

贪婪结构感知算法赋能的 OOFDM 双模差分索引调制方案

王真, 王惠琴, 唐崎涵, 彭清斌, 张悦
(兰州理工大学计算机与人工智能学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对光正交频分复用差分索引调制系统频谱效率受限、差分最大似然检测算法复杂度高的问题, 提出一种贪婪结构感知算法赋能的 OOFDM 双模差分索引调制方案。首先, 引入对同阶双模星座符号的二次索引, 挖掘符号资源的信息承载潜力以提升频谱效率。其次, 以最大结构化平均模值为准则动态缩小搜索空间, 仅需遍历概率最高的候选信号矩阵集合即可完成有效检测。仿真结果表明, 与基准方案相比, 所提方案在频谱效率提升了 8.33%~33.33% 的同时, 仅引入 1~3 dB 性能损失; 相较于基准算法, 所提算法的复杂度降低了 18.75%~94.74%, 且无性能损失。因此, 所提方案与算法的协同设计在频谱效率、复杂度和误码性能之间实现了有效优化与权衡。

关键词: 光正交频分复用; 差分索引调制; 频谱效率; 计算复杂度

中图分类号: TN929.12

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2026060

OOFDM with dual-mode differential index modulation enabled by greedy structure-aware algorithm

Wang Zhen, Wang Huiqin, Tang Qihan, Peng Qingbin, Zhang Yue

School of Computer Science and Artificial Intelligence, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Abstract: To address the limited spectral efficiency of optical orthogonal frequency division multiplexing with differential index modulation system and the high computational complexity of the differential maximum likelihood detection algorithm, an OOFDM with dual-mode differential index modulation enabled by greedy structure-aware algorithm was proposed. Firstly, secondary indexing was introduced for dual-mode constellation symbols of the same order, thereby further exploiting the information-carrying potential of symbol resources to enhance spectral efficiency. Secondly, by adopting the maximum structured average magnitude as the decision criterion, the search space was dynamically reduced, and effective detection could be achieved by traversing only the most probable candidate signal matrix set. Simulation results demonstrate that, compared with the benchmark scheme, the proposed scheme improves spectral efficiency by 8.33% to 33.33% while incurring only a 1 to 3 dB performance loss. In comparison with the benchmark algorithm, the proposed detection algorithm reduces computational complexity by 18.75% to 94.74% without any performance degradation. Therefore, the joint design of the proposed scheme and detection algorithm achieves an effective optimization and trade-off among spectral efficiency, computational complexity, and bit error performance.

Keywords: optical orthogonal frequency division multiplexing, differential index modulation, spectral efficiency, computational complexity

收稿日期: 2025-12-16; 修回日期: 2026-02-13

通信作者: 王惠琴, whq1222@lut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62261033, No.62565014); 甘肃省优秀博士生项目(No.26JRRA557, No.25JRRA121); 2026年甘肃省高校研究生“创新之星”项目(No.2026CXZX-539); 甘肃省青年科技基金资助项目(No.24JRRA974); 兰州理工大学博士基金资助项目(No.14062101)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62261033, No.62565014), Gansu Provincial Outstanding Doctoral Student Program (No.26JRRA557, No.25JRRA121), 2026 Gansu Province Graduate Student Innovation Star Program (No.2026CXZX-539), The Youth Science and Technology Foundation of Gansu Province (No.24JRRA974), The Doctoral Research Foundation of Lanzhou University of Technology (No.14062101)

0 引言

随着5G-A向6G的协同演进,通信系统正由传统架构加速向通信、感知、计算与控制深度融合的一体化方向发展。在满足多样化服务需求的同时,传统射频通信面临频谱资源枯竭、信号干扰加剧以及传输可靠性下降等严峻挑战。以光波作为信息载体的无线光通信(optical wireless communication, OWC)技术,凭借其400 THz量级的超大带宽、超高速率、抗电磁干扰、免授权频谱及绿色低碳等优势^[1],成为未来移动通信领域的关键技术,尤其在骨干回传、基站互联及难以部署光纤的边缘覆盖等场景中展现出独特价值^[2]。然而,OWC的可靠性受制于光束传播特性,大气湍流、沙尘、雨雪等环境因素会显著增强大气折射的随机性与时变性^[3],导致光束扩展、漂移和畸变^[4],进而引发光强衰减与闪烁现象,严重削弱其抗干扰能力,最终造成链路误码率升高。

光正交频分复用索引调制(optical orthogonal frequency division multiplexing with index modulation, OOFDM-IM)作为一种新型多载波技术,利用子载波的激活状态或分组模式作为索引传递额外信息,兼具提升频谱效率(spectral efficiency, SE)的潜力与良好的抗信道衰落特性。目前,国内外学者从结构设计、子载波激活策略、信道适应性增强以及算法优化等方面对OOFDM-IM进行了广泛探索^[5-9]。其中,Azim等^[5]提出一种分层索引OOFDM-IM方案,在SE和能量效率间实现细粒度均衡。文献[6]提出广义激活与子载波分配算法,验证OOFDM-IM在大气湍流信道下的可行性。文献[7]通过正交索引机制与离散傅里叶变换扩展技术,提出正交OOFDM-IM方案,在有效降低峰均功率比的同时增强了对光源非线性的鲁棒性。文献[8-9]采用实值离散哈特莱变换,消除OOFDM-IM对厄米特对称的依赖。赵黎等^[10]结合组合索引与欧氏距离约束优化子载波块索引策略,改善峰均比与误码性能间的权衡关系。Qasem等^[11-12]将OOFDM-IM应用于水下场景,并设计一种信号单极性方法,避免直流偏置的添加和限幅处理。文献[13]利用机器学习和深度学习算法设计适用于水下OOFDM-IM的智能索引识别算法。

尽管现有OOFDM-IM研究在传输速率、误码率与复杂度优化方面取得进展,但其普遍依赖接收

端已知理想信道状态信息(channel state information, CSI)的假设。然而,受信道快速时变、高导频开销以及静默子载波干扰等因素制约,实际系统中获取精确CSI需付出高昂的信道估计代价。因此,如何摆脱对信道估计的依赖成为提升OOFDM-IM实际应用价值的关键问题。目前,在OOFDM-IM中引入差分机制是一种有效的解决手段^[14]。文献[15]通过在时频域资源网格中构建时频弥散信号矩阵,提出无须信道估计的差分子载波索引移位键控方案。在此基础上,文献[16-17]进一步提出光正交频分复用差分索引调制(OOFDM with differential index modulation, OOFDM-DIM)方案,通过在子载波上传输星座符号,并设计低复杂度的DIM-former检测器,有效提升系统的传输速率与检测效率。然而,OOFDM-DIM信号矩阵需满足酉特性,导致SE低于同配置的OOFDM-IM,且高阶信号矩阵会使差分最大似然(differential maximum likelihood, DML)检测的计算复杂度呈指数级增加。

