

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.10.001

引用格式:李蹊,冯志勇,冯建元,等.电磁涡旋及其在无线通信中的应用[J].电讯技术,2015,55(10):1067-1073. [LI Xi,FENG Zhiyong,FENG Jianyuan,et al. Electromagnetic Vortex and Its Application in Wireless Communication[J]. Telecommunication Engineering,2015,55(10):1067-1073.]

电磁涡旋及其在无线通信中的应用*

李 蹊**,冯志勇,冯建元,张奇勋

(北京邮电大学 泛网无线通信教育部重点实验室,北京 100876)

摘 要:随着移动数据需求的飞速增长,频谱资源紧缺的问题已成为限制无线通信产业发展的瓶颈。电磁涡旋作为一项新的传输技术,引入轨道角动量这一新的复用维度,可以实现在同一频带同时传输多路信息,有望极大地提高通信系统的容量,有效解决频率资源短缺的问题。详细分析了电磁涡旋的结构和性质,概述了电磁涡旋的国内外研究进展,阐述了电磁涡旋的产生与接收方法及复用技术原理,指出了电磁涡旋面临的挑战与后续研究建议。

关键词:无线通信;电磁涡旋;轨道角动量;通信系统容量;研究进展

中图分类号:TN014 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)10-1067-07

Electromagnetic Vortex and Its Application in Wireless Communication

LI Xi,FENG Zhiyong,FENG Jianyuan,ZHANG Qixun

(Key Laboratory of Universal Wireless Communications,Ministry of Education,
Beijing University of Posts and Telecommunications,Beijing 100876,China)

Abstract: With the rapid growth in demand for the mobile data,the lack of spectrum resources has become a serious problem which restrains the development of wireless communication industry. As a new transmission technology,electromagnetic (EM) vortex beams,transmitted on the same frequency,can be used to send multi-path of information simultaneously since it utilizes the orbital angular momentum(OAM) as a new multiplexing dimension. It may not only improve the bandwidth efficiency and system capacity greatly, but also solve the problem of the shortage of frequency resources effectively. In this paper,the structures and characters of EM vortex are analyzed in detail. The domestic and abroad progress of EM vortex is systematically summarized.The ways to transmit and receive EM vortex and the principles of EM vortex in multiplexing are presented. Challenges in the application of EM vortex in wireless communication and suggestions for further research are pointed out.

Key words: wireless communication;electromagnetic vortex;orbital angular momentum;system capacity; research progress

1 引 言

近年来手机、平板电脑等移动智能终端的普及和相关数据服务技术的飞速发展,促使无线业务需求呈现爆炸式增长。但是,无线资源的有限性、独占性和稀缺性极大地限制了无线通信技术的发展,为

此人们先后研究了时分多址(Time Division Multiple Access,TDMA)、码分多址(Code Division Multiple Access,CDMA)、正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,OFDM)等多种复用技术来提高无线频谱的利用率。

* 收稿日期:2015-03-17;修回日期:2015-05-26 Received date:2015-03-17;Revised date:2015-05-26
基金项目:国家自然科学基金资助项目(L1222026)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. L1222026)

** 通讯作者:xlclzy1130@163.com Corresponding author:xlclzy1130@163.com

然而,从马可尼时代开始的无线通信技术一直主要是以信号的幅度、相位、频率等形式利用电磁波辐射的线性动量进行信息传输,并且在同一时间、同一码域里一个频带只能传输一路信息,其容量已经接近物理极限,故需要探索新的技术来满足未来移动数据的需求。2007 年,瑞典空间物理所的 Thidé 等人从带有轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 的涡旋光束的研究中受到启发,并结合涡旋光束相关理论与技术,提出了电磁涡旋 (EM Vortex) 这一概念,提出了利用电磁涡旋可以提高通信系统容量和效率的设想^[1]。电磁涡旋是带有 OAM 的电磁波,也称作 OAM 波束。由于 OAM 理论上具有无限的相互正交的模式态,因而可以将 OAM 作为除了时间、频率、码字以外的一种新的物理复用维度,利用这些正交的状态传输信息,就有望大幅度提高通信系统的容量和效率,这为研究无线通信频谱资源紧缺的问题提供了一个新的思路。本文梳理、总结了电磁涡旋最新研究成果,相关内容可为无线通信工作者提供新的观点和借鉴。

