

引用格式: 王俊峰, 於楚楚, 孙海信, 等. 索引调制在水声通信中的应用及其研究进展[J]. 声学技术, 2022, 41(4): 489-496. [WANG Junfeng, YU Chuchu, SUN Haixin, et al. Survey on index modulation in underwater acoustic communication systems[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(4): 489-496.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.04.002

# 索引调制在水声通信中的应用及其研究进展

王俊峰<sup>1</sup>, 於楚楚<sup>2</sup>, 孙海信<sup>2</sup>, 周明章<sup>2</sup>, 顾亚平<sup>3</sup>, 贾宁<sup>4</sup>

(1. 天津理工大学集成电路科学与工程学院, 天津 300384; 2. 厦门大学信息学院, 福建厦门 361005;

3. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 201815; 4. 中国科学院声学研究所水声环境特性重点实验室, 北京 100190)

**摘要:** 水声通信系统具有带宽受限和功率受限的显著特点。索引调制(Index Modulation, IM)技术在提高频谱效率、能源效率以及降低系统复杂度方面展现出了巨大潜力。因此, 在过去的几年中, 索引调制技术在水声通信中得到了广泛的应用, 引起了国内外学者的普遍关注, 有望成为高速水声通信系统的一个极具潜力的候选方案。文章聚焦于索引调制相关技术在水声通信中的应用, 并对其性能进行分析, 总结其研究进展。

**关键词:** 索引调制; 空间调制; 正交频分复用(OFDM); 水声通信

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-04-0489-08

## Survey on index modulation in underwater acoustic communication systems

WANG Junfeng<sup>1</sup>, YU Chuchu<sup>2</sup>, SUN Haixin<sup>2</sup>, ZHOU Mingzhang<sup>2</sup>, GU Yaping<sup>3</sup>, JIA Ning<sup>4</sup>

(1. School of Integrated Circuit Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2. School of Informations, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

3. Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201815, China;

4. Key Laboratory of Underwater Environment Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Underwater acoustic communication (UAC) system is characterized by limited bandwidth and power. Index modulation (IM) technique has shown great potential in improving spectrum efficiency and energy efficiency and reducing system complexity. Therefore, in the past few years, IM technique has been widely used in the UAC systems and attracted widespread attention of scholars at home and abroad. It is expected that IM technique will be a solution with great potential to high-speed UAC system. This paper focuses on the applications of the IM technique in the UAC system. Performance of the IM technique is analyzed, and the research progress is summarized.

**Key words:** index modulation (IM); spatial modulation; orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); underwater acoustic communications (UAC)

## 0 引言

在水下无线通信中, 由于声音具有较好的传播特性, 水声通信在海洋环境监测、海洋结构健康监测、目标跟踪、海洋数据采集等方面的应用引起了学术界和工业界的广泛关注。然而, 部署在水下的传感器节点缺乏可持续供电的电源, 因此电力消耗是水声通信面临的主要问题之一。此外, 在水声通

信系统中, 有效带宽和信道容量非常有限, 而且随着水下用户数量的增加和军事战略要求的提高, 可用频谱变得越来越稀缺, 这不仅阻碍了水下用户的接入, 也阻碍了高速数据传输的发展。总而言之, 水声通信系统既是一个功率受限的系统也是一个带宽受限的系统, 对其综合设计一直以来面临着巨大的挑战。

最近, 随着索引调制(Index Modulation, IM)概念的提出, 广大学者再一次将目光投向了调制方式相关研究领域。IM所涵盖的调制方式十分广泛, 它利用一些资源和构建块的状态来携带额外的信息从而提高效率, 而这些资源和构建块可以是物理的, 如天线<sup>[1-7]</sup>, 频率载波<sup>[8-15]</sup>和扩频码<sup>[16-22]</sup>; 也可以是虚拟的, 如, 信号星座<sup>[23-25]</sup>和空时矩阵<sup>[26]</sup>。为了应对水声环境所带来的挑战, 研究人员将IM应用到水声通信系统中<sup>[27-28]</sup>, 希望能够提高水下传输频

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目基金(61971362)。

作者简介: 王俊峰(1979—), 男, 陕西人, 博士, 研究方向为通信和信号处理。

孙海信(1977—), 男, 山东人, 教授, 研究方向为水声通信。

通信作者: 於楚楚, E-mail: 23320191153317@stu.xmu.edu.cn

周明章, E-mail: mzzhou@stu.xmu.edu.cn

谱效率,降低数据传输的能量成本,并结合水声中常用的多输入多输出(Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO)技术和正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术,对IM进行一系列改进<sup>[29-35]</sup>。研究成果表明:IM可以为水声通信系统提供低复杂度、高谱效且低功耗的解决方案,具有较好的应用前景,可以考虑作为水声通信网络中的一种备选数字调制技术。

本文聚焦于IM在水声通信中的应用及其研究进展,重点介绍了空间调制(Spatial Modulation, SM)及IM-OFDM的技术优势,介绍了IM在水声通信中的主要研究成果,通过性能分析讨论了其在水声信道中的实现方案,并对未来可能的研究方向进行了概述。

