

基于轨道角动量谱分解的多通道 水声通信及系统实现

开诚治¹, 刘天颀¹, 王青东², 李禹志¹, 郭各朴¹, 马青玉¹

(1. 南京师范大学计算机与电子信息学院/人工智能学院, 江苏 南京 210023)

(2. 山东科技大学海洋工程学院, 山东 青岛 266590)

[摘要] 水声通信能够实现信息的长距离传输, 在深海探索和军事领域发挥重要作用. 然而, 由于换能器带宽和声波波长的影响, 水声通信的发展与应用受到传输衰减大和信道容量低以及频谱利用率不足的限制. 本文结合复用涡旋声束 (AV) 和轨道角动量 (OAM) 谱分解技术, 研究了基于环形收发阵列的多通道水声通信方法, 并系统实现. 基于发送数据的 ASCII 编码, 利用全息信号的幅度和相位调制, 驱动环形换能器阵列发射沿轴传输的多通道 OAM 复用涡旋声束, 并通过环形换能器阵列的信号采样和 OAM 谱分解完成复用涡旋声束的 OAM 模式解码, 实现了高效的并行数据传输. 构建了 8 声源环形收发阵列和全息相控系统, 开展了 6 通道水声通信研究, 成功实现了复用涡旋声束的实验测量和 OAM 解码, 并与传统单通道二进制串行数据通信进行性能比较. 理论和实验结果证明, 基于 OAM 谱分解的通信通道数由发射阵列的阵元数 N 决定, 其解码精度由发射信号的相位精度和接收阵列的阵元数决定; 阵元数 $N \geq 1$ 的大阵列系统在满 OAM 模式复用条件下的传输速率约为传统水声通信的 N 倍. 本研究表明基于 OAM 谱分解的多通道通信可大幅提高信道容量和频谱利用率, 为其在水声通信中的实际应用提供了一种实用方案.

[关键词] 多通道水声通信, 轨道角动量复用, 环形收发阵列, 全息信号, 谱分解

[中图分类号] O424 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2024)01-0103-08

Multi-channel Underwater Acoustic Communication and System Implementation Based on Orbital Angular Momentum Spectrum Decomposition

Kai Chengzhi¹, Liu Tianqi¹, Wang Qingdong², Li Yuzhi¹, Guo Gepu¹, Ma Qingyu¹

(1. School of Computer and Electronic Information & School of Artificial Intelligence, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: As an important part of modern communication, the underwater acoustic communication can realize long-distance information transmission and play an important role in the fields of deep-sea exploration and military. However, due to the narrow bandwidth of the transducer and the long wavelength of acoustic waves, the application of the traditional underwater acoustic communication is still limited by the large attenuation, low channel capacity and insufficient spectrum utilization. In this paper, the multi-channel underwater acoustic communication using circular transceiver arrays is established by combining the multiplexing of acoustic-vortex (AV) beams and the orbital angular momentum (OAM) spectrum decomposition. Based on the ASCII code of transmitted data, holographic signals of amplitude and phase modulation are used to drive the transmitter array to generate multi-channel OAM-multiplexed beam. Through circular acoustic sampling and OAM spectrum decomposition, the OAM modes carried in the multiplexed AV are decoded successfully to realize the high-efficient data transmission in parallel. The experimental 6-channel underwater acoustic communication is carried out with the 8-source circular transceiver arrays. The field measurement and OAM decoding of the OAM-multiplexed AVs are accomplished, and the performance of data communication is compared with that of the traditional one-channel serial one.

收稿日期: 2023-02-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11934009, 11974187, 12174198, 12227808)、江苏省自然科学基金项目 (BE2022814).

通讯作者: 马青玉, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 声学、电子技术和生物医学物理. E-mail: maqingyu@njnu.edu.cn

Theoretical and experimental results show that the channel number based on OAM spectrum decomposition is determined by the source number N of the transmitter array, and the decoding accuracy is decided by the phase accuracy of the transmitters and sampling number of the receiver array. For a large system of N transceivers with $N \geq 1$, the transmission speed is proved to be about N larger than times that of the traditional acoustic communication system at a same baud rate. The multi-channel technology can greatly improve the channel capacity and the efficiency of spectrum utilization, and provides a practical scheme for its practical application in underwater acoustic communication.

Key words: multichannel underwater acoustic communication, orbital angular momentum multiplexing, circular transceiver array, holographic signal, spectrum decomposition

