



声涡旋信息应用研究进展

郭忠义 刘洪郡 李晶晶 周红平 郭凯 高隽

Research progress of applications of acoustic–vortex information

Guo Zhong-Yi Liu Hong-Jun Li Jing-Jing Zhou Hong-Ping Guo Kai Gao Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 244301 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200826

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200826>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用衍射光栅探测涡旋光束轨道角动量态的研究进展

Progress of detecting orbital angular momentum states of optical vortices through diffraction gratings

物理学报. 2018, 67(3): 034201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171899>

长周期多芯手征光纤轨道角动量的调制

Modulation of orbital angular momentum in long period chirally–coupled–cores fiber

物理学报. 2019, 68(6): 064211 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182036>

大气湍流信道中聚焦涡旋光束轨道角动量串扰特性

Effect of atmospheric turbulence on orbital angular momentum crosstalk of focused vortex beams

物理学报. 2020, 69(14): 144203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200243>

汉克–贝塞尔光束在海洋湍流信道中的螺旋相位谱分析

Analysis of orbital angular momentum spectra of Hankel–Bessel beams in channels with oceanic turbulence

物理学报. 2018, 67(11): 114201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180155>

圆柱型光纤螺线圈轨道角动量模式

Orbital angular momentum mode of cylindrical spiral wave–guide

物理学报. 2020, 69(5): 054207 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190997>

基于场变换理论的大角度涡旋电磁波生成方法

Wide–angle method for vortex electromagnetic wave generation using field transformation

物理学报. 2020, 69(13): 135201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200365>

综述

声涡旋信息应用研究进展*

郭忠义† 刘洪郡 李晶晶 周红平 郭凯 高隼

(合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009)

(2020年6月1日收到; 2020年7月10日收到修改稿)

涡旋声束携带的轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 可以传递给物体, 在微粒操控等方面有较好的应用前景. 除此之外, 涡旋声束在声学通信方面同样具有巨大的潜力. 由于具有不同 OAM 模式值的涡旋声束相互正交, 因此, 将 OAM 模式引入传统声学通信领域, 为未来实现高速、大容量及高频谱效率的水下声通信技术提供了潜在的解决方案. 本文对 OAM 声束的研究进展进行了综述, 主要介绍了涡旋声束的产生和检测方案、传输特性, 及其在声通信方面的典型研究案例. 最后, 对 OAM 声束的未来发展趋势及其前景进行了分析与展望.

关键词: 轨道角动量, 涡旋声束, 声通信**PACS:** 43.90.+v, 47.35.Rs**DOI:** 10.7498/aps.69.20200826

1 引言

近些年, 随着科技的发展和大数据业务的需求, 移动通信网络不断朝着宽带化、高速化、泛在化方面发展. 其中, 自由空间光通信、微波通信都已经得到了广泛的研究, 但这些通信方法在水下通信时会出现严重的信号衰减, 不适合水下长距离传输. 因此, 具有更长波长的声波成为水下通信主要的信息载体, 但基于声波的数据传输易受到信道容量和速度的影响, 限制了声学通信的发展, 而在希尔伯特空间中拥有无限维度的轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM), 成为提高声通信的信道容量和传输速率的一种简单可靠的方法.

1974年, Nye 和 Berry^[1] 通过类比晶体位错, 在波动理论中引入了相位位错的概念, 并对其进行了三种分类: 刃型位错、螺型位错和刃型螺型混合位错. 自 20 世纪 90 年代以来, 这些相位奇异性引起了人们广泛的兴趣, 在光学^[2-17]、电磁学^[18-24]

和声学等领域得到了广泛的研究. 其中, 螺型位错在光学通信和微粒操控领域凭借其独特的优势更是占据了重要地位. 涡旋光束就是一种具有螺旋型位错, 并携带轨道角动量的光束. 当高斯光束带有螺旋型的相位时, 光束便携带了轨道角动量, 其中心的相位不确定性导致了相位奇点的产生, 在光强上表现为中心位置出现一个圆形暗核.

由于声波和光波在波动传输方面具有类似的特性, 在 OAM 光束提出来不久, OAM 声束也开始进入了人们的研究范围. 1979年, Broadbent 和 Moore^[25] 首次提出 OAM 声束的概念, 并对 OAM 声束进行了理论分析. 和 OAM 光束类似, OAM 声束也具有同样的相位奇异性, 可通过数学形式 $\exp(im\theta)$ 来表述, 其中 θ 被称为方位角, m 被称为涡旋波的拓扑荷 (阶数), 定义为在一个波长传播距离内波阵面扭转的次数, 其符号与扭转方向有关, 且在理论上可以任意取值.

OAM 声束具有许多吸引人的特性, 首先就是携带不同拓扑荷的 OAM 声束之间相互正交. 假设

* 国家自然科学基金 (批准号: 61775050) 和中央高校基本研究经费 (批准号: PA2019GDZC0098) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guozhongyi@hfut.edu.cn

两束 OAM 声束的拓扑荷分别为 m_1 和 m_2 , 通过内积计算可以看出其正交性:

$$\int_0^{2\pi} e^{im_1\theta} (e^{im_2\theta})^* d\theta = \begin{cases} 0, & m_1 \neq m_2, \\ 2\pi, & m_1 = m_2. \end{cases} \quad (1)$$

因此, 携带不同拓扑荷的 OAM 声束可以作为单独的数据传输通道, 这就在时间、频率以外增加了一种新的物理维度. 而且, 这种新的多路复用技术可以与其他现有的多路复用策略相结合, 以进一步提高通信系统的容量.

OAM 声束除了在声通信系统中具有重要作用外, 其在相位奇点处相干相消呈现出的“甜甜圈”状的场强分布, 还可以在声波定位仪器中作为校准工具. 除此之外, 人们还发现了 OAM 声束在粒子操控等领域的巨大潜力. 声涡旋可以对液体或空气中的物体施加力 [26–33] 和力矩 [34–39]. 相比于 OAM 光束, OAM 声束不仅具有连续的螺旋相位分布, 同时还具有良好的物体穿透性和较小的生物损耗 [40,41], 有助于实现相对较大尺寸、非磁性且不导电微粒的捕获、悬浮和操纵 [42–54]; 而且, 由于声波的无损穿透性, 声涡旋可以操控物体内部微粒, 因此在医学超声领域上关于细胞或者微流的精准操控方面有着巨大的优越性.

本文全面综述了声涡旋信息及应用系统方面的研究进展. 对近些年在 OAM 声束的产生及复用方法、检测与解调方法、传输特性, 及其在通信领域的应用等方面的研究成果进行了阐述分析. 最后, 对目前研究工作中仍存在的不足进行了总结, 并对 OAM 声通信技术的未来发展趋势及其前景进行了展望.

2 OAM 声束的产生及复用

目前为止, OAM 声束的生成技术主要分为有源和无源两大类. 其中, 有源方法主要通过使用螺旋相控源和螺旋型源产生 OAM 声束. 前者通过在传感器阵列的驱动间引入适当的相位滞后产生螺旋型位错, 而后者则是通过声源的螺旋形状直接引入螺旋型位错 [55–60]. 在 1999 年, Hefner 和 Marston [55] 就率先在超声频率下产生了 OAM 声束. 他们利用黄铜环与一块聚偏氟乙烯 (PVDF) 压电薄膜构成了一种螺旋型换能器结构, 通过改变黄铜和 PVDF 分割处的偏移量, 使其表面高度满足 $z_T = \lambda\theta / (2\pi)$, 从而生成具有螺旋形波前的 OAM 声束. 受分割处

偏移量大小限制, 该方法的工作频率被限制在 150 kHz 以上, 且该装置只能产生一种拓扑荷的 OAM 声束. 为了进一步优化设计, 该团队又提出了一种由四块等大小、独立调控的压电片构成的结构来产生 OAM 声束. 该设计对 OAM 声束的波前相位进行离散化处理, 使相邻压电片之间的相位差为 90° , 经过实验验证, 该方法能在水下产生拓扑荷为 1 的 OAM 声束. 此后, 很多研究团队开始着手研究独立信号源控制的换能器阵列生成声涡旋波的方法. 声学换能器系统一般由环形分布的换能器阵列 (图 1(a)) 以及复杂的电路控制系统组成. 若想产生拓扑荷为 m 的声涡旋, 则相邻两个换能器的相位差应为 $2\pi m/N$, 其中 N 为换能器个数. 多个声源共同作用时, 因为有稳定的相位差信号叠加, 所以在传播轴中心产生了零场强点, 在近轴区域空间中叠加产生了沿轴传播的声涡旋.

2018 年, Muelas-Hurtado 等 [57] 提出了一种利用螺旋型有源衍射声栅产生涡旋声束的高效方法. 如图 1(b) 所示, 螺旋源粘在印刷电路板上, 由柔性铁电极构成, 螺旋路径的宽度和它们之间的间距是恒定的. 当接入超声频率的交流电压后, 螺旋源发生共振, 从而产生具有螺旋波前相位的涡旋声束. 该方法的工作频率为 30–300 kHz, 且利用声栅不同的衍射阶次, 该装置可以同时产生具有不同拓扑荷的 OAM 声束, 它们沿着传播轴彼此分离.

与有源方法相比, 使用无源方法产生涡旋声束更具方便性和可靠性, 对资源的消耗较小. 2004 年, Gspan 等 [61] 提出了利用光声效应产生涡旋声束的方法, 当脉冲激光照射到水箱中的用来产生 OAM 声束的螺旋相位板 (sprial phase plate, SPP) 后, 受热弹效应影响相位板会向另一侧传播压力波. 其中, 特殊设计的相位板厚度 h 是方位角 θ 的一个连续函数: $h = \lambda\theta / [2\pi f (c_0^{-1} - c^{-1})]$, 其中, c_0 是周围介质中的声速, c 是相位板中的声速, f 是入射波的频率. 2015 年, Wunenburger 等 [62] 设计了一个 SPP 用于产生高阶声涡旋. 该螺旋相位板的示意图如图 1(c1) 所示, 这个螺旋相位板由圆柱形底座和 4 个梯度随方位角变化的螺旋梯度表面组成. 当声波入射该结构时, 每个螺旋表面可以产生从 0 到 2π 逐渐变化的相位延迟, 从而在这个相位板的中心轴周围形成 $m = 4$ 的声涡旋. 但是 SPP 的大小和厚度均大于声波波长, 而且其转换效率也比较低, 对结构精度有较高的要求, 这些都限制了该装置的应用.