鉴于此,本文引入模式索引调制思想^[18],提出一种光正交频分复用双模差分索引调制(OOFDM with dual-mode DIM, OOFDM-DMDIM)方案及贪婪结构感知(greedy structure aware, GSA)检测算法,旨在提升现有OOFDM-DIM方案的SE并降低译码复杂度。本文方案在时频弥散矩阵结构索引基础上,引入对同阶双模星座符号的二次索引,从而进一步扩展索引空间,突破传统OOFDM-DIM的SE限制。此外,针对索引维度扩展导致的DML计算复杂度激增问题,本文所提GSA检测算法充分利用差分索引信号的稀疏结构特性,并基于最大结构化模平均准则动态约束搜索空间,大幅降低了计算复杂度,且在低信噪比条件下对误码性能有一定改善。

1 OOFDM-DMDIM方案

本文提出的OOFDM-DMDIM方案原理如图1所示。设定一个时频域资源网格大小为 $M \times N$ 的OOFDM帧(包含 M 个子载波与 N 个OOFDM符号),频域信号矩阵阶数为 L 。在频域上,每个OOFDM符号包含 $G = \frac{M}{L}$ 个子载波组。在时域上,每 L 个符号的持续时间为一个“时刻”, N 个

OOOFDM 符号的总时长包含 $T = \frac{N}{L}$ 个时刻。因此，一个 OOOFDM 帧中共包含 GT 个信号矩阵，每个信号矩阵对应一个子载波组在某时刻的一个传输单元。此外，本文采用同阶双模（模式数 $n_q = 2$ ）星座设计，如图 2 所示，星座阶数 Q 取值为 2 和 4。其中，不同模式（即不同初始相位）的星座符号具有相同的 Q 值和最小欧氏距离，从而保证二次索引仅在模式判决层面引入额外的不确定性，而不会模糊星座符号的判决边界。

由图 1 可知，发送端输入比特经串并转换后，按 T 个子比特流分配至各时刻进行传输。每个子比特流进一步分为 G 组（对应 G 个子载波组），每组包含 B 个比特。与仅考虑子载波激活位置的传统索引调制方案不同，本文通过二次索引机制将索引比特同时映射至信号矩阵结构与星座符号模式两个层面，从而扩展索引维度。具体而言，以单个时刻的传输信号为例，每组的 B 个比特按功能划分为三部分，即结构索引比特 b_1 、模式索引比特 b_2 和符号

映射比特 b_3 。其中， $b_1 = \lfloor \text{lb}(L!) \rfloor$ 比特被映射为信号矩阵的结构类型（ $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整），即第一次索引； $b_2 = \text{lb}(n_q)$ 比特用于选择星座符号所属的模式，即第二次索引； $b_3 = L \text{lb}(Q)$ 比特则被映射为 L 个星座符号。在三部分比特映射完成后，映射结果被送入信号矩阵生成器，生成满足酉特性约束（即每行每列有且仅有一个非零元素）的预发送信号矩阵 \mathbf{X} 。当 $L=2$ 时， \mathbf{X} 分为主对角和反对角两种结构；当 $L>2$ 时， \mathbf{X} 的结构由莱默码编码规则决定，每种不同的结构均可与从 1 开始的自然数一一对应编号^[16]。本文主要分析 $L=2$ 和 $L=4$ 两种典型阶数配置，其中， $L=4$ 时信号矩阵的所有结构及对应的莱默码编号如图 3 所示。根据上述比特映射规则，设星座符号为 Λ_v^u ，其中， u 表示星座符号的模式索引号， v 表示星座符号对应的十进制数。以 $Q=2$ 时的星座符号为例， $L=2$ 和 $L=4$ 时预发送信号矩阵 \mathbf{X} 的映射分别如表 1 和表 2 所示。由表 1 和表 2 可以看出，同一 \mathbf{X} 中的星座模式均相同，不同 \mathbf{X} 之间可选