2 电磁涡旋的原理

2.1 轨道角动量

由经典电磁场理论可知,电磁辐射同时带有能量和动量,其中动量又包括线性动量和角动量。线性动量与力的作用、平移力学相关,而角动量与力矩作用、转动力学相联系。一般来说,某区域的电磁场角动量可进一步表示为^[2]

$$J=L+S。$$
 (1)

式中, S 为自旋角动量 (Spin Angular Momentum, SAM), SAM 如同质量、电荷一样,是经典电磁场的一种固有属性,描述了电磁场旋转自由度的自旋特征,与电磁波的极化相关;而 L 为 OAM,是电磁场的外在属性,描述了电磁场旋转自由度的轨道特征及能量横向的旋转特性,与电磁波的相位波前分布有关。SAM 与 OAM 的关系可以用地球与太阳简单地进行类比:地球绕着自身的地轴旋转,就表现出了自旋角动量,地球在自旋的同时也围绕着太阳进行旋转,这就表现出了轨道角动量。与 SAM 只含有三种状态不同,由于 OAM 的模式数可以取任意值,理论上 OAM 含有无数种状态,并且这些状态相互正交,能够作为信息传输的载体,所以基于 OAM 的复用技术可以大大提高频谱的利用率。

2.2 电磁涡旋的结构

从本质上来讲,电磁涡旋就是携带 OAM 的电磁波,可以由普通电磁波添加一个相位旋转因子产生:

$$U(r,\theta)=A(r)\cdot\exp(j\ell\theta)。$$
 (2)

式中, r 为观察点到波束中心轴线的径向距离; θ 是围绕波束中心轴线的方位角,范围是 $[0,2\pi]$; $A(r)$ 表示电磁场的幅值; ℓ 是描述电磁涡旋的模式数,用来表示不同的 OAM 状态。当电磁涡旋波携带信息之后,在空中传播的电磁涡旋波可以表示成

$$U_s(r,\theta,t)=S(t)\cdot A(r)\cdot\exp(j\ell\theta)。$$
 (3)

式中, $S(t)$ 表示传递的信息数据。受旋转相位因子的影响,电磁涡旋的相位波前不再是平面结构,而是成螺旋状,绕着波束的传播方向旋转,旋转一周波束的相位改变 $\Delta\phi=2\pi\ell$ 。图 1 所示为模式数分别为 +2、+1、0、-1、-2 的 5 束电磁涡旋波的相位结构分布,其中 $\ell=0$ 表示平面电磁波。可以看出,若电磁涡旋模式数不同,则相应的辐射方式也不同。随着模式数绝对值的增大,电磁涡旋的螺旋性也变得复杂,相位变化也越剧烈。

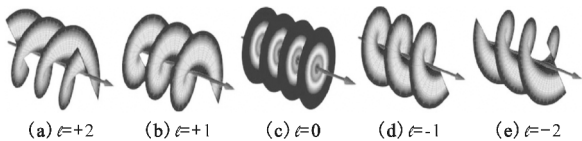


图 1 电磁涡旋波的相位波前结构
Fig. 1 The phase front structure of the EM vortex

图 2 显示了电磁涡旋的模式数分别为 -2、-1、+1、+2、+3 在远场条件下的电场强度和相位分布,从图中可以清楚地看出电磁涡旋的相位呈螺旋状分布的特点,且扭曲条纹的数目对应模式数的绝对值。在波束传播轴上也就是电磁涡旋的中心处电场振幅消失,场强强度为零,以致波束中心形成暗核,称作相位奇点,也叫做空心波束。因为相位波前螺旋型的分布特点使电磁涡旋携带了 OAM,因而拥有普通电磁波不具备的一些性质。

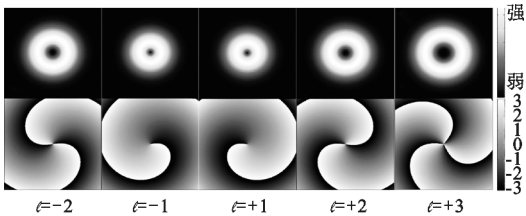


图 2 电磁涡旋的电场强度和相位分布
Fig. 2 The electric field intensity and phase distribution of the EM vortex