## 1 IM及其在水声通信中的应用

水声通信系统中,常用的索引调制方式主要在空域、频域和码域或它们之间的相互组合中进行。其中,根据不同的水声通信架构及所面临的不同问题,研究人员在传统IM基础上,又做出了进一步完善,相关文献如表1所示。

表1 现有的索引调制(IM)技术在水声通信系统中应用的有关文献

Table 1 Existing literatures related to applications of IM technique in underwater acoustic communication system

| 处理域 | IM技术                       | 应用的相关文献   |
|-----|----------------------------|-----------|
| 空域  | SM <sup>[10]</sup>         | [1-3,8-9] |
|     | GSM <sup>[11]</sup>        | [1-2]     |
|     | FGSM <sup>[12]</sup>       | [1-2,7]   |
|     | ESM <sup>[13]</sup>        | [2]       |
| 频域  | SIM-OFDM <sup>[14]</sup>   | [8]       |
|     | ESIM-OFDM <sup>[15]</sup>  | [8]       |
|     | OFDM-IM <sup>[16]</sup>    | [4-5,8]   |
| 码域  | CIM <sup>[17]</sup>        | [7]       |
|     | IM-OFDM-SS <sup>[18]</sup> | [6]       |

注: \*表格中将联合调制技术拆分成基础索引调制的组合表示,缩写含义详见文中。

### 1.1 空间调制

MIMO技术是水下通信的关键技术之一,它在发射端和接收端使用多天线来提高通信性能,通过多路复用和空间分集来实现更高的传输速率、更好的传输可靠性和更大的覆盖范围<sup>[36]</sup>。但是,MIMO技术具有许多局限性,如天线数量过多导致的实现复杂性,以及在多径信道中的性能衰减。因此,在传统MIMO系统中,通常只设置少量的发射天

线<sup>[24]</sup>。而基于MIMO系统的SM方案在每次通信过程中只选择一根发射天线进行数据传输,并使用空间域来弥补可能导致的传输速率的损耗<sup>[1]</sup>。因此,SM作为传统MIMO的替代方案,避免了MIMO系统中的一些常见问题,在通信系统中被广泛使用。

SM的主要思想是通过发射天线的索引来传递额外的信息,如图1所示。首先,将要传递的信息比特分成索引比特 $p_1$ 和调制比特 $p_2$ 两部分;然后, $p_1$ 用于确定发射天线,即完成信息比特到索引之间的映射, $p_2$ 经二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)、正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)等传统调制方式映射为调制符号,通过所选择的天线发射。因此,与空间移位键控调制或传统MIMO相比,SM可以在不激活所有发射天线和消耗额外发射功率的情况下发送更多的信息比特,获得更高的传输速率,避免了天线同步的需求,且抑制了天线间互干扰的产生。此外,增加发射天线的数量还可以提高频谱效率。为了进一步提高SM系统的传输速率,国内外学者提出一系列的改进方案<sup>[4,23-25,27,30]</sup>,如表1中所示。广义空间调制(Generalized Spatial Modulation, GSM)<sup>[4]</sup>可以同时激活多根天线,因此,在发射天线数较少的情况下,GSM可获得高于SM的传输速率。基于GSM机制的完全广义空间调制(Fully Generalised Spatial Modulation, FGSM)<sup>[27,35]</sup>是一种适用于水声通信系统的低功耗、高效率的方案。该方案通过改变天线的索引方式,使得被激活的天线数量可以是一个到多个/全部不等,并且该数量作为一种索引资源也携带额外的信息比特。因此,相比于GSM,FGSM能够有效减少数据传输的能耗,并且提高水下通信的频谱效率。

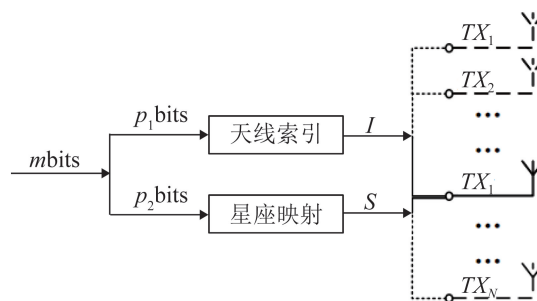


图1 空间调制示意图

Fig.1 Schematic diagram of spatial modulation

上述所有调制技术都试图通过增加发射天线和调制间的组合数量,以增加发送数据量。然而,与被广泛使用的空分复用技术相比,上述SM的频谱效率依然较低。因此,文献[23]引入了增强型空间调制(Enhanced Spatial Modulation, ESM)的概念。

其中，信息比特不仅可以搭载在有源发射机天线索引上，还可以通过所使用的信号星座类型进行发送，利用主星座和次星座增加调制和发射天线的组合数以携带额外的信息。在此基础上，文献[24-25, 30]对ESM做了一系列的改进。其中，增强全广义空间调制(EFGSM)<sup>[30]</sup>技术作为ESM与FGSM的结合体，是一种新的高效的水声通信方案。与SM、GSM和FGSM等传统方案相比，其在水下物联网中的应用不仅在节约能量和频谱效率方面具有优势，而且在平均误码率方面也有所改善。