针对上述工作存在的困境, 2014 年, Jimenez

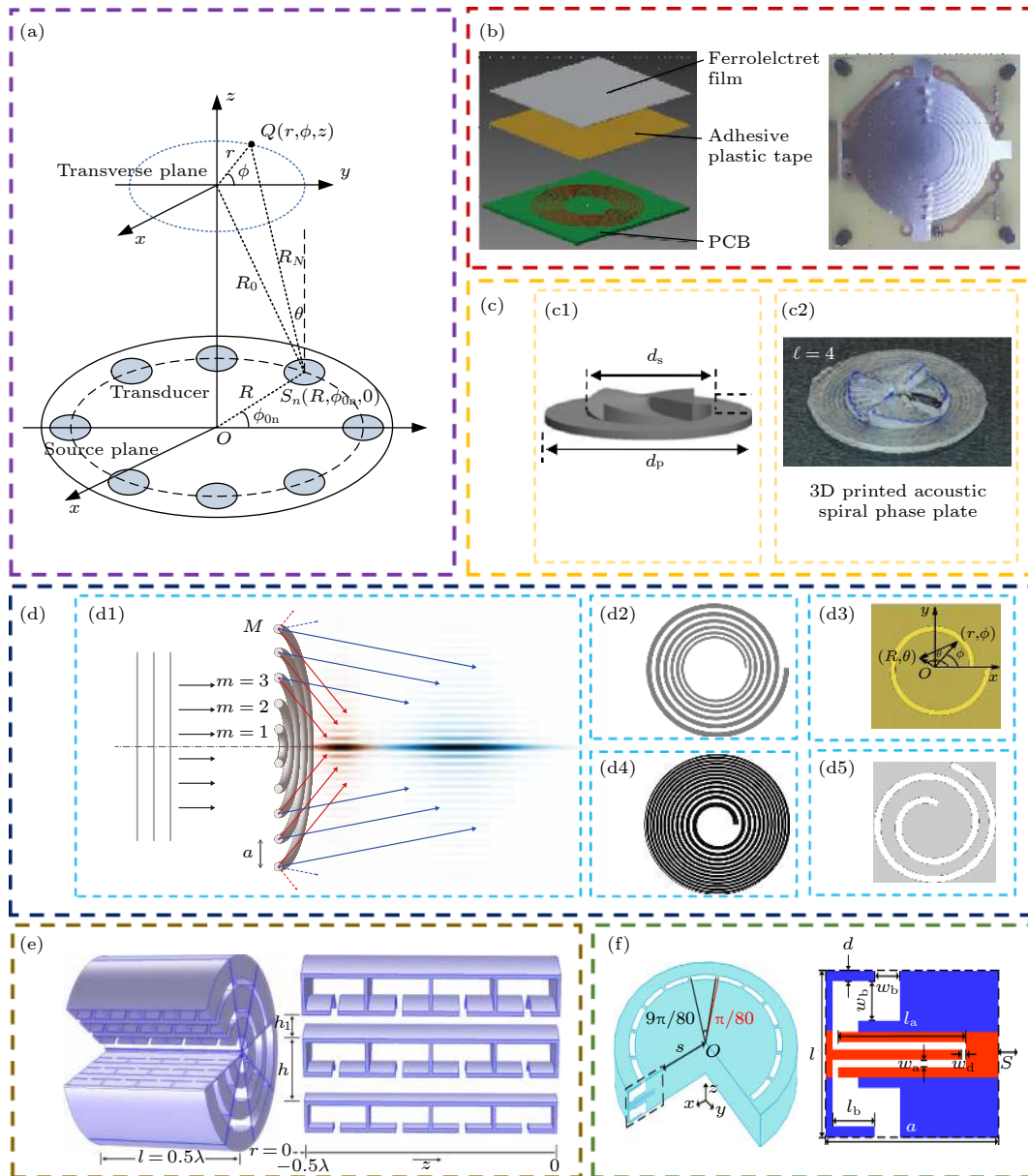


图 1 (a) 利用换能器阵列产生 OAM 声束示意图^[56]; (b) 利用螺旋型有源衍射声栅产生 OAM 声束示意图^[57]; (c) 利用声学 SPP 产生 $m = 4$ 的 OAM 声束示意图 (c1) 和 3D 打印实物图 (c2)^[62]; (d) 用于产生 OAM 声束的 (d1) 轴对称声栅^[63]、(d2) 对数螺旋声栅^[64]、(d3) 阿基米德螺旋声栅^[66]、(d4) 菲涅耳半波片声栅^[67,68]、(d5) 费马螺旋声栅^[69]; (e) 共振型环形超表面产生 OAM 声束示意图^[72]; (f) 复合迷宫型环形超表面产生 OAM 声束示意图^[73]

Fig. 1. (a) Schematics of generating acoustic OAM beams using transducers array^[56]; (b) schematics of generating acoustic OAM beams by spiral active diffraction grating^[57]; (c) schematics of a SPP with topological charge $m = 4$ (c1), picture of the 3D printed thermoplastic acoustic SPP (c2)^[62]; (d) using the axisymmetric sound grating^[63] (d1), logarithmic spiral sound grating^[64] (d2), Archimedes spiral sound grating^[66] (d3), Fresnel zone plate sound grating^[67,68] (d4), Fermat spiral sound grating^[69] (d5) to generate acoustic OAM beams; (e) acoustic OAM beams generated by resonant ring metasurface^[72]; (f) acoustic OAM beams generated by the complex labyrinth type ring metasurface^[73].

等^[63]提出了一种具有亚波长厚度的轴对称声栅,可以用来产生近似贝塞尔涡旋的声束.如图 1(d1)所示,平面声波通过声栅后发生衍射,在近轴区域能产生 OAM 声束.此后,研究人员将螺旋声栅的臂替换为对数螺旋线^[64](图 1(d2))、阿基米德螺旋线^[65,66](图 1(d3))、菲涅耳半波带^[67,68](图 1(d4))、

费马螺旋线^[69](图 1(d5))等形状,均能很好地产生 OAM 声束.此外,进一步的研究证明了通过调整螺旋声栅的臂数可以控制产生 OAM 声束的拓扑荷.值得一提的是,利用螺旋声栅不仅能产生整数阶 OAM 声束,也能产生分数阶 OAM 声波^[70]和聚焦 OAM 声束^[71],这对于涡旋声束的应用提供

了更多切实有效的途径.

为进一步减小装置的尺寸,近年来,被广泛用于声波前调控的超材料和超表面为产生涡旋声波提供了一个新的途径^[72-82].超表面通常由亚波长结构单元组成,通过引入共振或改变有效路径长度来控制波束的相位和振幅.2016年,Jiang等^[72]设计了一款基于声学共振的超表面,使得入射平面波透射该结构后会携带螺旋波前相位.如图1(e)所示,该结构由八个相同的扇形共振腔组成,每个扇形都由三层沿径向分布的共振腔组成,每行共振腔均由四个亥姆霍兹共振腔和一个长直管组合而成,通过改变长直管的高度,可调节透过超表面的传输相移.因此,只需将每个扇形对应的相位分布满足离散螺旋波前相位分布,就能产生目标 OAM 声束.2018年,Jia等^[73]设计了一种由复合迷宫结构(compound labyrinth structure, CLS)子单元组成的环形声超表面,用于在空气中产生分数阶 OAM 声束.如图1(f)所示,通过改变 CLS 子单元的一个结构参数来改变声波通过的有效路径的长度,可灵活而有效地控制声波通过 CLS 子单元的传输相移.

2019年,合肥工业大学郭忠义团队^[74]对声学共振结构进行了进一步研究,实现了高阶及复合涡旋产生.首先,该工作研究了采用该种共振结构产生 OAM 声波的频率适用范围.随后,采用该种结构产生了高阶 OAM 声波,并分析了结构半径、扇区数目和产生拓扑荷之间的关系,如图2(a1)所示,分别展示了产生拓扑荷为5的 OAM 声波的结构示意图以及在不同传输平面上声压和相位的分布情况.最后,使用改进的 Lin 算法获得了多路复用的相位分布,从而产生了复合涡旋声束.图2(a2)为通过改进的 Lin 算法计算得到的拓扑荷为-1和2复合涡旋的相位分布全息图,对其进行离散化(图2(a3))并加载到超表面上,便可实现复合涡旋声束的产生.为了证实该方法的可行性,工作中通过将该复合相位结构与产生拓扑荷为1和-3的结构相级联(图2(a4)),在每个区域的轴线上对声压进行检测来判断是否有所需拓扑荷的存在.该工作为 OAM 声波的高效复用提供了新的思路.