2.3 电磁涡旋的性质

(1)量子性

由式(2)或式(3)可知,不同的 ℓ 值对应不同的 OAM 状态,而不同的 OAM 状态对应不同的波前相位分布和辐射模式。从理论上来说, ℓ 可以取任意值,并不局限于整数值,并且非整数的 OAM 状态可以分解为整数 OAM 状态的傅里叶级数^[3]:

$$\exp(j\ell\theta)=\frac{\exp(j\pi\ell)\sin(\pi\ell)}{\pi}\sum_{m=-\infty}^{\infty}\frac{\exp(jm\theta)}{\ell-m},m\in\mathbf{Z}。$$

(4)

这说明,非整数的 OAM 可以分解为整数 OAM 状态的线性叠加,这些整数 OAM 状态也叫做本征态。

(2)正交性

正交,即互相独立,两两不相关。两个复指数信号 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 在区间 (t_1,t_2) 内互相正交的条件是

$$\int_{t_1}^{t_2}f_1(t)f_2^*(t)dt=\int_{t_1}^{t_2}f_1^*(t)f_2(t)dt=0,$$

(5)

而具有不同本征态的 OAM 状态是彼此正交的,因为

$$\int_0^{2\pi}\exp(jm_1\theta)\left[\exp(jm_2\theta)\right]^*dt=$$

$$\begin{cases} 2\pi, & m_1=m_2 \\ 0, & m_1\neq m_2 \end{cases}。$$

(6)

式(6)说明,对于任意两个整数阶的电磁涡旋波,只要它们的模式数不同,则它们相乘的积分为零,满足正交条件。由于具有不同本征态的 OAM 互相正交,故它们之间不会产生干扰。

(3)稳定性

电磁涡旋波的一个重要特性是其相位成螺旋状结构,相位奇点场强为零。不同模式数(整数、分数)的电磁涡旋波在传输过程中其相位奇点的稳定性并不相同。对于整数电磁涡旋波来说,其相位奇点具有稳定性,强度分布仍呈中心对称;而分数阶电磁涡旋波的相位奇点随着传输距离的增加不再保持稳定,中心电场强度不再为零,强度分布也不再呈中心对称^[4]。这说明只有模式数为整数的电磁涡旋波适合进行信息的传输。图 3 是整数阶与分数阶在不同距离下的强度图样,在(d)中可以看出分数阶涡旋光束在传播很短的距离后,中心光强便不再为零。

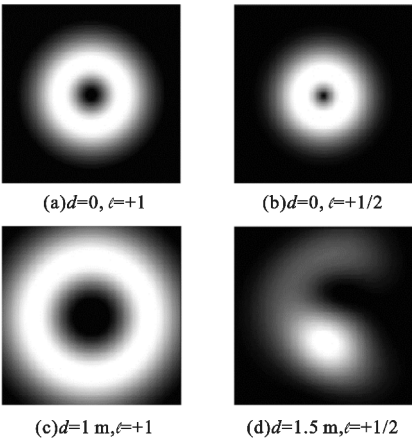


图 3 不同模式不同距离下电磁涡旋强度分布图
Fig. 3 The intensity distribution of the EM vortex in different modes and different distances

(4)反射性

当电磁涡旋波经过镜面反射之后,其模式数会变为原来的相反数,即电磁涡旋在传输过程经过反射后其旋转方向会发生改变。图 4 是相关的示意图,发送端发送模式数为 $\ell=+1$ 及 $\ell=+2$ 的两路电磁涡旋波,其中 $\ell=+2$ 的信号经过建筑物的反射会变成 $\ell=-2$ 的状态,接收端收到的 $\ell=-1$ 是 $\ell=+1$ 经过地面反射后的信号。但是电磁涡旋波的反射只会影响它的旋转方向而不会影响波前相位的结构,所以模式数绝对值相同的电磁涡旋波的扭曲条纹数目不会发生改变,这也从另一个方面说明了整数阶电磁涡旋的稳定性。