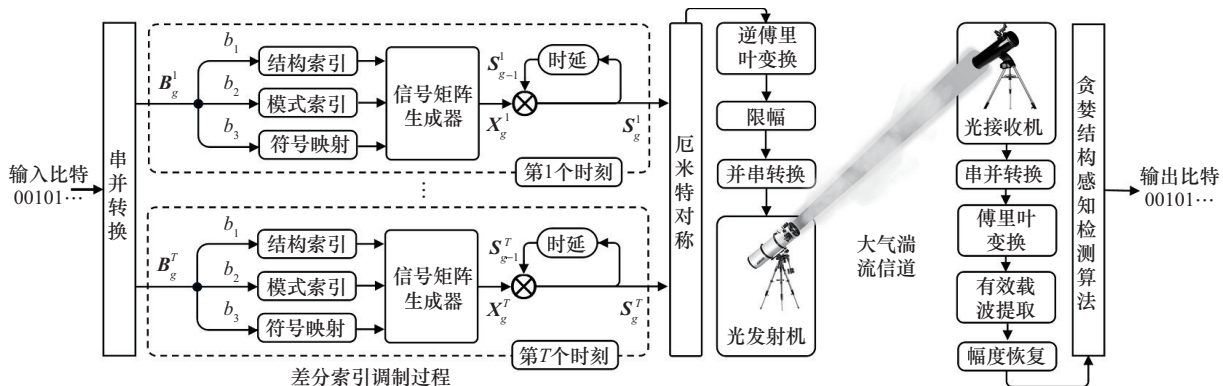


图 1 OOFDM-DMDIM 方案原理

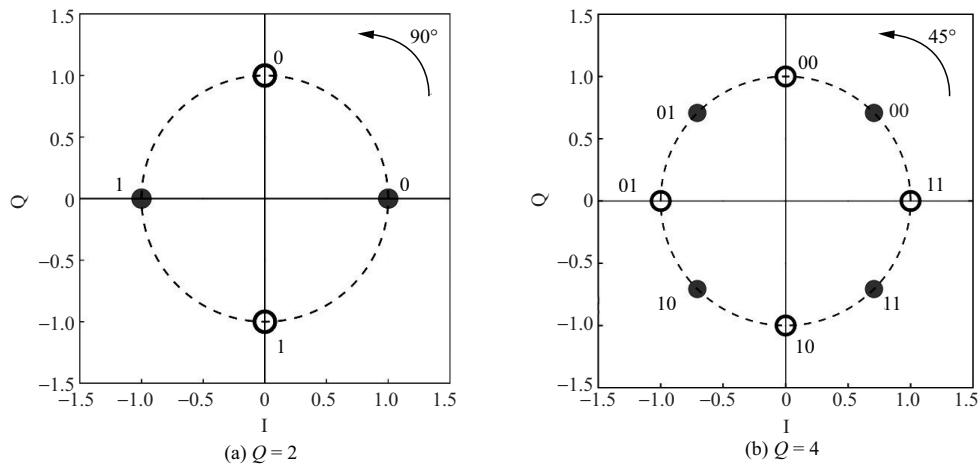


图 2 $Q=2$ 与 $Q=4$ 时的双模星座

用不同的星座模式,从而在保证差分结构约束的同时,利用模式索引实现双模传输。

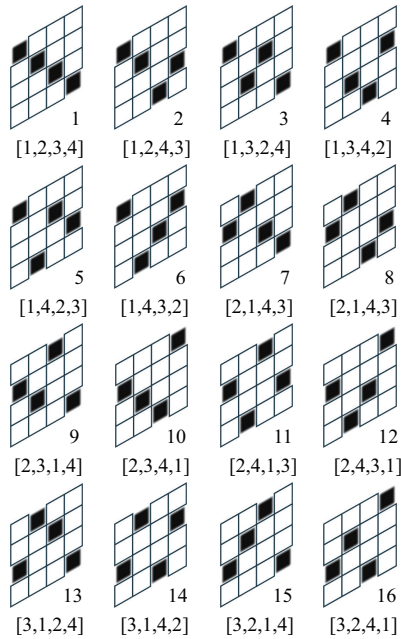


图3 L=4时信号矩阵的所有结构及对应的莱默码编号

表1 L=2, Q=2时X的映射

b_1	b_2	b_3	X
0	0	00	$\begin{bmatrix} A_0^1 & 0 \\ 0 & A_0^1 \end{bmatrix}$
⋮	⋮	⋮	⋮
0	1	10	$\begin{bmatrix} A_1^2 & 0 \\ 0 & A_0^2 \end{bmatrix}$
⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	11	$\begin{bmatrix} 0 & A_1^2 \\ A_1^2 & 0 \end{bmatrix}$

表2 L=4, Q=2时X的映射

b_1	b_2	b_3	X
0000	0	0000	$\begin{bmatrix} A_0^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_0^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_0^1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_0^1 \end{bmatrix}$
⋮	⋮	⋮	⋮
0101	0	1010	$\begin{bmatrix} A_1^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_0^1 \\ 0 & 0 & A_1^1 & 0 \\ 0 & A_0^1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
⋮	⋮	⋮	⋮
1111	1	1111	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & A_1^2 \\ 0 & A_1^2 & 0 & 0 \\ A_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_1^2 & 0 \end{bmatrix}$

为避免依赖CSI,在预发送信号矩阵X生成后,沿频域轴方向进行差分运算,得到实际发送信号矩阵S。具体而言,在同一时刻,第g个子载波组的发送信号矩阵S_g由前一子载波组的发送信号矩阵S_{g-1}与当前预发送信号矩阵X_g相乘得到,可表示为

$$S_g = S_{g-1} X_g \quad (1)$$

特别地,初始发送矩阵S₀为L阶单位矩阵。当所有T个时刻的发送信号矩阵构成完整的频域OOFDM帧后,对其进行厄米特对称、逆傅里叶变换、限幅和并串转换处理,生成时域信号s,最终通过光源发送。

经大气湍流信道传输的光信号由光电探测器接收,设所得时域接收信号为

$$y = \eta hs + n \quad (2)$$

其中,η为光电转换效率,h为大气湍流信道系数矩阵,n为加性白高斯噪声。本文采用指数威布尔(exponential Weibull, EW)分布模型^[18]描述大气湍流对光信号的影响,其概率密度函数f_{PDF}与f_{ICDF}分别为

$$f_{PDF}(I; \alpha, \beta, \zeta) = \frac{\alpha\beta}{\zeta} \left(\frac{I}{\zeta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{I}{\zeta}\right)^\beta\right] \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{I}{\zeta}\right)^\beta\right]\right\}^{\alpha-1} \quad (3)$$

$$f_{ICDF}(I; \alpha, \beta, \zeta) = \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{I}{\zeta}\right)^\beta\right]\right\}^\alpha \quad (4)$$

其中,α和β均为与闪烁指数直接相关的形状参数,ζ为与平均辐照度直接相关的尺度参数,I为接收光强。

时域接收信号y经串并转换、傅里叶变换、有效载波提取和幅度恢复处理后,形成频域接收信号并送入检测器解调。一般而言,检测器使用传统的DML检测算法,其检测准则为

$$\hat{X}_g = \arg \min_{X \in \mathcal{X}} \|Y_g - Y_{g-1} X\|_F^2 \quad (5)$$

其中,Ŷ_g为第g个子载波组估计所得的预发送信号矩阵,Y_g和Y_{g-1}分别为当前子载波组和前一子载

波组的接收信号矩阵, \mathcal{X} 为所有候选信号矩阵 \mathbf{X} 的集合, $\|\cdot\|_F^2$ 为 Frobenius 范数。

2 GSA 检测算法

传统 DML 检测算法虽然能在无 CSI 条件下实现信号检测, 但其性能仍受以下两个因素影响。一方面, DML 算法依赖前一组符号的判决结果, 在中高信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 条件下整体性能良好, 但在低 SNR 场景下, 历史判决误差可能引发误差传播, 导致后续检测精度下降; 另一方面, DML 算法需对所有候选信号矩阵进行全局搜索, 随着索引维度扩展, 候选矩阵数量呈指数级增长, 导致计算复杂度显著上升。鉴于此, 本文基于信号矩阵的结构化特征, 提出一种 GSA 检测算法。该算法将由索引比特决定的非零元素分布形式视为信号矩阵的结构, 通过计算接收信号矩阵在不同候选结构下非零元素的平均模值来完成结构感知, 将原本需要遍历的全局搜索空间压缩至最大平均模值对应结构的子空间, 并利用局部最优的贪婪搜索机制有效降低检测复杂度, 具体步骤如下。

