

基于电磁超表面的轨道角动量天线技术综述

杨恺乔, 邓力

(北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 电磁超表面是一种由亚波长电磁超材料单元周期性或非周期性排列构成的平面阵列结构, 这种结构具有非常强大的空间电磁波调控能力, 是天线领域的新兴研究方向。近年来, 人们开始关注轨道角动量 (OAM, Orbital Angular Momentum) 在无线通信技术中的应用, 以缓解频谱资源需求增长带来的压力。基于超表面构建的 OAM 无线通信系统具有设计简洁、灵巧轻便的特点, 目前正是该领域的研究热点。本文主要就近期超表面 OAM 无线通信天线技术的研究进展, 按照三个部分进行梳理总结。首先是 OAM 无线通信发展的简要介绍。其次是基于超表面的 OAM 无线通信天线关键技术研究进展综述, 包括基于无源、有源超表面的涡旋波天线技术等。最后, 本文对其今后的发展方向做出展望。

关键词: OAM 无线通信; 人工超表面; 天线技术; 涡旋波束

中图分类号: O422 **文献标识码:** A

Overview of orbital angular momentum antenna technology based on artificial metasurface

YANG Kaiqiao, DENG Li

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing
100876, China)

Abstract: Artificial metasurface is a planar array structure composed of periodic or aperiodic arrangement of sub wavelength electromagnetic metamaterial units. This structure has a very strong ability to regulate spatial electromagnetic waves, regarded as a new direction of antenna design. In recent years, increasing attention is paid to the application of orbital angular momentum (OAM) in wireless communication technology to alleviate the pressure caused by growth of demand. OAM wireless communication system based on metasurface has the characteristics of simple design, dexterity and portability, for which at present, it has become a research hotspot in this field. This paper summarizes the recent research progress of metasurface OAM wireless communication antenna technology according to three parts. The first is a brief introduction to the development of OAM wireless communication and metasurface. The second is about the research progress of key technologies of OAM wireless communication antenna based on metasurface, including vortex wave antenna technology based on passive and active metasurface. Finally, this paper discusses the direction of its future development.

Key words: OAM wireless communication; artificial metasurface; antenna technology; vortex beam

1 OAM 无线通信与电磁超表面概述

基金项目: 北京邮电大学信息与通信工程学院优秀学生创新基金资助项目 CX202110

作者简介: 杨恺乔 (1999-), 男 (汉族), 陕西西安人, 北京邮电大学信息与通信工程学院本科生, ykq@bupt.edu.cn;

作为最重要的发展“源动力”之一^[1]，人类对于通信的需求一直深刻影响着每一次通信系统的重大变革。随着信息时代的到来，人们对于移动通信的需求不断增长，全新的应用场景不断涌现^[2]，可以预见现有通信系统将很快到达其性能的极限。为应对这一重大变化，人们提出了诸如大规模多入多出、毫米波传输、多连接等技术^[1]，以求系统性能全面提升。然而，运用这些新技术仍然是对时间、空间、频率、码字等日益紧缺的传统通信资源进行开发，并且随着可用资源的逐步萎缩，开发难度也必将大幅提升。回望人类通信系统的演进历史，几乎每一代系统的诞生都伴随有新型资源的发现与利用。可以预见，开拓空时码频以外的信息载体正是未来通信系统演进的重要方向之一。

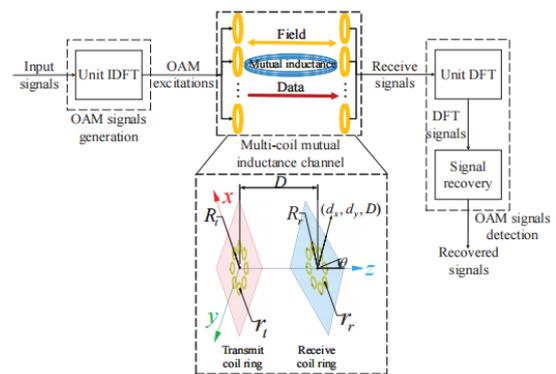
OAM是描述电磁波行为的又一物理参数。通过求解麦克斯韦方程组可以发现，携带有OAM的波束相位可以由 $\exp(il\theta)$ 项加以描述。这意味着自由空间中，电磁波的OAM独立于传播路径而存在，其传播横截面相位分布呈现出带有中心奇点螺旋形状，并且携带不同的OAM波束之间具有良好的正交性。OAM首先于上个世纪九十年代被观测到存在于螺旋相位光束^[3]。理论计算表明，单光子可携带的OAM大小为 $l\hbar$ ^[4]，其中 \hbar 表示约化普朗克常量。这意味着，相比于只能取 $\pm\hbar$ 的自旋角动量（Spin Angular Momentum, SAM），OAM具有无限自由度，可以被看作一种理想的通信资源。

关于OAM在通信领域的研究最早开始于光通信。研究表明，在光纤通信中，基于OAM的模分复用系统存在更少的模间串扰，可以避免引入复杂的数字信号处理流程^[5]。目前，OAM在光纤通信中的研究涉及丰富的内容，例如OAM光纤分析与设计^[5-7]、OAM有源无源器件设计^[5,8-9]、OAM光纤通信系统^[10-11]等。近年来，随着电子信息技术的持续发展以及“万物互联”浪潮的不断推进，OAM无线通信技术也逐渐成为研究热点。在光频段，主要的研究工作包括基于OAM的空间（含水下）无线光通信系统^[12-15]、大气（或海洋）湍流建模技术^[5,16]等。在微波段，关于OAM通信的研究虽然起步稍晚，但也取得了一些有价值的研究成果，目前属于更加前沿的研究领域^[5]。最早在2012年，如图1(a)，帕多瓦大学研究团队实现了442m距离的两路OAM复用通信

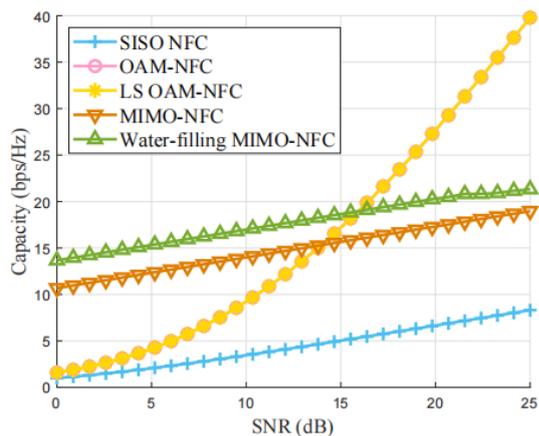
实验（又称“威尼斯”实验）^[17]，开创了一种全新的通信范式。日前，西安电子科技大学研究团队定量地给出了OAM近场通信中信道容量的理论公式，证明了大信噪比条件下OAM近场通信性能远高于MIMO近场通信^[18]，如图1(b)(c)。浙江大学研究团队首次报道了利用OAM模式群进行50m长距MIMO通信的实验，频谱效率达到了3.7 bit/s/Hz/stream^[19]，证明了OAM通信在视距范围内的巨大潜力。此外，图1(d)展示了NTT近期报道的利用OAM成功实现100m距离，速率达到100GHz/s的OAM通信实验^[20]。类似的理论与实验成果还有很多，这些都说明了基于OAM的无线通信开始逐步由构想走向实际。



(a)



(b)



(c)