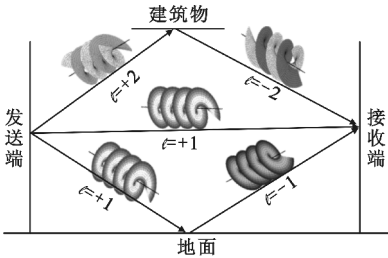


图 4 电磁涡旋波的模式转换
Fig. 4 Mode conversion of the EM vortex

综上,拥有任意 OAM 状态的电磁涡旋波均能够在电磁涡旋本征态上进行分解,且这些 OAM 本征状态性质稳定,可以取任意整数值,两两正交,彼此独立传播,故可以在这些本征状态上进行信息调制,或是利用它们作为携带信息的载波,使 OAM 成为继时间、频率、码字之后一项新的自由度。这是电磁涡旋可以提高通信系统容量的物理和数学基础。

3 电磁涡旋的研究进展

3.1 国外发展及研究现状

电磁涡旋是一种扭曲的电磁波,因而它的发展与电磁波的发展是紧密相连的。1936 年, Beth 证明了圆偏振光中含有 SAM^[5]。之后 SAM 在光学和量子力学中得到了广泛应用,而 OAM 却没有得到应有的重视。一直到 1992 年荷兰物理学家 Allen 发现拉盖尔高斯(Laguerre-Gaussian, LG) 涡旋光束在近轴传播条件下携带 OAM^[6],人们才开始对 OAM 产生兴趣。2004 年, Gibson 首次提出将 OAM 应用于光通信,研究了利用涡旋光束的不同 OAM 状态进行编码实现信息传输的可能性,结果表明用光束 OAM 不同状态进行编码可以提高信息传输的安全性^[7]。由于光也是一种特殊电磁波,瑞典空间物理研究所的 Thidé 受其启发,在 2007 年提出了将 OAM 引入低频无线电领域的设想,并提出了电磁涡旋的概念,进行了第一个基于无线频段 OAM 的仿真实验,并利用天线阵列产生了类似 LG 涡旋光束的电磁涡旋波。2010 年, Mohammadi 等人对电磁涡旋波的产生进行了综合仿真实验,系统研究了利用天线阵列形式可以产生携带不同 OAM 态的电磁涡旋波^[8]。2010~2011 年, Thidé 和意大利帕多瓦大学的 Tamburini 等人使用修正的螺旋状抛物面天线产生了电磁涡旋波束,并在意大利威尼斯的泻湖进行了第一个有关电磁涡旋的室外传输实验。实验结果表明,两束携带不同 OAM 状态的电磁涡旋波可以在同一频带下独立进行传输^[9]。2012 年,该小组使用修正的抛物面天线和商用八木天线分别产生电磁涡旋波和无涡旋波,并携带用数字相移键控(Phase Shift Keying, PSK) 调制的信息,在接收端用相位干涉仪进行测量,实验结果证明电磁涡旋技术可以和数字调制技术结合使用,且对于同频率其他信号干扰具有鲁棒性^[10],这表明电磁涡旋与当前通信技术具有较好的兼容性。2014 年,美国南加州 Yan 等人在毫米波频段实现了 4 路电磁涡旋波的复用,在 2.5 m 的传输距离下取得了高达 32 Gb/s 的惊人数据传输速率^[11]。然而,电磁涡旋技术也引起了一些学者的质疑,他们认为这种技术实际上是多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 技术的一种特例,并不会比 MIMO 带来更多系统容量的增长^[12],而 Tamburini 等人随后撰文回应,认为两种技术机理不同,现有的 MIMO 技术并没有实现电磁场的扭曲,没有利用电磁场的 OAM 自由度,因而电磁

涡旋是不同于 MIMO 的一项新技术^[13]。但是,现在学术界对于电磁涡旋与 MIMO 的确切关系仍然没有定论。

3.2 国内研究现状

在国家自然科学基金的大力支持下,国内对 OAM 的研究方兴未艾。2012 年,华中科技大学王健等人利用 OAM 光束与极化复用相结合,在短距离内成功实现了 2.56 Tb/s 的数据传输速率^[14],这标志着我国在光通信领域研究处于世界领先地位。然而,国内关于 OAM 的研究还主要在光学领域,对无线通信频段的电磁涡旋研究还处于起步阶段。2013 年,郭桂蓉院士等人对电磁涡旋应用于雷达目标成像的可能性进行了研究,阐述了电磁涡旋在雷达信息获取的潜在价值,为电磁涡旋在雷达领域的应用提供了参考与借鉴^[15]。

