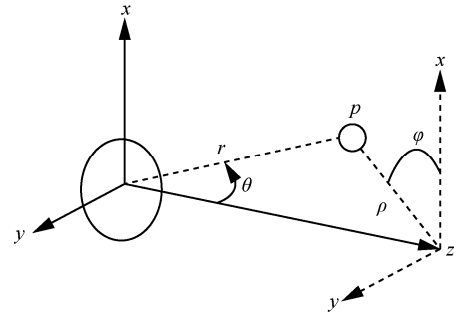


图 1 圆柱坐标系 (ρ, φ, z)

圆柱坐标系与直角坐标系的换算关系为 $\rho=r \cos \varphi, y=r \sin \varphi, z=z$ 。假设 z 为固定值, 那么电场可以描述为

$$E_l(\rho, \varphi) = A(\rho) \exp(il\varphi) \quad (1)$$

其中, $A(\rho)$ 为幅度函数, 可以表征为 l 阶贝塞尔函数形式; $\exp(il\varphi)$ 为螺旋相位的前端, l 为本征值。不同的 OAM 模式对应不同的 l 取值, l 的绝对值越大, 说明螺旋的旋转速度越快。一个显著特点是 $l \neq 0$ 的情况, 电磁波的相位分布沿着传播方向呈现螺旋上升形态, 如图 2 所示。

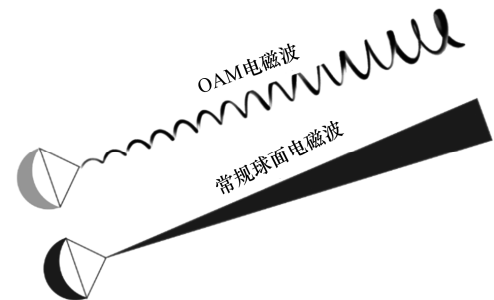


图 2 OAM 电磁波与常规球面电磁波

携带轨道角动量的电磁波有以下基本性质。

- 1) 理论上 OAM 本征值可以取任意离散值, 一般使用具有整数阶的本征模数, 非整数阶 OAM 模态可用傅里叶级数展开为整数阶 OAM 模态叠加, 不同本征模数的 OAM 模态正交;
- 2) 涡旋波束中心区域场值为 0, 称为空区或暗区, 能量主要集中在以波束传播轴向为中心的圆环区域上;
- 3) 随传播距离增大, 波束逐渐发散, 圆环区域半径扩大,

表 1

OAM 调制与 LM 调制的特点及优缺点

| 调制方式 | 特点 | 优点 | 缺点 |
|--------|----------------|--------------------|-------------------------------|
| OAM 调制 | 利用 OAM 模态承载信息 | 理论上通信容量非常高, 频谱利用率高 | 产生与接收方式复杂, 对天线拓扑要求高, 不适合远距离通信 |
| LM 调制 | 利用频率、相位、幅度承载信息 | 技术成熟, 成本较低 | 调制资源有门限, 且频谱利用率不高 |

呈现为一个逐渐扩大的中空锥形；4) OAM 的模数越大，涡旋波束发散角度越大。

2.2 OAM 无线通信技术最新发展

随着对光学 OAM 研究的深入，人们开始将光学 OAM 的研究方法逐步应用到无线电波领域，即射频电磁波。与光通信相比，射频电磁波生成和应用轨道角动量较困难，并且 OAM 波束发散导致射频波段在自由空间中实现长距离传输较困难。

2010 年，Mohammadi 等^[5]详细分析了利用均匀圆形天线阵列 (UCA, uniform circular array) 产生和检测不同模态的 OAM 电磁波。接收端采用与发射端 OAM 模式相反接收天线从空间接收整个环形波束能量，发射的 OAM 电磁波被接收天线相位补偿后变为常规平面电磁波，由于不同模式的 OAM 电磁波环形波束半径随模式数正比例增大，通过空分方式即可分离出相位补偿后的常规电磁波。这种全空域接收方法是从光学 OAM 借鉴而来的。