随着全球海洋活动的逐渐频繁,通信技术迅猛发展,现代海洋通信网络已成为我国学术界以及工业界的热点问题. 电磁波、光波在水下传输时受到衰减、散射和吸收等影响,传输距离大大受限,而基于声波的水声通信展现其独特的优势. 传统水声通信方法主要是基于声波的幅度、频率和相位特性对信息进行编码、调制、传输、接收和解码^[1-2]. 然而,由于高频声波在水中传播损耗较大,水声通信通常采用频率不超过 40 kHz 的声波载体,但较长的声波波长限制了信息传输速率. 常规水声换能器带宽较窄,难以实现宽带的调制,严重限制了水声通信的信道容量. 为了提高信道容量和传输速率,科学家开展了正交频分复用(orthogonal frequency division multiplex, OFDM)技术研究. 2000 年,美国 Polytech 大学的 Kim 等^[3]搭建基于 OFDM 技术的水声通信系统,传输速率可达 3 584 bps. 2005 年,新加坡的 Chitre 等^[4]实现了基于 OFDM 技术的水声通信实验,在 350 m 传输距离下的通信误码率仅为 0.01%. 2004 年,马雯等^[5]基于 MFSK 技术实现了数十公里的远距离水声通信,其通信速率仅为 4 bit/s. 2007 年,哈尔滨工程大学桑恩方等^[6]实现了基于 OFDM 技术的低误码率通信系统,其通信距离可达 7 km 左右. 尽管 OFDM 技术可以在一定程度上提高频谱利用率,但由于带宽限制,水声通信的信息传输速率仍难以得到质的提高^[7-8].

与传统声束不同,涡旋声束所携带的整数阶轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)相互正交,可以利用 OAM 模式复用^[9]来开展信息编解码实现数据通信. OAM 为数据传输提供了一种独立于频率、幅度、相位的新维度,具有安全性高、传递可靠、频谱利用率高等优点,因此基于 OAM 的数据传输技术成为水声通信的研究热点. 2017 年,Shi 等^[10]使用拓扑荷为-4 到+4 的 8 种 OAM 模式复用实现了通信速率为 8.0 ± 0.4 bit/(s·Hz) 的数据传输. 通过字母的 8 bit ASCII 编码,利用四圈等间距放置的换能器阵列(16×4),产生多路 OAM 复用涡旋声束传输编码数据,通过二维阵列接收实现了英文单词“Berkeley”的传送. 2018 年,南京大学的 Jiang 等^[11]将携带不同 OAM 的涡旋声束作为信息载体,基于声学解调超表面实现了实时多路复用信息的传递. 2019 年,Zhang 等^[12]设计了一个 OAM 复用的水声通信系统,实现了像素 256×256 的灰度图像的传输. 上述基于超构材料的 OAM 通信方法缺乏灵活性和实时性,而基于二维阵列的通信方法存在系统结构复杂,电路和控制繁琐等不足,因此亟需设计一种结构简单、传输速率快、易于调控和解码的通信系统来实现高效率的水声信息传输.

本文将复用涡旋声束理论^[13-14]与 OAM 谱分解技术引入水声通信领域,开展多通道水声通信研究和系统设计. 构建了基于环形收发阵列的多通道 OAM 复用涡旋声束,并利用 OAM 谱分解理论对复用涡旋声束进行解码,实现了水下多通道数据的高效并行传输. 与传统的水声通信方法相比,本研究克服了可用信道数量受限于换能器带宽的问题,大幅增加了信道容量,提高了信息传输效率,为 OAM 在多通道水声通信中的实际应用提供了一种实用方案.

1 基于 OAM 谱分解的多通道水声通信原理

1.1 基于环形发射阵列的多通道 OAM 复用涡旋声束构建

基于环形发射阵列的多通道 OAM 传输系统结构如图 1 所示,通过 N 阵元的环形换能器阵列进行幅度和相位调控来构建不同 OAM 模态复用涡旋声束. 根据相位编码理论,各阵元输出声波幅度相同,第 n 个阵元的初始相位为 $[2\pi(n-1)l]/N$,所构建单 OAM 涡旋声束的声压为^[15]:

$$p_l(r, \varphi, z) = \sum_{n=1}^N (A_0/R_n) \exp(ikR_n) \exp(i[2\pi(n-1)l]/N), \quad (1)$$

其中 l 是涡旋声束的拓扑荷, A_0 表示声源声压幅度, R_n 为换能器中心点 $(a, \varphi_n, 0)$ 与观测点 (r, φ, z) 间距离, $k = \omega/c$ 表示声速为 c 和角频率为 ω 声波的波数. 复用涡旋声束可以表示为 S 个同共轴传输的单 OAM 涡旋声束的线性叠加:

$$p(r, \varphi, z) = \sum_{s=1}^S p_{l_s}(r, \varphi, z) = \sum_{s=1}^S \left[\sum_{n=1}^N (A_0/R_n) \exp(ikR_n) \exp(\pm i\phi_{l_s,n}) \right], \quad (2)$$

其中 l_s 表示第 s 个涡旋声束的拓扑荷.

对发射阵元进行信号合成来产生 OAM 复用涡旋声束, 则第 n 个换能器的激励信号为:

$$u_n = \sum_{s=1}^S s_0 \cos(\omega t + \varphi_s), \quad (3)$$

其中 $\varphi_s = [2\pi(n-1)l_s]/N$ 是产生拓扑荷为 l_s 的涡旋声束所需激励信号的初相位. 可见, 第 n 个换能器的激励信号是同频相控余弦波的叠加, 所构建的复用涡旋具有较复杂的声压和相位分布, 因此需要对发射阵元进行精确的幅度和相位调控.