4 电磁涡旋的关键技术

4.1 电磁涡旋的产生

无线通信频段的电磁涡旋目前主要有两种常用产生方法:一是天线阵列法,二是螺旋抛物面天线法。下面分别对这两种方法进行介绍。

(1) 天线阵列法

天线阵列是由许多相同的电偶极子按照某种几何图形排列组成的天线系统。Mohammadi 等证明^[8],使用圆形天线阵列就可以产生电磁涡旋波,原理是将 N 个电偶极子等间隔地放置在一个圆周上,对这些电偶极子进行相位控制,使相邻的电偶极子产生连续的相位延时 $\delta\phi = 2\pi\ell/N$, ℓ 是 OAM 模式数,则环绕天线阵列一周后就产生了 $2\pi\ell$ 的相位旋转,从而产生了电磁涡旋波。

电偶极子的个数 N 会影响阵列产生的电磁涡旋波。由 OAM 的量子性可知,所发射的总的 OAM 状态可分解成 OAM 本征态,而由于天线阵列的个数是有限的,所以存在能产生 OAM 状态数的上限值。Mohammadi 等指出,天线阵列可以产生的模式数范围为 $-N/2 < \ell < N/2$ 。当 $|\ell| > N/2$ 时,天线阵列就无法产生纯的螺旋相位波前,导致波束失真, OAM 状态便无法得到。

此外,圆形天线阵列的直径 D 也会对电磁涡旋波的方向性产生影响。改变天线阵列的直径 D ,可以改变电磁涡旋沿着轴线开口 θ 的大小。随着直径 D 的增大,电磁涡旋开口的角度也会随之减小。图 5 则反映了天线阵列直径相对于波长倍数、中心张

角及辐射增益的数量关系。随着天线阵列直径 D 的增大,电磁涡旋波中心张角 θ 逐渐变小,同时辐射增益 $G^{\max}$ 逐渐变大。这说明加宽天线阵列的直径可以有效地减小中心轴线的开口张角,也就可以增强电磁涡旋波的方向性。

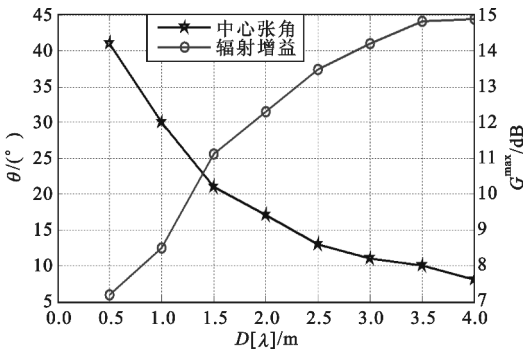


图 5 阵列直径与中心张角及辐射增益的关系
Fig. 5 Relations between the center opening angle, diameter of the array and radiation gain

(2)螺旋抛物面天线法

螺旋抛物面天线是将普通的抛物面天线一侧开一道口,将口的两边错开,将其扭曲成螺旋状,从物理上模拟了波束相位的旋转,使得电磁波束的不同点相对其他点而言有了不同的相位波前,因而将普通电磁波扭曲成了电磁涡旋波。这种电磁涡旋的产生方式可以用于不容易进行相位控制的情况,并且方向性较好。

4.2 电磁涡旋的接收

目前主要采用相位干涉仪和螺旋相位板(Spiral Phase Plate,SPP)对电磁涡旋波进行接收。相位干涉仪主要由两个完全相同的天线组成,要求这两个天线在与电磁涡旋波轴线相垂直的平面上,并尽量使电磁涡旋的相位奇点位于两天线连线的中点。一种简单的接收装置示意图如图 6(a)所示,两个天线 A、B 分别在不同地点,两者间距为 d ,模式数为 $\ell = +1$ 的电磁涡旋波由于涡旋的相位结构会在 A、B 天线产生 180° 的相位差;而对于 $\ell = 0$ 的无涡旋电磁波,其在 A、B 不会产生相位差,通过测量这个相位差就可以间接地判断电磁涡旋的模式数。

螺旋相位板接收法是直接将电磁涡旋波束通过特殊设计的 SPP,SPP 的结构为阶梯状。当电磁涡旋通过 SPP 后,SPP 的阶梯结构会使电磁涡旋的相位产生不同的延迟,导致相位发生了扭曲,最终效果是与 SPP 设计模式相匹配的电磁涡旋会被恢复成平面电磁波的形式。图 6(b)显示了 OAM 为 +6 的电磁涡旋波经过模式为 -6 的 SPP 后会变成普通的

