

轨道角动量在无线通信中的研究新进展综述

孙学宏^{1,2,3}, 李 强^{2,3}, 庞丹旭^{2,3}, 曾志民¹

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 宁夏沙漠信息智能感知重点实验室, 宁夏银川 750021;
3. 宁夏大学物理电气信息学院, 宁夏银川 750021)

摘 要: 随着无线通信技术的蓬勃发展, 频谱利用率和系统容量已经趋近香农极限. 轨道角动量作为一项新型技术, 拥有高效频谱利用率和抗干扰能力, 引起了国内外学术界的关注. 本文首先介绍了轨道角动量的应用与无线通信系统的基本原理; 其次综述了轨道角动量在相关领域的研究进展, 并对轨道角动量产生的关键技术进行深入分析, 以及对现有的轨道角动量接收方法进行梳理总结; 最后在目前已有研究的基础上, 展望并提出了未来轨道角动量在无线通信研究及应用中需要重点解决和关注的一些突出问题, 包括携带轨道角动量涡旋电磁波的产生, 不同模式轨道角动量电磁波相互干扰的抑制, 轨道角动量模式的编码方式以及不同模式涡旋电磁波的分离与检测等方面.

关键词: 涡旋电磁波; 轨道角动量; 无线通信; 频谱效率; 无线数据编码; 抗干扰

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)11-2305-10

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.025

New Research Progress of the Orbital Angular Momentum Technology in Wireless Communication: A Survey

SUN Xue-hong^{1,2,3}, LI Qiang^{2,3}, PANG Dan-xu^{2,3}, ZENG Zhi-min¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
2. Key Laboratory of Intelligent Sensing for Desert Information, Yinchuan, Ningxia 750021, China;
3. School of Physics Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: With the rapid development of wireless communication technology, spectrum efficiency and system capacity has been close to the Shannon limit. As a new technology, the orbital angular momentum (OAM) has attractive properties of high spectrum utilization and anti-interference, arousing widespread concerns of domestic and foreign academics. Firstly, this paper reviews the application of OAM and the basic principle of wireless communication system. Then, it puts emphasis on the research progress of OAM in the related fields, mainly on the in-depth analysis for key technologies of generating OAM and the summary in existing method for receiving OAM. Finally, it looks into the future and proposes some prominent issues to be solved and focused on wireless communication research and application of OAM, including generation and reception of electromagnetic vortex waves carrying OAM, the suppression of the mutual interference of the OAM electromagnetic vortex waves in different modes, coding of OAM and the separation and detection of vortex waves carrying OAM in different modes and so on.

Key words: electromagnetic vortex waves; orbital angular momentum; wireless communication; spectrum efficiency; wireless data encoding; anti-interference

1 引言

根据经典电动力学理论^[1], 电磁辐射可以同时携带能量以及角动量, 角动量是由描述极化状态的自旋角动量 (Spin angular momentum, 简称 SAM) 和描述螺旋相位结构的轨道角动量 (Orbital angular momentum, 简称 OAM) 组成^[2]. 自旋角动量与光子的自旋相关, 呈现出一种圆偏

振的表现形式, 20 世纪初 Poynting 就预测了 SAM 的存在^[3], 但是直到 1936 年 Beth 通过实验验证之后 SAM 才被广泛应用. 而轨道角动量 (OAM) 是与光子的空间分布相关. 1992 年, Allen 和 Barnett 等人发现在近轴传播条件下, 光束的相位因子 $\exp(i l \varphi)$ 具有确定的轨道角动量 $l h$ 的特性^[4], (其中 l 是拓扑荷数, φ 是方位角, h 是普朗克常数). 无论在光学领域还是在无线电领域中, OAM

都是表征具有螺旋相位结构波形的自然属性. OAM 在光学中已经被广泛应用, 通过引入 OAM, 光通信系统的传输能力得到很大程度的扩展.

物理学理论表明光波也是电磁波, 最新的研究成果表明, OAM 已经不仅仅局限在光领域内, 也可以应用在无线电领域中. 2007 年, Thide 首次提出将光子轨道角动量应用于低频, 通过仿真验证了可以使用相控阵列天线产生类似拉盖尔高斯涡旋光束的涡旋电磁波, 开创了将轨道角动量应用在无线通信中的先河, 提出了利用涡旋电磁波用于扩大无线通信容量的设想^[5]. 2010 年 Mohammadi 系统研究了利用相控阵列天线产生携带 OAM 的电磁波束^[6], A. Tennant 等人进一步提出了一种时间开关阵列 (Time-switched array, 简称 TSA), 可以同时产生多个模态的 OAM 值^[7]. 2011 年, Tamburini 和 Thide 采用一种螺旋抛物面天线和八木天线验证了携带轨道角动量电磁波在无线通信信息传输中的可行性^[8]. 2012 年 8 月, 在上述装置的基础上, 利用相位干涉仪在接收端测量波束中电场的相位差, 验证了电磁涡旋波的抗干扰能力^[9]. 目前已经提出了轨道角动量的概念, 但迄今为止还未在无线通信中得到充分利用和发挥.

国内关于光学轨道角动量的研究综述很多^[10], 但针对无线通信领域的综述文献还比较少. 本文在总结、分析相关领域已有成果的基础上, 对涉及的相关信息进行了梳理, 首先对无线通信中轨道角动量的国内外研究现状和应用背景进行综述, 接着介绍了轨道角动量的几种产生方法, 同时对轨道角动量的接收方式做出了归纳总结, 最后对近期关于轨道角动量在无线通信领域中的研究热点进行了概括, 并对其发展趋势进行展望.

2 轨道角动量基本原理

电磁场的角动量可以表示为^[11]

$$\mathbf{J} = \int \epsilon_0 \mathbf{r} \times \text{Re} \{ \mathbf{E} \times \mathbf{B}^* \} dV \quad (1)$$

角动量可以分解为轨道角动量 (OAM) 和自旋角动量 (SAM)^[12,13]

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S} \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{L} = \epsilon_0 \int \text{Re} \{ i \mathbf{E}^* (\hat{\mathbf{L}}, \mathbf{A}) \} dV \quad (3)$$

$$\mathbf{S} = \epsilon_0 \int \text{Re} \{ \mathbf{E}^* \} dV \quad (4)$$

$\hat{\mathbf{L}} = -i(\mathbf{r} \times \nabla)$ 是轨道角动量算子^[14], $i = \sqrt{-1}$ 为虚数单位, \mathbf{A} 为矢量位函数. \mathbf{S} 表征的是电磁波的极化方式, \mathbf{L} 与电磁波空间相位分布有关.