同年,该团队又提出采用费马螺旋产生高阶和复用的涡旋^[69].图2(b1)为产生高阶和复合 OAM 声波的结构示意图、声压和相位分布以及对拓扑荷

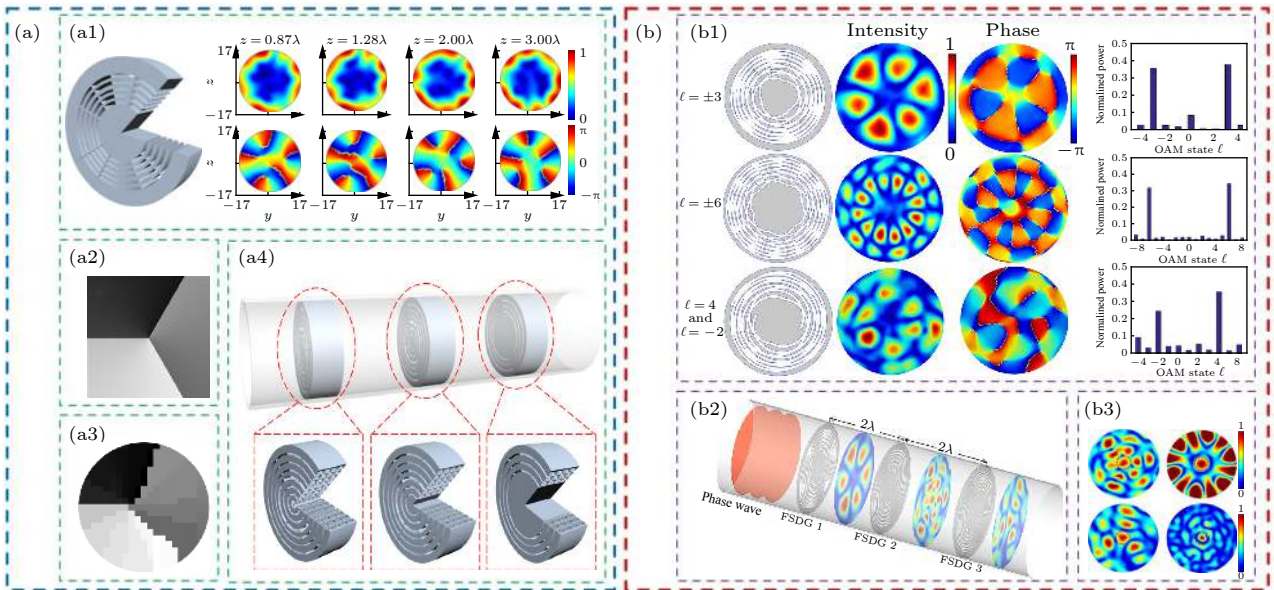


图2 (a) 采用声学共振结构实现高阶和复合 OAM 声束的产生^[74], (a1) 结构示意图及不同检测平面上的声压与相位分布, (a2) 产生复合 OAM 声束的相位全息图, (a3) 加载到超表面上的离散化相位全息图, (a4) 检测产生声场组成的结构示意图; (b) 采用费马螺旋实现高阶和复合 OAM 声束的产生^[69], (b1) 结构示意图、声压和相位分布以及模式检测结果, (b2) 进行模式分离的原理图及 (b3) 结果

Fig. 2. (a) Generation of high-order and multiplexed acoustic OAM beams by acoustic resonance structure^[74], (a1) structure and the distributions of pressure and phase of different planes, (a2) multiplexed phase hologram of OAM sound beams, (a3) discretization phase hologram, (a4) structure to detect vortex field; (b) generation OAM sound beams by Fermat's spiral diffraction grating^[69], (b1) structural diagram, sound pressure, phase distribution, and power density spectrum, (b2) schematic diagram for detection, and (b3) results.

纯度进行检测后的结果. 此外, 该工作中还通过级联不同的螺旋结构 (图 2(b2)) 实现了对复合 OAM 态的解调, 图 2(b3) 为每个区域的声压分布, 可以看出在声场中心有亮斑的出现, 进一步说明了采用该方法产生复合涡旋的可行性. 该工作中还对拓扑荷的纯度进行了分析, 证明了该方法产生复合 OAM 声束的高效性. 此外, 考虑到该结构在实际操作中的缺点, 还提出用不同声阻抗的材料对镂空部分进行填充的方法. 这种方法不仅可以解决结构的缺陷, 还可以改变 OAM 声束强度的大小, 提高所设计的费马螺旋衍射声栅的实用性, 也为其他声栅更好的应用提出了一种普适性方法.

相较而言, 由于没有共振器件, 使用螺旋相控源和螺旋型源等有源方法产生 OAM 声束具有更宽的工作带宽, 并且可以灵活的改变工作状态, 但其结构尺寸过大, 实现过程复杂, 而使用相位板、螺旋声栅和超表面等无源器件则更为简单和廉价. 常用的不同涡旋声束产生方案在多个方面的性能比较如表 1 所列.

表 1 不同涡旋声束产生方案性能比较

Table 1. Performance comparison of different schemes of generating acoustic vortex beams.

	有源方法		无源方法		
	螺旋相控源	螺旋型源	相位板	螺旋声栅	超表面
成本	高	高	低	低	低
速度	正常	正常	正常	正常	正常
可靠性	高	高	高	高	高
复杂性	高	高	低	低	低
OAM模式	复合	复合	单一	复合	复合
工作频段	宽	宽	窄	宽	窄

3 OAM 声波的检测与解调

对于 OAM 通信系统而言, 接收端能否快速准确有效地解调对通信质量影响巨大. 目前国内外学者从涡旋声波的特性出发, 提出了多种 OAM 解调方案, 包括内积算法、降低拓扑荷的值、机器学习、螺旋波导、抛物线型解码超表面等. 2017 年, Shi 等^[83] 使用八种拓扑荷实现了 OAM 声束通信, 在接收端通过 68 个传感器对声强和相位进行检测, 再利用内积算法对信号解调, 该系统的误码率仅为 $10^{-6.3}$. 如图 3(a) 所示, 虽然多路 OAM 声束之间相互干涉, 但由于不同 OAM 模式的涡旋声束间

相互正交, 故只需对每个传感器的振幅和相位进行解复用, 就能得到组成复合 OAM 声束的拓扑荷种类. 由于该方法需要对传感器阵列反馈的结果进行复杂的算法计算, 所以所需的成本较高.

针对上述工作存在的困境, 2018 年, Jiang 等^[84] 利用拓扑荷为零的 OAM 声束中心声强不为零的特点, 通过不断的降低拓扑荷的值来对 OAM 声束解调. 该方案使 OAM 声束不断的经过能产生拓扑荷为 -1 的 OAM 声束的超材料结构, 若在第 m 层结构处观察到中心处的非零声强, 则代表该 OAM 声束中包含有拓扑荷为 m 的信息. 该方法中的超材料结构可广泛地被其他能产生 OAM 声束的结构所替代, 且不需要声传感器阵列, 为提高检测效率和减小成本提供了一种新的思路.

近些年, 机器学习凭借其优秀的数据分析和信息处理能力在各种领域都展示了它的作用. 2019 年, Stankevich^[85] 采用一个双层卷积神经网络, 实现了对 OAM 声束的解复用. 输入层包含有 R 个输入的 10 个卷积神经元, 通过减少与输出层的连接数, 提高了学习速度, 并将神经元滤波器输出的序列分成互不相交的 5 点区间, 在每个区间选取最大值. 该方法能在一定的噪音干扰和传播距离下, 仅使用 10 个接收器, 仍保持较高的检测准确率.

除此之外, 利用特殊设计的结构将携带不同拓扑荷的 OAM 声束进行分离, 进而解调出对应的拓扑荷值的方法也得到了研究. 2019 年, Liu 等^[86] 利用相反 OAM 模式涡旋声波的布拉格散射带隙不同, 用一种带有周期性支管阵列的螺旋波导实现了旋转方向相反的涡旋声束的分离, 为声波束通信的解复用提供了一条新的途径. 该复合波导由一个与分流管周期性连接的右手螺旋形波导组成, 通过合理选择分流管的几何参数影响能带结构中的阻带开启, 进而将不同旋向的 OAM 声束分离. 该方法对于拓扑荷符号的检测简单且有效, 在一些特定场合有着重要作用.

2020 年, Jiang 等^[87] 将自由空间传播的多路涡旋声波通过波导壁顶部的一个孔耦合到波导中, 再使用抛物线型解码超表面将 OAM 声束携带的 OAM 转换为横向线性动量, 如图 3(b1) 所示, 使得携带不同拓扑荷的涡旋声束经过解码超表面后反射的平面波会沿不同方向传播, 进而只需通过检测特定空间角的反射波就可以检测出对应的拓扑荷值. 图 3(b2) 为反射角度 α 与拓扑荷值 m 的