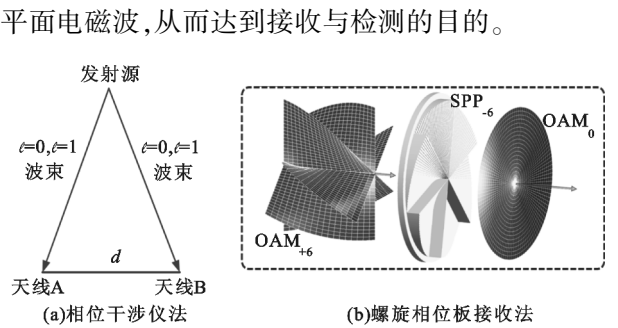


图 6 电磁涡旋的接收检测方案
Fig. 6 The scheme of the EM vortex receiving and detecting

另外,值得注意的是,螺旋相位板法同样可以用于电磁涡旋的产生,只需要将普通电磁波通过 SPP 后就能产生电磁涡旋波束。

4.3 电磁涡旋的复用

在自由空间传输的情况下,由于电磁涡旋只受模式数的影响,与信号的波长、频率、时移等因素无关,因而可以利用电磁涡旋与其他无线通信复用技术相结合,来进一步提高通信系统的容量。图 7 是电磁涡旋提高通信系统容量的结构说明框图。按照正交振幅调制(Quadrature Amplitude Modulation,QAM)的信息被调制到同一频率的 4 束平面相位的普通电磁波上,然后这些平面电磁波通过不同模式数的相位螺旋板,使其相位波前添加上不同的相位旋转因子,转化为电磁涡旋波,其模式数分别为 $\ell = +4, \ell = +8, \ell = -8, \ell = +16$ 。这时,电磁涡旋波的强度剖面图就变成“圆环状”的场强分布,圆环的中心无场强,对应相位奇点。由于电磁涡旋的正交性使不同的电磁涡旋状态可以独立进行传输而不会互相干扰,因而这 4 路电磁涡旋波可以经过一个非极化的分束器进行合并传输。除此以外,因为轨道角动量 OAM 与自旋角动量 SAM 彼此独立,且 SAM 与电磁波的极化有关,所以电磁涡旋的复用同时可以与极化复用相结合。经过一个极化分束器引入水平极化和垂直极化,就可以使通信系统的容量加倍,在一个频段实现 8 路信息的复用。而在接收端,先通过一个偏振片对极化复用的电磁涡旋进行解极化复用,将 4 路水平极化的信息和 4 路垂直极化的信息分离。为了对模式数为 ℓ 的电磁涡旋波进行解复用,需要用一个模式数为 $-\ell$ 的螺旋相位板来去掉相位旋转因子 $\exp(j\ell\theta)$,这样就将其转化为了无涡旋的普通电磁波,如式(7)所示:

$$U_{\text{DEMUX}}(r,\theta,t)=\exp[j(-\ell_q)\theta]\sum_{p=1}^N S_p(t)\cdot A_p^{\text{RX}}(r)\cdot \exp(j\ell_p\theta)=$$

$$S_q(t) \cdot A_q^{RX}(r) + \sum_{p=1, p \neq q}^N S_p(t) \cdot A_p^{RX}(r) \cdot \exp(j\ell'_p \theta)。$$

(7)

式中, $\ell'_p=\ell_p-\ell_q$,显然,只有模式数为 ℓ_q 的电磁涡旋波去除了相位旋转因子转化成了普通电磁波,其他电

磁涡旋的模式数由 ℓ_p 变成了 ℓ'_p 。由于普通电磁波的强度剖面图不再成圆环状,中心是一个高强度亮点,与其他电磁涡旋成圆环状分布完全不同,可以通过空间滤波器将它们分离,最后就可以对这个平面相位电磁波进行正交相干解调用于还原有用信息。