在SM技术中，接收端需要检测有源天线索引及传输的星座符号。有源天线索引的检测是检测器中的一项非常具有挑战性的任务，为了有效检测发射数据，必须先正确判断有源天线索引。在大部分文献中，SM通常是基于完美的信道状态信息，通过最优<sup>[6]</sup>和次优<sup>[1]</sup>检测器来实现。并且，基于这种检测方法，SM技术已成功应用于水声通信中<sup>[27,30]</sup>。然而，在实际情况下，接收端并没有完美的信道状态信息，且水声信道的复杂性更是增加了对检测器的要求，因此如何进行水声信道估计，并且获得良好的信号检测性能，在水声SM系统中起到了关键作用<sup>[37]</sup>。文献[7]验证了基于导频的递推最小二乘自适应信道估计算法在水声SM通信系统中的适用性，且随着导频长度的增加，误码率和均方误差性能得到了改善。然而，导频长度的增加也导致了系统频谱效率的下降。因此，在未来的工作中，尝试使用不同的信道估计技术，以提高SM技术的频谱效率。此外，SM与其他技术的结合，依然具有很大的发展空间。为了解决水声信道的带宽限制问题，文献[33]结合SM的概念，提出了在水声信道中进行有效图像传输的不等误差保护方案，为IM技术在水声通信系统中的应用拓宽了新的思路，表现出广阔的应用前景。

## 1.2 子载波索引调制

OFDM技术由于其能够有效对抗多径效应引起的码间干扰(Inter Symbol Interference, ISI)<sup>[38]</sup>，广泛应用于水声信道中。然而，OFDM信号的子载波间隔对终端移动和海浪产生的多普勒效应十分敏感<sup>[39]</sup>。多普勒频偏破坏了子载波间的正交性，进一步增大了载波间干扰(Inter Carrier Interference, ICI)，严重影响系统性能。由于ICI的功率随着有源子载波的数量增大而增大，因此，以频谱效率为代价，可以通过将一些子载波设置为空闲来降低ICI。一种新兴的调制技术，即子载波索引调制(Subcarrier Index Modulation OFDM, SIM-OFDM)

应运而生。

SIM-OFDM借用SM的原理，天线索引同样适用于OFDM子载波索引。在SIM-OFDM中，子载波状态由索引比特控制，子载波的索引隐含地传递索引比特信息，频谱效率的损失得到了补偿。但是，由于每个OFDM块中激活子载波的数量是可变的，需要一个完美的前馈链路来明确子载波索引比特与子载波索引之间的映射方法，这使得该方案的实用性较差。增强型子载波索引调制(ESIM-OFDM)<sup>[9]</sup>通过一个索引比特来控制两个连续子载波的状态。当其采用相同的星座映射方式时，ESIM-OFDM系统的频谱效率要远远落后于OFDM系统。文献[10]中提出了一种更加灵活和高效的方案，即OFDM-IM，其系统框图如图2所示。该方案将所有子载波分成若干块，每个块内根据索引比特激活相应的子载波子集来传输调制符号，每个块内激活子载波的数量可以不同。因此，相比ESIM-OFDM，频谱利用率得到了很大的提升。并且，通过调整参数，OFDM-IM甚至可以获得比OFDM更高的频谱利用率。此外，由于部分子载波处于未激活状态，在发送功率一定的情况下，激活子载波的能量将高于传统OFDM系统中的子载波能量，更利于接收机检测，在没有ICI的情况下<sup>[11-12]</sup>，其误码率和可达传输速率方面都有超过传统OFDM的潜力，且空子载波的存在也促进了一系列峰均抑制比降低的方法<sup>[13-15]</sup>。

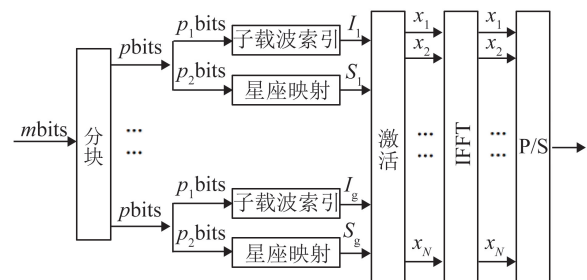


图2 OFDM-IM系统框图

Fig.2 Block diagram of OFDM-IM system

文献[28]首次尝试将OFDM-IM技术应用到水声通信系统中。然而，恶劣的水声信道引起了严重的ICI，增加了子载波状态错误检测的可能性，从而导致了激活子载波及其调制符号的检测错误，系统性能比传统OFDM差。为了使OFDM-IM技术更加适用于水声通信系统，未来研究方向应集中在设计对ICI具有鲁棒性的新型OFDM-IM技术，或设计更完备的接收端信号检测器，以获得更精确子载波索引及调制符号的检测结果。为了解决上述问题，文献[31]提出了OFDM-IM在水声通信应用中