将轨道角动量应用在电磁波中, 在正常的电磁波

中添加一个相位旋转因子 $\exp(il\varphi)$, 此时电磁波波前将不再是平面结构, 而是绕着波束传播方向旋转, 呈现出一种螺旋的相位结构, 涡旋电磁波可表示为

$$U(r, \varphi) = A(r) e^{il\varphi} \quad (5)$$

其中, $A(r)$ 为电磁波的幅值, r 表示到波束中心轴线的辐射距离, φ 为方位角, l 是轨道角动量的本征值.

相位旋转因子 $\exp(il\varphi)$ 决定了涡旋波束空间相位分布结构, 不同 OAM 模态涡旋波束的空间结构不同^[15], 本征值 $l=0, l=\pm 1, l=\pm 2, l=\pm 3$ 的空间螺旋相位波前如图 1 所示:

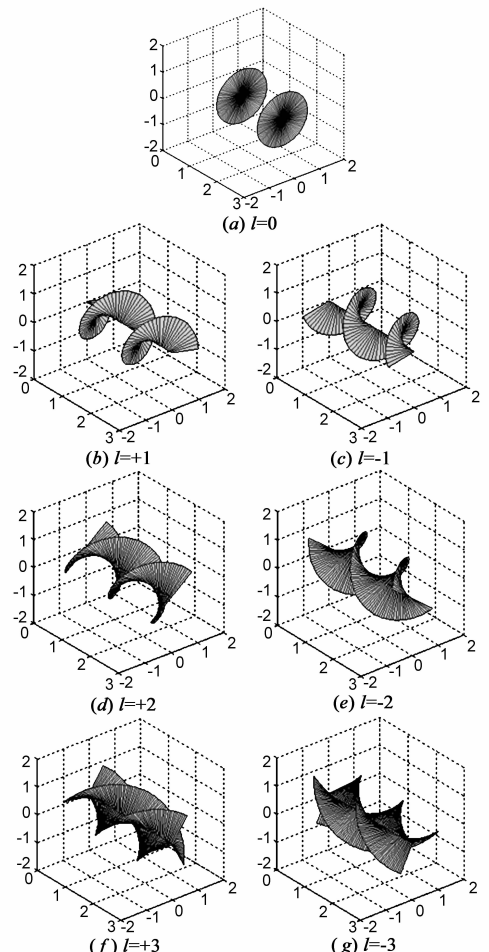


图1 不同OAM模态的涡旋电磁波相位波前

3 轨道角动量的产生与发射

目前, 对于轨道角动量的产生与发射方式主要有透射螺旋结构、透射光栅结构、螺旋反射面结构和天线阵列 4 种形式^[16], 如图 2 所示.

前两种方法源自于光学, 主要应用于相对较高的频率甚至到毫米波段^[17], 而后两种方法主要针对于较低频率. 下面基于轨道角动量的不同产生方式, 对现有的研究进展进行综述.

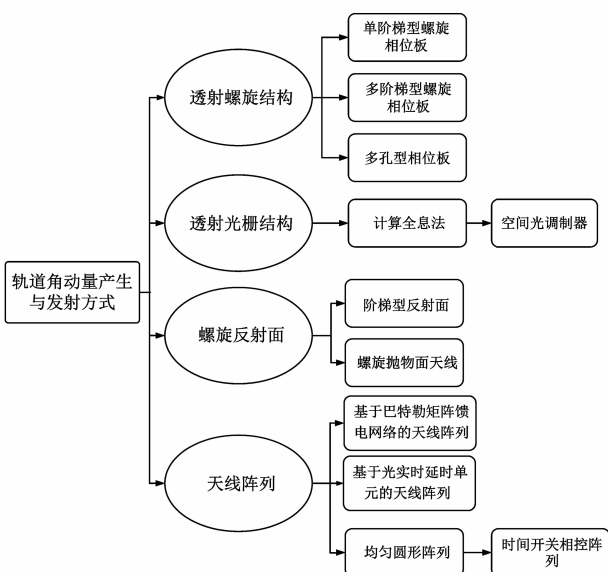


图2 轨道角动量产生与发射分类框图

3.1 透射螺旋结构

透射型螺旋结构包括单阶梯^[18]、多阶梯^[19]和多孔型^[20]螺旋相位结构,是将波束直接透过螺旋相位板,将正常的电磁波添加相位因子转变为扭曲波前结构,在波束中心位置产生相位奇点,形成电磁涡旋波。

3.1.1 单阶梯型螺旋相位板

螺旋相位板(Spiral phase plate,简称 SPP),是厚度相对中心旋转方位角 φ 成比例变化的透明板,表面结构类似于一个螺旋状的阶梯,如图 3 所示。当波束通过这个相位板时,由于相位板的螺旋面结构导致透射波束的波程差不同,引起相位的改变量也不同,从而产生一个具有螺旋特征的相位因子,使透射波束由正常电磁波变成具有螺旋特征的涡旋电磁波,通过改变螺旋相位板阶梯高度 Δh ,可以产生多种模态值 l 的螺旋波束,螺旋板的步幅高度 Δh 可以表示为:

$$\Delta h = l\lambda / (n - 1) \quad (6)$$

其中, l 为 OAM 模态值, λ 是透射波波长, n 是相位板材料折射率。

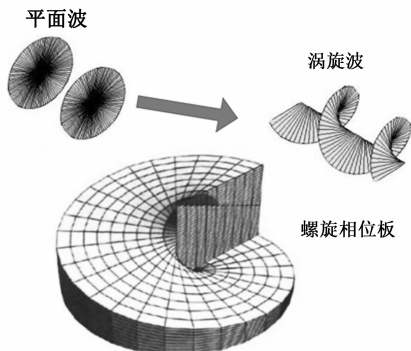


图3 平滑单阶梯型螺旋相位板

文献[18]中通过利用多个螺旋相位板实现了 32-Gbit/s 毫米波在 8 种模式下使用 4 种 OAM 模态(OAM 模态值 $l = -3, -1, +1$ 和 $+3$)、2 种极化方式在自由空间通信链路中的复用传输.实验参数如表 1 所示:

表 1 SPPs 实现 32-Gbit/s 毫米波复用传输实验参数

材料	高密度聚乙烯	
折射率	1.51 ($f = 28\text{GHz}$)	
相位板高度差	$l = \pm 1$	$h_1 = 2.07\text{cm}$
	$l = \pm 3$	$h_2 = 6.21\text{cm}$
相位板直径	30cm	
串扰	$l = \pm 1$	-25dB ~ -23dB
	$l = \pm 3$	-26dB ~ -25dB
误码率(BER)	$< 3.8 \times 10^{-3}$	

结合表 1 及实验结果分析可知,在接收端可以不经任何数字后处理,并且在 OAM 信道串扰较低的情况下就可以分开不同的数据流,在单极化 28GHz 窄带载波测得的串扰优于 -23dB,在双极化状态时串扰优于 -16dB,所测 8 个信道的误码率均低于 3.8×10^{-3} .因此,可以有效地利用前向纠错码(FEC)进行信息传输,并且同时发送多个重叠的空间模式,具有提高自由空间通信系统总容量以及提高频谱效率的潜力。

3.1.2 多阶梯型螺旋相位板

由于制作工艺的限制,实际操作中很难得到理想的呈现连续平滑相位分布的单阶梯螺旋相位板,取而代之的是多阶梯型螺旋相位板,表面结构类似于旋转的阶梯,同时相位的增加步幅也以阶梯的形式递增.多阶梯型螺旋相位板由多个紧凑的相位阶梯单元组成,相比连续平滑的单阶梯型相位板,用多个独立的相位阶梯来取代^[19].图 4 为平面波束透射到多阶梯型螺旋相位板产生螺旋相位波前的示意图。

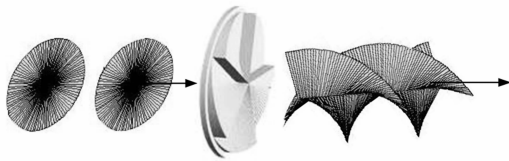


图4 多阶梯型螺旋相位板示意图

文献[19]所提出的多阶梯型螺旋相位板是由聚丙烯材料 RGD430 三维印刷而成.螺旋相位板的折射率为 1.638,在 0.1THz 下的吸收系数为 0.057mm^{-1} ,该实验使用平面螺旋相位板进行 OAM 的产生、发送、转换、检测和这些基本功能为太赫兹通信系统引入了一个新的自由度,有利于更广泛推广太赫兹 OAM 通信应用,例如成像和传感,为实现灵活的太赫兹 OAM 通信铺平

道路.

3.1.3 多孔型相位板

多孔型相位板结构类似于螺旋相位板是新型的平面相位板^[20,21].该相位板具有密度完全不同的孔分布,与上述相位板由角宽度变化实现相位延迟不同,该方法是在波束通过相位板时由钻孔引起介电常数的角度变化引起相位延迟^[20],如图5所示.

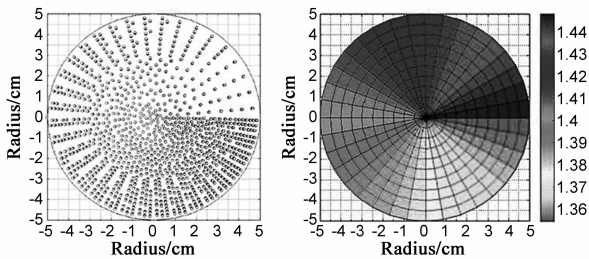


图5 多孔型相位板和折射率分布图

相对介电常数 ϵ_r 和方位角 θ 之间的关系如图5所示,由公式(7)定义得出,其中 Δ_n 为折射率的变化, n_m 是材料的折射率:

$$\epsilon_r(\theta) = \theta^2 \Delta_n^2 / (2\pi l)^2 - \theta n_m \Delta_n / \pi l + n_m^2 \quad (7)$$

相位板孔分布是方位角 θ 的函数,如图5所示相位板的不均匀孔分布使折射率从1.35至1.45变化,可以获得对应于一个 OAM 拓扑荷 $|l| = 1$ 的 $\pm 2\pi$ 旋转相位波前.公式(8)所示孔体积 V_h 和相对介电常数 $\epsilon_r(\theta)$ 之间的关系:

$$V_h(\theta) = (\epsilon_r(\theta) - n_m^2) / (1 - n_m^2) \quad (8)$$

3.2 透射光栅结构

透射光栅结构功能类似于螺旋相位结构,利用计算全息法(Computer generated hologram,简称CGH)经过模拟仿真生成全息板(Holographic plate,简称HP),并利用该全息板生成携带 OAM 的电磁波,如图6所示为实际制作的全息板模型^[22].

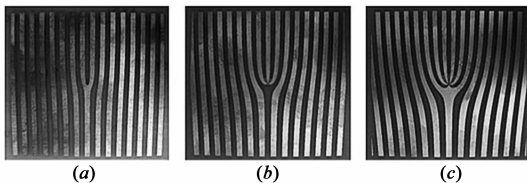


图6 全息板的实际模型

计算全息法就是利用波前再现的方式根据所需要的 OAM 模式由计算机模拟生成波场的方法,其关键步骤是由计算机制作相位全息图.将轨道角动量 OAM 添加到毫米波束,由于涡旋波束具有特殊的螺旋相位结构,在发生干涉时产生的干涉条纹分布图案中会含有交叉位错结构,错位数与拓扑荷值相同,然后用特殊介质来记录这些图案就制作成了可以获取涡旋波束的叉

形光栅,从而得到相位全息图.根据计算机仿真的输出数据钻刻出所需形状的介质板,用来制作相位全息面,波束照射在制作好的全息光栅上,就形成了我们需要的各种拓扑荷值的涡旋波束^[23],实验装置如图7所示.