1.2 基于环形接收阵列的 OAM 谱分解理论

OAM 复用涡旋声束可以看成是多个单 OAM 声场的线性叠加, 且不同 OAM 模式之间相互正交. 在传播距离为 z 的横截面内, 拓扑荷为 l 涡旋声场的声压可以简化为 $p_l(r, \varphi, z) = A(l, r) \exp[i\psi(l, r)] \exp(il\varphi)$ [16], 其中 $A(l, r)$ 表示环形声场的径向声压分布, $\psi(l, r)$ 和 $l\varphi$ 分别为其径向和角向相位分布. 因此, 复用涡旋声场可以用所包含 OAM 谱分解 [17] 来表示:

$$p(r, \varphi, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m(r, z) \exp(im\varphi) / \sqrt{2\pi}, \quad (4)$$

其中 $a_m(r, z)$ 表示复用涡旋声场中半径为 r 圆周上 m 阶 OAM 的复幅度, 可通过 $c_m(r, z) = |a_m(r, z)|^2$ 计算得到 m 阶 OAM 的功率谱 $P_m = \int_0^\infty c_m r dr$.

本研究中, 为了简化计算过程, 可用 $\sum_{i=1}^M p_i(r, \varphi_i, z) \xi(\varphi_i) \exp(-im\varphi_i)$ 来替代 $\int_0^{2\pi} p(r, \varphi, z) \exp(-im\varphi) d\varphi$, 其中 $p_i(r, \varphi_i, z)$ 和 $\varphi_i = 2\pi(i-1)/M$ 分别是第 i 个检测点的声压和角度, 得到 $a_m(r, z) \approx (1/\sqrt{2\pi}) \sum_{i=1}^M p_i(r, \varphi_i, z) \xi(\varphi_i) \exp(-im\varphi_i)$, 因此, m 阶 OAM 的归一化功率谱为:

$$P_m(r, z) = |a_m(r, z)|^2 / \sum_{m=-l_{\max}}^{l_{\max}} |a_m(r, z)|^2, \quad (5)$$

其中 $l_{\max} = \text{Fix}[(N-1)/2]$ 表示发射阵列所能发出的最大拓扑荷 [15], $\text{Fix}(x)$ 表示对 x 向下取整. 当复用涡旋声束包含 S 个 OAM 模式时, 当且仅当 $m = l_m$ 时, $P_m = 1/S$, 且 S 个 OAM 的 P_m 总和为 1.

1.3 基于 OAM 复用涡旋声束的多通道编解码

将传输字符 ASCII 码的对应位进行相应的拓扑荷编码 [18] 来产生单 OAM 涡旋声束, 然后通过多个携带单 OAM 涡旋声束合成构建复用涡旋声束, 其所携带的 OAM 模态相互正交. 本研究中, 由于 8 声源环形阵列所能产生涡旋声束的最大拓扑荷为 $l_{\max} = 3$, 以 $\pm 3, \pm 2, \pm 1$ 的 OAM 模态组合来对 ASCII 码进行低 6 位的二进制编码, 可以构建 64 个字符编码. 表 1 列出了字符“NJNU”的 OAM 模态编码信息.

设定收发阵列和系统参数为 $N = 8, r = 7 \text{ cm}$,

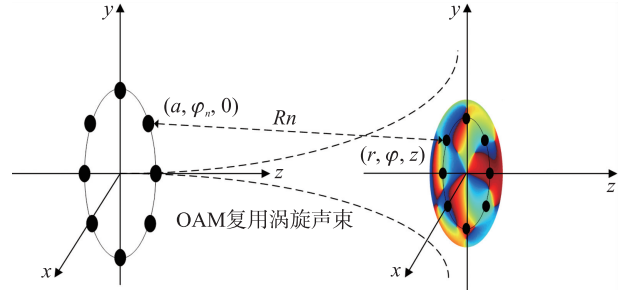


图 1 基于环形发射阵列的多通道 OAM 传输系统结构图

Fig. 1 Sketch map of the multi-channel OAM transmission system based on circular transceiver array

表 1 发送字母“NJNU”的 OAM 模态编码

Table 1 OAM states coding of transmitting characters “NJNU”

字母	OAM					
	-3	-2	-1	1	2	3
N	0	0	1	1	1	0
J	0	0	1	0	1	0
N	0	0	1	1	1	0
U	0	1	0	1	0	1

$f=40\text{ kHz}$, $c=1\,500\text{ m/s}$,通过相应单 OAM 涡旋声束的合成传输“NJNU”的复用涡旋声场,得到如图 2 所示 $z=25\text{ cm}$ 横截面内的声场声压和相位分布. 可见复用涡旋声场破坏了单 OAM 涡旋声场的环形声压和螺旋相位分布,同时由于不同字母编码所包含的 OAM 模式不同,所构建的复用涡旋也具有明显的差异,难以从相位螺旋直接求解所含的 OAM 模式,需要通过进一步的 OAM 解码才能恢复编码信息.