2011 年，Tamburini 等^[6]利用 7 阵子的八木天线在 2.4 GHz 频点实现了对电磁波 OAM 的产生与检测。该实验同样对非整数 OAM 电磁波的产生与测量进行了验证，并在距离为 442 m 的威尼斯湖面上实现了两路不同 OAM 电磁波的通信。该实验说明，利用 OAM 电磁波可以在同一个频点实现多路传输，从而极大提高通信效率。

由于采用圆形天线阵列产生 OAM 电磁波的方式需要复杂的馈线网络，2012 年，Tennant 等^[7]提出了一种等效的圆形天线阵列馈电方式。2013 年，Mahmouli 等^[8]分别采用螺旋相位板和全息幅度板 2 种方式产生 OAM 模态，并在 60 GHz 频点、400 m 距离上实现了 4 Gbit/s 视频信号的传输。

中国高校在该研究方向上也取得了很大的进展。从 2013 年开始，浙江大学发表了多篇 OAM 天线的论文，研制了多种独创的小尺寸、高性能射频 OAM 天线，包括圆形行波天线^[9]、基片集成波导天线^[10]、介质谐振天线^[11]及金属环形谐振器缝隙天线^[12]。近几年来，浙江大学研究团队提出了二维平面螺旋轨道角动量 (PSOAM, plane spiral orbital angular momentum) 波束的新概念^[13]，并提出了部分孔径接收方案^[14]。2016—2019 年，西安电子科技大学在 OAM 调制与编码以及长距离通信领域^[15-17]做了大量研究工作，结合 MIMO 实现了高频谱效率^[16]，为了进一步减小波束发散角，该团队提出特殊的

OAM 序列设计方案^[17]，采用类似于波束成形的方法解决了 OAM 波束发散角的问题。2017 年，华中科技大学研究了 OAM 信道容量^[18]，并提出基于轨道角动量的空间调制 (OAM-SM, orbital angular momentum spatial modulation) 传输方案^[19]，分析了能量效率、接收复杂度和平均误码率性能，并在能量效率上对比了基于轨道角动量的多输入多输出 (OAM-MIMO, orbital angular momentum-multiple input multiple output) 毫米波通信系统，所提的 OAM-SM 方案具有抗路径损耗衰减能力，适合于长距离传输。2017—2019 年，上海交通大学在 OAM 共轴多模式发射天线领域做出了重大贡献^[20-23]，该团队提出基于涡旋电磁波馈源的反射面天线的设计方法，产生带有 4 个 OAM 模态的电磁波，实现高阶模态和低阶模态发散角的一致，为长距离共轴接收提供了巨大的帮助。清华大学航电实验室研究了采用 OAM 域映射到第二频域的方法，2016 年 12 月完成世界首次 27.5 km 长距离 OAM 电磁波传输实验^[24-25]，并提出联合 OAM 编码调制方法^[26]、联合 OAM 维度建立欧氏空间^[27]。2018 年，该团队相继实现了从十三陵水库到清华大学的 30.6 km 长距离 4 模式索引调制 OAM 传输和 172 km 长距离 OAM 部分相位面接收实验，为未来长距离 OAM 电磁波空间传输实验 (100~400 000 km) 奠定了关键理论和技术基础。

日本内政和通信部 (MIC, Ministry of Interior and Communications) 委托日本电气股份有限公司 (NEC, Nippon Electronic Company) 和日本移动通信公司 (NTT, Nippon Telegraph and Telephone Corporation) 等多家单位联合推广 OAM 在 5G 和 B5G 的工程化推进。2018 年 12 月，NEC 首次成功演示了在 80 GHz 频段内，超过 40 m 的 OAM 模态复用实验 (采用 256QAM 调制、8 个 OAM 模态复用)，其主要面向于点对点的回程应用。NTT 在 2018 年和 2019 年成功演示了 OAM 模态的 11 路复用技术实验，并实现在 10 m 的传输距离下达到 100 Gbit/s 的传输速率^[28-29]。2019 年，韩国科学院面向未来无线通信应用，将 OAM 应用于 6G 移动通信中，同时也制定了关于 OAM 量子态传输的国家级重点课题，计划支持到 2026 年。