的一种变形,结合ICI自抵消机制和海上试验和仿真,进一步证实了OFDM-IM是一种很有前途的水声通信技术。

然而,OFDM-IM最初的研究集中在单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)系统中,而SISO系统的频谱效率有限,不适合某些应用。为此,文献[40]将MIMO和OFDM-IM的原理相结合,进一步提高了OFDM-IM方案的频谱和能量效率。文献[29]提出基于SM和OFDM-IM的联合索引调制(SM-IM-OFDM)的认知水声通信系统,利用扩频码作OFDM-IM的循环前缀以便于识别天线索引,为水声通信高谱效传输提供了新的设计思想。

### 1.3 码索引调制

文献[16]首次提出码索引调制(Code Index Modulation, CIM)的概念。它是一种针对单载波和单用户的高速率且高能效的扩频通信技术。CIM以直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DS-SS)调制为基础,利用扩频码索引作为信息承载单元,旨在保留扩频调制优势的同时,以较低的系统复杂度实现比DS-SS技术更高的数据吞吐量<sup>[17-18]</sup>。

为了改善OFDM-IM的性能,提高OFDM-SS的频谱效率,文献[19]将CIM的思想扩展到OFDM系统中,提出了IM-OFDM-SS系统,如图3所示。在SISO系统中,采用预定义的扩频码索引来传递索引比特,并用索引得到的扩频码对星座符号进行DS-SS。与此同时,文献[19]将IM-OFDM-SS扩展到多码和多用户的场景,形成通用(G-)IM-OFDMSS和IM-MC-CDMA方案。IM-OFDM-SS技术提高了系统的频谱效率,降低了硬件实现复杂度,提高了能源效率,并表现出了较好的误码率性能,同时由于扩频技术的存在CIM对信道相关性没有SM敏感<sup>[20]</sup>。

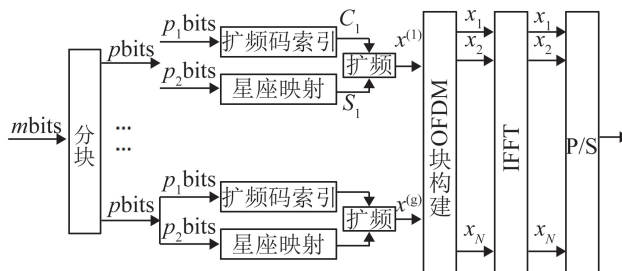


图3 IM-OFDM-SS系统框图

Fig.3 Block diagram of IM-OFDM-SS system

目前, CIM的主要应用于其与SM和IM-OFDM系统的组合方案中<sup>[21-22]</sup>,这种方式可以提高CIM系统的整体性能。完全广义空间扩频调制(SS-FGSM)<sup>[32]</sup>就是一种适用于水声信道的基于CIM与

FGSM的联合调制技术,其将大部分信息比特搭载在发射天线的索引和扩展码的索引中传输,只有少量信息比特采用物理传输,因此能够有效减少水下节点的能耗,提高信道利用率。

此外,基于深度学习的高效扩频码检测接收机设计也是CIM在水声通信应用中的一个重要研究方向。文献[34]将IM-OFDM-SS技术应用到全双工认知水声通信系统(Full-duplex Cognitive Underwater Acoustic Communications, FDCUACs)中,以进一步提高数据传输速率和改善频谱效率。在此基础上,结合自干扰消除技术,首次提出了一种基于深度学习网络的FDCUACs信号检测方案,避免了由信道估计、均衡和解调导致的误差传播。文献[32]中所设计的基于深度学习的检测器,用于完全广义空间扩频调制(SS-FGSM)水下通信系统中激活天线和扩频码的索引比特以及调制比特的检测,有效降低了检测器的计算复杂度。

## 2 基于IM的水声通信技术性能分析

本节对基于IM的水声通信技术性能进行了分析,通过蒙特卡罗仿真分析了误比特率(Bit Error Ratio, BER)性能,对比了不同IM的可达传输速率和接收机检测复杂度。

IM技术在水声OFDM系统中的BER性能如图4所示,它给出了多径瑞利衰落信道下子载波总数为1 024的OFDM、OFDM-IM、SM-IM-OFDM和IM-OFDM-SS的系统误码性能。需要注意的是,在不考虑天线索引和导频的情况下,所有方案的频谱效率都相同,接收端使用ML检测方式。如图4所示,在水声信道中,基于OFDM-IM的系统性能比传统的OFDM的系统性能差。而SM-IM-OFDM和IM-OFDM-SS的传输性能都明显优于传统的OFDM。

基于IM的水声通信技术的可达传输速率和接收端检测复杂度如表2所示。为了定量分析表2中不同IM技术在水声OFDM系统中的速率,图5给出了在子载波总数为1 024,每个OFDM块中子载波数 $N_c$ 分别为8和16的情况下,OFDM-IM、SM-IM-OFDM和IM-OFDM-SS的可达速率。这里设置调制阶数 $M$ 为4,发射天线数 $N_t$ 和接收天线数 $N_r$ 为4。如图5所示,OFDM-IM和SM-IM-OFDM的可达速率随着 $N_c$ 和每块中激活子载波数量 $N_s$ 的增大而增大,由于IM-OFDM-SS的速率只与 $N_c$ 的大小有关,故IM-OFDM-SS的可达速率大小保持不变。此外,与OFDM-IM相比,SM-IM-OFDM可通过