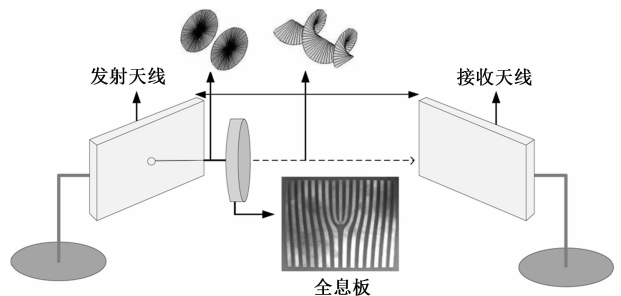


图7 全息法产生OAM装置图

因此,可以利用计算机仿真软件产生全息板的方法,用来在毫米波段产生 OAM 信号.在文献[23]中,通过 Matlab 编码控制印刷电路板路由器,在介质板上根据所需 OAM 模式制作相位全息板,再将波束通过制作好的全息板,就可以产生所需模式的轨道角动量,利用实验证明了 4-Gbps 未压缩视频在 60GHz 频段的 OAM 无线信道上可以成功传输,这种基于 OAM 和全息波束形成的空间复用将会进一步提高系统容量.

空间光调制器法(Spatial light modulator,简称SLM)也是计算全息法的一种,它采用的是计算机控制方式,操作更为简单快捷,直接将电脑上的图像加载到 SLM 上,减化了制作全息光栅的复杂过程^[24].

按照信号的输出方式,可以将 SLM 分为反射型空间光调制器和透射型空间光调制器.在空间光调制器的作用下,我们可以得到各种本征值的涡旋波束相互作用产生的干涉图样.如图8所示,在使用反射式纯相位型液晶空间光调制器(SLM)产生涡旋波的方法中,把程序编好并将模拟出不同本征值的涡旋波束干涉全息图加载到空间光调制器上,通过观察相位全息图中心

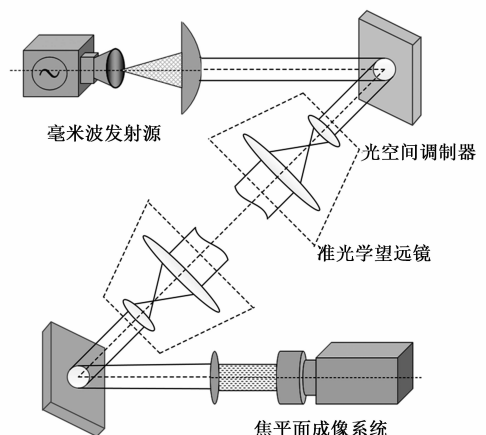


图8 反射型空间光调制器OAM通信系统

条纹分叉数量和分叉位错的方向来识别涡旋波束的本征值和螺旋方向。

3.3 螺旋反射面

螺旋反射面结构可分为阶梯型反射面和螺旋抛物面,当波束入射到反射面上时,由于反射面的这种非平面螺旋结构,波前的不同区域会在反射面上引起波束相邻部分有一个相对延迟,从而达到波前扭曲的效果。要生成不失真的涡旋电磁波,这类通过反射产生 OAM 波束的装置要求反射器的轴线与电磁波波束中心绝对平行。

3.3.1 阶梯型反射面

文献[25]中设计通过将聚苯乙烯泡沫塑料块雕制成 8 阶梯结构的反射面,构成一个阶梯状螺旋反射器如图 9 所示,各个阶梯之间有 $\pi/4$ 的相位阶跃,当波束入射时,会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,利用该反射面所能产生的 OAM 模态值可以表示为:

$$l = \frac{2\mu_c}{\lambda} \left(\frac{N+1}{N} \right) \quad (9)$$

其中, N 为离散的阶梯数, μ_c 为阶梯的总表面间距, λ 为入射波波长^[25,26]。

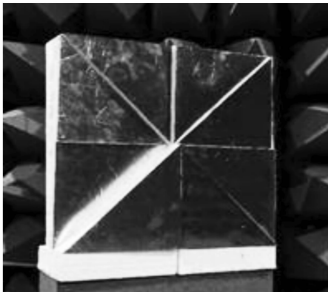


图9 阶梯状螺旋反射器

3.3.2 螺旋抛物面天线

螺旋抛物面天线是对阶梯状螺旋反射器的改进,采用一种螺旋型抛物面结构的天线来产生涡旋电磁波^[8,27,28]。根据阶梯型反射面中的公式(9),当阶梯数 N 趋于无穷时,

$$l = \frac{2\mu_c}{\lambda} \quad (10)$$

同时阶梯型反射面理想化成为一个螺旋抛物面结构的反射面。如图 10 所示。

2011 年, B. Thide 等人利用螺旋抛物面天线和八木天线首次验证了携带轨道角动量的电磁波在无线通信中进行信息传输的可行性^[8]。实验采用螺旋抛物面天线和八木天线分别产生 OAM 模态 $l = 1$ 的涡旋电磁波和 $l = 0$ 的正常电磁波,并在同一频点上,以不同的 OAM 模态值对不同的波束进行编码传输。在接收端利

用两个天线构成一个相位干涉仪,利用相位干涉法来识别两个 OAM 的模态值。实验原理图如图 11。



图10 螺旋抛物面天线

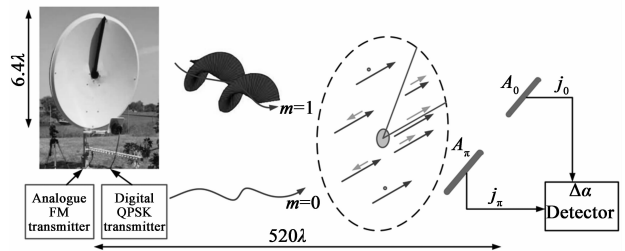


图11 OAM无线传输验证实验

2012 年,该小组采用上述实验装置进一步验证电磁涡旋波的抗干扰能力,实验结果表明 OAM 信号在相同载频、较强宽频带干扰和地面反射干扰条件下,OAM 编码技术与相位编码技术是兼容的,且二者互不影响;同时,OAM 编码技术对于同频宽带干扰和地面反射具有鲁棒性^[9]。实验中所使用的八木天线及抛物面天线主要参数特性如表 2 和表 3 所示。

表 2 八木天线主要参数性质

工作频率范围 (MHz)	2400 – 2480
平均增益	16.5dBi
尺寸	45cm × 5cm × 4cm
垂直/水平辐射	35°
阻抗	50Ω
(电压驻波比)SWR	< 1.3

表 3 螺旋抛物面天线设计所需的方位角高度

方位角	高度(以波长 λ 为单位)位)	高度(cm)
2π	1/2	6.25
π/2	3/4	4.69
π	1/4	3.12
3π/2	1/8	1.56

结合上表的实验参数分析,通过使用螺旋抛物面天线,在每个无线涡旋信道上采用基于 OAM 模态的密集编码技术,可以显著提高频带利用率。此外,实验结果同时表明,即使是在远场区或者非相干非单色波束

上,这种空间相位特征可以被完整保存下来.这些结果在无线通信中开辟了新的前景,提供一种解决频带饱和问题的具体方案.