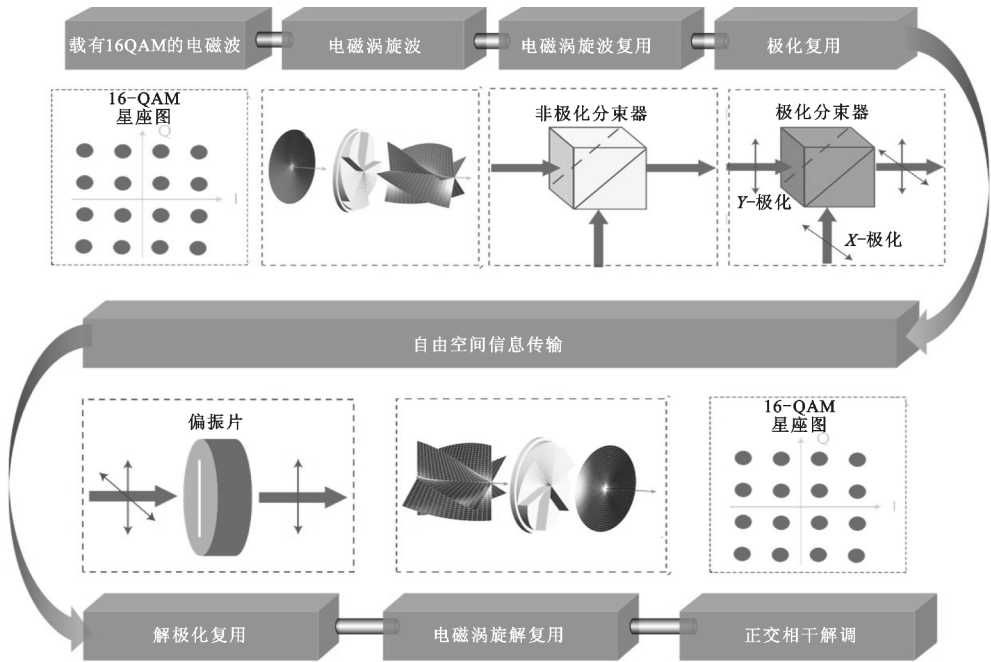


图 7 电磁涡旋复用结构框图
Fig. 7 The multiplexing diagram of the EM vortex

5 电磁涡旋的挑战与研究建议

电磁涡旋在无线通信中拥有巨大的潜力,然而目前研究还处于探索阶段,所以电磁涡旋仍然面临着许多的问题和挑战。

首先,只有整数阶的电磁涡旋波适合用于信息传输,这对发送设备的参数及精度要求较高,并且目前的发射与接收装置只能对一种模式数的电磁涡旋波进行产生和接收,要想产生与接收其他的模式需要重新对设备进行设置,所以如何研制电磁涡旋的高效产生与接收器件仍是一个有待突破的问题。

其次,用于产生电磁涡旋的设备都较为复杂与庞大,很难投入到实际应用中,故如何做到设备的集成化,使智能手机、平板电脑等终端设备可以发射电磁涡旋波,是一项巨大的挑战。

另外,受到大气湍流的影响,现有电磁涡旋的无线传输距离都较短,只有2~3 m。黄善国等提出了利用强度干涉板的方法能够提高电磁涡旋的传输距离^[16],但是提升效果有限。如何进一步拓展电磁涡旋的无线传输距离,使之能应用于未来室内环境的无线通信是接下来要解决的一个难题。

最后,电磁涡旋与MIMO技术的关系仍需要后续的研究。电磁涡旋可以与波分复用等复用技术相结合,MIMO也可以与这些复用技术相结合,而三者间的相互结合是否可行,仍然存在疑问。若是成功,则不仅证明了电磁涡旋复用的先进性优越性,而且将大大提高现有通信系统的效率,实现多技术的大融合。

6 结束语

基于线性动量进行信息调制的无线通信容量已经几乎达到了香农极限,只有充分利用电磁波的角动量来进行信息调制才能进一步提高系统容量。而电磁涡旋就是这样一种可以利用轨道角动量进行信息传输的电磁波。由于电磁涡旋利用OAM这一新的复用维度,具有无穷多种本征态,且这些本征态两两正交,在独立的传输过程中能够保持稳定的相位结构,理论上即使在不使用其他编码技术和复用技术的情况下也可以在一个固定的频带范围内实现无限多的信号传输。另一方面,电磁涡旋与其他复用技术不是竞争关系,而是合作关系,具有良好的兼容性,因而利用电磁涡旋有望极大提高通信系统的容