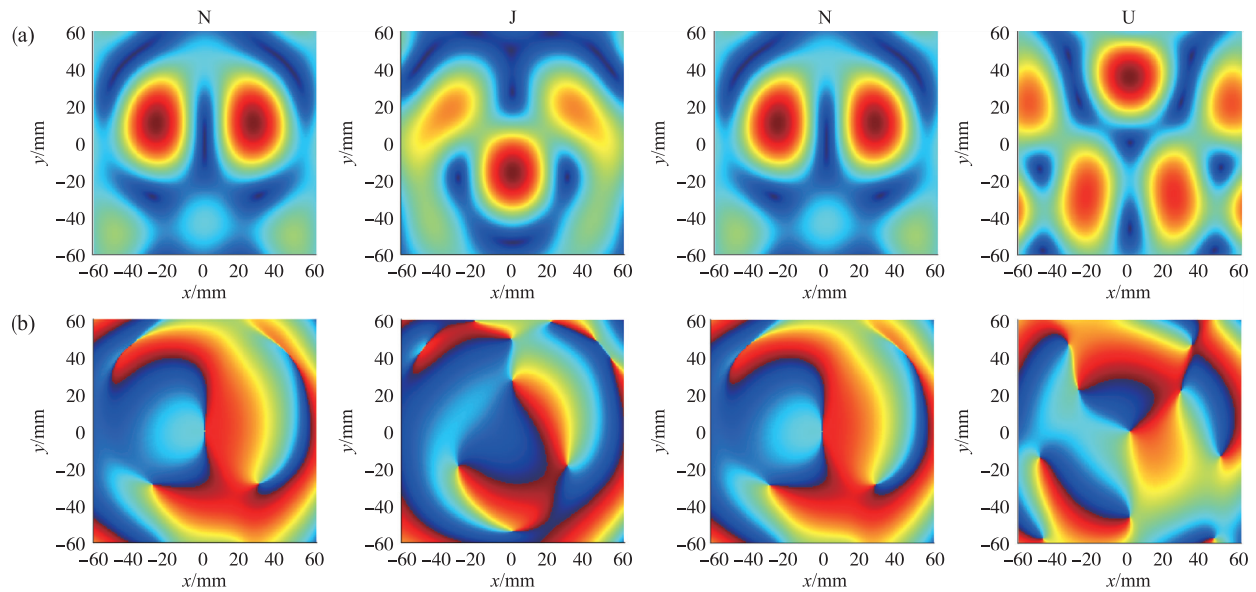


图 2 传输字符“NJNU”时复用涡旋声场横截面的 (a) 声压和 (b) 相位分布

Fig. 2 Cross-sectional distributions of (a) pressure and (b) phase of OAM-multiplexed acoustic-vortex beams transmitting characters “NJNU”

2 基于 OAM 谱分解的多通道水声通信系统实现

2.1 基于 OAM 谱分解的多通道水声通信硬件系统

为了实现多通道水声数据传输,搭建了如图 3(a) 所示的实验系统,其中上位机、全息信号调控模块和发射换能器阵列^[19] 构成发射端,环形接收换能器阵列、多路信号检测模块和解码模块组成接收端. 上位机将待传输字符进行编码,转换为复用涡旋声束的 OAM 模式,并控制全息信号调控模块输出多路幅度和相位可控的正弦信号,构建包含多 OAM 的复用涡旋声束. 接收换能器阵列采集复用涡旋声束横截面内的环

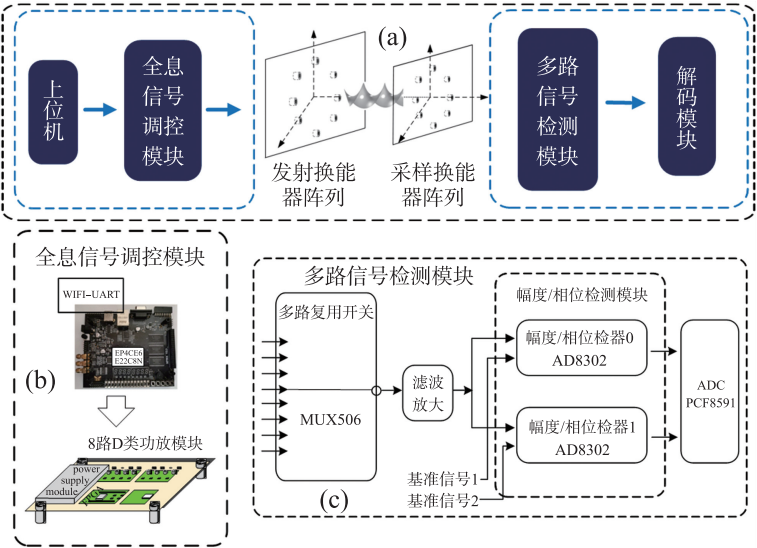


图 3 (a) 基于 OAM 谱分解的多通道水声通信实验系统框图, (b) 全息信号调控模块, (c) 多路信号检测模块原理框图

Fig. 3 (a) Sketch map of the underwater multi-channel acoustic communication system based on OAM spectrum decomposition, (b) module of holographic signal regulation, and (c) block diagram of the multi-channel signal detection module