步骤 1 确定候选信号矩阵的结构类型。2 阶信号矩阵包括主对角和反对角两种标准结构, 且矩阵间相乘不会产生新结构。对于 4 阶信号矩阵, 基于莱默码与结构索引比特的向下取整约束, 共有 16 类标准结构, 其两两相乘则生成 8 种新结构, 即 [3,4,1,2]、[3,4,2,1]、[4,1,2,3]、[4,1,3,2]、[4,2,1,3]、[4,2,3,1]、[4,3,1,2] 和 [4,3,2,1], 对应的莱默码编号为 17~24。因此, 4 阶信号矩阵共包含 24 种结构。

步骤 2 识别接收信号矩阵的结构类型。计算接收信号矩阵在所有可能结构下非零元素的平均模值, 将最大平均模值对应的结构确定为当前矩阵的结构类型, 并获取其编号。

步骤 3 缩小搜索空间。根据步骤 2 识别的结构编号, 同时结合不同结构下信号矩阵间的相乘关系, 判断 $(\mathbf{Y}_g, \mathbf{Y}_{g-1})$ 对应结构编号组合所属的标准结构类型。将全局搜索空间压缩至该标准结构对应的子搜索空间, 并在此搜索空间中进行 DML 检测, 从而完成接收信号矩阵的解调。具体而言, 假设 \mathbf{Y}_g 和 \mathbf{Y}_{g-1} 的结构类型分别为 {1,2,4,3} (编号 2) 和 {1,2,3,4} (编号 1), \mathbf{Y}_g 则由 \mathbf{Y}_{g-1} 与标准结构 {1,2,4,3}

下的矩阵相乘得到。两者的结构编号组合 (2,1) 属于标准结构 {1,2,4,3} 对应的编号组合集合。此时, DML 检测仅需遍历该标准结构下的候选信号矩阵, 搜索空间大幅缩减。

步骤 4 遍历接收信号矩阵完成解调。对所有时刻的接收信号矩阵重复执行步骤 2 和步骤 3, 直至所有信号矩阵解调完毕。

从检测机理上看, 在正确结构假设下, 接收信号矩阵中非零元素的模值统计期望显著高于错误结构对应的模值分布, 其平均模值在概率意义上具有更大的判决间隔。基于最大结构化平均模值进行结构筛选, 相当于以较高概率提前排除大部分低似然候选结构, 从而将后续 DML 搜索限制在最有可能的子空间内。这种结构先验约束的检测方式在低 SNR 区域能有效抑制误差传播, 因此, 在一定 SNR 范围内可能表现出优于 DML 的误码性能。随着 SNR 升高, 两种算法在结构判决上的正确率逐渐趋于一致, 性能差异随之减小。

综上所述, GSA 检测算法通过“结构感知-空间缩小-局部搜索”的三级优化机制, 在保留 DML 无须 CSI 检测优势的同时, 缓解了误差传播问题并降低了计算复杂度, 该算法同样适用于传统 OOFDM-DIM 方案。本文所提 GSA 检测算法的伪代码如算法 1 所示。

算法 1 GSA 检测算法

输入 接收信号矩阵集合 $\{\mathbf{Y}_g\}_{g=0}^G$ (结构索引比特 b_1 和模式索引比特 b_2 隐式嵌入信号矩阵中), 标准候选矩阵集合空间 \mathcal{X} , 标准结构下的编号集合查找表 Ξ

输出 估计的预发送信号矩阵集合 $\{\hat{\mathbf{X}}_g\}_{g=0}^G$

- 1) 根据信号矩阵阶数 L 初始化结构集合 Ψ
若 $L=2$, 则 $\Psi = \{[1,2],[2,1]\}$
若 $L=4$, 则 $\Psi = \{[1,2,3,4], \dots, [4,3,2,1]\}$
- 2) for $g=1$ to G do
- 3) //步骤 1: 结构判决 (对应 b_1 的估计)
- 4) for $k=1$ to $|\Psi|$ do
- 5) 计算 \mathbf{Y}_g 在编号为 k 的结构下的非零元素平均模值 ϑ_k
- 6) end for
- 7) 寻找 ϑ_k 的最大值, 记录所对应的结构编

- 号 k
- 8) //步骤2: 局部搜索 (对应 b_2 和 b_3 的联合判决)
 - 9) 根据 (Y_g, Y_{g-1}) 对应的结构编号组合映射到 Ξ 中的标准结构编号
 - 10) 将确定的标准结构编号映射到 \mathcal{X} 中的候选矩阵子空间
 - 11) 执行 DML
 - 12) end for

3 性能分析

3.1 频谱效率分析

根据 OOFDM-DMDIM 方案的比特映射规则, 定义 SE 为每个信号矩阵中可传输的平均比特数, 计算式为

$$R_{\text{OOFDM-DMDIM}}^{\text{SE}} = \frac{\lfloor \text{lb}(L!) \rfloor + \text{lb}(n_q) + L \text{lb}(Q)}{L^2} \quad (6)$$

为便于与不同方案进行对比, 本文在相同参数下计算了 OOFDM-DIM 与 OOFDM-IM 方案的 SE, 表达式分别为

$$R_{\text{OOFDM-DIM}}^{\text{SE}} = \frac{\lfloor \text{lb}(L!) \rfloor + L \text{lb}(Q)}{L^2} \quad (7)$$

$$R_{\text{OOFDM-IM}}^{\text{SE}} = \frac{\text{lb}(C_L^1) + C_L^1(Q)}{L} \quad (8)$$

图4为不同参数配置下3种方案的SE。由图4可以看出, 当 $L=2$ 时, 本文所提 OOFDM-DMDIM 方案与 OOFDM-IM 方案的 SE 持平, 而传统 OOFDM-DIM 方案在相同配置下存在明显的 SE 损失。实验结果表明, 二次索引机制能够有效弥补差分调制引入的 SE 下降, 使系统在保持无 CSI 检测优势的同时恢复至与 OOFDM-IM 相当的 SE 水平。在 $Q=2$ 和 $Q=4$ 时, OOFDM-DMDIM 方案的 SE 相较于 OOFDM-DIM 分别提升了 33.33% 和 20%, 表明星座模式索引的引入可在不增加信号矩阵阶数的前提下显著扩展索引空间。进一步地, 当 $L=4$ 时, 尽管酉约束限制了结构索引比特的增加, 但本文方案的 SE 在 $Q=2$ 和 $Q=4$ 时仍较 OOFDM-DIM 分别提升了 12.5% 和 8.33%, 验证了二次索引机制在高阶信号矩阵条件下的有效性。