表 2 现有水声通信中 IM 方案的可达传输速率和接收端检测复杂度

Table 2 Achievable rate and receiver complexity of IM technique in current underwater acoustic communication

| IM 技术                      | 可达速率( $R$ )   | 接收端检测复杂度   |
|----------------------------|---|--|
| SM <sup>[7,27,30,33]</sup> | $\log_2(M) + \log_2(N_t)$   | MRC $\rightarrow 2N_r N_t - N_t$<br>Opt. $\rightarrow N_t M (3N_r + 1)$<br>ML $\rightarrow 8N_r (2)^{R_{SM}}$  |
| GSM <sup>[27,30]</sup>     | $\log_2(M) + \left\lceil \log_2 \left( \frac{N_t}{N_u} \right) \right\rceil$                                      | ML $\rightarrow 8N_r [2(N_u - 1)] (2)^{R_{GSM}}$   |
| FGSM <sup>[27,30]</sup>    | $\log_2(M) + \left\lceil \log_2 \sum_{N_t=1}^{N_t} \left( \frac{N_t}{N_u} \right) \right\rceil$                   | ML $\rightarrow 8N_r \left( 2 \left\lceil \frac{N_T}{2} - 1 \right\rceil \right) (2)^{R_{FGSM}}$   |
| EFGSM <sup>[30]</sup>      | $\log_2(M_p) + \left\lceil \log_2 \sum_{N_t=2}^{N_t} \left( \frac{N_t}{N_u} \right) \right\rceil + \log_2(M_s)$   | ML $\rightarrow 8N_r \left[ \left( 2 \left\lceil \frac{N_T}{2} - 1 \right\rceil \right) (2)^{M_p} + \left( 2 \left\lceil \frac{N_T}{2} - 1 \right\rceil \right) (2)^{M_s} \right]$ |
| SS-FGSM <sup>[32]</sup>    | $\log_2(M) + \log_2(N) + \left\lceil \log_2 \sum_{N_t=1}^{N_t} \left( \frac{N_t}{N_u} \right) \right\rceil$       | ML $\rightarrow 8NN_r \left( 2 \left\lceil \frac{N_T}{2} - 1 \right\rceil \right) (2)^{R_{SS-FGSM}}$<br>DL $\rightarrow (Q_1 Q_2 + Q_2) + (Q_2 Q_3 + Q_3)$                         |
| OFDM-IM <sup>[28,31]</sup> | $N_G \left( \left\lceil \log_2 \left( \frac{N_c}{N_s} \right) \right\rceil + N_s \log_2(M) \right)$               | ML $\rightarrow N_G 2^{\left\lceil \log_2 \left( \frac{N_c}{N_s} \right) \right\rceil} M^{N_s}$<br>LLR $\rightarrow N_G N_c M$   |
| SM-IM-OFDM <sup>[29]</sup> | $N_G \left( \left\lceil \log_2 \left( \frac{N_c}{N_s} \right) \right\rceil + N_s \log_2(M) \right) + \log_2(N_t)$ | ML $\rightarrow N_G (N_r + 1) N_t 2^{\left\lceil \log_2 \left( \frac{N_c}{N_s} \right) \right\rceil} M^{N_s}$<br>ML $\rightarrow 2N_G N M$   |
| IM-OFDM-SS <sup>[19]</sup> | $N_G (\log_2(M) + \log_2(N_c))$   | ML + DL $\rightarrow N_G \left[ 2N + \sum_{k=1}^3 (Q_k Q_{k+1} + Q_{k+1}) \right]$   |

注： $M$ 为调制阶数， $N_t$ 为发射天线数量， $N_r$ 为接收天线数量， $N_u$ 为需要激活的天线数量， $N_c$ 为每个OFDM块中子载波数量， $N_s$ 为每个OFDM块中激活子载波数量， $N_G$ 为OFDM块数， $N$ 为扩频码长度， $M_p$ 为主调制阶数， $M_s$ 为副调制阶数， $Q_n (n > 1)$ 为神经网络隐含层节点数， $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整， $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。MRC为最大比合并检测(Maximal Ratio Combining)，ML为最大似然检测(Maximum-Likelihood)，Opt为最优检测(Optimum)，ML为极大似然检测(Maximum Likelihood)，DL为深度学习检测(Deep Learning)，LLR为对数似然比检测(Logarithmic Likelihood Ratio)。