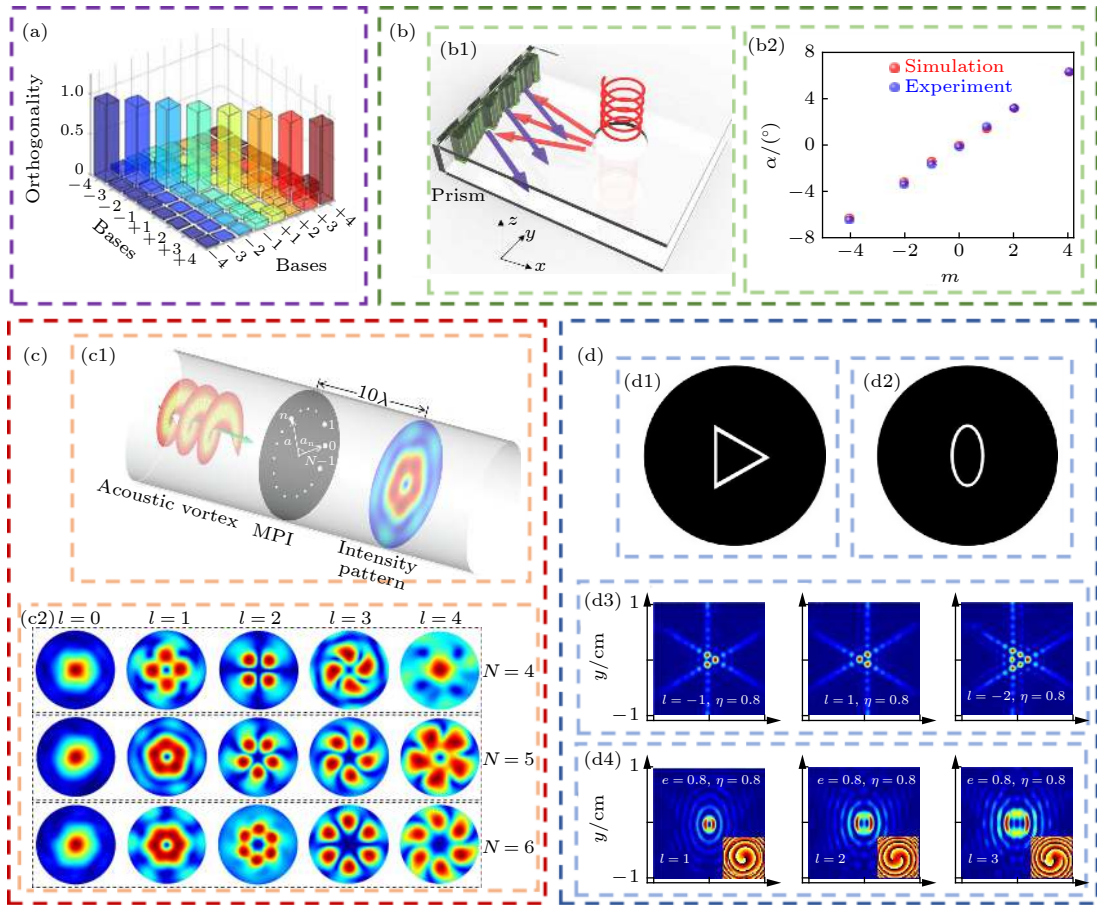


图 3 (a) 利用内积算法检测 OAM 声束示意^[83]; (b) 利用抛物线型解码超表面检测 OAM 声束示意图 (b1) 和拓扑荷值 m 和反射角 α 的函数关系 (b2)^[87]; (c) 利用圆孔阵列干涉屏检测 OAM 声束的 (c1) 示意图和 (c2) 远场强度分布图^[89]; (d) 利用 (d1) 环形三角孔径与 (d2) 环形椭圆孔径实现 OAM 声束检测示意图 (d1), (d2) 及远场强度分布 (d3), (d4)^[90]

Fig. 3. (a) Inner product algorithm is used to detect OAM sound beams^[83]; (b) detection of OAM sound beams by using parabolic decoding metasurface (b1), relationship between the reflection angle, α , and OAM charge, m ^[87] (b2); (c) detection principle of multi-points interferometer (c1), far-field intensity distributions (c2)^[89]; (d) sketch map (d1), (d2) and far-field intensity distributions (d3), (d4) for (d1) annular triangle aperture and (d2) annular ellipse aperture^[90].

关系, 从仿真和实验结果均可看出, 二者具有近似线性的关系. 该方法能够在一个较宽的频带快速并行地读出携带的 OAM 模式信息, 同时还可以通过修改解码超表面的几何参数, 优化携带不同拓扑荷的 OAM 声束对应的空间分离角的分辨率.

在光涡旋中, 基于干涉或者衍射原理, 利用涡旋波的特性来检测拓扑荷是一种普遍的检测方法^[88]. 2020 年, 合肥工业大学郭忠义课题组提出, 利用涡旋声波的干涉或者衍射原理来测量拓扑荷也是可行的, 并分别采用圆孔阵列干涉屏^[89]、环形三角孔径与环形椭圆孔径^[90]实现了对声涡旋的检测. 对于圆孔阵列干涉屏而言, 如图 3(c) 所示, 假设携带拓扑荷为 m 的声涡旋在带有 N 个圆孔的圆孔阵列干涉屏的检测范围内, 则携带拓扑荷为 $m' = m + N$ 的衍射图案与拓扑荷为 m 的衍射图案中心特征

相同. 通过对衍射后的声场分布进行判断, 可以实现对 $|m| < N$ 的涡旋的检测. 对于三角形孔径 (图 3(d1)), 从计算得到的结果 (图 3(d3)) 可以看出, 可以根据衍射图案中心出现的三角形状的亮斑分布判断入射涡旋声束的拓扑荷, 相应的拓扑荷数判别规律是 $|m|$ 为任意一条边的亮点数减一, 并且亮斑的方向与拓扑荷的符号有关, 携带相反拓扑荷的声涡旋的远场衍射图案将会旋转 180° . 而对于椭圆形孔径 (图 3(d2)), 从强度分布图与相位分布图 (图 3(d4)) 中不难发现, 通过数声涡旋波经过环形椭圆孔径衍射屏后得到的强度分布图中的暗斑数或者相位分布图中的奇点个数可以判断入射声涡旋波携带的拓扑荷数. 但是, 用环形椭圆孔径不能检测声涡旋携带的拓扑荷的符号.

关于 OAM 声束解调现在仍处于起步阶段, 但

表 2 不同涡旋声束解调方案性能比较

Table 2. Performances comparison of different demodulation schemes of acoustic vortex beams.

	内积算法	降低OAM模式的阶数	机器学习	螺旋波导	抛物线型解码超表面	圆孔阵列/环形孔径
成本	高	低	低	低	低	低
速度	正常	正常	正常	正常	正常	正常
可靠性	高	高	高	高	高	高
复杂型	复杂	复杂	简单	简单	简单	简单
OAM模式	复合	复合	复合	仅能分辨符号	复合	单一
工作频段	宽	窄	宽	窄	窄	宽

在水下通信中, 利用 OAM 声束传输数据具有其他方法不可比拟的优势, 因此寻找并完善简单高效的 OAM 声束解调方法仍是未来研究的重中之重. 目前提出的不同涡旋声束解调方案在多个方面的性能比较如表 2 所列.

4 OAM 声束的传输特性

涡旋波场的一个重要特征就是具有相位奇点, 它的存在具有普遍性和结构稳定性^[91]. 从物理上来说, 这意味着它们是在波场中自然产生的, 而场的微弱扰动并不能使它们消失. 除此之外, OAM 声束还有许多其他有趣的性质.

2003 年, Thomas 和 Marchiano^[92] 提出一个仅用线性场来定义的伪动量的概念, OAM 声束和 OAM 光束也具有相同的性质. 虽然伪动量只涉及线性场, 但声波的传播始终是一个非线性现象, 而非线性将引起高次谐波的产生. 该工作指出, 在均匀无损介质中, 拓扑荷随谐波的阶数线性增加, 所有谐波的伪角动量与伪能量之和守恒. 此外, 在假定波的角动量等于其伪角动量的前提下, 可以计算施加于吸声物体或各向异性介质上的力矩. 2005 年, 他们^[93] 又指出拓扑荷为 m 的高阶声涡旋具有不稳定性, 任何微弱的扰动都可能会使其变成 $|m|$ 个拓扑荷为 1(或-1) 的涡旋. 此外, 该工作还研究了具有相同或相反拓扑荷的两个 OAM 声束间的相互作用, 证实了两个携带相同拓扑荷的 OAM 声束在传播过程中不会相互影响, 而当携带的拓扑荷符号相反时, 两束 OAM 声束会逐渐靠近直至融合, 并且融合后的波束将不再具有螺型位错的特征.

在考虑实际情况或应用时, 介质通常在不同的空间区域对应的参数也不同. 例如, 在生物医学超声研究中, 声速在各组织间存在较大差异^[94,95]; 在深海环境中, 声速是深度的函数, 是由温度、盐度

分层和压力变化造成的^[96]. 2008 年, Marchiano 等^[97] 对在均匀或非均匀介质中 OAM 声束的三维非线性传播进行了数值研究. 对非线性系统的动力学特性及均匀介质中 OAM 声束非线性特性的研究表明, OAM 声束在传播过程中产生激波, 形成一个带有方位激波的波场. 此外, 该课题组还利用不同的聚焦透镜对非线性区域内的拓扑荷动力学(即 OAM 声束的本征性质)进行了研究, 结果表明, 如果 OAM 声束通过一维聚焦介质(圆柱形透镜)传播, 拓扑荷会出现反转(图 4(a)), 而如果传播介质是二维聚焦介质(球形透镜), 拓扑荷会保持不变(图 4(b)). 通过对线性光学中已经观察到的结果进行推广, 并结合对谐波的研究, 证实 OAM 声束的三维非线性行为也基本相同.

2009 年, Brunet 等^[98] 通过实验观察到携带不同拓扑荷的非线性声涡旋在传播时会产生激波, 进一步推动了对 OAM 声束传播特性的研究. 由于有限振幅波的传播速度取决于压力的瞬时值, 因此波的高振幅部分比低振幅部分传播得更快, 而且由于水是声波的准非色散介质, 会导致时间剖面上的畸变, 这些因素最终导致了激波的形成. 针对这些具有三维螺旋形状的激波, 该课题组对其纵向分量和方位角分量都进行了研究. 图 5(a) 显示了拓扑荷分别为 $m = 1$ (左) 和 $m = 3$ (右) 的 OAM 声束在同一平面上以时间间隔 $T/3$ (T 为周期) 测得的瞬时声压情况. 值得注意的是, 激波的波前仍显示为螺旋状. 实验结果表明, 在激波形成的距离之外, 频率与拓扑荷守恒定律仍然有效. 激波的形成不会破坏 OAM 声束结构的稳定性, 而且强化了 OAM 声束在非线性扰动下的结构稳定.