3.4 相控天线阵列

天线阵列是产生携带 OAM 波束的典型方法^[29,30],其中对阵列单元馈送相同的信号,但是各阵子之间有相继连续的相位延迟,使得涡旋波束围绕轴线旋转一周后,相位增加 $2\pi l$,可以通过改变阵元之间馈电相位差来产生不同的 OAM 模式^[31,32].

3.4.1 圆形相控阵列

携带 OAM 的波束可以通过 N 个阵元的相控圆形阵列来产生^[33,34],使用简单的偶极子天线作为天线阵元,阵子相互之间等间隔均匀分布排列在圆周上,阵列单元被馈送相同的信号,相邻两个阵元间的相位差表示为 $\delta\varphi = 2\pi l/N$, N 为阵元数, l 为所需要的 OAM 模式值^[5,6],天线结构如图 12 所示:

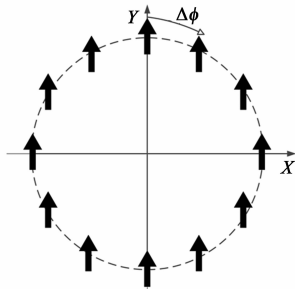


图 12 圆形阵列天线结构

需要注意的是,阵列天线阵元的数目决定所能产生的 OAM 模式的最大值^[35,36],即满足 $-N/2 < l < N/2$,其中 N 是阵列中阵元的个数^[37,38].文献[29]设计出一种圆形贴片相控阵天线,参数如表 4 所示,这种天线薄、重量轻并且易于制造,利用该阵列天线可以实现 10GHz 频段产生携带轨道角动量的电磁涡旋波,同时对该贴片天线间互耦效应进行了优化,给出了一种产生 OAM 波束的新思路^[29].

表 4 阵列天线主要参数特性

阵元间距	2.49mm
阵元个数	8
半径	15mm
阵元尺寸	6.8mm × 6mm
相位差	45°
工作频率	10GHz
增益	4.6dB
辐射总效率	59%

时间开关阵列(Time-switched array,简称 TSA),是实现相控阵天线功能的另一种方法,但成本低得多^[7,39].

时间开关阵列(TSA)的基本原理是使用时间作为附加参数,用高速射频(RF)开关周期性地通过控制阵列的阵元打开或者关闭,以这样的方式由阵列的辐射模式实现预定功能.利用 TSA 的基本功能,得出圆形 TSA 可以生成多个 OAM 辐射模式.

文献[7]中,以模拟的形式得出圆形时间开关阵列可以生成 OAM 辐射模式,并对由 TSA 产生的 OAM 模式与类似几何形状的圆形相控阵产生的 OAM 进行比较.圆形相控阵系统必须使用特定的、个别的相移,产生不同的 OAM 模式.相比之下,TSA 可以在开关周期的谐波频率内同时生成多种 OAM 模式^[7].

3.4.2 基于巴特勒矩阵馈电网络的阵列

巴特勒矩阵主要由 3dB 定向耦合器、交叉耦合器和移相器组成^[40].信号从输入端口分别输入时,被平均分配到各个输出端口,同时使各个输出端口之间保持一定的相位差.文献[41]设计将 8×8 巴特勒矩阵放置在阵列天线前面,形成一个天线阵列馈电网络,如图 13 所示.在所述矩阵的每一个输入端增加一个适当的相位梯度,由此生成一个波束携带所需的 OAM,将产生的 8 束携带不同 OAM 的涡旋电磁波以相同的频率在多个信道进行信息传输,同时完成多个 OAM 模式的发射和接收^[41].实验所设计 8×8 巴特勒矩阵的参数要求如表 5 所示.

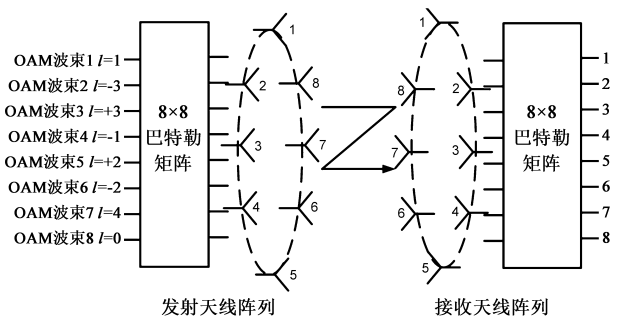


图 13 巴特勒矩阵馈电网络传输原理图

表 5 8×8 巴特勒矩阵设计参数

材料	Rogers TMM4
介电常数	4.5 ± 0.045
厚度(mm)	3.175
频率	2.45GHz
带宽	2.35GHz - 2.55GHz (~8%)
S11	$< -10\text{dB}$
相位分布	10°
幅度分布	1dB
插入损耗	$< 1\text{dB}$
OAM 模式值	$0, \pm 1, \pm 2$

通过对上表的分析可以看出,在微带技术中提出将信号经过一个 8×8 巴特勒矩阵馈送到环形天线阵列,产生携带不同 OAM 的信号,这些信号可以在多个信

道上进行同频传输. 所设计的矩阵应尽可能减少在平面布局内微带线的交叉数目, 较少的交叉数目能够降低微带线之间的耦合性, 并可以保持一个相对较大的带宽(8%的相对带宽)以及良好的射频性能.

3.4.3 基于光实时延时单元(Optical true time delay unit, 简称 OTTD)的天线阵列

实时延时(TTD)系统是将相对于光频来说频率极低的电信号调制到光波上, 再对这个光波通过光纤传输进行延时, 然后将电信号在光探测器中提取, 提取出的电信号在相位上形成一定的延时^[42].