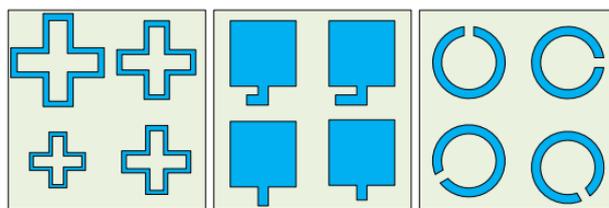
(d)

图 1 微波段 OAM 无线通信有关研究；(a)“威尼斯”实验场地^[17]；(b)西安电子科技大学研究团队设计的 OAM 通信系统示意图^[18]；(c)根据(b)系统计算得到的不同近场通信方案信道容量对比图^[18]；(d)NTT 报道的实验装置^[20]。

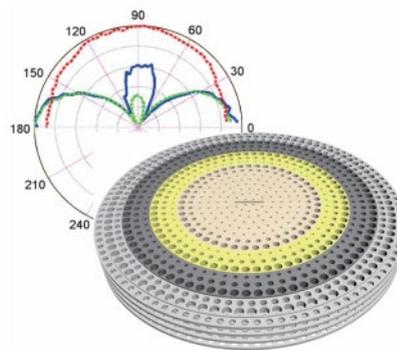
尽管 OAM 无线通信领域已经出现了很多重要的系统级成果，但这一技术仍然面临着许多实际挑战，其中就包括携带高质量、高纯度 OAM 电磁波（或称为涡旋电磁波）的产生。传统的涡旋电磁波发生装置主要包括环形天线阵、螺旋相位板天线等。这些装置或是体积庞大，或是效率低下，或是馈电网络设计复杂^[21]，难以做到精准、灵活地产生涡旋电磁波。幸运的是，电磁超材料的出现为解决该问题提供了一种可行的思路。

所谓电磁超材料（或称为超构材料、新型人工电磁媒质、特异媒质等），是指将亚波长单元按照周期性或非周期性排布形成的人工结构^[22]。关于电磁超材料最早的研究可以追溯到 1965 年前苏联科学家 Veselago 提出的左手媒质概念^[23]。而后，从上个世纪末到本世纪初，英国的 Pendry 爵士以及美国

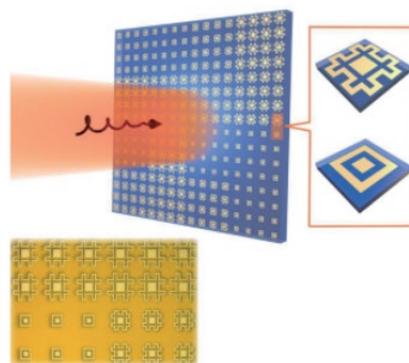
的 Smith 教授等人的系列工作带动了电磁超材料的研究热潮^[22]。与天然材料不同，电磁超材料由种类丰富的人工设计超材料单元排列组成，如图 2(a)，可以产生负等效介电常数、负等效磁导率等诸多反常的物理现象。随着对电磁超材料研究的不断深入，人们发现这种结构还具有强大的电磁调控能力，例如，可以通过调制电磁超材料单元的物理尺寸产生呈现一定分布规律的反射或透射系数，使得入射电磁波获得预先设计的幅度与相位调制。如图 2(b)所示的超材料透镜，就是最好的例证。一些学者注意到，如果将电磁超材料器件的厚度压缩，制成平面结构，可以大幅降低材料损耗以及器件的体积与质量^[24]，并且不影响实际效果，由此诞生了人工超表面，如图 2(c)。基于设计简洁、制作成本低、轻便灵活、电磁调控能力强大等一系列优势，目前人工超表面被广泛应用于各类新型微波器件以及通信系统架构的设计之中。



(a)



(b)



(c)

图2 超材料单元与器件；(a)三种常见的超材料单元设计方案^[25]；(b)一种超材料二维超分辨率成像放大透镜^[22]；(c)一种带有两类单元的反射型超表面^[22]。

2 基于超表面的 OAM 天线设计技术

关于 OAM 无线通信的研究主要集中于波束的产生、大容量高速率传输以及高效准确接收三个方面^[5]。由于和底层硬件的高度相关性，基于超表面的 OAM 通信技术研究大多出现在高效高质量波束的产生环节。接下来，本文将围绕涡旋波束的产生详细介绍近年来出现的若干技术进展。

2.1 无源窄带超表面涡旋波天线

利用无源超表面进行涡旋波天线设计具有简单、轻便的特点，其基本结构包括一个馈源天线，外加一块无源超表面。根据使用的调控方法，可以将超表面划分为透射型（利用透射系数调控波前）与反射型（利用反射系数调控波前）。由于产生涡旋波的机理相对简单，目前，基于无源窄带超表面的研究重点主要在于扩大相位调控范围、降低材料损耗、实现极化可控、多路集成等方面。

有研究指出，如图 3(a)所示，利用多层方环加雪花状金属贴片-介质板结构组建透射型超表面可以有效控制透射系数波动，实现 360 度相位覆盖，从而在 X 波段产生高纯度涡旋波^[26]。此后，有研究者提出了一种六边形多层金属贴片-介质板超表面单元，如图 3(b)，同样实现了较低透射损耗和大范围相位覆盖，并且在此基础上获得了入射波极化不敏感特性^[27]。除此以外，一些科研团队也在关注如何实现两个正交线极化波的独立调控。如图 3(c)，来自电子科技大学的一项成果表明，可以利用十字形金属贴片构造多层透射单元，通过调节正交的两臂尺寸实现对不同极化方向电磁波的独立调控^[28]。这项研究成功地在水平极化和垂直极化分别产生了拓扑荷 $l = 2, 4$ 的涡旋波束^[28]。图 3(d)展示了另

一组团队同时利用超表面的透射、反射特性，通过巧妙设计十字形金属贴片的排列方式，实现了携带不同 OAM 模式的两种正交线极化波在空间上的相反传输^[29]。这些成果大多涉及透射型表面，事实上，也存在利用反射型表面生成高质量涡旋波束的案例^[30]，例如图 3(e)。

需要指出，大多数研究在设计超表面相位分布时，除了考虑到螺旋相位，还兼顾了入射波补偿相位。原因在于，目前没有任何一种天线可以产生平面电磁波，所以需要借助超表面的调控能力将出射波束尽可能汇聚，以便实验结果观测。能够实现这一点，得益于广义斯涅尔折射（如图 3(f)所示、反射定律的发现^[31]：

$$n_i \sin \theta_i - n_r \sin \theta_r = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx} \quad (1)$$

$$n_i \sin \theta_i - n_t \sin \theta_t = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx} \quad (2)$$

其中标号 i, r, t 分别代表入射、反射、折射， Φ 表示超表面附加相位， λ_0 代表真空波长。特别对于反射型超表面，广义斯涅尔定律使得偏馈方式成为可能^[30]。补偿相位对于超表面天线至关重要，在后续宽带化技术的介绍中还会看到这一点。

多路集成也是窄带超表面的一种研究方向。一些研究人员希望可以用一块超表面同时产生多路携带不同 OAM 模式的涡旋波，并根据广义斯涅尔定律控制这些波束的传播方向，实现空间上的分离或交叠^[3-4, 32-34]，如图 3(g)所示。此外，也有研究人员注意到，同一块超表面对不同极化波的相位调制效应存在规律性的差异，可以通过操作电磁波的极化方式同时产生多路携带不同 OAM 的涡旋波束^[35]。这些设计主要利用了相位叠加方法，随着集成的功能增多，超表面相位分布也会趋于复杂。