2019 年，我国工业与信息化部召开第六代移动通信工作研讨会，将轨道角动量作为六项 6G 备选关键技术之一，列入国家未来三年重点研究计划，

并成立了相应的 OAM 技术任务组。

3 OAM 和 MIMO 的关系

近年来，在 OAM 技术的迅速发展过程中，其与 MIMO 技术的关系存在着一些争议。主要争议在于 OAM 是否提供了一个全新的维度，基于 OAM 的无线通信是否是 MIMO 的一种特例，OAM 与 MIMO 之间到底是什么关系。在经过大量的讨论后，目前已经趋于明朗。OAM 可以分为两大类，一类称为量子轨道角动量 (q-OAM, quantum-orbital angular momentum)，另一类称为合成轨道角动量 (s-OAM, synthetic-orbital angular momentum)。前者的研究进展相对较小，从量子学的角度看，电磁波发送时，已经具备了不同模态的轨道角动量。传统的天线无法生成具有各种模态的 OAM 电磁波，也无法在接收时对其进行区分。实现基于 q-OAM 的传输需要新型的量子天线，这样才能提供一个无线通信的全新维度，但是目前这方面还面临很多的挑战。前面介绍的进展都是属于 s-OAM 的范畴，其发出的电磁波经过相位的改变后形成了涡旋形态的波束，实际上可以理解一种特殊的波束成形。OAM 子类与 MIMO 的关系如表 2 所示。

表 2 OAM 子类与 MIMO 的关系

| OAM 子类 | 与 MIMO 的关系 |
|--------|-----------------------|
| q-OAM | 独立于 MIMO 外，开辟了新的维度 |
| s-OAM | MIMO 子集的特殊形式，对应涡旋波束成形 |

目前，MIMO 技术中经典的波束形状并不是涡旋形态的，因此只能在不同“方向”上进行空间资源区分。而涡旋波束可以对相同方向上的空间资源进行区分，提供了一个新的维度“波数”。新的维度并不是不占用其他维度，而是在占用其他维度时是否可以再区分。方向和波数是一组对偶维度，在相同方向下，可以再按照波数区分，引入波数维度，在相同波数下，可以再按照方向区分，引入方向维度。

MIMO 理论上是一种处理方向/空间和波数的通用技术。其并没有规定信号形式和天线使用方式，也没有给出如何根据信道特征进行空间采样的方法。因此 s-OAM 属于 MIMO 的一种应用形式，因为其使用的也是传统意义上的空间资源。但由于目前的空间采样采用几何波束形式，只能高效地使信号在空间方向上区分，不能高效地使信号在波数上区分，因此其具有一个非常好的特征：不再需要

利用大量的不相关路径来进行空间复用，即使是在视距环境下，该技术也能够通过大量的 OAM 模态来分别承载多路数据，实现视距下的高自由度的空间复用传输，并且接收检测的复杂度变低。

在接收天线尺寸受限的前提下，OAM 不会超过同等天线规格 MIMO 的容量极限，也不会提高给定信道的最大自由度，即 MIMO 和 OAM 具有相同的理论性能上界。但在多径信道稀疏的情况下，视距多输入多输出 (LOS-MIMO, line of sight-multiple input multiple output) 信道矩阵的秩 (自由度) 远小于天线数量。基于 OAM 的正交基可以降低子信道之间的互相关性，提高信道矩阵的秩 (自由度)，使之趋近于满秩矩阵。通过引入正交基使信道矩阵正交化。在某些情况下，LOS-MIMO 信道矩阵的秩退化，通过 OAM 的正交基提升信道矩阵的秩，使其尽可能地接近满秩。

2017 年，Yuan 等^[30]证明了 OAM-MIMO 在一些近距离通信场景中的可用性。2018 年，Takuichi^[31]发现在近场区域中 OAM-MIMO 性能提高。此外，他还发现，当 UCA 的半径变大时，OAM-MIMO 的性能会提高。Wang 等^[18]基于所提出的 OAM 无线信道模型，导出了 OAM-MIMO 通信系统的容量。同时他们还研究了一些系统参数 (如 OAM 状态间隔和天线间距) 对 OAM-MIMO 通信系统容量的影响。仿真结果表明，较大的 OAM 状态间隔和较大的天线间距可以增加基于 OAM 的 MIMO 通信系统的信道容量。为了提高频谱效率，Cheng 等^[16]提出了轨道角动量嵌入式多输入多输出 (OEM, orbital angular momentum-embedded- multiple input multiple output) 通信框架，以获得大规模 OAM-MIMO 毫米波无线通信的乘法频谱效率增益。结果表明，该框架比传统的大规模 MIMO 毫米波通信框架更大且 OEM 毫米波通信能够显著提高频谱效率。为了最大化 OAM-MIMO 系统的频谱效率，2018 年，Zhao 等^[32]又提出了一种多 OAM 模式多路复用涡旋无线电 (RMMVR, reused multi-orbital angular momentum-mode multiplexing vortex radio) MIMO 系统，该系统基于分形均匀圆阵列。