2019 年, Fan 等^[99] 对 OAM 声束在非均匀介质中的传播进行了研究. 首先, 该课题组对线性分层流体(声速为 $c = c_0 - Gz$, G 为梯度)中 OAM

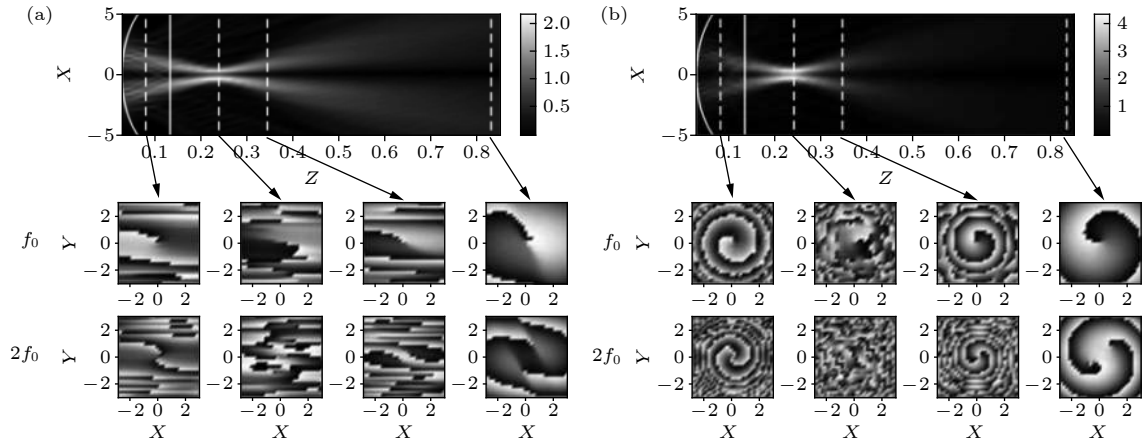


图 4 OAM 声束通过 (a) 一维声透镜和 (b) 二维声透镜的非线性传播^[97], 其中上图显示 XOZ 平面的均方根振幅. 下图是基波和二次谐波在虚线表示的不同距离 ($Z = 0.07, 0.23, 0.32$ 和 0.85) 的 XY 平面上的相位

Fig. 4. Nonlinear propagation of a single OAM sound beams through (a) a 1D acoustical lens and (b) a 2D acoustical lens^[97]. Top view presents the RMS (root mean square) amplitude in the XOZ plane. Bottom views are representations of the phase for the fundamental frequency and the second harmonic across plane X, Y at different distances: $Z = 0.07, 0.23, 0.32$, and 0.85 the positions of these planes are indicated by dashed lines on the top view.

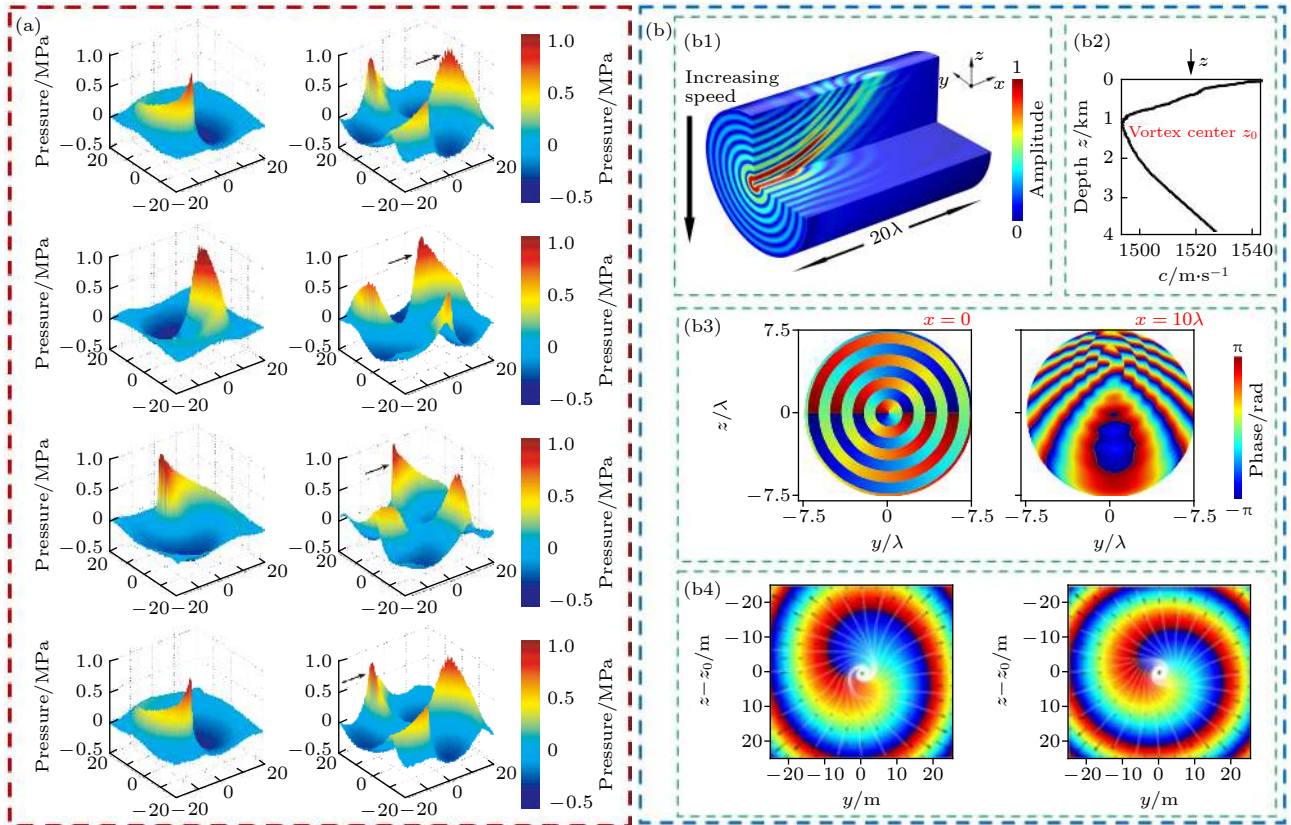


图 5 (a) 携带拓扑荷 $m = 1$ (左) 和 $m = 3$ (右) 的非线性 OAM 声束在不同时刻的瞬时声压 (黑色箭头表示其中一个激波的位置)^[98]; (b) (b1) 分层介质中 OAM 声束弯曲的模拟, (b2) 深度与声速的关系, (b3) 在不同的传播距离 x 下, 相位在 $y-z$ 截面上的拉伸和变形, (b4) 在分层海洋中 (左) 的相位 (彩色图) 和能量通量 (黑色箭头和白色流线)(顶部) 以及与在非分层海洋中 (右) 的传播的比较^[99]

Fig. 5. (a) Instantaneous sound pressure of a nonlinear OAM beam carrying topological charge $m = 1$ (left) and $m = 3$ (right) at different moments^[98]. The black arrows indicate the position of one of the three shocks. (b) (b1) Simulation of OAM sound beams bending in a stratified medium, (b2) the sound speed profile, (b3) stretching and distorting of the phase on $y-z$ cross sections at different propagating distances x , (b4) vortex phases (color plots) and energy flux (black arrows and white streamlines) in the stratified ocean (left) and a comparison with propagation in an unstratified ocean (right)^[99].

声束的传播进行了模拟 (图 5(b1)). 通过仿真发现, OAM 声束向上弯曲并向分层方向拉伸, 图 5(b3) 为在不同传播距离处的相位分布情况. 此外, 该课题组还模拟了 OAM 声束在深海环境中的传播. 通过温度、盐度和声压的变化计算出了声速的分布 (图 5(b2)), 结果表明, 海洋分层同样会使 OAM 声束变形 (垂直拉伸), 也同样出现了不对称特征, 但由于分层相对较弱, 不对称现象不像之前那样强烈 (图 5(b4) 分别为分层 (左) 与非分层 (右) 海洋模型中相位和能流的分布情况), 即非线性梯度使 OAM 声束向声速最小方向聚焦, 而线性梯度则使 OAM 声束向一个方向弯曲. 该工作为复杂介质中 OAM 声束的传播研究开辟了一条新的途径, 其研究结果将有助于 OAM 声束在非均匀介质 (如海洋和生物医学组织) 中的应用.

5 OAM 声束在通信方面的应用

随着近海工业应用、海洋环境的远程监测等水下活动的日益增多, 水下通信的发展变得至关重要. 但是水分子对微波和中、远红外辐射的吸收较强, 使得利用电磁波的技术难以在水下应用. 另外, 由于波长较短的光波会被海洋中的物体 (如小颗粒、碎片和海洋生物) 散射, 水下光通信的范围被限制在 200 m 以内^[100,101], 因此, 利用声波传递信息是目前水下通信应用的主导技术. 然而, 因为高频声波在水中的损耗会使传播距离减少, 声波的适用带宽通常被限制在 20 kHz 以内, 大大限制了数据传输的频谱带宽和数据速率. 但 OAM 声束的正交性提供了在单一声波束内进行多路数据传输的独特能力, 因此, 将 OAM 集成到现有的通信系统中有望进一步提高频谱效率, 满足不断增长的数据速率需求.

2017 年, Shi 等^[83] 提出一种基于 OAM 的高速声通信技术, 使用 -4 到 +4 的八种拓扑荷实现了 (8.0 ± 0.4) (bit/s)/Hz 的数据传输. 其原理是通过计算机控制的数模转换电路产生信号来控制换能器阵列 (图 6(a1)): 共四圈, 每一圈包括 16 个等间距放置的换能器) 将编码成多路 OAM 声束的信息发射到自由空间, 并在接收端采用声学相控阵进行接收和解调. 该工作中展示了英文单词 “Berkly” 的传送, 每个字母用 8 bit 长度的 ASCII 码编码. 如图 6(a2) 所示, 当对应的拓扑荷阶数上有信号输出时, 编码为 “1”; 信号关闭时, 编码为 “0”, 信号能

量平均分配在每个字节对应的所有编码为 “1” 的态上. 图 6(a3) 为携带不同字母信息的复用 OAM 声束的声压和相位分布. 在接收端处进行声场扫描, 并利用计算机对扫描得到的声场幅度与相位进行内积运算. 经过这种信号后处理, 将相互重叠的八种拓扑荷分离开来, 并从中解调出了所包含的信息. 该工作还通过理论计算与实验测量分析了这种 OAM 传输技术的误比特率 (bit error rate, BER) 与接收端换能器数目之间的关系, 发现只有当换能器数目较大时方可获得较低 BER, 但继续增加换能器数目并不会进一步降低 BER.