形声压分布,获得相应的幅度与相位信息,由解码模块进行 OAM 谱分解计算,实现传输数据的多通道字符解码。

为实现发射阵元幅度和相位的精确调控,设计了如图 3(b)所示的全息信号调控模块,由 FPGA 和多路 D 类功放模块组成,可以产生 8 路幅度和相位可控的激励信号。FPGA(Cyclone IV EP4CE6E22C8N, 200 MHz)实时输出频率、幅度和相位精确可控的 8 路 PWM 波,经由 8 路 D 类功率放大模块^[20]对 FPGA 输出的 PWM 信号进行放大,经过低通滤波后驱动换能器阵列输出幅度和相位可调的全息正弦信号。

进一步基于环形采样阵列设计多路信号检测与解码模块,利用环形换能器阵列对复用涡旋声场的横截面声场进行采样,通过解码模块进行 OAM 的功率谱的计算。信号检测模块的原理如图 3(c)所示,多路复用开关芯片(MUX506)在 CPU 控制下依次传输八路双极性模拟信号,经滤波和放大(OPA2810)后输入幅度/相位检测模块,利用两片基于乘法器的幅度/相位检测器(AD8302)检测输入正弦信号的幅度及其和基准信号的相位差。电路采用初始相差 90° 的两路基准信号来进行双路相位检测,并将相差检测范围从 180° 扩展到 360° 。最后将两个检测器的检测结果传输至 ADC 芯片(PCF8591),完成对换能器阵列输出模拟信号的幅度和相位检测,并通过 IIC 传送给解码模块进行 OAM 解码和传输数据恢复。

2.2 基于 OAM 谱分解的多通道水声通信软件系统

软件系统包括发射端软件和接收端软件两部分,其中发射端软件分为初始化模块、全息信号产生与补偿模块和数据发送模块,接收端软件分为初始化模块和终端服务程序,工作流程如图 4 所示。由于 8 个发射换能器的阻抗难以保持一致,事先对各换能器的阻抗差异性进行检测,构建换能器的幅度和相位补偿数据文件,并存储在上位机中。当程序初始化后,上位机先建立 TCP 连接,根据输入的补偿数据文件地址读取数据存放于数组中,并进入等待状态。当接收到待传输字符或数据时,将字符进行编码,产生相应的 OAM 模态,然后计算出换能器阵列所对应的幅度和相位;进一步在换能器补偿数据中查找所对应的幅度和相位补偿信息,对计算的结果进行补偿,依次传送至全息信号调控模块中。当所有换能器的调控信息均发送完毕后,上位机发出刷新命令,控制全息信号调控模块同步刷新输出波形,完成换能器阵列驱动信号的全息调控。

接收端承担接收换能器阵列的幅度与相位数据采集和 OAM 解码任务,程序由初始化函数和中断服务程序构成,软件流程如图 4(b)所示,程序初始化在硬件上包括对定时器、GPIO 和 IIC 接口的初始化,并对 ADC 数组和解码缓冲数组进行初始化。初始化后的硬件定时器以约定的码元持续时间进行计时,并在计时结束后触发中断。在中断服务程序中,首先对计时器进行重装载以备下一帧数据的检测,然后依次通过 GPIO 控制函数控制多路复用开关将各换能器的输出信号传送至 ADC,通过 IIC 读写函数读取声压的 ADC 数据。经过 8 次循环完成接收阵列的环形采样,将检测到的声压数组送给解码模块进行 OAM 谱分解,完成相应传输字符的解码。

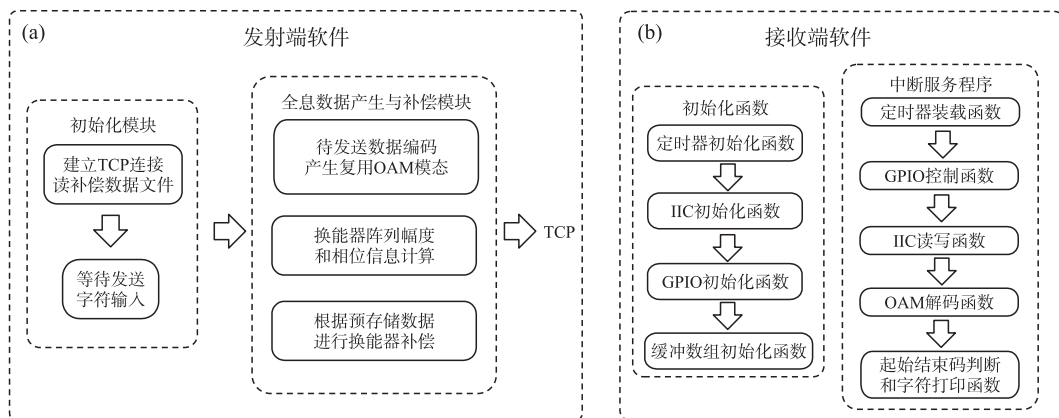


图 4 基于 OAM 谱分解的多通道水声通信系统: (a) 发射端, (b) 接收端软件框图

Fig. 4 Software block diagram of (a) transmitting and (b) receiving ends of the underwater multi-channel acoustic communication system based on OAM spectrum decomposition

3 实验结果与分析

基于 OAM 谱分解的多通道水声通信实验系统如图 5 所示,在上位机软件控制界面键入传输字符或字符串信息,经全息信号调控模块后激励 8 阵元环形发射换能器阵列产生 OAM 复用涡旋声束,8 阵元环形接收换能器阵列进行声场采样,并经信号检测模块采集其幅度和相位信息,由计算机进行 OAM 谱分解计算,实现传输数据解码.