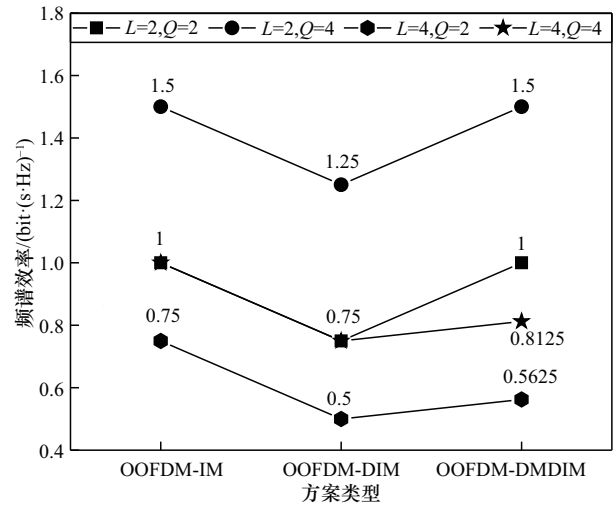


图4 OOFDM-IM、OOFDM-DIM与OOFDM-DMDIM方案的SE

3.2 理论可达速率分析

为从信息论角度进一步分析本文方案的理论传输性能, 本文在EW湍流信道模型下对其可达速率 (achievable rate, AR) 进行分析。根据式(2)给出的接收信号表达式, 系统的理论AR可由输入输出的互信息表示, 其归一化表达式为

$$R^{\text{AR}} = \frac{1}{L^2} \text{E} \left[I(X_g; Y_g | H_g) \right] \quad (9)$$

其中, H_g 为对应的信道系数矩阵, $\text{E}[\cdot]$ 为信道统计特性的期望。由于离散星座调制、结构化索引映射以及无CSI检测等因素的共同作用, 式(9)中的互信息一般难以获得闭式解析表达。然而, 在中高SNR条件下, 系统互信息可逼近其上界^[19], 其表示为

$$\lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} R^{\text{AR}} = \frac{1}{L^2} \text{lb} |\mathcal{X}| \quad (10)$$

对于本文方案, 信号矩阵集合的规模为 $|\mathcal{X}| = n_q \cdot Q^L \cdot 2^{\lfloor \text{lb}(L!) \rfloor}$, 对应的高SNR理论AR上界即式(6)所给出的SE表达式。与传统OOFDM-DIM方案相比, 二次索引机制通过在相同结构下引入星座模式索引, 有效扩大了信号矩阵集合的规模, 从而在EW湍流信道下提升系统的理论AR上界。但在有限SNR条件下, 实际系统性能仍受湍流与检测算法误差的共同影响。

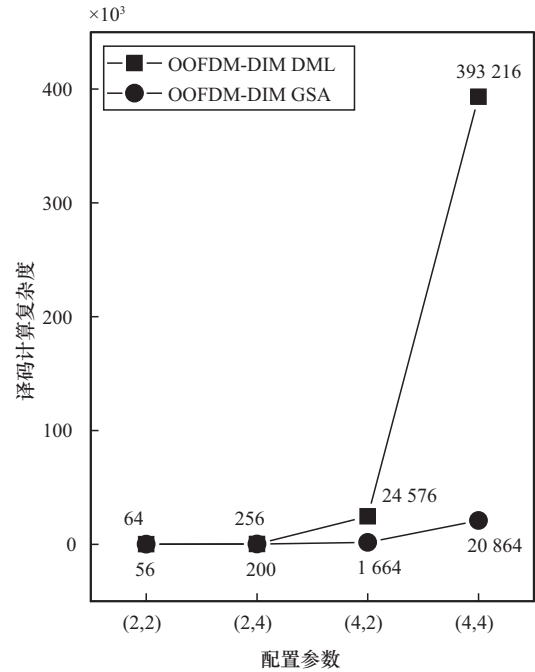
3.3 译码计算复杂度分析

本节重点对比传统DML检测算法与本文所提GSA检测算法的复杂度。对于DML检测算法, 其核心步骤包括矩阵乘法、差值计算及Frobenius范

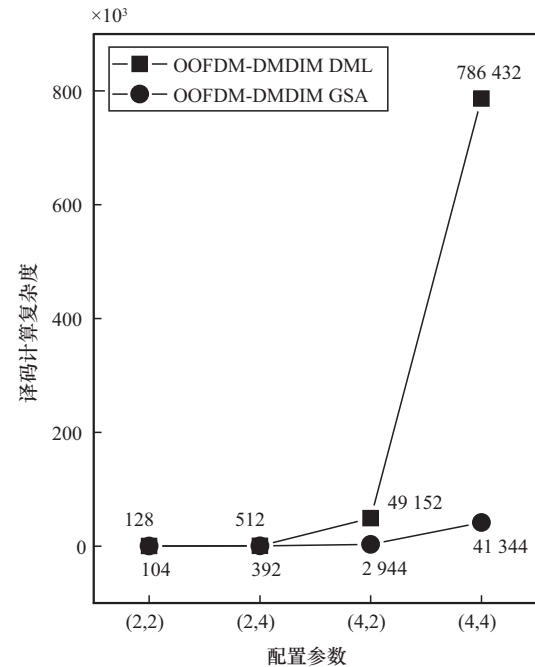
数求解，复杂度由矩阵乘法的复杂度 $O(L^3)$ 、矩阵差值计算的复杂度 $O(L^2)$ 和 Frobenius 范数的复杂度 $O(L^2)$ 组成。因此，对于单个候选信号矩阵，DML 检测算法的复杂度为 $O(L^3 + 2L^2)$ 。根据 OOFDM-DIM 与 OOFDM-DMDIM 方案的信号调制原理，候选信号矩阵的个数分别为 $Q^L \cdot 2^{\lfloor \text{lb}(L!) \rfloor}$ 和 $n_q \cdot Q^L \cdot 2^{\lfloor \text{lb}(L!) \rfloor}$ ，因此，DML 检测算法在两种方案下的总译码计算复杂度分别为 $O(L^2(L+2)Q^L 2^{\lfloor \text{lb}(L!) \rfloor})$ 和 $O(L^2(L+2)n_q Q^L 2^{\lfloor \text{lb}(L!) \rfloor})$ 。

本文所提 GSA 检测算法通过结构感知缩小搜索空间，其步骤包括平均模值计算与局部 DML 检测，因此计算复杂度由两部分组成。其中，平均模值计算的复杂度为 $O(|\Psi|L^2)$ ，单个候选信号矩阵下 DML 检测部分的复杂度为 $O(L^3 + 2L^2)$ 。在 OOFDM-DIM 和 OOFDM-DMDIM 方案中，每个标准结构下的候选信号矩阵数分别为 Q^L 和 $n_q Q^L$ ，因此，GSA 检测算法在两种方案下的总译码计算复杂度分别为 $O(L^2(|\Psi| + Q^L(L+1)))$ 和 $O(L^2(|\Psi| + n_q Q^L(L+1)))$ 。