与该方案中将信息加载在 OAM 的开关态上不同, Cheng 课题组^[84,102] 直接将携带不同拓扑荷的 OAM 声波作为信息载体. 如图 6(b1) 所示, 该工作使用 8 个换能器单元组成的相控阵来实现复合 OAM 声波的产生, 其中每个单元信号的幅度和相位均可独立调控. 以单频声波为例, 利用拓扑荷 $m = 1$ 和 $m = 2$ 两种 OAM 声束进行编码可以传输 2 bits 的信息; 但如果将信息编码在相位, 可利用现有的 $1/4$, $1/8$ 及 $1/16$ 相位键控技术等已有编码手段来实现编码, 分别传输 4, 8, 及 16 bits 的信息, 若同时再采用幅值进行编码, 同样可根据不同的幅值编码技术实现多 bit 的信息传输. 图 6(b2) 展示了不同复合信号在解码端两个区域中的分布情况, 其中 m -th (A, ϕ) 表示拓扑荷为 m , 幅度和相位分别为 A 和 ϕ 的 OAM 声束的声压. 从图 6 可以看出, 利用 OAM 声束来编码信息时, 携带不同拓扑荷的 OAM 声束不仅相互之间完全正交, 而且与复合信号的幅度与相位也独立. 因此, 这种编码方式可以直接与现有的多路复用技术兼容, 在不增加额外信道负担的情况下开辟一种新的通信自由度. 在接收端, 则采用了基于超表面的实时解调原理. 对于共使用 N 阶 OAM 声束进行编码的系统, 通过在接收端依次放置 N 个相同的解调超表面 (de-multiplexing metasurface, DMM) (每个表面设计为将拓扑荷数 m 降低 1 阶), 可将 OAM 声束转化为阶数变化的 OAM 声束或平面波. 以 $m = 1$ 阶的 OAM 声束为例, 经过第一个 DMM 后, 波束将转化为平面波, 其中心处的声压将不再为零 (图 6(b3)). 由于当且仅当 m 降至 0 时解调端对称中心处的场强方不为零, 因此, 通过依次在每一个 DMM 之后的区域中直接检测中心处声强大小, 即可简便而高效地测量出发射端处具有相应阶数的

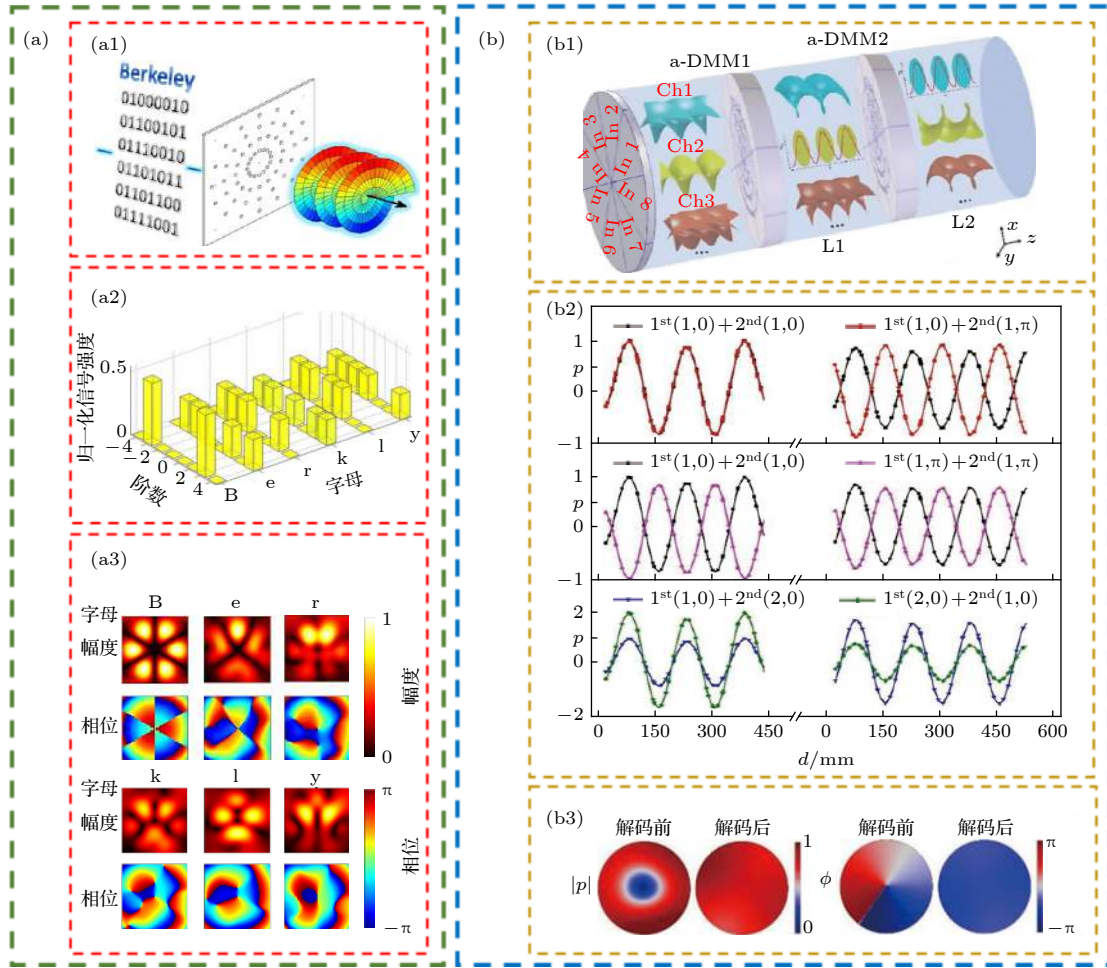


图 6 (a) (a1) 实验原理示意图, (a2) 单词“Berkeley”对应的 ASCII 编码方式, (a3) 实验测量得到的单词“Berkeley”对应的调制信号包含的八种拓扑荷的声压幅度与相位^[83]; (b) (b1) 基于 OAM 声束的调制-解调原理示意图, (b2) 不同复合信号在解码端两个区域中的分布情况, (b3) 用超表面解码前后的信号幅度 (左侧) 及相位 (右侧) 分布图^[84,102]

Fig. 6. (a) (a1) Schematic diagram of the experiment, (a2) the ASCII code corresponding to the word “Berkeley”, (a3) the amplitude and phase of the eight topological charges contained in the modulation signal corresponding to the word “Berkeley” as measured by the experiment^[83]; (b) (b1) schematic diagram of the modulation-demodulation principle based on the OAM sound beams, (b2) distribution of different composite signals in two regions of the decoding terminal, (b3) distribution diagram of signal amplitude (left) and phase (right) before and after the decoding with the hypersurface^[84,102].

OAM 声束的幅值和相位信息.

2019 年, Zhang 和 Yang^[103] 利用声涡旋传输的形式实现了一幅大小为 256×256 像素的标准灰度图像的传输. 在该工作中, 发射端的原理图如图 7(a) 所示, 每个像素被编码为 8 位二进制数据, 并将图像的像素独立编码为开-关键控 (on-off keying, OOK) 形式的 OAM 声载波, 每个比特占据指定的独立 OAM 通道. 该团队采用 20 个换能器组成的半径为 λ 的环形阵列, 以 10 kHz 的频率发射拓扑荷为 +1 到 +8 的多路涡旋声束, 图像数据通过多路复用的 OAM 声束并行传输, 并在距离发射面 20 个波长处的接收端, 通过方形接收阵列在一个 $1.5\lambda \times 1.5\lambda$ 的扫描区域进行声压场数据采集.

将所记录的幅值和相位数据与 8 个具有与发射 OAM 拓扑荷反向的 OAM 态进行内积, 以恢复原始信号. 他们在该工作中指出, 这种方案使频谱效率达到 8 (bit/s)/Hz, 与直接的 OOK 调制相比, 信息传输速率提高了 8 倍. 若结合更多的 OAM 模式与先进的调制格式, 可以实现频谱效率的进一步提高. 此外, 在该工作中, 还对可用 OAM 信道的数目和系统的接收性能进行了系统研究, 结果发现, 可用的 OAM 通道的数量与发射端换能器的数量有关, 而接收性能与接收器的数量和扫描面积有关, 与布置方式无关, 分辨率越高, 覆盖范围越广, 接收性能越好.

为了实现设计结构简单、控制方便的收发信机

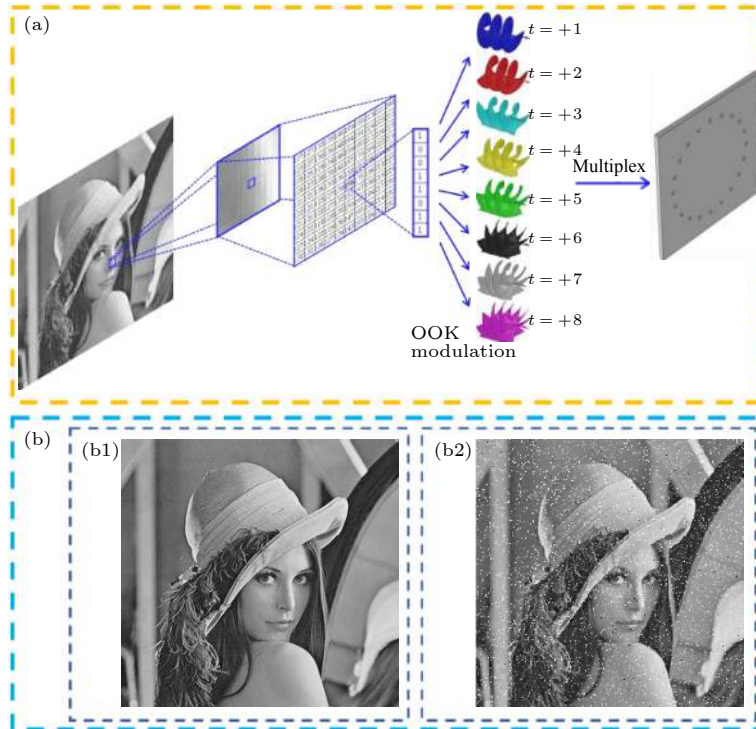


图 7 (a) 水声通信系统多路复用 8 OAM 模式的概念示意图; (b) (b1) 通信系统传输的 256×256 像素的灰度图像 lena (lena.jpg); (b2) 在 20 dB 信噪比下, 仅考虑加性高斯白噪声得到的接收图像^[103]

Fig. 7. (a) Notion of underwater acoustic communication system multiplexing 8 OAM topological charges; (b) (b1) the gray scale image with 256×256 pixels of lena (lena.jpg) to be transmitted through the communication system, (b2) the receiving image obtained at 20 dB SNR where additive white gaussian noise (AWGN) was only concerned^[103].