4 OAM 的产生与接收

4.1 s-OAM 的产生

如何很好地获得各种 OAM 模态是实际应用中的一个重要课题。目前的一些研究中给出了多种方

式^[33-39], 如表 3 所示, 这些方法从 OAM 的基本原理出发, 从不同的角度使电磁波携带波前相位, 从而产生不同模态的 s-OAM 波束。

4.2 s-OAM 的接收

s-OAM 的接收方法主要包括全空域共轴接收法、部分接收法和单点接收法等。

1) 全空域共轴接收法

接收端采用与发射端 OAM 模态相反的接收天线, 从空间接收整个环形波束能量, 发射的 OAM 电磁波被接收天线相位补偿后变为常规平面电磁波。然而, 由于 OAM 电磁波波束发散, 所需的全空域接收天线尺寸随着传输距离的增加而线性增大, 在实际中无法实现。因此, 全空域的接收方法只适用于短距离点对点接收。此外, 采用电磁波衍射模块对全空域接收信号进行坐标变换法, 可以将输入的不同 OAM 模态变换到横向不同的动量模态^[40]。

2) 部分接收法

不同 OAM 模态的电磁波产生的相位差不同。

当天线间距固定时, 天线间相位差与 OAM 模态成正比。因此, 可以在部分环形波束上均匀布置一个弧形天线阵列接收信号, 对接收信号做傅里叶变换即可完成不同相位差的检测, 进而完成不同 OAM 模态的检测和分离。然而, 由于这种部分接收法是对部分环形波束进行采样, 其可以检测和分离的 OAM 模态数量受限于接收天线个数以及天线阵所形成的弧段尺寸, 且检测同一数量的 OAM 模态所需的阵列弧段尺寸随传输距离而线性增大。

3) 单点接收法

单点接收法又称为远场单点近似法, 通过检测电场和磁场在 3 个坐标轴的幅度分量来完成 OAM 模态的检测^[41-43]。但是, 由于该方法为远场近似的结果, 只有当 OAM 电磁波波束的发散角很小, 并且接收点的极化方向与 OAM 电磁波的极化方向完全一致时, 才能达到很好的近似效果。此外, 由于单点接收法采用的是电场强度和磁场强度的幅度,

表 3 不同 s-OAM 产生方式的原理、优缺点及应用领域

| 产生方式 | 原理 | 优点 | 缺点 | 应用领域 |
|---------|--|------------------------------|---|----------|
| 螺旋相位板 | 利用平面波经过厚度变化或者介电常数变化的圆形介质板引起相位时延, 包括 2 种方案: 厚度螺旋增加的介质板和多孔型相位板, 实际中也采用多阶梯相位板近似 | 原理简单、成本低 | 用于高频到光波波段, 只能产生单一模数 OAM 波, 模数较高时轴心部分加工难度大, 波束发散角度大, 透射损耗大, 复用技术方案复杂 | 光通信、无线通信 |
| 阶梯反射法 | 各个阶梯之间有相位阶跃, 当波束入射时, 由于这种特殊的阶梯状结构导致反射波不再是平面, 成为波前扭曲的涡旋电磁波 | 结构简单 | 只能产生单一模数 OAM 波, 不易小型化 | |
| 旋转抛物面天线 | 将抛物面反射器改造为具有螺旋抬升的结构 | 保留了抛物面天线的优点, 不需要相位控制, 波束方向性强 | 只能产生单一模数的 OAM 波, 体积大 | 无线通信 |
| 阵列天线 | 利用等距圆阵, 相邻阵元采用等幅、相位差为 $\frac{2\pi l}{N}$ 的激励馈电 | 理论成熟, 可产生多个模数的 OAM 波 | 馈电结构复杂, 高阶模数 OAM 需要大量天线单元, 波束发散角度大, 阵元相位误差易导致波前抖动和主瓣宽度增大 | 无线通信 |
| 反射/透射阵列 | 利用馈源向周期性单元组成的反射/透射面照射, 形成 OAM 波 | 无复杂的馈电网络 | 反射/透射面上单元设计复杂 | 无线通信 |
| 波导谐振天线 | 方案较多, 例如行波谐振天线、介质谐振天线等 | 尺寸小, 易集成 | 传输距离较近, 离实用尚有差距 | 无线通信 |
| 电磁超表面天线 | 通过人工设计的亚波长周期性微结构单元改变入射平面波的电磁特性, 从而获得反射或透射的 OAM 波 | 尺寸小, 易集成 | 工艺较复杂 | 光通信、无线通信 |