文献[43]第一次提出了用于产生携带轨道角动量的射频(RF)信号的光实时延时(OTTD)系统^[43]. 将 OTTD 单元连接到圆形天线阵列, 如图 14 所示, 采用这种天线结构可以精确地提供螺旋相位变化, 用于产生携带 OAM 的射频波束, 因此可以方便地形成不同状态(拓扑电荷)的 OAM 电磁波束. 该系统的突出优点是, 支持以相同的频率对携带的 OAM 状态的 RF 信号进行多路复用或者解复用, 用于增加无线通信系统的容量和效率.

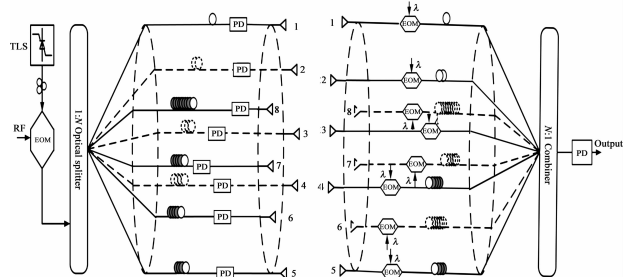


图14 OTTD系统原理图

4 轨道角动量的接收与检测

涡旋电磁波的接收, 关键在于如何“去旋转”, 目前的解决思路是在接收端对涡旋电磁波进行反向相位旋转^[44], 即在涡旋电磁波上添加一个反向旋转相位因子 $e^{-jl\varphi}$, 难点在于如何确定涡旋电磁波的本征值 l .

现阶段在涡旋电磁波接收方面的研究主要是测量和检测涡旋电磁波的本征值 l . 依据现有文献, 针对轨道角动量的接收与检测方法主要有:

4.1 干涉法

干涉法基本原理是通过引入一束参考波与涡旋波进行干涉, 通过分析干涉条纹的形状与数量来确定涡旋波的拓扑荷(轨道角动量)及其位置^[45]. 如果待测波束中包含相位奇点, 该处的干涉条纹会出现位错或分叉, 出现位错的位置就表示相位奇点的位置, 同时由于干涉条纹的分叉数, 可以判断出涡旋波的拓扑荷.

文献[45]将一束平面电子波通过由石墨薄膜堆叠而成的螺旋相位板, 产生在自由空间中具有相位奇点

的涡旋电子波束. 涡旋波束和透射电子显微镜中平面电子波之间的干涉图案显示出波束携带拓扑电荷的相位奇点位置及干涉条纹的形状, 确定出轨道角动量^[45], 如图 15 所示.

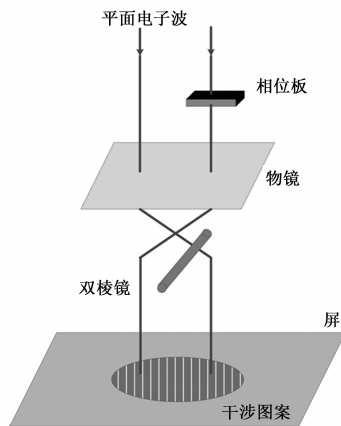


图15 电子干涉法原理图

4.2 相位梯度法

携带轨道角动量的波束具有螺旋相位波前的独特特征, 可以通过分析相位差来确定 OAM 的模态值, 这种方法被称为相位梯度法^[46]. 在以波束轴为中心的远端圆上设立两个接收器, 通过两根天线的相位采样本计算接收波束的 OAM 模态^[33]. 接收原理如图 16 所示, 两个接收器的相位样本分别是 $\varphi_1^{\text{electric}}$, $\varphi_2^{\text{electric}}$, 与波束中心形成扇形的角度为 β , OAM 的模态值 l 为:

$$\frac{\varphi_1^{\text{electric}} - \varphi_2^{\text{electric}}}{\beta} = l \quad (11)$$

图 16 中, 浅色圆点表示阵列天线阵元, 深色圆点表示两个接收器, 通过接收器之间的相位差可以很容易得到接收波束的 OAM 模态值. 文献[38]中, 设立两个相邻的接收器, 观察接收电场辐射图, 可以得出 OAM 的模态数, 通过两个接收器接收信号的相位延迟判断 OAM 模态值的正负号^[38].

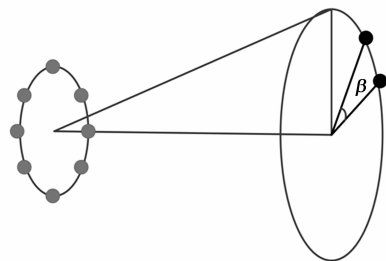


图16 相位梯度法原理图

4.3 其它轨道角动量接收与检测方法

除了上述方法, 还有许多其他的 OAM 接收与检测方法, 包括直接转矩测量法^[47], 三角测量法^[47], 三极子

天线阵列测量法^[47], 单点测量法^[46], 旋转多普勒效应^[5]以及利用逆向螺旋相位板^[19], 天线阵列^[47]全息图^[48], 辐射模式图^[47]等方法.

5 总结与展望

迅速发展的现代通信系统面临着巨大挑战, 在采用高度加密编码和信道共享技术后, 对于有限的无线电频谱资源, 亟需提高数据传输速率和无线电频谱的利用率^[49,50]. 因此, 轨道角动量(OAM)作为一种新技术备受关注, 但大多数的研究和应用都还集中在光学领域, 在无线通信领域中还处于探索阶段. 为了进一步研究轨道角动量在无线通信中的发展前景, 在结合本文的前提下, 可以综合考虑以下问题:

(1) 对于轨道角动量的产生, 根据希尔伯特空间理论, 任意 OAM 态的电磁涡旋波均可在特征模态空间上进行分解, 张成一个无穷维的 Hilbert 空间^[51], 即理论上可以调制无限多信息, 目前对于产生 OAM 模态的研究, 现阶段仅局限在本征值为整数部分.

(2) 由于涡旋电磁波具有特殊的螺旋相位波前结构, 在电磁波传播过程中, 极易受到传输环境因素的影响, 包括大气湍流、雨雾等^[52], 破坏其空间波前结构, 使不同 OAM 模态之间信息传输产生干扰^[53].