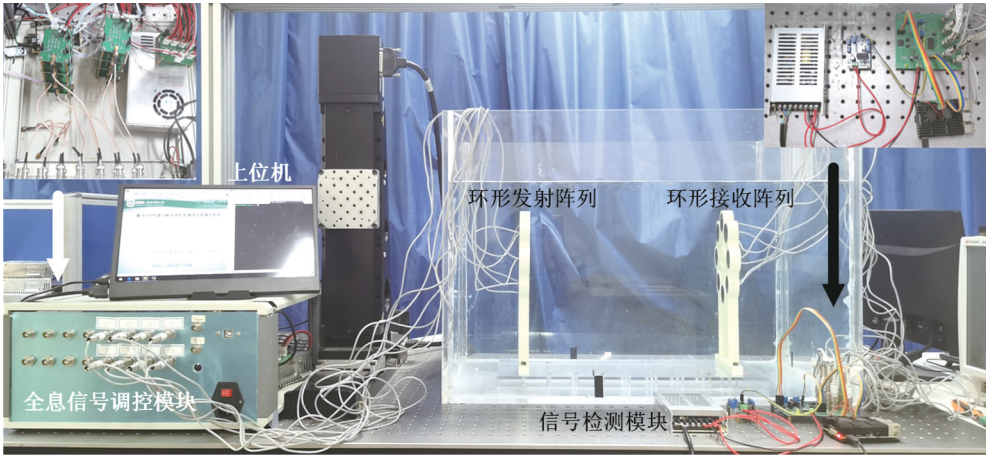


图 5 基于 OAM 谱分解的多通道水声通信实验系统照片

Fig. 5 Experimental photography of the underwater multi-channel acoustic communication system based on OAM spectrum decomposition

3.1 复用涡旋声束的声场测量和解码

按照表 1 的 OAM 编码方式分别传输字符“NJNU”,形成复用涡旋声束,利用步进电机控制水听器在 $z=25\text{ cm}$ 横截面内进行声场扫描,得到如图 6 所示的声压和相位分布,可见四种复用涡旋声场的实验结果和图 2 基本一致,但是由于存在噪声干扰和声场反射,以及较大的测量步进等因素的影响,实验声压分布存在一定的干涉波纹,同时其相位分布也产生了一定的畸变.

利用 8 阵元环形接收换能器阵列采集声场的幅度和相位信息,运用 OAM 谱分解法计算得到如图 7 所示的复用涡旋声场的 OAM 功率谱强度分布. 由于传输过程中存在噪声干扰和声场干涉,测量结果存在一定的 OAM 谱扩散,没有发射的 OAM 模态并不为 0,但其功率谱强度比编码发送的 OAM 模态低得多,其大

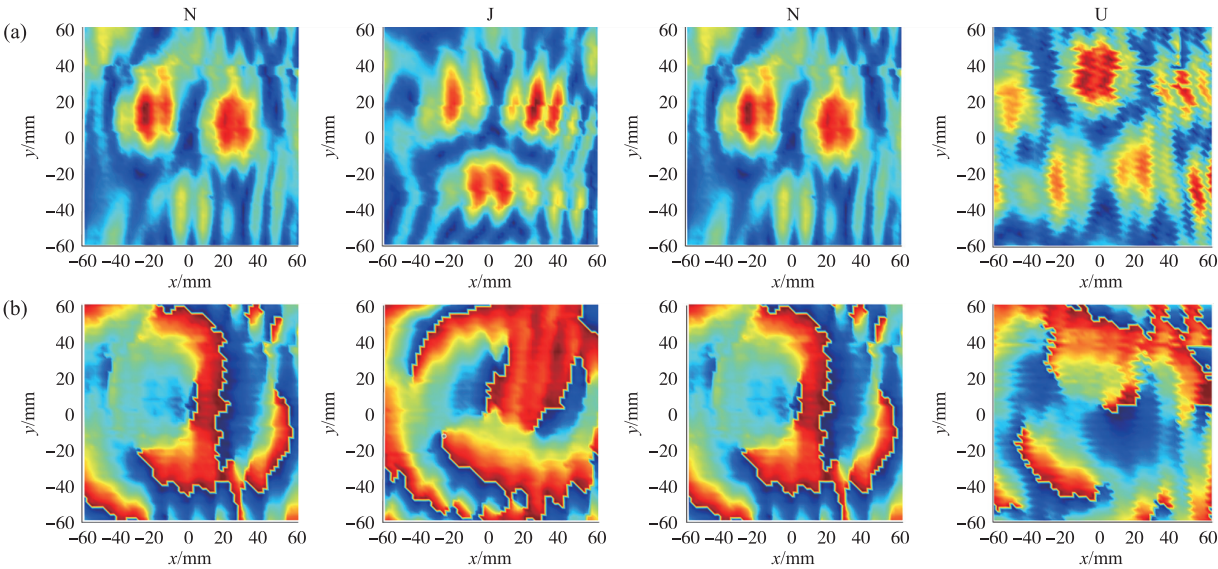


图 6 实验传输字母“NJNU”复用涡旋声束在 $z=25\text{ cm}$ 横截内的 (a) 声压和 (b) 相位分布

Fig. 6 Experimental cross-sectional distributions of (a) pressure and (b) phase of OAM-multiplexed acoustic-vortex beams transmitting characters “NJNU” at $z=25\text{ cm}$