其检测性能受噪声影响很大。

4) 其他接收方法

最近几年还有许多其他的 OAM 接收与检测方法。2018 年, Zhang 等^[44]提出了一种基于数字旋转虚拟天线的 OAM 模式检测方法, 即通过测量相应的旋转多普勒频移来识别不同的 OAM 模式。2019 年, Yao 等^[22]提出了一种有效测量长距离传输的轨道角动量特性的新方法。通过旋转 OAM 波天线并固定平面波天线作为参考, 可以测量 OAM 波前的相位和幅度特性。Yao 等在山东省青岛市进行了实验, 来验证长距离传输的 OAM 相位特性, 实验结果表明, OAM 的涡旋相位特性在长距离传输后保持良好。Yao 等的工作为在现实环境中利用 OAM 性能提供更多的选择和可能性, 尤其是对长距离传输。

有效检测 OAM 波束一直以来都是研究学者最关注的课题之一, 研究性能更好的检测算法需要注意 2 个方面: 一方面, 需要检测算法功率上损失最小; 另一方面, 不能破坏正交性, 除此之外还需要考虑实际的天线尺寸与间距。

5 未来 OAM 的研究方向

涡旋波的一个特点是波束整体呈发散形态, 波束中心凹陷, 中心能量为 0, 整个波束呈中空的倒锥形, 并且 l 越大, 倒锥形对应的圆心角越大。当模式增大时, 电磁波束原本的最大辐射方向开始出现辐射暗区, 并逐渐扩大, 波束发散越来越严重。随着传输距离越来越大, 环形波束的半径也会越来越大, 这对电磁波的接收造成了很大困扰, 已成为制约涡旋电磁波进一步发展和普及的重要因素之一。由于 OAM 信号中非零模式信号主瓣发散以及接收和发射天线的配置问题对整体性能影响巨大, 包括收发天线中心未对准、传输距离过长导致接收天线无法完全接收主瓣信号等问题。OAM 大多数在无线通信领域中仍处于探索阶段, 本文认为未来的研究趋势应当主要集中在以下几个方面。

1) 非理想情况下 OAM 的传输

OAM 系统要求收发天线轴心对齐, 当收发机之间出现轴心偏角时, 接收器会产生模式串扰, 导致误码率增大, 系统性能下降。无线通信尤其是移动通信中存在很多非理想状态, 包括非共轴、非视距等几种类型。这是解决涡旋电磁波在移动通信中

应用的关键问题。非理想条件都会破坏 OAM 模式的正交性, 使一些原有的优良特征丧失。并且这些非理想条件会使涡旋电磁波的接收方法失效, 因为目前大多接收方法都是基于理想条件下的仿真或实验。虽然当前也有一些学者提出了针对某些非理想条件的解决方案, 比如 2018 年, Chen 等^[45]提出一种针对收发天线非共轴情况下的波束接收方案, 但该方案只考虑非平行不对称的情形, 仍有很大的局限性。还有很多现实应用中的非理想条件需要考虑。一些补偿方案只能解决较小幅度的离轴和非平行情况, 比较适合点对点的应用场景, 而对于移动通信的典型场景, 则存在大幅度的离轴, 并且终端还可能发生快速的旋转和移动。这些非理想条件都是移动通信中肯定会面临、必须要解决的问题, 因此需要针对性地进行优化。