图 5 展示了不同配置参数下 OOFDM-DIM 和 OOFDM-DMDIM 方案 DML 与 GSA 算法的译码计算复杂度，配置参数以 (L, Q) 标注。在不同参数配置下，GSA 检测算法的计算复杂度均低于传统 DML 算法，且该优势随 L 和 Q 的增大更明显。当 $L=2$ 时，由于候选信号矩阵规模较小，DML 算法的全局搜索复杂度较低，因此，GSA 检测算法的复杂度优势相对有限。在 OOFDM-DIM 方案中，GSA 检测算法在 $Q=2$ 和 $Q=4$ 时的复杂度降幅分别为 12.5% 和 21.88%。在 OOFDM-DMDIM 方案中，对应的降幅分别为 18.75% 和 23.44%。当 $L=4$ 时，DML 算法的搜索空间呈指数级增长，而 GSA 检测算法通过结构感知与空间压缩机制将搜索范围限制在高概率子空间，从而显著抑制复杂度增长。在 OOFDM-DIM 与 OOFDM-DMDIM 方案中，GSA 算法相对于 DML 算法的复杂度降幅均达到 93%~94.7%。实验结果表明，GSA 检测算法在高维调制场景下具有显著的低复杂度优势，尤其适用于大规模信号矩阵的检测。



(a) DML与GSA算法在OOFDM-DIM方案中的译码计算复杂度



(b) DML与GSA算法在OOFDM-DMDIM方案中的译码计算复杂度

图5 不同配置参数下 OOFDM-DIM 和 OOFDM-DMDIM 方案中 DML 与 GSA 算法的译码计算复杂度

3.4 误码性能分析

为验证本文所提 OOFDM-DMDIM 方案与 GSA 算法的有效性，本节采用蒙特卡罗方法对其在 EW 大气湍流信道下的误码率 (bit error ratio, BER) 性能进行仿真，并与传统 OOFDM-IM 方案

和OOFDM-DIM方案进行对比。具体而言,在3 dB的SNR间隔下,随机生成发送比特序列,并独立生成满足EW分布的大气湍流信道系数与加性高斯白噪声样本,对系统进行50次重复传输与检测,最后在每个SNR下统计所有BER样本并求均值。仿真参数设置为 $M=N=512$,光电转换效率 $\eta=0.7$,发射光波长为780 nm,传输距离为1 000 m,接收孔径为25 mm。EW大气湍流信道模型参数如表3所示。其中,大气折射率结构常数 C_n^2 用于表征大气湍流强度,其取值范围遵循OWC中的常用划分标准,当 C_n^2 处于 $10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ 量级时对应弱湍流条件,当 C_n^2 达到 $10^{-13} \text{m}^{-2/3}$ 量级时对应强湍流条件。两种湍流条件下的参数取自文献[20]中的典型值,以在仿真中准确刻画不同湍流强度下光强起伏的统计特性。此外,若无特别说明,3种方案的BER仿真结果比较均基于传统DML检测算法。

湍流强度	大气折射率结构常数/ $\text{m}^{-2/3}$	α	β	ζ
弱湍流	7.2×10^{-15}	3.67	1.97	0.73
强湍流	3.6×10^{-15}	5.50	0.74	0.29

图6给出了 $L=2$ 、 $Q=2$ 时3种方案的误码率仿真结果。在弱湍流条件下,当 $\text{BER} = 1 \times 10^{-4}$ 时,与OOFDM-DIM方案相比,OOFDM-DMDIM方案在SE增益为33.33%的前提下,仅引入约1 dB的SNR性能损失,表明二次索引机制能够在有限性能代价下有效提升系统的信息承载能力。进一步比较不同检测算法的性能可知,引入本文所提GSA算法后,OOFDM-DIM与OOFDM-DMDIM方案的BER性能均得到改善,且OOFDM-DMDIM与OOFDM-IM方案之间的SNR差距进一步缩小至1 dB以内。同时,GSA算法在保持误码性能相近的前提下,译码计算复杂度降低了约18.75%。在强湍流条件下,3种方案的BER随SNR变化的整体趋势与弱湍流条件下保持一致,验证了结果的普适性。综上所述,在 $L=2$ 、 $Q=2$ 配置下,本文所提OOFDM-DMDIM方案在提升SE的同时保持可接受的误码性能,而GSA算法进一步实现了检测性能与计算复杂度之间的有效权衡。

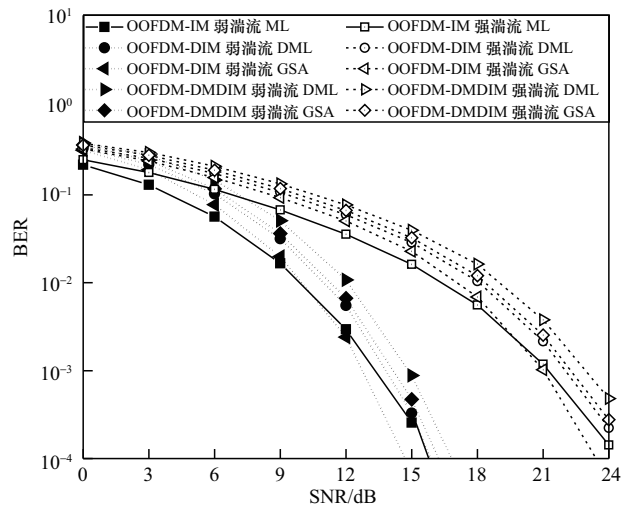


图6 $L=2$ 、 $Q=2$ 时3种方案的误码率

图7展示了 $L=2$ 、 $Q=4$ 时3种方案的误码率仿真结果。在弱湍流条件下,当 $\text{BER} = 1 \times 10^{-4}$ 时,OOFDM-DMDIM方案相较于OOFDM-DIM方案实现了20%的SE增益,此时存在约3 dB的SNR损失,表明调制阶数的增大会在一定程度上导致BER性能下降。进一步分析译码算法可知,对于OOFDM-DIM与OOFDM-DMDIM方案,本文所提GSA算法与DML算法相比,计算复杂度分别降低了21.88%和23.44%,且在低SNR区域仍能获得一定的BER性能改善,但改善幅度较 $Q=2$ 时有所减小,再次说明调制阶数是影响系统性能的重要因素。在强湍流条件下,3种方案的误码率变化趋势与弱湍流条件下基本一致。综上所述,在 $L=2$ 、 $Q=4$ 配置下,本文所提OOFDM-DMDIM方案以一定的误码性能损失为代价实现了SE的提升,而GSA算法在保持良好BER性能的同时,有效降低了译码计算复杂度。