小均小于 0.1. 因此,基于设定的功率谱阈值 0.1,可以得到复用涡旋声束所含有的 OAM 模式,重建的六位二进制数和表 1 所示的结果完全一致,证明本系统能够实现六通道的数据精确传输.

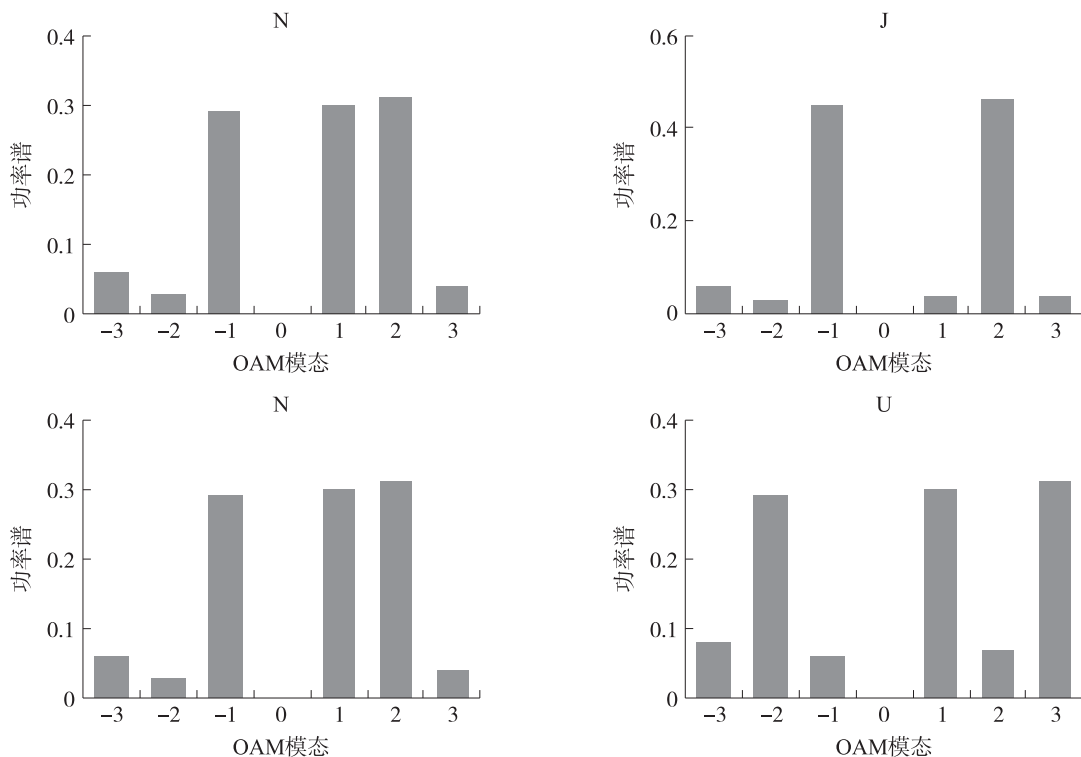


图 7 实验传输字母“NJNU”复用涡旋声束的 OAM 谱分解实验结果

Fig. 7 Experimental results of OAM spectrum decomposition of OAM-multiplexed acoustic-vortex beams transmitting characters“NJNU”

4 讨论

本文的多通道水声通信系统是一种典型的 MIMO 系统,各发射阵元之间相互独立,阵元数为 8 的发射换能器阵列仅能实现 6 通道的并行数据传输,其传输速率可以提高 6 倍. 在相同实验条件下,利用一对共轴换能器进行传统单通道二进制串行通信,在无误码条件下减小码元持续时间到 1.5 ms,实现了 666 bit/s 的单通道数据传输,而基于 OAM 谱分解的并行传输速率达到 $666 \times 6 = 4\,000$ bit/s,证明所设计系统的稳定传输速率为传统单通道串行传输方式的 6 倍(通道数 N). 通过提高发射换能器阵元数, N 阵元的环形发射阵列可以形成涡旋声束的整数阶最大拓扑荷为 $l_{\max} = \text{Fix}[(N-1)/2]$,因此,大阵列系统($N \geq 1$)在满 OAM 模式复用条件下的可用 OAM 为 $-l_{\max}$ 到 l_{\max} (不包括 0),其复用声束所包含的 OAM 模式总数近似为 N ,这种并行数据通信条件下的传输速率约为传统单通道系统的 N 倍,这可以大幅度提高复用涡旋声束的通道数和通信速率,提升水声通信的效率.