2) 对 OAM 发散角的抑制或消除

现有的 OAM 接收检测方法是采用一个大口径的天线(或天线阵)将整个环形波束接收下来, 随着传输距离增大, 涡旋电磁波的发散角变大, 所需接收天线尺寸也越来越大。这种接收方法在长距离传输时变得异常困难, 天线尺寸几乎无法接受。另一方面, 接收端采用大口径的天线部署也限制了其在无线通信中的应用场景。目前针对抑制能量发散角, 学者们也提出了一些解决办法, 例如部分波面检测算法。它虽然可以增加通信距离, 但会破坏 OAM 模式的正交性。因此, 如何较大幅度地抑制甚至消除能量发散角, 解决远场下的 OAM 传输问题是值得进一步探索的。

3) OAM-MIMO 的天线拓扑研究

传统的 MIMO 技术侧重于在给定的一些经典天线拓扑下最大程度地开发其潜在的性能潜力, 如均匀线性阵列 (ULA, uniform linear array)、UCA。但是由于应用场景不同, 在设计天线结构时考虑的条件就不同。在不同的尺寸限制、通信频率、收发距离条件下, 如何设计天线拓扑才能获得最优的性能是传统 MIMO 并没有充分研究的。2018 年, Zhang 等^[44]基于圆柱坐标系下辐射场的理论公式, 分析了其传输和接收特性。通过计算多个 OAM 波的上下边界的函数公式及分析多个 OAM 波的最佳接收位置的振幅和相位, 确认多模 OAM 波的共同接收采样区域。不同的天线拓扑的通信性能存在显著差异, 如何针对不同

的应用场景找到最优的天线拓扑结构, 是本文未来研究的重点。

4) OAM 模式选择

OAM 中不同模式相互正交的特性为传输信息提供了新维度, 因此如何利用不同模式进行信号的调制、处理也成为研究的重点, 除了可以类似传统通信直接传输信息外, OAM 电磁波中不同的模式也可用于索引调制、保密传输等新的应用场景。无论是部分相位面接收还是虚拟旋转接收, 可利用的 OAM 模式数有限 (小于发射天线数), 直接利用不同模式传输信息所带来的增益有限, 将 OAM 模式组合调制, 模式组合对应独立的信息传输通道, 可以显著提高频谱利用率。

5) OAM 应用场景的选择

目前, 产生不同模式的涡旋电磁波的方法有很多种, 如 SPP 板、UCA 等。不同的产生方法, 其对应的实现复杂度、成本、所需的天线数量都不一样, 而且其性能也存在差异。OAM-MIMO 系统也有多种应用场景, 针对不同的应用场景, 服务的对象、接受服务的人员数量不同, 对通信的标准要求也不同。因此, 针对不同场景选择不同的 OAM 实现方法也是值得研究的。

6 结束语

对传输容量的巨大需求可能会使实际的通信系统陷入带宽瓶颈, 利用 OAM 进行通信被视为应对可预见的容量紧缩的关键解决方案。OAM 已经在光通信中被成功利用, 在无线通信中也有着非常好的应用前景。目前对于 OAM 通信的研究与实际应用还处于起步阶段, 鉴于该项技术的巨大潜力, 国内外多家高校及研究机构均在该领域不断探索前进, 并且在雷达、通信、光学、量子等领域取得了多项研究进展。OAM 的引入使无线通信中不再需要利用大量的不相关路径来进行空间复用, 即使是 LOS 环境, 该技术也能够通过大量的 OAM 模式来分别承载多路数据, 实现 LOS 环境下高自由度的空间复用传输。对于微波无线回传链路、点对点通信的容量的提升以及短距离单用户超高速率的数据传输 (如虚拟现实场景) 的需求, OAM 也能够满足。这些是传统的 MIMO 技术所不具备的。此外, OAM 模式之间良好的正交性还可以用于各类干扰的消除, 如小区间干扰、上下行干扰、全双工收发自干扰等, 为干扰消除提供了更多的技术手

段, 具有非常好的应用前景。希望本文的工作能够吸引学术界和产业界的更多关注, 以促进相应的研究活动, 特别是能够为提高频谱利用率提供有用的建议。

参考文献:

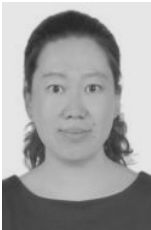
- [1] MCMORRAN B J, AGRAWAL A, ANDERSON I M, et al. Electron vortex beams with high quanta of orbital angular momentum[J]. *Science*, 2011, 331(6014): 192-195.
- [2] 刘曼. 探测涡旋光束轨道角动量的新方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 278-284.
LIU M. New method for detecting angular momentum of vortex beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 33(3): 278-284.
- [3] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [4] YAN Y, XIE G, LAVERY M P, et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 4876-4876.
- [5] MOHAMMADI S M, DALDORFF L K, FOROZESH K, et al. Orbital angular momentum in radio: measurement methods[J]. *Radio Science*, 2010, 45(4): 1-14.
- [6] TAMBURINI F, MARI E, SPONSELLI A, et al. Encoding many channels in the same frequency through radio vorticity: first experimental test[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 14(11): 78001-78004.
- [7] TENNANT A, ALLEN B. Generation of OAM radio waves using circular time-switched array antenna[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(21): 1365-1366.
- [8] MAHMOULI F E, WALKER S D. 4-Gbps uncompressed video transmission over a 60-GHz orbital angular momentum wireless channel[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013, 2(2): 223-226.
- [9] ZHENG S, HUI X, JIN X, 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.
- [10] JIN X, CHEN Y, CHI H, et al. Half-mode substrate integrated waveguide antenna for generating multiple orbital angular momentum modes[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(9): 684-686.
- [11] PAN Y, ZHENG S, ZHENG J, et al. Generation of orbital angular momentum radio waves based on dielectric resonator antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 385-388.
- [12] ZHANG W T, ZHENG S L, HUI X N, et al. Four-OAM-mode antenna with traveling-wave ring-slot structure[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 194-197.
- [13] ZHENG S L, CHEN Y L, ZHANG Z F, et al. Realization of beam steering based on plane spiral orbital angular momentum wave[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(3):