(3) 针对于 OAM 模态的编码方式^[54], 近期主要有两种研究方向, 一种是对 OAM 本身进行编码, 另一种是以携带 OAM 电磁波作为载波进行信息传输, 目前在该领域研究较少, 对 OAM 进行编码信息传输仍是一个难点.

(4) 在无线通信系统中, 对于调制在涡旋电磁波上的信息, 如何对其进行有效的分离和检测, 是当前所面临的巨大挑战之一.

参考文献

[1] Jackson J D. Classical electrodynamics[M]. New York etc.: Wiley, 1962. 24 - 47.

[2] Cohen-Tannoudji C, Dupont-Roc J, Grynberg G. Introduction to the covariant formulation of quantum electrodynamics[M]. USA: Wiley-VCH Verlag GmbH, 1989. 361 - 455.

[3] Poynting J H. The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1909, 82(557): 560 - 567.

[4] Allen L, Beijersbergen M. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185 - 8189.

[5] Thidé B, Then H, Sjöholm J, et al. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain[J].

Physical Review Letters, 2007, 99(8): 87 - 91.

[6] Mohammadi S M, Daldorff L K S, et al. Orbital angular momentum in radio-a system study[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(2): 565 - 572.

[7] Tennant A, Allen B. Generation of radio frequency OAM radiation modes using circular time-switched and phased array antennas[A]. LAPC. Antennas and Propagation Conference[C]. Loughborough, UK: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012. 1 - 4.

[8] Tamburini F, Mari E, et al. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test[J]. New Journal of Physics, 2012, 14(3): 001 - 017.

[9] Tamburini F, Thidé B, Boaga V, et al. Experimental demonstration of free-space information transfer using phase modulated orbital angular momentum radio[J]. ArXiv Preprint ArXiv, 2013, 13(02): 20 - 25.

[10] 张宏科, 姚琳元, 宋飞. 无源光网络标准发展及关键技术研究[J]. 电子学报, 2015, 43(3): 557 - 567.

ZhangHongke, Yao Linyuan, et al. Development of standards and research on key technology in passive optical network[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(3): 557 - 567. (in Chinese)

[11] Nevels R, Kish L. Twisted waves: concept and limitations[J]. Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI) on IEEE, 2013, 978(1): 1460 - 1461.

[12] Barnett. Optical angular-momentum flux[J]. Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics, 2002, 4(2): 7 - 16.

[13] Humblet J. Sur le moment d'impulsion d'une onde électromagnétique[J]. Physica, 1943, 10(7): 585 - 603.

[14] Beth R A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light[J]. Physical Review, 1936, 50(2): 1 - 15.

[15] Sjölm J, Palmer K. Angular momentum of electromagnetic radiation. Fundamental physics applied to the radio domain for innovative studies of space and development of new concepts in wireless communications[J]. ArXiv Preprint ArXiv, 2009, 0190(1): 5 - 9.

[16] 晋军, 邵尉, 孟凡秋. 涡旋电磁波在军事无线通信中的应用[J]. 通信技术, 2014, 09(02): 985 - 988.

Jin Jun, Shao Wei, et al. Application of vortex electromagnetic wave in military wireless communication[J]. Communications Technology, 2014, 09(02): 985 - 988. (in Chinese)

[17] Turnbull G A, Robertson D A, Smith G M, et al. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre-wave frequencies by use of a spiral phaseplate[J]. Optics Communications, 1996, 127(4): 183 - 188.

[18] Yan Y, Guodong X, et al. Demonstration of 8-mode 32-Gbit/s millimeter-wave free-space communication link using 4 orbital-angular-momentum modes on 2 polarizations[A]. NSW. IEEE International Conference on IEEE[C]. Sydney: Commu-