阵列, 2020 年, Li 等^[104] 采用简化的单点收发器阵列构建了 OAM 声束通信的理论模型, 通过建立的环形 16 声源阵列实验系统, 研究了 OAM 声束通信原理和性能. 该方案基于相位编码技术形成拓扑荷可控的 OAM 声束, 通过拓扑荷调控和多 OAM 声束的合成, 构建同轴传输的 OAM 复用声束. 在接收端, 通过单环接收阵列进行声场信号的检测和 OAM 声束的正交解码, 成功实现了基于单环收发阵列的 OAM 声束通信 (单环收发阵列由 M 个接收单元和 N 个发射单元组成). 然后, 该工作又模拟了对于 $m = 7$ 的单 OAM 声束, 采用 16×16 和 32×32 的收发器阵列时的信道容量和信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 的关系, 并将其与相应的多入多出 (multiple input-multiple output, MIMO) 系统进行了比较. 研究表明, OAM 通信系统的信道容量随着信噪比的增大而增大. 对于相同信噪比的情况, 信道容量随收发器阵列单元数的增加而增大. 对于不同 OAM 态的情况, 该工作也对信道容量及 SNR 的关系进行了研究. 此外, 该工作还研究了单 OAM, 8-OAM 和 14-OAM 波束信道容量与 SNR 的关系. 在 SNR 为 30 dB 时, 8-OAM

的信道容量为 31.072 bit/s/Hz, 比相同情况时采用单 OAM 的信道容量高了 15.703 bit/s/Hz, 比采用 14-OAM 时的信道容量低了 4.01 bit/s/Hz. 结果表明, 单 OAM 声束的信道容量远小于多 OAM 声束, 且随多路声涡旋的 OAM 态的增加而增大. 因此, 基于 OAM 的声波通信可以有效增加信道容量, 同时避免了不同模式之间的串扰, 具有良好的解码稳定性. 该工作为 OAM 声束在通信中的阵列设计、数据传输、解码和校准提供了理论基础和技术支持, 在水声通信领域具有广阔的应用前景.

值得注意的是, 对于声学 OAM 通信系统的研究仍处于初级阶段, 声学 OAM 通信的可行性, 特别是水下声学 OAM 通信, 还需要进一步的实验验证. 除了固有的 OAM 声束发散和偏移问题外, 水下环境 (水生生物, 湍流效应等) 对 OAM 链路的影响也需要进一步研究. 目前, 大多数 OAM 声束相关的实验都是在实验室可控环境下进行的. 实验室之外的测试和 OAM 系统的实际部署应该是未来研究活动的重点.

6 总结与展望

本文从涡旋声束的基本理论出发,对涡旋声束的产生与检测理论及相关研究进展进行了综述.并对声 OAM 的传输特性及其在通信方面的应用研究进行了阐述与总结.除了 OAM 声束在粒子操控、生物医学等方面的应用外,OAM 声束在通信方面的应用也成为近年来研究的热点问题.由于涡旋声束 OAM 态取值的无限性及不同 OAM 态之间的相互正交性,声波的 OAM 态可以为声通信系统提供一个全新的物理维度,并且,利用 OAM 作为新的通信自由度,可以与现有的多路复用传输系统合并兼容,有望带来水下声学通信技术方面的巨大变革.

当前研究中尽管已经初步证明了涡旋声束所蕴含的潜力,但还远远无法满足实际应用的需求.涡旋声束未来的成功很大程度上将依赖于 OAM 声束发射机、多路复用器、解复用器和接收机等系统组件的研究与开发.然而,当前许多与声 OAM 相关的实验仍然使用体积庞大且价格昂贵的组件,这些组件不适合实际实现和大规模使用.如何有效降低组件的成本和尺寸,并保证其与现有技术相兼容仍旧需要深入的研究.此外,传播信道的状态对基于 OAM 的链路有很大的影响,在一些复杂信道条件下出现的问题也需要得到解决.总之,目前对 OAM 声束的研究仍处于起步阶段,存在着许多问题与挑战,值得进一步深入研究和解决.但可以预见的是,随着研究的深入,OAM 这一全新维度的引入将有助于在医学诊疗、水下通信和海洋探测等方面取得重大突破.

参考文献

- [1] Nye J F, Berry M V 1974 *Proc. R. Soc. Lond. A* **336** 165
- [2] Berry M V 2004 *J. Opt. A* **6** 259
- [3] Fu S Y, Zhang S K, Wang T L, Gao C Q 2016 *Opt. Express* **24** 6240
- [4] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. 2012 *Nat. Photonics* **6** 488
- [5] Kai C H, Huang P, Shen F, Zhou H P 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 7902510
- [6] Guo Z Y, Zhu L, Guo K, Shen F 2017 *Nanoscale Res. Lett.* **12** 1
- [7] Guo Z Y, Wang Z K, Dedo M M, Guo K 2018 *IEEE Photonics J.* **10** 7906511
- [8] Dedo M I, Wang Z K, Guo K, Sun Y X, Shen F, Zhou H P, Gao J, Sun R, Ding Z Z, Guo Z Y 2019 *Appl. Sci.* **9** 2269
- [9] Kai C H, Feng Z K, Dedo M I, Huang P, Guo K, Shen F, Gao J, Guo Z Y 2019 *Opt. Commun.* **430** 151
- [10] Wang Z K, Guo Z Y 2019 *IEEE Access* **7** 163633
- [11] Feng Z K, Wang X Y, Dedo M I, Guo K, Shen F, Kai C H, Guo Z Y 2019 *Opt. Commun.* **435** 441
- [12] Wang Z K, Dedo M M, Guo K, Zhou K Y, Shen F, Sun Y X, Liu S T, Guo Z Y 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 7903614
- [13] Dedo M M, Wang Z K, Guo K, Guo Z Y 2020 *Opt. Commun.* **456** 124696
- [14] Guo Z Y, Gong C F, Liu H J, Li J J, Wang Z K, Yang Y, Gong Y B 2020 *Opto-Electronic Engineering* **47** 190593 (in Chinese) [郭忠义, 龚超凡, 刘洪郡, 李晶晶, 王子坤, 杨阳, 宫玉彬 2020 *光电工程* **47** 190593]
- [15] Li T, Chen J, Ke X Z, Lü H 2012 *Acta. Phys. Sin.* **61** 124208 (in Chinese) [李铁, 谌娟, 柯熙政, 吕宏 2012 *物理学报* **61** 124208]
- [16] Yin X L, Guo Y L, Yan H, Cui X Z, Chang H, Tian Q H, Wu G H, Zhang Q, Liu B, Xin X J 2018 *Acta. Phys. Sin.* **67** 114201 (in Chinese) [尹霄丽, 郭翊麟, 闫浩, 崔小舟, 常欢, 田清华, 吴国华, 张琦, 刘博, 忻向军 2018 *物理学报* **67** 114201]
- [17] Cui C, Wang Z, Li Q, Wu C Q, Wang J 2019 *Acta. Phys. Sin.* **68** 064211 (in Chinese) [崔燊, 王智, 李强, 吴重庆, 王健 2019 *物理学报* **68** 064211]
- [18] Yin Z P, Zheng Q, Guo K, Guo Z Y 2019 *Appl. Sci.* **9** 2949
- [19] Wang L L, Chen H Y, Guo K, Shen F, Guo Z Y 2019 *Electronics* **8** 251
- [20] Yang Y, Wang Z L, Wang S M, et al. 2019 *Electronics* **8** 1224
- [21] Yang Y, Guo K, Shen F, Gong Y B, Guo Z Y 2019 *IEEE Access* **7** 138541
- [22] Shen F, Mu J N, Guo K, Guo Z Y 2019 *IEEE T. Antenn. Propag.* **67** 5763
- [23] Fan Q M, Yin C Y 2018 *Acta. Phys. Sin.* **67** 144101 (in Chinese) [范启蒙, 尹成友 2018 *物理学报* **67** 144101]
- [24] Guo Z Y, Wang Y Z, Zheng Q, Yin C Y, Yang Y, Gong Y B 2019 *J. Radars* **8** 631 (in Chinese) [郭忠义, 汪彦哲, 郑群, 尹超逸, 杨阳, 宫玉彬 2019 *雷达学报* **8** 631]
- [25] Broadbent E G, Moore D W 1979 *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* **290** 353
- [26] Marston P L 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 3539
- [27] Kang S T, Yeh C K 2010 *IEEE T. Ultrason. Ferr.* **57** 1451
- [28] Zhang L, Marston P L 2011 *Phys. Rev. E* **84** 035601
- [29] Baresch D, Thomas J L, Marchiano R 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** 25
- [30] Marzo A, Caleap M, Drinkwater B W 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 044301
- [31] Demore C E M, Yang Z Y, Volovick A, Cochran S, MacDonald M P, Spalding G C 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 194301
- [32] Diego B, Thomas J L, Marchiano R 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 024301
- [33] Sapozhnikov O A, Bailey M R 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** 661
- [34] Volke-Sepulveda K, Santillan A O, Boulloussa R R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 024302
- [35] Zhang L K, Marston P L 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **129** 1679
- [36] Zhang L K, Marston P L 2011 *Phys. Rev. E* **84** 065601
- [37] Zhang L K 2018 *Phys. Rev. Appl.* **10** 034039
- [38] Anhauser A, Wunenburger R, Brasselet E 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 034301
- [39] Diego B, Thomas J, Marchiano R 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 074301