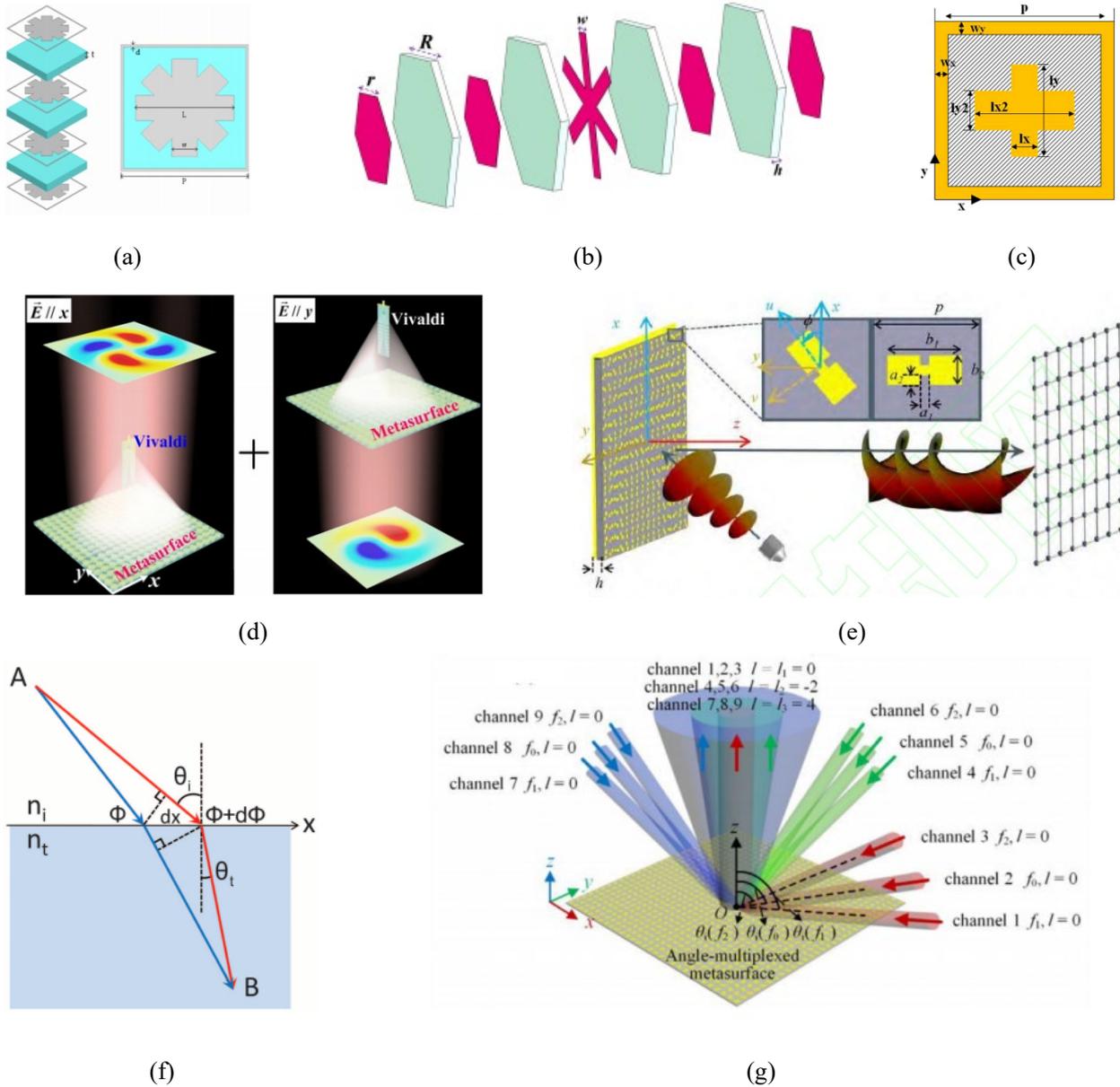


图3 无源窄带超表面天线的相关理论与研究成果；(a)多层雪花状贴片超表面单元^[26]；(b)多层六边形超表面单元^[27]；(c)多层十字形贴片超表面单元俯视图^[28]；(d)一种可以实现极化、OAM 模式独立调控的设计方案^[29]；(e)基于馈电的反射型表面^[30]；(f)分界面相位分布不均匀情况下的斯涅尔折射定律^[30]；(g)利用超表面实现多路 OAM 模式集成^[34]。

2.2 无源宽带超表面涡旋波天线

宽带化是目前超表面天线走向实用必须要解决的一项关键性技术问题。在窄带设计中，主要考虑超表面在工作频点附近的相位分布，进而确定单元的排列方式与物理尺寸。由于超表面的幅度、相位响应曲线与频率相关^[34]，当一束宽带电磁信号入射后，很可能造成严重色散，影响实际通信效果。若记一块超表面涡旋波天线的理想相位分布为 Ψ ，则有

$$\Psi(r, \theta, f) = \psi(r, \theta, f) + l\theta \quad (3)$$

公式(3)等号右边的第一项一般用于调控电磁波传播方向，和入射波频率紧密相关，第二项用于产生螺旋相位，与入射频率相互独立。近年来，关于宽带化超表面的研究主要集中在频率无关以及频率相关的设计上。

许多研究者注意到^[36-41]可以通过几何相位原理，或者具体地称为 Pancharatnam-Berry 相位（简称 PB 相位）原理设计宽带超表面。PB 相位源于几何变换，使得超材料单元在一定条件下的可以通过旋转，实现相位响应曲线的自由平移，从而获得宽

带范围内相对相位的频率无关特性。图 4(a)展示了一种基于 PB 相位原理设计的超表面单元典型幅度、相位响应曲线。对于反射型超表面, PB 相位原理可以表述为^[21]

$$r_{ll} = \frac{1}{2} [(r_{xx} - r_{yy}) + j(r_{xy} + r_{yx})] e^{-2jk\phi} \quad (4.1)$$

$$r_{lr} = \frac{1}{2} [(r_{xx} + r_{yy}) + j(r_{xy} - r_{yx})] \quad (4.2)$$

$$r_{rl} = \frac{1}{2} [(r_{xx} + r_{yy}) - j(r_{xy} - r_{yx})] \quad (4.3)$$

$$r_{rr} = \frac{1}{2} [(r_{xx} - r_{yy}) - j(r_{xy} + r_{yx})] e^{2jk\phi} \quad (4.4)$$

其中, $r_{ll}, r_{lr}, r_{rl}, r_{rr}$ 分别代表左旋到左旋、右旋到左

旋、左旋到右旋、右旋到右旋圆极化波反射系数, $r_{xx}, r_{xy}, r_{yx}, r_{yy}$ 分别代表 x 到 x 、 y 到 x 、 x 到 y 、 y 到 y 线极化波反射系数, ϕ 代表超表面单元旋转的角度。在一定带宽内若近似满足, 共极化反射系数等值反相且交叉极化反射系数等于零, 或共极化反射系数为零且交叉极化反射系数等值同相, 则可以获得较好的相位调制效果。不过, 透射型超表面的 PB 相位原理会有一些不同^[36]。理论表明, 无论是反射型还是透射型表面, 都只能产生圆极化涡旋波束。表 1 展示了一些近期取得的研究成果, 可以看出利用 PB 相位原理已经能够设计出带宽非常大的超表面天线。