- nications(ICC), 2014. 4850 – 4855.
- [19] Zhu L, et al. Experimental demonstration of basic functionalities for 0.1-THz orbital angular momentum(OAM) communications [A]. CA Optical Fiber Communication Conference [C]. San Francisco: Optical Society of America, 2014. 3 – 7.
- [20] Beniss A, Niemiec R, et al. Flat plate for OAM generation in the millimeter band [A]. Eu CAP 2013-European Conference [C]. Gothenburg: Antennas & Propagation, 2013. 3203 – 3207.
- [21] Cheng L, Hong W, Hao Z C. Generation of electromagnetic waves with arbitrary orbital angular momentum modes [J]. Scientific Reports, 2014, 4814 (4): 1 – 4.
- [22] Mahmoudi F E, Walker S D. 4-Gbps uncompressed video transmission over a 60-GHz orbital angular momentum wireless channel [J]. Wireless Communications Letters on IEEE, 2013, 2(2): 223 – 226.
- [23] Mahmoudi F E, et al. Orbital angular momentum generation in a 60-GHz wireless radio channel [A]. IEEE 20th Telecommunications Forum [C]. Belgrade: TELFOR, 2012. 315 – 318.
- [24] Jiang Y, et al. Wireless communications using millimeter-wave beams carrying orbital angular momentum [A]. CMC' 09. Communications and Mobile Computing, 2009 [C]. Yunnan: WRI International Conference on IEEE, 2009. 495 – 500.
- [25] Tamburini F, Mari E, et al. Experimental verification of photon angular momentum and vorticity with radio techniques [J]. Applied Physics Letters, 204102(2011), 99(20): 1 – 3.
- [26] Thidé B, Tamburini F, Mari E, et al. Radio beam vorticity and orbital angular momentum [J]. ArXiv Preprint ArXiv, 2011, 6015(01): 01 – 11.
- [27] Vaishnavi V, Priya V G, Devi S, et al. Simulation of helical modulation in a focal plane array [A]. ICCSP. Communications and Signal Processing [C]. Melmaruvathur: 2014 International Conference on IEEE, 2014. 1414 – 1418.
- [28] Singh R P, Poonacha P G. Survey of techniques for achieving topological diversity [A]. NCC. Communications [C]. New Delhi, India: IEEE, 2013. 1 – 5.
- [29] Bai Q, Tennant A, Allen B, et al. Generation of orbital angular momentum(OAM) radio beams with phased patch array [A]. LAPC. Antennas and Propagation Conference [C]. Loughborough, UK: IEEE, 2013. 410 – 413.
- [30] Bai Q, Tennant A, Cano E, et al. An experimental phased array for OAM generation [A]. LAPC. Antennas and Propagation Conference [C]. Loughborough, United Kingdom: IEEE, 2014. 165 – 168.
- [31] Opare K A, Kuang Y. Performance of an ideal wireless orbital angular momentum communication system using multiple-input multiple-output techniques [A]. TEMU. Telecommunications and Multimedia [C]. Heraklion: IEEE, 2014. 144 – 149.
- [32] Zhang Y, Feng W, Ge N. On the restriction of utilizing orbital angular momentum in radio communications [A]. CHINA-COM. Communications and Networking in China [C]. Guilin: IEEE, 2013. 271 – 275.
- [33] Wu H, Yuan Y, Zhang Z, et al. UCA-based orbital angular momentum radio beam generation and reception under different array configurations [A]. WCSP. Wireless Communications and Signal Processing [C]. Hefei: IEEE, 2014. 1 – 6.
- [34] Bai Q, Tennant A, Allen B. Experimental circular phased array for generating OAM radio beams [J]. Electronics Letters, 2014, 50(20): 1414 – 1415.
- [35] Niemiec R, Brousseau C, Mahdjoubi K, et al. Characterization of an OAM flat-plate antenna in the millimeter frequency band [J]. Antennas and Wireless Propagation Letters on IEEE, 2014, 13(13): 1011 – 1014.
- [36] Niemiec R, Brousseau C, Mahdjoubi K, et al. Characterization of an OAM antenna using a flat phase plate in the millimeter frequency band [A]. EuCAP. Antennas and Propagation [C]. The Hague: IEEE, 2014. 3006 – 3010.
- [37] Bai X, Jin R, Liu L, et al. Generation of OAM radio waves with three polarizations using circular horn antenna array [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2014, 2014 (501): 132 – 143.
- [38] Deng C, Chen W, Zhang Z, et al. Generation of OAM radio waves using circularvaldi antenna array [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013, 2013(10): 1 – 7.
- [39] Tennant A, Allen B. Generation of OAM radio waves using circular time-switched array antenna [J]. Electronics Letters, 2012, 48(21): 1365 – 1366.
- [40] 文瑞虎, 王海彬, 等. 基于基片集成波导的巴特勒矩阵馈电网络 [J]. 探测与控制学报, 2012, 33(5): 29 – 33. Wen Ruihu, Wang Haibin, et al. Substrate integrated waveguide butler matrix feed network [J]. Journal of Detection & Control, 2012, 33(5): 29 – 33. (in Chinese)
- [41] Palacin B, Sharshavina K, Nguyen K, et al. An 8 × 8 Butler matrix for generation of waves carrying orbital angular momentum(OAM) [A]. EuCAP. Antennas and Propagation [C]. The Hague: IEEE, 2014. 2814 – 2818.
- [42] 史双瑾, 邱琪, 廖云, 等. 光实时延时技术进展 [J]. 半导体光电, 2009, 30(4): 486 – 491. Shi Shuangjin, Qiu Qi, Liao Yun, et al. Progresses on optical true-time-delay technologies [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(4): 486 – 491. (in Chinese)
- [43] Gao X, Huang S, Zhou J, et al. Generating, multiplexing/demultiplexing and receiving the orbital angular momentum of radio frequency signals using an optical true time delay unit [J]. Journal of Optics, 2013, 15(105401): 1 – 6.
- [44] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. Advances in Optics and Photonics, 2011, 3(2): 161 – 204.

- [45] Uchida M, Tonomura A. Generation of electron beams carrying orbital angular momentum[J]. Nature, 2010, 464(7289): 737 – 739.
- [46] Mohammadi S M, Daldorff L K S, Forozesh K, et al. Orbital angular momentum in radio: measurement methods[J]. Radio Science, 2010, 45(4): 1 – 14.
- [47] Then H, et al. Detecting orbital angular momentum in radio signals[J]. ArXiv Preprint ArXiv, 2008, 11(7): 41 – 45.
- [48] Verbeeck J, Tian H, Schattschneider P. Production and application of electron vortex beams[J]. Nature, 2010, 467(7313): 301 – 304.
- [49] Yuan C, Wen Y, et al. Directional beamforming for high-speed railway communications with frequency offset precorrection[J]. Chinese Journal of Electronics, 2014, 23(1): 163 – 168.
- [50] Shi Yan, S M L J. Max-flow capacity for multi-hop mobile wireless networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(4): 713 – 718.
- [51] 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, et al. Electromagnetic vortex based radar target imaging[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(6): 71 – 76. (in Chinese)
- [52] 盛楠, 廖成, 张青洪, 等. 预测毫米波雾衰减的抛物方程模型研究[J]. 电子学报, 2014, 42(5): 958 – 962.
Sheng Nan, Liao Cheng, et al. The parabolic equation model for estimation fog attenuation at millimeter wave lengths[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(5): 958 – 962. (in Chinese)
- [53] 邹丽, 赵生妹, 王乐. 大气湍流对轨道角动量态复用系统通信性能的影响[J]. 光子学报, 2014, 43(09): 58 – 63.
Zou Li, et al. The effects of atmospheric turbulence on orbital angular momentum-multiplexed system [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(09): 58 – 63. (in Chinese)
- [54] Allen B, Tennant A, Qiang B, et al. Wireless data encoding and decoding using OAM modes [J]. Electronics Letters, 2014, 50(3): 232 – 233.

作者简介



孙学宏 男, 1974 年生于宁夏灵武市. 北京邮电大学信息与通信工程学院博士研究生. 宁夏大学物理电气信息学院副教授, 硕士生导师. 研究方向为新一代宽带无线通信技术与网络.
E-mail: sunxh@bupt.edu.cn



李强 男, 1989 年生于山东临沂. 宁夏大学物理电气信息学院硕士研究生. 研究方向为宽带无线通信技术.



庞丹旭 男, 1992 年生于陕西咸阳. 宁夏大学物理电气信息学院硕士研究生. 研究方向为宽带无线通信技术与网络.



曾志民 男, 1956 年生于北京市, 北京邮电大学下一代通信系统理论与技术研究室主任、责任教授、博士、博士生导师. 研究方向新一代宽带无线通信技术与网络.