- 1352-1358.
- [14] ZHENG S, HUI X, ZHU J, et al. Orbital angular momentum mode-demultiplexing scheme with partial angular receiving aperture[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12251-12257.
- [15] QIN F, GAO S, CHENG W C. A high-gain transmit array for generating dual-mode OAM beams[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 61006-61013.
- [16] CHENG W C, ZHANG H L, LIANG L P, et al. Orbital-angular-momentum embedded massive MIMO: achieving multiplicative spectrum-efficiency for mmWave communications[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 2732-2745.
- [17] YANG Y W, CHENG W C, ZHANG W, et al. Mode modulation for wireless communications with a twist[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(11): 10704-10714.
- [18] WANG L, GE X H, ZI R, et al. Capacity analysis of orbital angular momentum wireless channels[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 23069-23077.
- [19] GE X H, ZI R, XIONG X S, et al. Millimeter wave communications with OAM-SM scheme for future mobile networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(9): 2163-2177.
- [20] YAO Y, LIANG X L, ZHU W R, et al. Phase mode analysis of radio beams carrying orbital angular momentum[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1127-1130.
- [21] BAI X D, LIANG X L, SUN Y T, et al. Experimental array for generating dual circularly-polarized dual-mode OAM radio beams[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 40099.
- [22] YAO Y, LIANG X L, ZHU W R, et al. Experiments of orbital angular momentum phase properties for long-distance transmission[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 62689.
- [23] YAO Y, LIANG X L, ZHU M H, et al. Analysis and experiments on reflection and refraction of orbital angular momentum waves[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(4): 2085-2094.
- [24] ZHANG C, MA L. Millimetre wave with rotational orbital angular momentum[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 31921.
- [25] ZHANG C, MA L. Detecting the orbital angular momentum of the electro-magnetic waves with orbital angular momentum[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4585.
- [26] ZHANG C, MA L. Trellis-coded OAM-QAM union modulation with single-point receiver[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(4): 690-693.
- [27] ZHANG C, JIANG J, ZHAO Y. Euclidean space with orbital angular momentum[C]//2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [28] DOOHWAN L, HIROFUMI S. An experimental demonstration of 28 GHz band wireless OAM-MIMO (orbital angular momentum multi-input and multi-output) multiplexing[C]//2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [29] DOOHWAN L, HIROFUMI S. An evaluation of orbital angular momentum multiplexing technology[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(9): 1729-1741.
- [30] YUAN Y, ZHANG Z, CANG J, et al. On the capacity of an orbital angular momentum based MIMO communication system[C]//2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-7.
- [31] TAKUICHI H. Equivalence between orbital angular momentum and multiple-input multiple-output in uniform circular arrays: Investigation by eigenvalues[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2018, 60(5): 1072-1075.
- [32] ZHAO L J, ZHANG H L, CHENG W C, et al. Fractal uniform circular arrays based multi-orbital-angular-momentum-mode multiplexing vortex radio MIMO[J]. *China Communications*, 2018, 15(9): 118-135.
- [33] 穆春元. 轨道角动量光束的光—声参量放大[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- MU C Y. Optical-acoustic parameter amplification of orbital angular momentum beams[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
- [34] 孙学宏, 李强, 庞丹旭. 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, 39(11): 171-180.
- SUN X H, LI Q, PANG D X. Review of new research progress of orbital angular momentum in wireless communication[J]. *ACTA Electronica Sinica*, 2015, 39(11): 171-180.
- [35] 王亦楠. 关于轨道角动量天线的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- WANG Y N. Research on orbital angular momentum antenna[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [36] 孙牧歌, 孙学宏, 常伟. 基于环形 OAM 阵列天线的复用传输系统研究[J]. *微波学报*, 2019, 35(1): 38-43, 48.
- SUN M G, SUN X H, CHANG W. Research on multiplexing transmission system based on loop OAM array antenna[J]. *Journal of Microwaves*, 2019, 35(1): 38-43, 48.
- [37] 雷星宇. 毫米波轨道角动量反射阵天线的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- LEI X Y. Research on angular momentum reflective array antenna with millimeter wave orbit[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [38] 范迪, 沈文辉. 基于环形缝隙介质谐振器的 OAM 天线[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(18): 71-75.
- FAN D, SHEN W H. OAM antenna based on toroidal slot dielectric resonator[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(18): 71-75.
- [39] 杨鹏鹏. 基于亚波长结构的光学 OAM 产生和调制方法研究[D]. 成都: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2016.
- YANG K P. Research on generation and modulation of optical OAM based on sub-wavelength structure [D]. Chengdu: Graduate School of

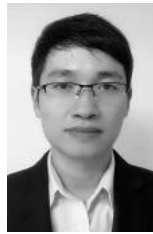
Chinese Academy of Sciences (Institute of Optoelectronic Technology), 2016.

- [40] YAN Y, XIE G D, LAVERY M P, et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 4876-4876.
- [41] MOHAMMADI S M, DALDORFF L K, FOROZESH K, et al. Orbital angular momentum in radio: measurement methods[J]. Radio Science, 2010, 45(4): 1-14.
- [42] DIALLO C D, NGUYEN D K, CHABORY A, et al. Estimation of the orbital angular momentum order using a vector antenna in the presence of noise[C]//The 8th European Conference on Antennas and Propagation. Berlin: Springer, 2014: 3248-3252.
- [43] NGUYEN D K, SOKOLOFF J, PASCAL O, et al. Local estimation of orbital and spin angular momentum mode numbers[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 50-53.
- [44] ZHANG Y, ZHANG H, PANG L H, et al. On reception sampling region of OAM radio beams using concentric circular arrays[C]//2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [45] CHEN R, XU H, MORETTI M, et al. Beam steering for the misalignment in UCA-based OAM communication systems[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2018, 7(4): 582-585.

[作者简介]



郑凤 (1977-), 女, 山东青岛人, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为无线通信和未来网络。



陈艺戡 (1984-), 男, 湖南常德人, 中兴通讯股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为多天线和高频通信。



冀思伟 (1996-), 女, 河北张家口人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线通信。



段高明 (1996-), 男, 湖北十堰人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线通信。



郁光辉 (1976-), 男, 江苏南通人, 博士, 中兴通讯股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为多天线、高频通信、网络架构、人工智能等。