表 1 一些宽带超表面涡旋波天线设计成果

文献	类型	中心频点(GHz)	相对带宽(%)	OAM 模式	OAM 模式纯度 (%)	效率
[37]	反射	64.5	17.1	-1	>75.5	>0.64
[38]	透射	10	20	1, 2	>85.1	(峰值) 0.92
[39]	反射	16	50	1	\	\
[40]	透射	60	66.7	-1, 2	>50, >62	>0.7, >0.2
[41]	反射	30	80	1-4	\	\
[21]	反射	14.3	105.6	-1.5, -3, -10	>35, >45, >50	\
[36]	透射、反射	20.9	111.0	1	\	>0.2

有趣的是, 一项研究特别关注了单元对称性对产生宽带涡旋波束的影响^[42]。它指出, 在旋转过程中六边形单元的反射系数幅度波动相比正方形单元更加平稳, 使用正六边形单元能够产生比使用正方形单元纯度更高的 OAM 模式。这可以在一定程度上解释前文提到的窄带六边形单元超表面的优良性能^[27]。此外, 这项研究还类比幅度调制原理, 利用傅里叶级数定量地分析了一般情况下超表面形状对 OAM 模式纯度的影响, 从而可以通过定制超表面完成一些复杂的功能^[42]。

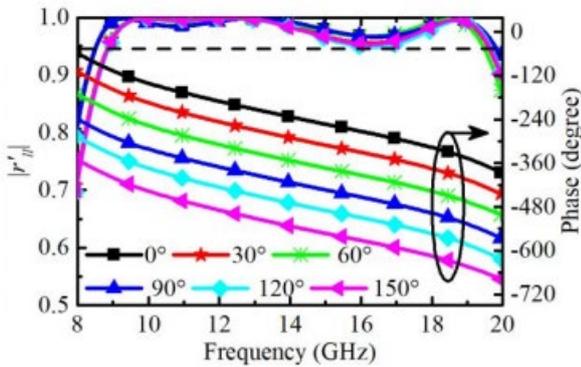
PB 相位的出现仅仅解决了螺旋相位分布的构造问题, 当涉及到传播方向调控、结构波束产生(后文将具体介绍)环节时, 利用 PB 相位构造的宽带超表面仍然会导致非常严重的色散现象^[40]。有研究

指出^[43], 公式(3)中的 $\psi(r, \theta, f)$ 项可以展开为如下的 Taylor 级数形式:

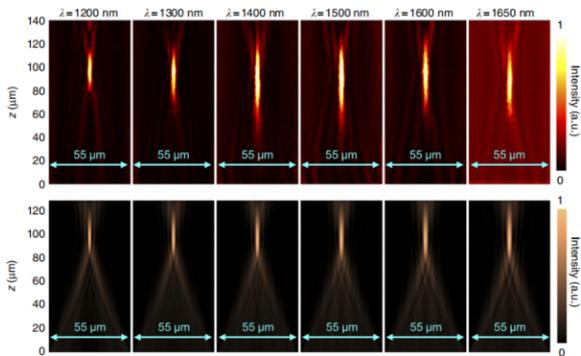
$$\begin{aligned} \psi(r, \theta, f) = & \psi \Big|_{f=f_{\min}} + \frac{\partial \psi}{\partial f} \Big|_{f=f_{\min}} (f - f_{\min}) + \dots \\ & + \frac{1}{k!} \frac{\partial^k \psi}{\partial f^k} \Big|_{f=f_{\min}} (f - f_{\min})^k + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

其中, f_{\min} 为设计频段的最低值。如果可以找到一种单元, 在设计频段内其相位曲线近似满足公式(5), 且幅度谱保持相对稳定, 就能够实现宽带超表面天线。这种思想一直用来指导消色差超材料平板

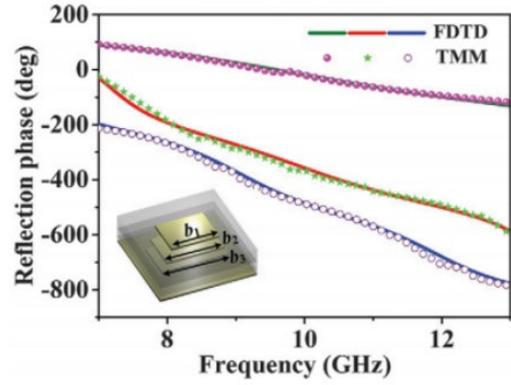
透镜的研究。2013年，威斯康星大学麦迪逊分校的研究团队，基于一般性频率选择表面设计方法^[44]，通过多层非谐振单元成功在 X 波段构造了相对带宽约 40% 的消色差平板透镜天线^[45]。此后，南京大学与台湾大学团队在 2017 年发表的论文中报道了一种利用单层谐振单元与 PB 相位原理实现的消色差平板光学透镜，如图 4(b) 所示，相对带宽约为 33%^[46]。同年，哈佛大学与滑铁卢大学团队也报道了类似的成果^[43]。接下来，最近的一项研究提出，可以基于多重谐振洛伦兹模型设计出高效的消色差与异常色差超材料反射镜^[47]。这项研究提供了一种多层矩形金属贴片-介质板单元，如图 4(c)，通过丰富的耦合效应直接产生了近乎线性的相位谱曲线，大幅扩展了谐振型单元的可操作带宽^[47]。当然，一些研究者也尝试通过路径累积相位实现宽带设计，例如，图 4(d) 展示了基于多重反射原理，利用 3D 打印技术设计实现的一种两频段宽带介质反射表面^[48]。这种设计方案虽然比金属-介质单元更便于操作，但往往会丧失体积优势。



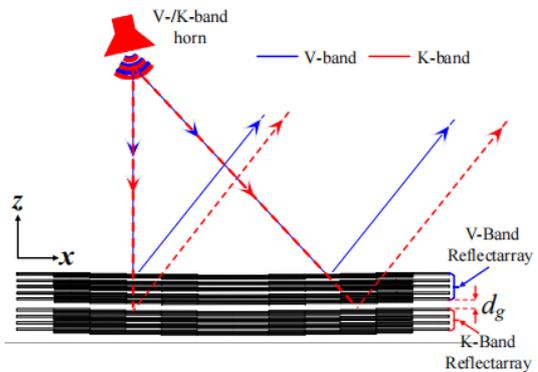
(a)



(b)



(c)



(d)

图 4 无源宽带超表面相关研究成果; (a)一种可实现 PB 相位单元的频率响应曲线^[21]; (b)波长位于 1200-1600nm 范围内一种超材料透镜聚焦效果的测试与仿真图像^[46]; (c)基于多重谐振洛伦兹模型设计的超表面单元^[47]; (d)一种双频段宽带介质反射表面^[48]。

总之，目前超宽带平板透镜、反射镜的设计已经取得了很多可喜的成果，关于宽带超表面涡旋波天线的报道也逐渐出现，例如，近期的一份报告显示，一组研究人员已经在光频段成功利用二氧化钛颗粒与 PB 相位原理制造了透射型宽带超表面完美涡旋光束发生器^[49]（下一节还会再次介绍）。不过，为了更好地用于 OAM 无线通信，很多宽带超表面天线加入了其他更加复杂的功能，虽然由于消色差与涡旋的联合设计还不成熟，很多“宽带”超表面天线设计还有待完善之处，这些将在下一节详细介绍。