量,有效解决频谱资源紧缺的问题,展现了其广阔的应用前景。

作为一项新技术,电磁涡旋在无线通信领域仍存在着许多的困难和质疑,今后电磁涡旋技术的研究主要会集中在如何精确地产生与接收多种电磁涡旋本征态、设备的集成化、传输距离的拓展以及电磁涡旋与 MIMO 的关系上。相信随着研究的不断深入,电磁涡旋会成为推动无线通信实现跨越式发展的关键技术。

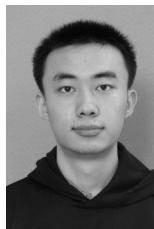
参考文献:

- [1] 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): 087701-1-087701-4.
- [2] Tamburini F, Mari E, Thidé B, et al. Experimental verification of photon angular momentum and vorticity with radio techniques[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(20): 204102-1-204102-3.
- [3] Berry M V. Optical vortices evolving from helicoidal integer and fractional phase steps[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, 6(2): 259-263.
- [4] 丁攀峰. 整数与分数阶涡旋光束相位奇点的稳定性分析[J]. *华中科技大学学报*, 2011, 39(5): 118-122.
DING Panfeng. Stabilization analysis of phase singularity of vortex beams with integral and fractional orders[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology*, 2011, 39(5): 118-122. (in Chinese)
- [5] Beth R A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light[J]. *Physical Review*, 1936, 50(2): 115-125.
- [6] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [7] Gibson G, Courtial J, Padgett M, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [8] Mohammadi S, Daldorff L, Bergman J, et al. Orbital angular momentum in radio—a system study[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(2): 565-572.
- [9] 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(3): 033001-1-033001-17.
- [10] Tamburini F, Thidé B, Boaga V, et al. Experimental demonstration of free-space information transfer using phase modulated orbital angular momentum radio[EB/OL]. 2013-02-14 [2015-03-12]. <http://arxiv.org/pdf/1302.2990v2.pdf>.
- [11] Yan Y, Xie G D, Martin P J, et al. High-capacity millime-

tre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Communications*, 2014(5): 1-9.

- [12] Edfors O, Johansson A J. Is Orbital Angular Momentum (OAM) Based Radio Communication an Unexploited Area? [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2012, 60(2): 1126-1131.
- [13] Tamburini F, Thidé B, Mari E, et al. Reply to Comment on Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test[J]. *New Journal of Physics*, 2012(14): 118002.
- [14] Wang J, Yang J Y, Fazal I, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [15] 郭桂蓉, 胡卫东, 杜小勇. 基于电磁涡旋的雷达目标成像[J]. *国防科技大学学报*, 2013, 35(6): 71-76.
GUO Guirong, HU Weidong, DU Xiaoyong. Electromagnetic vortex based radar target imaging[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35(6): 71-76. (in Chinese)
- [16] Gao X L, Huang S G, Wei Y F, et al. An orbital angular momentum radio communication system optimized by intensity controlled masks effectively: Theoretical design and experimental verification[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(24): 241109-1-241109-5.

作者简介:



李蹊(1991—),男,山东济南人,2014年于山东大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为宽带移动通信系统新理论及

技术;
LI Xi was born in Jinan, Shandong Province, in 1991. He received the B. S. degree from Shandong University in 2014. He is now a graduate student. His research concerns new theory and technology of the broadband mobile communication system.

Email: lxclzyl130@163.com

冯志勇(1971—),女,教授、博士生导师,IEEE 高级会员,主要研究方向为异构无线的融合、网络动态频谱管理、认知无线网络等;

FENG Zhiyong was born in 1971. She is now a professor and Ph. D. supervisor, and also a senior member of IEEE. Her research concerns convergence of heterogeneous wireless networks, dynamic spectrum management, cognitive wireless networks and so on.

冯建元(1990—),男,博士研究生,主要研究方向为异构无线网络;

FENG Jianyuan was born in 1990. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns heterogeneous wireless networks.

张奇勋(1983—),男,博士,副教授,主要研究方向为异构无线网络、认知无线网络等。

ZHANG Qixun was born in 1983. He is now an associate professor with the Ph. D. degree. His research concerns heterogeneous wireless networks, cognitive wireless network and so on.