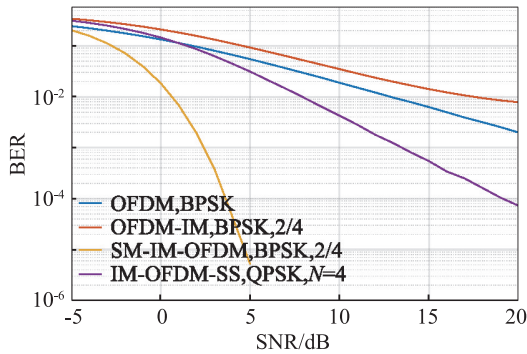


图 4 不同 IM 技术在水声 OFDM 系统中的 BER 对比  
Fig.4 BER comparison of different IM techniques in underwater acoustic OFDM system

SM 传输数据，因此其速率比 OFDM-IM 高。

接收端基于 ML 算法的检测复杂度如图 6 所示，参数设置同上。对比图 4 可知，IM-OFDM-SS 可以在保证传输可靠性的同时，有效降低接收端的计算复杂度。在相同的系统条件下，SM-IM-OFDM 在带来高谱效的同时，也会带来比 OFDM-IM 更高的接收端检测复杂度。

在收发阵元为  $4 \times 4$  的 MIMO 系统中，传输速率为 8 bpcu (bit per channel use) (实线)、9 bpcu (虚线) 时，SM、GSM、FGSM、EFGSM、SS-FGSM 的系

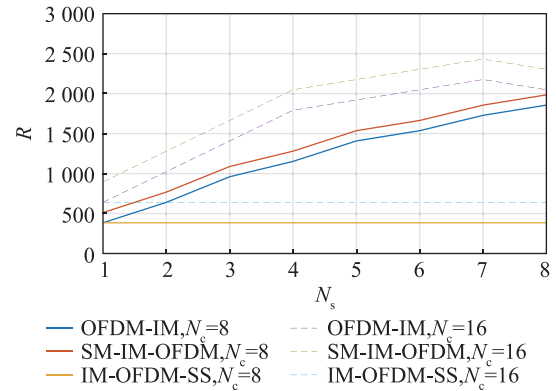


图 5 不同 IM 技术在水声 OFDM 系统中的可达速率对比  
Fig.5 Comparison of achievable rates of different IM techniques in underwater acoustic OFDM system

统误码性能如图 7 所示，图中 128QAM 表示调制阶数为 128 的 QAM 数字调制，其余相同。从图 7 中可以看出，在低信噪比情况下，SM、GSM、FGSM、EFGSM、SS-FGSM 的系统误码性能相差很小，而高信噪比时，SM 和 GSM 方案的误码率十分接近，FGSM、EFGSM、SS-FGSM 的误码性能则明显优于 SM 和 GSM 方案。由于 EFGSM 的组合变化较 FGSM 多，因此在相同传输速率的情况下，EFGSM 在基于 ML 算法的检测准确率方面不如

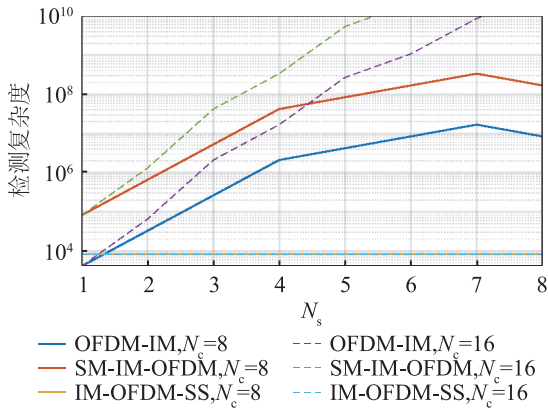


图6 不同IM技术在水声OFDM系统中的接收端检测复杂度对比  
Fig.6 Comparison of receiver complexities of different IM techniques in underwater acoustic OFDM system

FGSM。在SS-FGSM方案中引入了扩频的思想，提高了信号的抗干扰能力，因此其误码性能明显优于其他SM方案。

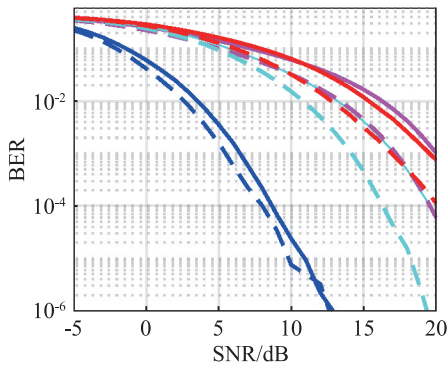


图7 不同IM技术在水声MIMO系统中的BER对比  
Fig.7 BER comparison of different IM techniques in underwater acoustic MIMO system

采用正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)在调制阶数相同的情况下，不同IM技术在水声MIMO系统中的可达传输速率性能对比如图8所示。为了便于比较，设GSM的激活子载波数 $N_u=2$ ，EFGSM的主调制阶数 $M_p=4$ ，副调制阶数 $M_s=2$ ，SS-FGSM的扩频码长度 $N=4$ 。可以看到，FGSM、EFGSM、SS-FGSM的可达数据率随着 $N_t$ 呈线性增长，SM的可达数据率随着 $N_t$ 呈对数增长，而GSM的可达数据率随着 $N_t$ 和 $N_u$ 的组合变化也呈对数增长。在同等系统条件下，SS-FGSM、EFGSM和FGSM的频谱效率明显高于SM和GSM。