2.3 无源超表面 Bessel-Gauss 与完美涡旋波束天线

简单涡旋波束并不是一种十分理想的信息载体。事实上，这种波束的螺旋式波前相当脆弱，容易受到湍流、障碍的影响^[50]。此外，简单涡旋波束的发散特性与拓扑荷数密切相关，拓扑荷数越大，波束传播过程中发散程度越严重，这给接收天线设计带来了很大不便^[51]。在光通信中，人们注意到通过特殊调控方法产生的一些光场具有近似无衍射、显著自愈、携带 OAM、光斑半径与拓扑荷数无关等诸多优良物理特性，这些光场被称为结构光场^[52]。结构光场种类丰富，典型的包括 Laguerre-Gauss 光场、Bessel-Gauss 光场、完美涡旋光场、Lommel 光场等^[52]。这里主要介绍微波段 Bessel-Gauss 波束、完美涡旋波束相关的研究成果。

1987 年的一项研究首次报道了一种具有无衍射能力的光束，并且在横向传播截面上这种光束具有服从第一类零阶 Bessel 函数的幅度特性^[53]，这种光束被称为零阶 Bessel 光束。随后，人们陆续发现 Bessel 波束可以携带 OAM，并具有显著的自愈能力^[52]。然而，理想 Bessel 波束具有无穷大能量，为近似地获得其无衍射、自愈能力，人们设计了一种可以实现的 Bessel-Gauss 波束，其电场标量解析式如下^[52]：

$$E_m(r, \theta, z) = -\frac{\exp[i(kz + m\theta)]}{1 + 2i\beta z} \exp\left[-\frac{ik_r^2 z + 2\beta k^2 r^2}{2k(1 + 2i\beta z)}\right] J_m\left(\frac{k_r r}{1 + 2i\beta z}\right) \quad (6)$$

其中满足 $k_r^2 + \beta^2 = k^2$ 。从(6)式可以看出， m 阶 Bessel-Gauss 波束携带拓扑荷数为 m 的 OAM 模式，并且阶数 m 也会影响波束的发散程度。有研究定量地刻画了 Bessel-Gauss 波束的最大准无衍射距离和波束半功率宽度^[54]：

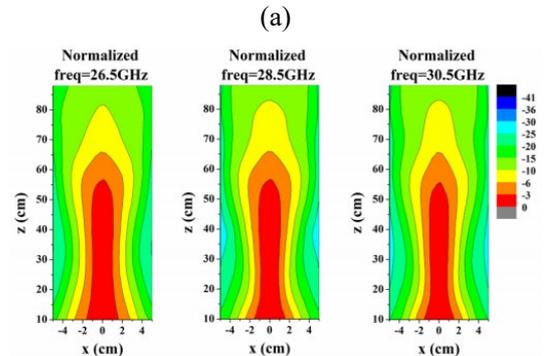
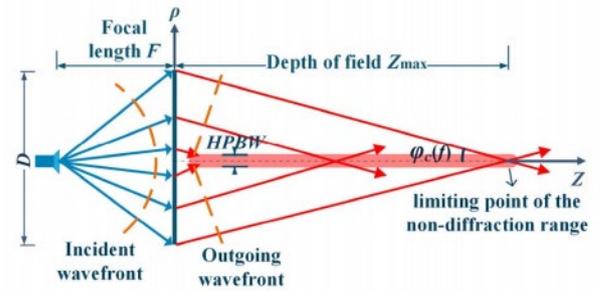
$$Z_{\max} = \frac{D}{2 \tan \varphi_c(f)} \quad (7)$$

$$HPBW = \frac{2.235\lambda}{2\pi \sin \varphi_c(f)} \quad (8)$$

其中 $\varphi_c(f)$ 表示设计的收敛角度， D 表示天线孔

径，如图 5(a)所示。

一些工作关注了零阶 Bessel-Gauss 波束的无衍射特性，例如，电子科技大学研究团队基于景深带宽和焦斑带宽概念提出了一套宽带大景深 Bessel 天线设计方案^[55]。如图 5(b)，这项工作利用多层金属贴片-介质板结构设计了 90 度等间隔宽带相位补偿单元，并构造了圆形透射表面，在 28.5GHz 处获得了 14%的相对带宽^[55]。此外，该研究团队还研究了偏轴宽带 Bessel-Gauss 波束的产生方案，并利用六边形单元以同样的方式获得了 13.8%的相对带宽^[56]。另一些工作则探索了高阶 Bessel-Gauss 波束的宽带产生方案。2019 年的一份报告显示，可以通过巧妙设计的两类多层非谐振单元，而不借助 PB 相位原理，构造宽带超表面产生一阶 Bessel-Gauss 波束，并且这项研究在 33.5GHz 处获得了 14.9%的相对带宽^[57]。此后，两项研究明确地利用 PB 相位原理实现了宽带 Bessel-Gauss 波束发生装置（相对带宽均为 50%）^[58-59]。考虑到使用路径累积相位设计介质超表面会造成厚度差异，一项研究利用等效介电常数原理设计了一类等厚的空心介质单元，如图 5(c)，并以此在宽带范围内产生了零阶 Bessel-Gauss 波束（中心频点 28GHz，相对带宽 14.3%）^[60]。这里需要指出，上面提到的一些研究^[57-59]仅从携带的 OAM 模式角度实现了宽带，但还可以更进一步地追求准无衍射特性的宽带化，即无衍射距离不随频率变化而变化。不过，更完备的研究目前比较少见。



(b)

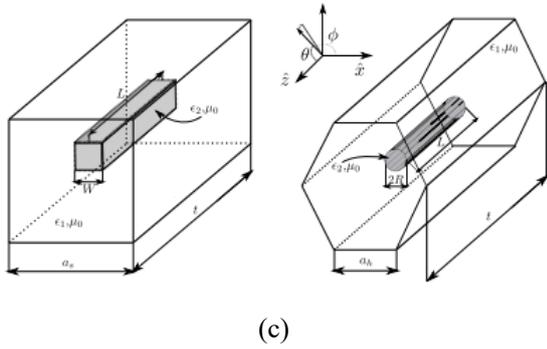


图 5 有关超表面 Bessel-Gauss 波束天线的一些研究(a)基于透射型超表面的 Bessel-Gauss 波束产生原理^[54]; (b)一种宽带大景深 Bessel 天线的仿真验证^[55]; (c)两种等厚度空心介质单元模型^[60]。

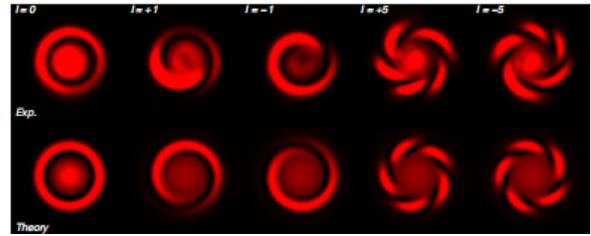
2013 年的一项研究首次提出了完美涡旋光束的概念，并且定义了理想完美涡旋光束的标量电场解析式^[61]：

$$E(r, \theta) = \delta(r - r_0) \exp(im\theta) \quad (9)$$

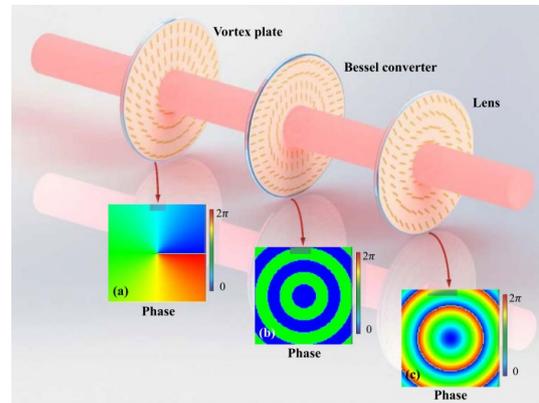
从(9)式可以看出，完美涡旋光束表现为一个携带 OAM 的等半径亮环。随后，一项研究指出，理想完美涡旋光束就是理想 Bessel 光束的 Fourier 变换，可以借助一块透镜将入射的 Bessel 波束汇聚至焦平面，从而产生一个“完美”的亮环^[62]。由于理想 Bessel 光束不存在，实际产生的“完美涡旋光束”只是理想情况的近似，不过已经可以看到很好的等半径效果^[62]，如图 6(a)所示。最初提出完美涡旋光束的一个重要原因是为了解决多个 OAM 模式高效耦合至光纤的问题^[62]，但这一成果也能够为微波段无线通信的接收天线设计带来了简化。