本研究中,复用涡旋声束的实验声压和相位分布与仿真大致吻合,但仍然存在明显的差异,这主要由收发阵列的一致性和同轴性,声场反射和干涉,以及声场扫描等的存在. 由于实验过程中声场中心的信号较小,系统的检测灵敏度不足,因此需扩大声场扫描区域. 为了快速扫描声场采取了较大的扫描步进,使得横截面内的声压和相位测量不够精确. 在利用 OAM 谱分解理论进行实验数据解码时,对收发阵列的同轴性和平行性提出了较高的要求,需要经过多次实验测量才可以得到较为理想的实验数据来实现正确的 OAM 解码. 另外,本研究在水中进行了短距离的实验测量,结果较为准确,但是在实际的水声通信中,海水并不能完全看成均匀介质,同时还需考虑不同深度的水压、船只以及海洋生物对声场的影响,因此研究非均匀海洋环境中涡旋声束的传播特性对基于 OAM 谱分解多通道水声通信的实际应用将有更大的价值.

5 结论

本文将涡旋声束复用理论与 OAM 谱分解技术引入水声通信领域,开展多通道水声通信研究. 通过待

传输数据与复用涡旋声束 OAM 模态映射进行多通道信息调制,实现复用涡旋声束的精准调控;通过 OAM 谱分解对环形阵列采样的复用涡旋声场的全息声压信号进行数据解调,实现基于 OAM 模态的多通道数据解码. 通过 8 声源环形收发阵列构建实验系统,开展 6 通道水声信息的并行传输,实现了高速数据传输. 结果证明,基于 OAM 谱分解的多通道水声通信技术可以有效解决换能器的带宽限制问题,在同一频率下大幅提高了信道容量与数据传输速率,在水声通信中展现出独特优势,为其应用和推广提供了理论支撑和实践基础.

[参考文献]

- [1] 高潭,吕成财,田川,等. 面向 OFDM-MFSK 水声通信的差错控制方法[J]. 系统工程与电子技术,2022,44(5):1701-1708.
- [2] 张舒然,武岩波,朱敏,等. 一种鲁棒性强的 OFDM 水声通信系统[J]. 应用声学,2019,38(4):635-644.
- [3] KIM B C, LU I T. Underwater acoustic channel simulator for broadband communication systems[J]. Journal of the Acoustical Society of America,2000,109(5):2451-2451.
- [4] CHITRE M, ONG S H, POTTER J, et al. Performance of coded OFDM in very shallow water channels and snapping shrimp noise[C]//Oceans, Washington; IEEE,2005:996-1001.
- [5] 马雯,黄建国,张群飞,等. 用 MFSK 调制实现水声远程信息传输[J]. 电讯技术,2004,44(5):80-83.
- [6] 桑恩方,徐小卡,乔钢,等. Turbo 码在水声 OFDM 通信中的应用研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2009,30(1):60-66.
- [7] TAMAGNONE M, CRAEYE C, PERRUISSEAU-CARRIER J, et al. Comment on encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test[J]. New journal of physics,2012,14(11):118001.
- [8] 常青,林川,李显旭,等. 电磁涡旋通信技术发展与现状[J]. 系统工程与电子技术,2018,40(11):2554-2565.
- [9] 郭忠义,刘洪郡,李晶晶,等. 声涡旋信息应用研究进展[J]. 物理学报,2020,69(24):19-32.
- [10] SHI C Z, DUBOIS M, WANG Y, et al. High-speed acoustic communication by multiplexing orbital angular momentum[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America,2017,114(8):7250-7253.
- [11] JIANG X, LI Y, LIANG B, et al. Convert acoustic resonances to orbital angular momentum[J]. Physical review letters,2016,117(3):034301.
- [12] ZHANG H, YANG J. Transmission of video image in underwater acoustic communication[J/OL]. arXiv Preprint arXiv:1902.10196,2019.
- [13] 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.
- [14] XIE Z, GAO S, LEI T, et al. Integrated (de) multiplexer for orbital angular momentum fiber communication[J]. Photonics research,2018,6(7):743-749.
- [15] YANG L, MA Q Y, TU J, et al. Phase-coded approach for controllable generation of acoustical vortices[J]. Journal of applied physics,2013,113(15):154904.
- [16] LI W, DAI S J, MA Q Y, et al. Multiple off-axis acoustic vortices generated by dual coaxial vortex beams[J]. Chinese physics B,2018,27(2):024301.
- [17] LI X J, LI Y Z, MA Q Y, et al. Principle and performance of orbital angular momentum communication of acoustic vortex beams based on single-ring transceiver arrays[J]. Journal of applied physics,2020,127(12):124902.
- [18] 李昕珈. 基于单环收发阵列的涡旋声束轨道角动量通信与性能研究[D]. 南京:南京师范大学,2020.
- [19] 孙浩. 声轨道角动量发射换能器阵列[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [20] 何建桥,李禹志,郭各朴,等. 宽带 D 类超声功率放大器的设计与实现[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2020,20(1):25-32.

[责任编辑:杜忆忱]