基于ML算法的接收端检测复杂度性能如图9所示。对比图8可知，FGSM在实现高频谱效率

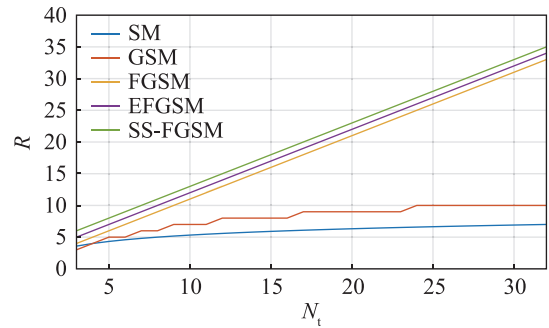


图8 不同IM技术在水声MIMO系统中的可达速率对比  
Fig.8 Comparison of achievable rates of different IM techniques in underwater acoustic MIMO system

的同时也会带来很高的接收端计算复杂度，而SS-FGSM和EFGSM在实现高频谱效率的同时仍可保持较低的计算复杂度，其中SS-FGSM的计算复杂度又会明显低于EFGSM。SM的检测复杂度低，但其可实现的数据传输速率也低，GSM的数据传输速率略高于SM，但其复杂度却远远大于SM。

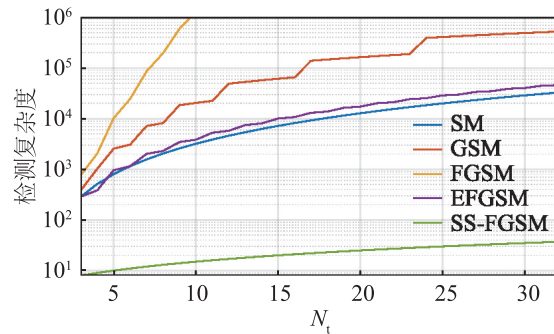


图9 不同IM技术在水声MIMO系统中的接收端检测复杂度对比  
Fig.9 Comparison of receiver complexities of different IM techniques in underwater acoustic MIMO system

### 3 总结和展望

由于IM技术在能源效率、频谱效率和系统复杂性方面的优势，IM技术在过去10年飞速发展。与此同时，IM技术作为水声通信系统中极具潜力的一种调制方式，也得到了国内外学者的关注。本文对IM技术及其在水声通信中的应用研究进行了归纳与总结，并对比分析了不同IM在传输速率、传输可靠性以及接收端检测复杂度方面的异同。

目前，IM技术已经建立了较为完善的体系，性能不断提升，但在此基础上实现更稳健而高效的通信仍具有一定发展空间。而且，随着人工智能在各行业的成功应用，采用机器学习方法来提高水声通信的稳健性和实现水声高速通信势必能成为未来基于IM技术水声通信的一个主要研究方向。