近年来，关于完美涡旋波束的研究主要集中在光学领域，产生完美涡旋光束的方法包括计算全息图^[63]、空间光调制器^[64-65]、介质螺旋相位板^[66]等。一些较早的研究也成功利用基于 PB 相位原理设计的透射型超表面产生了完美涡旋光束^[67-68]，如图 6(b)。近期，有研究者提出了一种名为“重叠完美涡旋光束”的变体，并在太赫兹波段通过介质超表面验证了现象^[69]。这种波束由携带相反符号 OAM 的完美涡旋波束组成，使得相位设计极大简化，抑制了超表面复杂相位分布带来的散射效应^[69]。有关宽带完美涡旋波束源的研究目前仍然比较少，但难得的是，上一小节提到的研究在光频段成功实现了这一点^[49]，如图 6(c)。与一般超表面设计使用的叠加

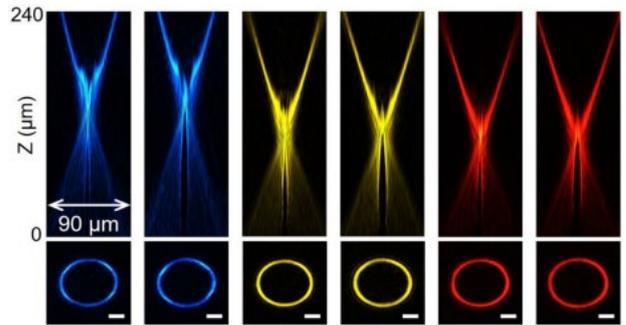
相位思路一致，这项研究设计的超表面，同时集成了轴棱锥、透镜、涡旋相位，并且利用 PB 相位原理，通过旋转控制相位曲线的抬升，再利用弱耦合以及传播累积相位原理，通过设计单元表面二氧化钛颗粒的底面尺寸，改变单元的有效折射率，获得了一系列具有不同斜率近似线性的相位曲线^[49]，从而在几乎全可见光频段实现了宽带响应。这样的结果无疑会对宽带超表面涡旋波束天线设计带来启示。



(a)



(b)



(c)

图 6 有关超表面完美涡旋波束天线的一些研究; (a)携带不同拓扑荷数 OAM 的非理想完美涡旋光束干涉图样，上为仿真，下为实验^[62]; (b)利用 PB 相位超表面生成完美涡旋光束^[67]; (c)拓扑荷数为 5、10 的宽带完美涡旋光束产生实验^[49]。

2.4 有源超表面在 OAM 无线通信中的应用

无源超表面的一个重大缺陷是灵活度不高，不能随意改变其相位分布，这使得无源超表面难以用

于具有移动性要求的通信场景中，且功能单一，不能实现重构。一些研究者注意到了这一点，提出可以将有源器件，例如二极管、场效应管等，加入单元设计,如图 7(a)所示，形成数字超材料或可编程超材料^[70-71]。基于数字超材料单元构筑的超表面可以通过控制输入电压，切换单元的相位响应曲线，实现超表面相位分布的灵活可调。近年来，这项技术已经开始被逐渐应用于 Bessel、涡旋波束等超表面天线的设计中了。例如，电子科技大学研究人员利用二极管设计了具有 1bit 相位补偿能力的超材料单元，并以此实现了程序可控的宽带大扫描角度 Bessel 波束天线（相对带宽约 34%）^[55]。另外，东南大学研究人员利用时域数字编码超表面实现了非线性准 Bessel 波束的产生^[72]。2020 年的一项研究利用双二极管以及旋转对称贴片,实现了一种具有 1bit 相位补偿能力的高透射率数字超表面，用于同时产生拓扑荷数小于等于 2 的涡旋波（相对带宽约 13%）^[73]。同年，另一项研究利用 3 个二极管实现了一种具有 2bit 相位补偿能力的反射型数字超表面，能够产生携带 6 阶 OAM 的波束（相对带宽约 33%），如图 7(b)，并且相关团队还利用这项成果完成了一项图片传输实验^[74]。可以看到，虽然有源超表面能够实现的功能更加丰富，但相比无源超表面，有源超表面可以操作的带宽要小很多，可以产生的 OAM 阶数也要少很多。此外，从天线增益的角度来看，有源超表面的表面也不及无源超表面，如图 7(c)所示。这既给有源超表面设计提出了严苛的要求，也预示着有源超表面具有相当大的发展空间。

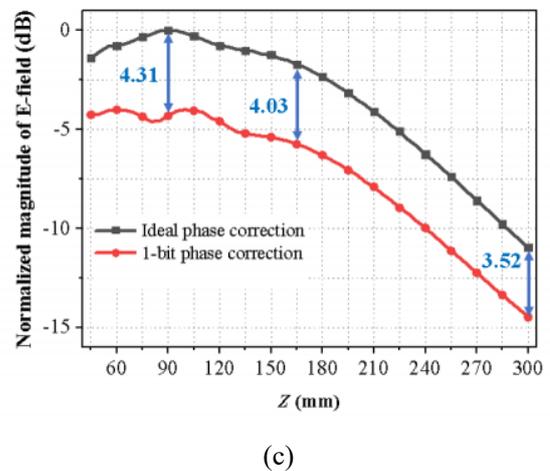
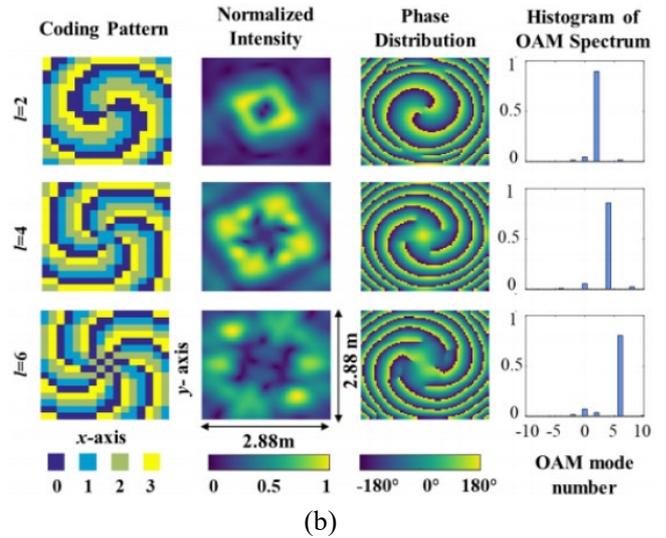
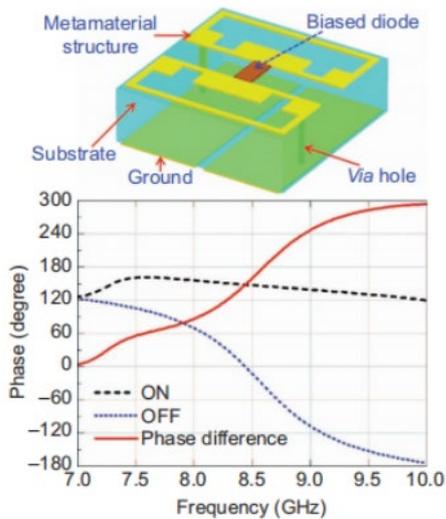