图8给出了 $L=4$ 、 $Q=2$ 时3种方案的误码率仿真结果。在弱湍流和强湍流条件下,当 $\text{BER} = 1 \times 10^{-4}$ 时,OOFDM-DMDIM相较于OOFDM-DIM实现了12.5%的SE增益,SNR存在约2.5 dB的性能损失。对于OOFDM-DIM,GSA算法在各SNR区域维持略优于DML算法的误码性能;而在OOFDM-DMDIM中,两种检测算法的BER曲线几乎重合,未表现出明显差异。综合来看,在 $L=4$ 、 $Q=2$ 的配置下,OOFDM-DMDIM能够在可接受的BER性能损失范围内实现SE的有效提升。同时,随着信号矩阵阶数 L 的增大,GSA算法在

BER 性能上与 DML 算法的差异进一步减小，但计算复杂度较 DML 算法降低了约 94%，复杂度优势愈发显著。

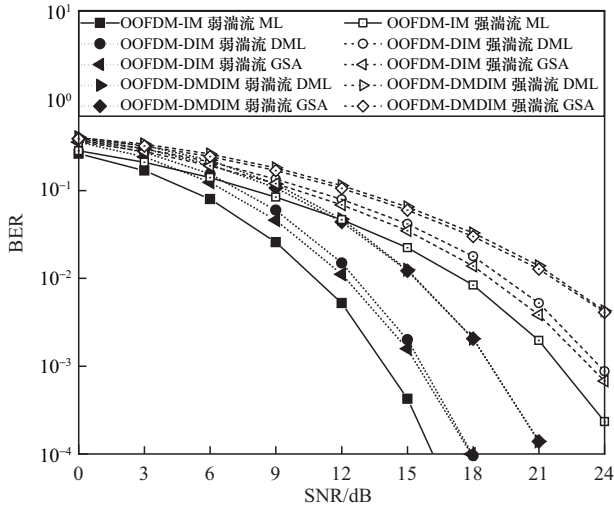


图 7 $L=2, Q=4$ 时 3 种方案的误码率

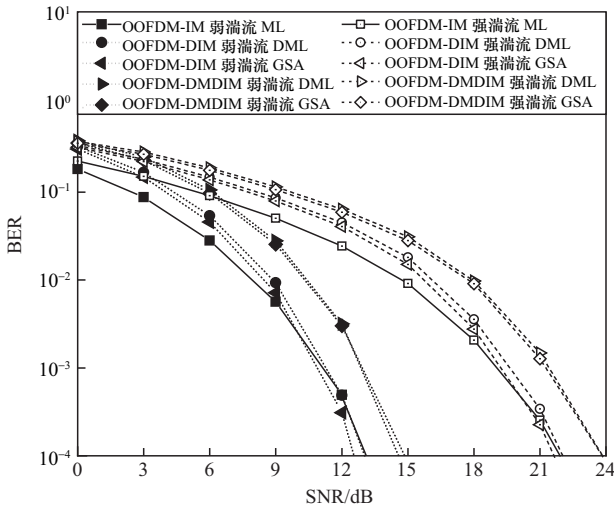


图 8 $L=4, Q=2$ 时 3 种方案的误码率

图 9 展示了 $L=4, Q=4$ 时 3 种方案的误码率仿真结果。在弱湍流条件下，当 $BER = 1 \times 10^{-4}$ 时，OOFDM-DMDIM 相较于 OOFDM-DIM 以约 2 dB 的 SNR 代价实现了 8.33% 的 SE 提升，表明在高阶星座条件下，OOFDM-DMDIM 仍能在可控的误码性能损失范围内有效提升 SE。进一步分析可知，对于 OOFDM-DIM 与 OOFDM-DMDIM，GSA 算法在 BER 性能上整体优于传统 DML 算法，但其性能增益随着星座阶数的增加而逐渐减小。值得注意的是，GSA 算法在 OOFDM-DMDIM 方案中的译码计

算复杂度较 DML 算法降低了约 94.74%，展现出在高阶索引场景下较强的低复杂度适应能力。综合来看，在 $L=4, Q=4$ 高阶配置下，OOFDM-DMDIM 通过二次索引机制实现了 SE 的进一步提升，而 GSA 算法在保持 BER 性能基本一致的前提下，大幅降低了译码计算复杂度。

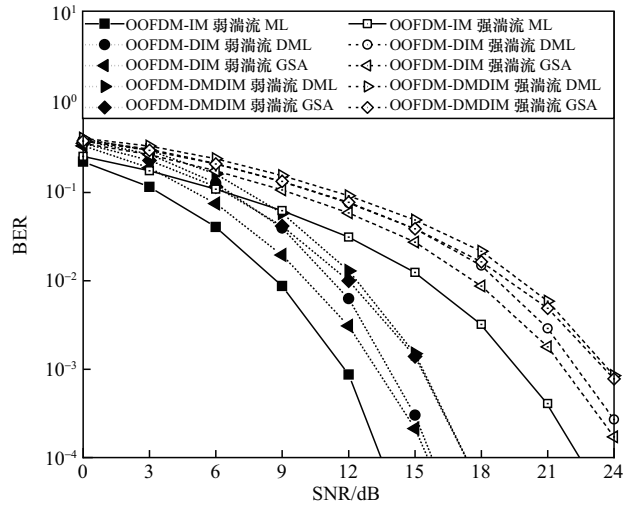


图 9 $L=4, Q=4$ 时 3 种方案的误码率

为进一步评估本文所提调制方案与检测算法的综合性能，根据图 6~图 9 的仿真结果，可归纳出以下结论。首先，在相同检测算法条件下，与 OOFDM-DIM 相比，OOFDM-DMDIM 由于引入二次索引机制扩展了信号矩阵集合规模，在目标 $BER = 1 \times 10^{-4}$ 时存在约 1~3 dB 的 SNR 损失，该损失随 L 和 Q 配置而变化。其次，对于相同的调制方案，GSA 算法在 BER 性能上与传统 DML 算法基本保持一致，能够在低 SNR 区域一定程度上缓解误差传播带来的性能退化，同时显著降低译码计算复杂度。因此，在不同配置下，基于 GSA 算法的 OOFDM-DMDIM 方案虽然在 BER 性能上相较于传统基于 DML 算法的 OOFDM-DIM 方案仍存在小幅 SNR 损失，但 SE 提升了 8.33%~33.33%，译码复杂度降低了 18.75%~94.7%，体现出在 SE、译码复杂度与 BER 性能之间的有效权衡。此外，对于本文所提 OOFDM-DMDIM 方案，随着 L 和 Q 的增大，GSA 算法的复杂度相较于 DML 算法更有优势，而 BER 性能差异逐渐减小，验证了本文方案与检测算法在不同参数配置下的适用性与有效性。