## 参 考 文 献

- [1] MESLEH R, HAAS H, AHN C W, et al. Spatial modulation - A new low complexity spectral efficiency enhancing technique [C]//2006 First International Conference on Communications and Networking in China. Beijing, China. IEEE, 2006: 1-5.
- [2] MESLEH R Y, HAAS H, SINANOVIC S, et al. Spatial modulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(4): 2228-2241.
- [3] JEGANATHAN J, GHAYEB A, SZCZECINSKI L, et al. Space shift keying modulation for MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3692-3703.
- [4] YOUNIS A, SERAFIMOVSKI N, MESLEH R, et al. Generalised spatial modulation[C]//2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA, USA. IEEE, 2010: 1498-1502.
- [5] MESLEH R, IKKI S S, AGGOUNE H M. Quadrature spatial modulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2738-2742.
- [6] JEGANATHAN J, GHAYEB A, SZCZECINSKI L. Spatial modulation: optimal detection and performance analysis[J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(8): 545-547.
- [7] JUNEJO N U R, ESMAYEL H, SUN H X, et al. Pilot-based adaptive channel estimation for underwater spatial modulation technologies[J]. Symmetry, 2019, 11(5): 711.
- [8] ABU-ALHIGA R, HAAS H. Subcarrier-index modulation OFDM[C]//2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Tokyo, Japan. IEEE, 2009: 177-181.
- [9] TSONEV D, SINANOVIC S, HAAS H. Enhanced subcarrier index modulation (SIM) OFDM[C]//2011 IEEE GLOBECOM Workshops. Houston, TX, USA. IEEE, 2011: 728-732.
- [10] BAŞAR E, AYGÖLÜ Ü, PANAYIRCI E, et al. Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(22): 5536-5549.
- [11] WEN M W, CHENG X, YANG L Q. Optimizing the energy efficiency of OFDM with index modulation[C]//2014 IEEE International Conference on Communication Systems. Macao, China. IEEE, 2014: 31-35.
- [12] CHENG X, WEN M W, YANG L Q, et al. Index modulated OFDM with interleaved grouping for V2X communications [C]//17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Qingdao, China. IEEE, 2014: 1097-1104.
- [13] KIM K H. PAPR reduction in OFDM-IM using multilevel dither signals[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(2): 258-261.
- [14] VORA A, KANG K D. Index modulation with PAPR and beamforming for 5G MIMO-OFDM[C]//2018 IEEE 5G World Forum (5GWF). Silicon Valley, CA, USA. IEEE, 2018: 389-394.
- [15] KALIA S, JOSHI A, AGRAWAL A. PAPR analysis of IFFT and DWT based OFDM-IM system[C]//2019 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC). NOIDA, India. IEEE, 2019: 109-112.
- [16] KADDOUM G, AHMED M F A, NIJSURE Y. Code index modulation: a high data rate and energy efficient communication system[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(2): 175-178.
- [17] KADDOUM G, NIJSURE Y, TRAN H. Generalized code index modulation technique for high-data-rate communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7000-7009.
- [18] XU W K, HUANG T T, WANG L. Code-shifted differential chaos shift keying with code index modulation for high data rate transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(10): 4285-4294.
- [19] LI Q, WEN M W, BASAR E, et al. Index modulated OFDM spread spectrum[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4): 2360-2374.
- [20] KADDOUM G, SOUJERI E. On the comparison between code-index modulation and spatial modulation techniques[C]//2015 International Conference on Information and Communication Technology Research (ICTRC). Abu Dhabi, United Arab Emirates. IEEE, 2015: 24-27.
- [21] ÇÖGEN F, AYDIN E, KABAOĞLU N, et al. A novel MIMO scheme based on code-index modulation and spatial modulation[C]//2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Izmir, Turkey. IEEE, 2018: 1-4.
- [22] ÇÖGEN F, AYDIN E, KABAOĞLU N, et al. Code index modulation and spatial modulation: a new high rate and energy efficient scheme for MIMO systems[C]//2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). Athens, Greece. IEEE, 2018: 1-4.
- [23] CHENG C C, SARI H, SEZGINER S, et al. Enhanced spatial modulation with multiple signal constellations[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(6): 2237-2248.
- [24] CHENG C C, SARI H, SEZGINER S, et al. New signal design for enhanced spatial modulation with multiple constellations[C]//2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Hong Kong, China. IEEE, 2015: 872-876.
- [25] CHENG C C, SARI H, SEZGINER S, et al. New signal designs for enhanced spatial modulation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7766-7777.
- [26] WANG J F, CUI Y, LI J H, et al. On orthogonal coding-based modulation[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(4): 816-820.
- [27] HUSSEIN H S, ESMAYEL H, JIANG D. Fully generalised spatial modulation technique for underwater communication Electronics Letters, 2018, 54(14): 907-909.
- [28] WEN M W, LI Y K, CHENG X, et al. Index modulated OFDM with ICI self-cancellation in underwater acoustic communications[C]//2014 48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA, USA. IEEE, 2014: 338-342.
- [29] WANG J F, CUI Y, LIU L J, et al. Frequency offset estimation for index modulation-based cognitive underwater acoustic communications[C]//2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Xiamen, China. IEEE, 2017: 1-5.
- [30] QASEM Z A H, ESMAYEL H, SUN H X, et al. Enhanced fully generalized spatial modulation for the Internet of underwater things[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(7): 1519.
- [31] WEN M W, CHENG X, YANG L Q, et al. Index modulated OFDM for underwater acoustic communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 132-137.
- [32] QASEM Z A H, ESMAYEL H, SUN H X, et al. Deep learning-based spread-spectrum FGSM for underwater communication[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(21): 6134.
- [33] ESMAYEL H, QASEM Z A H, SUN H X, et al. Underwater image transmission using spatial modulation unequal error

- protection for Internet of underwater things[J]. *Sensors* (Basel, Switzerland), 2019, **19**(23): 5271.
- [34] WANG J F, MA S X, CUI Y, et al. Signal detection for full-duplex cognitive underwater acoustic communications with SIC using model-driven deep learning network[C]//2019 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Dalian, China. IEEE, 2019: 1-6.
- [35] ELSAYED M, HUSSEIN H S, MOHAMED U S. Fully generalised spatial modulation[C]//2018 35th National Radio Science Conference (NRSC). Cairo, Egypt. IEEE, 2019: 274-282.
- [36] LI B S, HUANG J, ZHOU S L, et al. MIMO-OFDM for high-rate underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2009, **34**(4): 634-644.
- [37] BASAR E, AYGOLU U, PANAYIRCI E, et al. Performance of spatial modulation in the presence of channel estimation errors[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, **16**(2): 176-179.
- [38] COATELAN S, GLAVIEUX A. Design and test of a multicarrier transmission system on the shallow water acoustic channel [C]//Proceedings of OCEANS'94. Brest, France. IEEE, 1994: III/472-III/477.
- [39] LIN J C. Least-squares channel estimation for mobile OFDM communication on time-varying frequency-selective fading channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, **57**(6): 3538-3550.
- [40] BAŞAR E. Multiple-input multiple-output OFDM with index modulation[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, **22**(12): 2259-2263.