图 7 有源超表面相关研究成果；(a)一种数字超表面单元及其两种状态下的相位响应曲线^[70]；(b)一种高效透射型数字超表面^[73]；(c)数字化处理引起的天线增益下降^[55]。



(a)

3 未来展望

人工超表面凭借其体积小、质量轻、设计简洁、生产成本低廉、调控能力强大的优势，称为近年来 OAM 无线通信技术领域的研究热点。通过之前对本领域近年来相关研究成果的梳理与总结，可以大致发现存在这些的规律：操作带宽由窄到宽、天线增益由低到高、单元设计由简单到复杂、可实现功能由单一到丰富。这些变化释放了积极的信号，预示着超表面技术正逐渐朝着实用方向发展。

当然，基于超表面的 OAM 无线通信技术研究目前也存在着一些非常明显的缺陷。首先，超表面单元设计离不开物理理论支撑，目前关于单元的建模理论还十分匮乏。虽然，一些研究针对简单单元

提出了较为可靠的等效电路模型^[21,75],但随着贴片形状的复杂化和层数的增加,人们需要更加精准的模型来描述超材料单元的行为,指导超表面设计。其次,目前还很少有研究成果实现“完整的”宽带化,如第二节所述,这一点限制了涡旋波束的实际应用。最后是关于有源化、数字化的问题。目前的数字超表面虽然在可操作带宽、天线增益方面都不及无源超表面,但同时数字超表面却有着更大的自由度与灵活性,平衡这两方面矛盾也是接下来必须面对的一项重要挑战。

总之,基于人工超表面的 OAM 无线通信技术有着很大的应用价值与发展空间,相信有关技术可以在不久的将来投入实用,更好地解决现代社会面临的种种问题。

参考文献

- [1] 张平,牛凯,田辉,聂高峰,秦晓琦,戚琦,张娇.6G 移动通信技术展望[J].通信学报,2019,40(01):141-148.
- [2] 王承祥,尤肖虎,梁应敞,易芝玲.B5G 通信网络专题[J].中国科学:信息科学,2019,49(09):1231-1232.
- [3] Yang Li,Xiong Li,Lianwei Chen,et al.Orbital Angular momentum multiplexing and demultiplexing by a single metasurface[J].Advanced Optical Materials,2017,5(2).
- [4] Zhao H, Quan B, Wang X, et al. Demonstration of Orbital Angular Momentum multiplexing and demultiplexing based on metasurface in terahertz band[J]. ACS Photonics, 2017, 5(5).
- [5] 杨婧翹. 模分复用系统中轨道角动量模式传输理论分析与应用研究[D].北京邮电大学,2021.
- [6] Mao B, Liu Y, Zhang H, et al. Complex analysis between CV modes and OAM modes in fiber systems[J]. Nanophotonics, 2019, 8(2):271-285.
- [7] Zhang H, Zhang X, Li H, et al. The Orbital Angular Momentum modes supporting fibers based on the photonic crystal fiber structure[J]. Crystals, 2017, 7(10).
- [8] 王敬好. 多波长涡旋光纤激光器[D].合肥:中国科学技术大学,2021.
- [9] Sroor, H, Huang YW, Sephton B. et al. High-purity Orbital Angular Momentum states from a visible metasurface laser[J]. Nature Photonics ,2020,14: 498–503.
- [10] Zhu L, Li J, Zhu G, et al.First demonstration of Orbital Angular Momentum (OAM) distributed raman amplifier over 18-km OAM fiber with data-carrying OAM multiplexing and wavelength-division multiplexing[J]. Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2018), paper W4C.4.
- [11] Zhang J, Wen Y, Tan H, et al.80-Channel WDM-MDM transmission over 50-km Ring-Core Fiber using a compact OAM demux and modular 4×4 MIMO equalization[C]. 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper W3F.3.
- [12] 尹霄丽,孙志雯,崔小舟,郑子健,陈小政,郭翊麟,廖焕宇,刘光耀.基于空间分集的海洋无线光通信轨道角动量复用系统的性能[J].光子学报,2018,47(11):21-28.
- [13] Cai C, Zhao Y, Zhang J, et al.Experimental demonstration of an underwater wireless optical link employing Orbital Angular Momentum (OAM) modes with fast auto-alignment system[C]. 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), San Diego, CA, USA ,2019:1-3.
- [14] 赵一凡. 基于轨道角动量模式多场景短距光互连的应用基础研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [15] Li L, et al. Limited-size aperture effects in an orbital-angular-momentum-multiplexed free-space optical data link between a ground station and a retro-reflecting UAV[J]. Optics Communications, 2019, 450.
- [16] 刘雪婷,翟焱望,付时尧,高春清.湍流大气中高稳定性全庞加莱球光束模式选择(特邀)(英文)[J].红外与激光工程,2021,50(09):78-88.
- [17] Tamburini F, Mari E, Sponselli A, et al. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test[J]. New Journal of Physics, 2012,14: 033001.
- [18] Lyu R, Cheng W, Zhang W. Modeling and performance analysis of OAM-NFC systems[J]. IEEE Transactions on Communications (Early Access), 2021.
- [19] Xiong X, Zheng S, Zhu Z, et al. Experimental study of plane spiral OAM mode-group based MIMO communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation (Early Access),2021.
- [20] Sasaki H, Yagi Y, Yamada T, et al. An experimental demonstration of over 100 Gbit/s OAM multiplexing transmission at a distance of 100 m on 40 GHz band[C].IEEE International Conference on

Communications Workshops (ICC Workshops), Dublin Ireland, 2020.