4 结束语

针对无线光通信中OOFDM-DIM系统SE受限及传统DML算法译码复杂度高的问题,本文提出一种基于双模差分索引调制的OOFDM-DMDIM方案,并相应设计一种低复杂度的GSA检测算法,实现SE与译码复杂度的协同优化。本文方案在时频弥散矩阵索引的基础上,引入同阶双模星座符号的二次索引机制,进一步拓展索引资源的利用维度,有效提升单位信号矩阵内的信息比特承载量,从而突破传统OOFDM-DIM方案的SE瓶颈。仿真结果表明,本文所提OOFDM-DMDIM方案仅以有限的误码性能损失为代价,即可实现8.33%~33.33%的频谱效率提升,具体增益取决于调制阶数与星座模式数配置。同时,本文所提GSA检测算法通过结构感知与最大平均模值判决准则,有效压缩候选搜索空间,在保证检测准确性的同时显著降低计算复杂度。仿真结果表明,与传统DML算法相比,本文所提GSA算法的译码计算复杂度可降低18.75%~94.74%,且在部分系统配置下还能进一步改善误码性能。综上所述,本文所提OOFDM-DMDIM方案与GSA检测算法的协同设计,在提升SE的同时有效抑制译码复杂度增长,兼顾性能增益与实现可行性,表现出优越的综合性能,为无线光通信中高效差分索引调制方案的设计提供了新的研究思路。

参考文献:

- [1] Ke X Z, Dong K. Optical Wireless Communication[M]. Singapore: Springer Nature, 2022.
- [2] Jeon H B, Kim S M, Moon H J, et al. Free-space optical communications for 6G wireless networks: challenges, opportunities, and prototype validation[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(4): 116-121.
- [3] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [4] Sharma K, Grewal S K. Capacity analysis of free space optical communication system under atmospheric turbulence[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(2): 1-18.
- [5] Azim A W, Le G Y, Chaffi M, et al. LACO-OFDM with index modulation for optical wireless systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(3): 664-667.
- [6] 王惠琴, 豆红霞, 曹明华, 等. 大气湍流信道中的广义索引调制非对称限幅光OFDM[J]. 光学精密工程, 2021, 29(9): 2268-2277.
- [7] Wang H Q, Dou H X, Cao M H, et al. Asymmetrically clipped optical OFDM with generalized index modulation for atmospheric turbulent channel[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(9): 2268-2277.
- [8] Ahmed F, Nie Y G, Chen C, et al. DFT-spread OFDM with quadrature index modulation for practical VLC systems[J]. Optics Express, 2021, 29(21): 33027.
- [9] Xu X Y, Zhang Q, Yue D W. Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation based on discrete Hartley transform in visible light communications[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(3): 1-10.
- [10] Xu X Y, Zhang Q, Yue D W. Discrete Hartley transform-based dual-mode index modulation OFDM for visible light communications[J]. Applied Optics, 2023, 62(31): 8442-8450.
- [11] 赵黎, 何欢洁, 孟祥艳, 等. 基于组合索引与欧氏距离相结合的OFDM-IM可见光通信系统研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(8): 2710-2716.
- [12] Zhao L, He H J, Meng X Y, et al. Research on OFDM-IM visible light communication system based on combination index and euclidean distance[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(8): 2710-2716.
- [13] Qasem Z A H, Ali A, Deng B H, et al. Index modulation-based efficient technique for underwater wireless optical communications[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 167: 109683.
- [14] Qasem Z A H, Ali A, Deng B H, et al. Unipolar X-transform OFDM with index modulation for underwater optical wireless communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(11): 581-584.
- [15] Zhang X Y, Zeng Z H, Du P F, et al. Intelligent index recognition for OFDM with index modulation in underwater OWC systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2024, 36(20): 1249-1252.
- [16] Althunibat S, Mesleh R, Basar E. Differential subcarrier index modulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8): 7429-7436.
- [17] 王惠琴, 王真, 陈丹, 等. 湍流信道下差分索引移位键控直流偏置光OFDM[J]. 光学学报, 2023, 43(18): 31-39.
- [18] Wang H Q, Wang Z, Chen D, et al. Differential index shift keying DC bias optical OFDM in turbulent channels[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(18): 31-39.
- [19] Wang H Q, Wang Z, Tang Q H, et al. Optical orthogonal frequency division multiplexing with differential index modulation[J]. Optics Communications, 2025, 574: 131226.
- [20] Wang Z, Wang H Q, Tang Q H, et al. 4×4 differential index modulation for optical orthogonal frequency division multiplexing[J]. Optics Letters, 2024, 49(18): 5155-5158.
- [21] Mao T Q, Jiang R, Bai R W. Optical dual-mode index modulation aided OFDM for visible light communications[J]. Optics Communications, 2017, 391: 37-41.
- [22] Alvarado A, Brannstrom F, Agrell E, et al. High-SNR asymptotics of mutual information for discrete constellations with applications to

BICM[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 60(2): 1061-1076.

- [20] Barrios R, Dios F. Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging for Gaussian beam waves[J]. Optics Express, 2012, 20(12): 13055.

[作者简介]



王真 (1998-), 男, 山西应县人, 兰州理工大学博士生, 主要研究方向为无线光通信理论与技术、多载波技术、索引调制、深度学习。



王惠琴 (1971-), 女, 甘肃渭源人, 博士, 兰州理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线光通信理论、探地雷达信号处理、位移数据处理。



唐崎涵 (1996-), 男, 陕西勉县人, 兰州理工大学博士生, 主要研究方向为无线光通信理论与技术、多输入多输出、深度学习。



彭清斌 (1983-), 男, 甘肃兰州人, 兰州理工大学讲师, 主要研究方向为无线光通信理论与技术、混沌信号处理。



张悦 (1994-), 女, 甘肃天水人, 博士, 兰州理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线光通信理论与技术、光学智能反射面通信。