- [40] Bernard I, Doinikov A A, Marmottant P, Rabaud D, Poulain C, Thibault P 2017 *Lab Chip* **17** 2470
- [41] Maxwell A D, Bailey M, Cunitz B W, et al. 2016 *J. Acoust. Soc. Am.* **139** 2040
- [42] Baresch D, Thomas J L, Marchiano R 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 184901
- [43] Courtney C R P, Demore C E M, et al. 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 154103
- [44] Foresti D, Poulidakos D 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 024301
- [45] Baudoin M, Gerbedoen J, Riaud A, Matar O B, Smagin N, Thomas J 2019 *Sci. Adv.* **5** eaav1967
- [46] Chen X Y, Lam K H, Chen R M, Chen Z Y, Qian X J, Zhang J, Yu P, Zhou Q F 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 054103
- [47] Marzo A, Seah S A, Drinkwater B W, Sahoo D R, Long B, Subramanian S 2015 *Nat. Commun.* **6** 8661
- [48] Seah S A, Drinkwater B W, Carter T, Malkin R, Subramanian S 2014 *IEEE T. Ultrason. Ferr.* **61** 1233
- [49] Courtney C R P, Drinkwater B W, Demore C E M, et al. 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 123508
- [50] Li W, Dai S J, Ma Q Y, Guo G P, Ding H P 2018 *Chin. Phys. B* **27** 024301
- [51] Hong Z Y, Zhang J, Drinkwater B W 2015 *EPL* **110** 14002
- [52] Li Y Z, Wang Q D, Guo G P, Ma Q Y 2018 *Technical Acoustic* **41** 704 (in Chinese) [李禹志, 王青东, 郭各朴, 马青玉 2018 *声学技术* **41** 704]
- [53] Skeldon K D, Wilson C, Edgar M, Padgett M J 2008 *New J. Phys.* **10** 013018
- [54] Zhang R Q, Guo H L, Deng W Y, Huang X Q, Lu J Y, Liu Z Y 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 123503
- [55] Hefner B T, Marston P L 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **106** 3313
- [56] Ma Z Y, Ma J, Zhang D, Tu J 2018 *Chin. Phys. B* **27** 034301
- [57] Muelas-Hurtado R D, Ealo J L, Pazos-Ospina J F, Volke-Sepulveda K 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 084101
- [58] Yang L, Ma Q Y, Tu J, Zhang D 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 154904
- [59] Pazos-Ospina J F, Ealo J L, Franco E E 2017 *J. Acoust. Soc. Am.* **142** 61
- [60] Li Y Z, Ma Q Y, Guo G P, Tu J, Zhang D 2018 *J. Appl. Phys.* **124** 114901
- [61] Gspan S, Meyer A, Bernet S, Ritsch-Martel M 2004 *J. Acoust. Soc. Am.* **115** 1142
- [62] Wunenburger R, Lozano J I V, Brasselet E 2015 *New J. Phys.* **17** 103022
- [63] Jimenez N, Romero-García V, Picó R, et al. 2014 *EPL* **106** 24005
- [64] Jiang X, Zhao J J, Liu S L, Liang B, Zou X Y, Yang J, Qiu C W, Cheng J C 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 203501
- [65] Jiménez N, Sánchez-Morcillo V, Picó R, García-Raffi L M, Romero-García V, Staliunas K 2015 *Phys. Procedia* **70** 245
- [66] Wang T, Ke M Z, Li W P, Yang Q, Qiu C Y, Liu Z Y 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 123506
- [67] Jimenez N, Romero-García V, García-Raffi L, Camarena F, Staliunas K 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 204101
- [68] Muelas-Hurtado R D, Ealo J L, Volke-Sepúlveda K 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 114101
- [69] Zhou H P, Li J J, Guo K, Guo Z Y 2019 *J. Acoust. Soc. Am.* **146** 4237
- [70] Jia Y R, Wei Q, Wu D J, Xu Z, Liu X J 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 173501
- [71] Chen D C, Zhou Q X, Zhu X F, Xu Z, Wu D J 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 083501
- [72] Jiang X, Li Y, Liang B, Cheng J C, Zhang L K 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 034301
- [73] Jia Y R, Ji W Q, Wu D J, Liu X J 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 173502
- [74] Guo Z Y, Liu H J, Zhou H, et al. 2019 *Phys. Rev. E* **100** 053315
- [75] Ye L P, Qiu C Y, Lu J Y, Tang K, Jia H, Ke M Z, Peng S S, Liu Z Y 2016 *Aip Adv.* **6** 085007
- [76] Esfahlani H, Lissek H, Mosig J R 2017 *Phys. Rev. B* **95** 024312
- [77] Naify C J, Rohde C A, Martin T P, Nicholas M, Guild M D, Orris G J 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 223503
- [78] Charles A R, Christina J N, Matthew D G, et al. 2017 *Proc. SPIE* **10170** 1017011
- [79] Jiménez-Gambín D, Jiménez N, Benlloch J M, Camarena F 2019 *Sci. Rep.* **9** 1
- [80] Zeng J F, Zhang X, Wu F G, Han L X, Wang Q, Mu Z F, Dong H F, Yao Y W 2019 *Phys. Lett. A* **383** 2640
- [81] Liu J J, Liang B, Yang J, Yang J, Cheng J C 2020 *Sci. Rep.* **10** 1
- [82] Fan S W, Wang Y F, Cao L Y, et al. 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 163504
- [83] Shi C Z, Dubois M, Wang Y, Zhang X 2017 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **114** 7250
- [84] Jiang X, Liang B, Cheng J C, Qiu C Y 2018 *Adv. Mater.* **30** 1800257
- [85] Stankevich D A 2019 *CEUR Workshop Proceedings* **2416** 300
- [86] Liu F M, Li W P, Pu Z H, Ke M Z 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 193501
- [87] Jiang X, Shi C Z, Wang Y, Smalley J, Cheng J C, Zhang X 2020 *Phys. Rev. Appl.* **13** 014014
- [88] Fu S Y, Gao C Q 2018 *Acta. Phys. Sin.* **67** 034201 (in Chinese) [付时尧, 高春清 2018 *物理学报* **67** 034201]
- [89] Gong C F, Li J J, Guo K, Zhou H P, Guo Z Y 2020 *Chin. Phys. B* **29** 104301
- [90] Zhou H P, Li J J, Gong C F, Guo K, Guo Z Y 2020 *J. Acoust. Soc. Am.* **148** 167
- [91] Nye J F, Wright F J 2000 *Am. J. Phys.* **68** 776
- [92] Thomas J L, Marchiano R 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 244302
- [93] Marchiano R, Thomas J L 2005 *Phys. Rev. E* **71** 066616
- [94] Soldevilla M S, McKenna M F, Wiggins S M, et al. 2005 *J. Exp. Biol.* **208** 2319
- [95] Gu J J, Yun J 2018 *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **65** 1258
- [96] Zhang L K, Swinney H L 2017 *J. Acoust. Soc. Am.* **141** 3186
- [97] Marchiano R, Coulouvrat F, Ganjehi L, Thomas J L 2008 *Phys. Rev. E* **77** 016605
- [98] Brunet T, Thomas J, Marchiano R, Coulouvrat F 2009 *New J. Phys.* **11** 013002
- [99] Fan X D, Zou Z G, Zhang L K 2019 *Phys. Rev. Research* **1** 032014
- [100] Mullen L, Laux A, Cochenour B 2009 *Appl. Opt.* **48** 2607
- [101] Mullen L, Alley D, Cochenour B 2011 *Appl. Opt.* **50** 1396
- [102] Liang B, Cheng J C 2017 *Physics* **46** 658 (in Chinese) [梁彬, 程建春 2017 *物理* **46** 658]
- [103] Zhang H, Yang J 2019 arXiv: 1902.10196 [eess.SP]
- [104] LI X J, Li Y Z, Ma Q Y, Guo G P, Tu J, Zhang D 2020 *J. Appl. Phys.* **127** 124902

REVIEW

Research progress of applications of acoustic-vortex information^{*}

Guo Zhong-Yi[†] Liu Hong-Jun Li Jing-Jing
Zhou Hong-Ping Guo Kai Gao Jun

(*School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

(Received 1 June 2020; revised manuscript received 10 July 2020)

Abstract

The orbital angular momentum (OAM) carried by acoustic vortex beam can be transmitted to objects, which has a good application prospect in particle manipulation. In addition, the acoustic vortex beam also has great potentials in acoustic communication. The acoustic vortex beams with different OAM modes are orthogonal to each other, so the OAM mode can be introduced into the traditional acoustic communication, which provides a potential solution for realizing the high-speed, large-capacity and high-spectral efficiency of underwater acoustic communication technology in future. In this paper, we summarize the research progress of acoustic vortex beam, in which we mainly introduce the generation and detection scheme of acoustic vortex beam, its transmission characteristics, and its typical research cases in communication. Finally, the future development trend and the outlook of acoustic vortex beam are also analyzed and prospected.

Keywords: orbital angular momentum, acoustic vortex, acoustic communication

PACS: 43.90.+v, 47.35.Rs

DOI: [10.7498/aps.69.20200826](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200826)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61775050) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant No. PA2019GDZC0098).

[†] Corresponding author. E-mail: guozhongyi@hfut.edu.cn