- [21] Yang L J, Sun S, Sha W E I. Ultrawideband reflection-type metasurface for generating integer and fractional orbital angular momentum[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,68(3):2166-2175.
- [22] 崔铁军. 电磁超材料——从等效媒质到现场可编程系统[J]. 中国科学:信息科学, 2020, 50(10): 1427-1461.
- [23] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509–514.
- [24] Bao L, Wu R Y, Fu X, et al. Multi-beam forming and controls by metasurface with phase and amplitude modulations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(10):6680-6685.
- [25] 刘永杰. 基于电磁超表面的准无衍射波束产生技术及其应用研究[D].西安: 西安电子科技大学,2019.
- [26] Qin F, Wan L, Li L, et al. A Transmission metasurface for generating OAM beams[J].IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(10):1793-1796.
- [27] Bai X, Kong F, Qian J, et al. Polarization-insensitive metasurface lens for efficient generation of convergent OAM beams[J].IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(12) : 2696-2700.
- [28] Qi X, Zhang Z, Zong X, et al. Generating dual-mode dual-polarization OAM based on transmissive metasurface[J]. Scientific Reports, 2019, 9:97.
- [29] Tang S, Cai T, Wang G, et al. High-efficiency dual-modes vortex beam generator with polarization-dependent transmission and reflection properties[J]. Scientific Reports, 2018, 8:6422.
- [30] 孙胜,阳椋均,沙威.基于反射超表面的偏馈式涡旋波产生装置[J].物理学报. 2021, 70(19): 198401.
- [31] Yu N, Genevet P, Kats MA, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J].Science, 2011 Oct 21;334(6054):333-7.
- [32] He X, Yang Y, Deng L, et al. 3D Printed Sub-Terahertz All-Dielectric Lens for Arbitrary Manipulation of Quasi-Nondiffractive Orbital Angular Momentum Waves[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021,13 (17):20770-20778.
- [33] Li S, Li X, Zhang L, et al. Efficient optical angular momentum manipulation for compact multiplexing and demultiplexing using a dielectric metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(8).
- [34] Wang L, Yang Y, Deng L, et al. Terahertz Angle-Multiplexed metasurface for multi - dimensional multiplexing of spatial and frequency domains[J]. Advanced Theory and Simulations, 2020, 3(10).
- [35] Zhang K, Yuan Y, Ding X, et al. Polarization-engineered noninterleaved metasurface for integer and fractional orbital angular momentum multiplexing[J]. Laser & Photonics Review,2021,15(1).
- [36] Akram M R, Ding G, Chen K, et al. Ultrathin single layer metasurfaces with ultra-wideband operation for both transmission and reflection[J].Advanced Materials,2020, 32(12).
- [37] Bi F, Ba Z, Wang X. Metasurface-based broadband orbital angular momentum generator in millimeter wave region[J].Optics express,2018,26(20): 25693-25705.
- [38] Zhang F, Song Q, Yang G M, et al. Generation of wideband vortex beam with different OAM modes using third-order meta-frequency selective surface[J].Optics express, 2019,27(24): 34864-34875.
- [39] Ma H, Kong X, Chen P, et al. Broadband vortex beams generation with narrow divergence angle using polarization insensitive metasurface[J].IEEE Access,2020,8: 218062-218068.
- [40] Zhang D, Lin Z, Liu J, et al. Broadband high-efficiency multiple vortex beams generated by an interleaved geometric-phase multifunctional metasurface[J].Optical Materials Express, 2020,10(7): 1531-1544.
- [41] Dong X, Sun H, Gu C, et al. Reflective metasurface for generating vortex wave in ultra-wideband[C]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), Suntec City, Singapore,2018.
- [42] Yang L J, Sun S, Sha W E I. Manipulation of orbital angular momentum spectrum using shape - tailored metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials,2021,9(2).
- [43] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. Phase and dispersion engineering of metalenses: broadband achromatic focusing and imaging in the visible[DB/OL]. arXiv:1711.09343v1, 2017.
- [44] Al-Joumayly M A, Behdad N. A generalized method for synthesizing low-profile, band-pass frequency selective

- surfaces with non-resonant constituting elements[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(12):4033-4041.
- [45] Li M, Al-Joumayly M A, Behdad N, et al. Broadband True-Time-Delay microwave lenses based on miniaturized element frequency selective surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(3):1166-1179.
- [46] Wang S, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. Nature Communications, 2017, 8,187.
- [47] Cai T, Tang S, Zheng B, et al. Ultrawideband chromatic aberration-free meta-mirrors[J]. Advanced Photonics, 3(1),016001.
- [48] Zhu J, Yang Y, Mcgloin D, et al. 3-D printed All-Dielectric Dual-Band broadband reflectarray with a large frequency ratio[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(10): 7035-7040.
- [49] Liu M, Huo P, Zhu W, et al. Broadband generation of perfect Poincaré beams via dielectric spin-multiplexed metasurface[J]. Nature Communications, 2021, 12,2230.
- [50] 王万君. 贝塞尔高斯波束在湍流大气中的传输特性和应用[D].西安: 西安电子科技大学,2019.
- [51] Zhang Y, Jiang L. A Novel demultiplexing scheme for vortex beams in radio communication systems[J].IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(7):7243-7248.
- [52] 李永旭. 结构光场的特性及其在光通信中的应用研究 [D].西安: 西安电子科技大学,2020.
- [53] Durmin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. Physical review letters,1987,58(15).
- [54] Zhong Y C, Cheng Y J. Ka-Band wideband large Depth-of-Field beam generation through a phase shifting surface antenna[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64,(12): 5038-5045.
- [55] 钟熠辰. 宽带大景深准无衍射天线研究[D].成都: 电子科技大学,2020.
- [56] Zhong Y C, Cheng Y J. Wideband Quasi-Nondiffraction Beam with accurately controllable propagating angle and Depth-of-Field[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(10):5035-5042.
- [57] Yang X, Zhou Y, Wang G, et al. A wideband transmission metasurface for generating Bessel beam carrying orbital angular momentum[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019, 29(11).
- [58] Akram Z, Li X, Qi Z, et al. Wideband vortex beam reflectarray design using Quarter-Wavelength element[J].IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019,18(7): 1458-1462.
- [59] Li D, Wang X, Ling J, et al. Planar efficient metasurface for generation of Bessel beam and super-resolution focusing[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53,143.
- [60] Vaquero Á F, Pino M R, Arrebola M, et al. Bessel beam generation using dielectric planar lenses at millimeter frequencies[J].IEEE Access, 2020, 8: 216185-216196.
- [61] Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V, et al. Generation of the "perfect" optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator[J]. Optics Letters, 2013, 38(4):534-536.
- [62] Vaity P, Rusch L. Perfect vortex beam: Fourier transformation of a Bessel beam[J]. Optics Letters, 2015, 40(4):597-600.
- [63] Fu S, Du Y, Liu D, et al. Reconfigurable generation of double-ring perfect vortex beam[J].Optics Express,2021,29(11): 17353-17364.
- [64] Zhu F, Huang S, Shao W, et al. Free-space optical communication link using perfect vortex beams carrying orbital angular momentum (OAM) [J].Optics Communications, 2017,396 : 50-57.
- [65] Li Mengmeng. Free-space optical communication with finite acceptance aperture using concentric perfect optical vortex[C]. 2nd Information Communication Technologies Conference (ICTC), Nanjing, China ,2021.
- [66] Guo Z, Liu H, Xiang L, et al. Generation of perfect vortex beams with Polymer-Based phase plate[J].IEEE Photonics Technology Letters , 2020,32(10): 565-568.
- [67] Liu Y, Ke Y, Zhou J, et al. Generation of perfect vortex and vector beams based on Pancharatnam-Berry phase elements[J]. Scientific reports ,2017, 7, 44096.
- [68] Zhang Y, Liu W, Gao J, et al. Generating focused 3D perfect vortex beams by plasmonic metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(4).
- [69] Yang Y, Wang T, Wang K, et al. Generation of Terahertz superimposed perfect vortex beams[J]. IEEE Photonics Journal ,2021,13 (4).
- [70] Cui T J, Qi M Q, Wan X. et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J].

Light Sci Appl , 2014,3(e218) .

- [71] Giovampaola C D, Engheta N. Digital metamaterials[J]. Nature Mater, 2014,13:1115–1121.
- [72] Fang Z, Cheng Q, Cui T. Nonlinear quasi-Bessel beam generation based on the time-domain digital-coding metasurface[J]. Journal of Radars, 2021, 10(2): 267–273.
- [73] Bai X, Kong F, Sun Y, et al. High-efficiency transmissive programmable metasurface for Multimode OAM generation[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(17).
- [74] Shuang Y, Zhao H, Ji W, et al. Programmable High-Order OAM-Carrying Beams for direct-modulation wireless communications[J].IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2020,10(1): 29-37.
- [75] Al-Joumayly M A, Behdad N. A generalized method for synthesizing Low-Profile, Band-Pass frequency selective surfaces with non-resonant constituting elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010,58(12): 4033-4041.