

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.260127.

专题:2025 全国硕博士光通信菁英论坛

王真,王惠琴,黄瑞,等.稀疏双模索引调制OOTFS系统设计与性能分析[J].光通信研究,2026(4):102-108.

Wang Z, Wang H Q, Huang R, et al. Design and Performance Analysis of the OOTFS with Sparse Dual Mode Index Modulation System[J]. Study on Optical Communications, 2026(4):102-108.

# 稀疏双模索引调制OOTFS系统设计与性能分析(特邀)

王 真<sup>1</sup>,王惠琴<sup>1</sup>,黄 瑞<sup>2</sup>,唐崎涵<sup>1</sup>,曹明华<sup>1</sup>,张 悦<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 计算机与人工智能学院,兰州 730050; 2. 兰州理工大学 自动化与电气工程学院,兰州 730050)

**摘要:**【目的】光正交时频空(OOTFS)系统在复杂光信道中具有良好的鲁棒性。为提升其频谱效率(SE),索引调制(IM)技术被引入该系统。然而,现有被广泛使用的双模索引调制方案多采用固定或全激活结构,频谱效率调节粒度有限,灵活性不足。【方法】鉴于此,文章提出了一种稀疏双模索引调制 OOTFS(OOTFS-SDM-IM)系统。通过引入非全激活的子载波组结构,并结合模式索引机制,扩展了系统的索引映射自由度,实现了频谱效率的灵活调节。在此基础上,文章给出了系统 SE 表达式,并基于指数威布尔大气湍流信道模型,对不同参数配置下系统的误码率性能进行了分析。【结果】仿真结果表明,文章所提 OOTFS-SDM-IM 系统可实现  $1.0 \sim 2.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  的频谱效率范围,并以  $0.25 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  的步长进行细粒度调节,较基于双模索引调制(DM-IM)的系统具有更高的参数配置灵活性。在相同频谱效率条件下,两者误码率性能一致,验证了文章所提系统在不引入性能损失的前提下实现了频谱效率扩展。进一步地,通过结构优化可获得额外性能增益。【结论】文章所提 OOTFS-SDM-IM 系统为实现传输可靠性与频谱利用效率的协同优化提供了一种有效的设计方法。

**关键词:**无线光通信;光正交时频空;双模索引调制;大气湍流

**中图分类号:**TN929

**文献标志码:**A

## Design and Performance Analysis of the OOTFS with Sparse Dual Mode Index Modulation System

WANG Zhen<sup>1</sup>, WANG Huiqin<sup>1</sup>, HUANG Rui<sup>2</sup>, TANG Qihan<sup>1</sup>, CAO Minghua<sup>1</sup>, ZHANG Yue<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Artificial Intelligence, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:**【Objective】Optical Orthogonal Time - Frequency Space (OOTFS) systems exhibit strong robustness in complex optical channels. To further enhance the Spectral Efficiency (SE), Index Modulation (IM) has been introduced into OOTFS systems. However, existing widely used dual-mode index modulation schemes generally rely on fixed or fully activated structures, resulting in limited SE granularity and insufficient flexibility. 【Methods】To address this issue, a OOTFS with Sparse Dual Mode Index Modulation (OOTFS-SDM-IM) system is proposed. By introducing a non-fully activated subcarrier grouping structure combined with a mode indexing mechanism, the proposed scheme extends the index mapping freedom and enables flexible SE adaptation. The spectral efficiency expression is derived, and the bit error rate performance under different parameter configurations is analyzed over an Exponential Weibull atmospheric turbulence channel. 【Results】Simulation results show that the proposed OOTFS-SDM-IM system achieves a spectral efficiency range from  $1.0$  to  $2.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  with a fine granularity of  $0.25 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ , providing higher configuration flexibility than conventional Dual-Mode Index Modulation (DM-IM) based systems. At equal spectral efficiency, the proposed scheme exhibits identical bit error rate performance compared with its dual-mode index modulation counterpart, verifying the enhancement of spectral efficiency enhancement without performance degradation. Furthermore, additional performance gains can be obtained through appropriate structural optimization. 【Conclusion】The proposed OOTFS-SDM-IM system provides an effective design approach for achieving a desirable trade-off between transmission reliability and spectral efficiency.

**Key words:** optical wireless communications; OOTFS; DM-IM; atmospheric turbulence

## 0 引 言

无线光通信因具有高速率和低时延等优势,成为突破传统射频通信瓶颈的重要技术之一<sup>[1]</sup>,但在快速时变信道环境下,其仍面临误码率(Bit Error

Rate, BER)上升及频谱利用率受限等问题。为此,光正交时频空(Optical Orthogonal Time-Frequency Space, OOTFS)技术被提出<sup>[2]</sup>。该技术通过在时延-多普勒域处理信息,可有效对抗信道时变性带来的性能退化,从而提升系统传输鲁棒性<sup>[3]</sup>。

收稿日期:2026-05-06; 修回日期:2026-05-22; 纸质出版日期:2026-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62261033, 62265010, 62565014); 甘肃省科技厅优秀博士生资助项目(甘肃省科技计划资助, 26JRR557, 25JRR121); 2026 甘肃省研究生创新之星资助项目(2026CXZX-539)

作者简介:王真(1998-),男,山西应县人。博士,主要研究方向为多载波无线光通信理论与技术。

通信作者:王惠琴,教授。E-mail:whq1222@lut.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

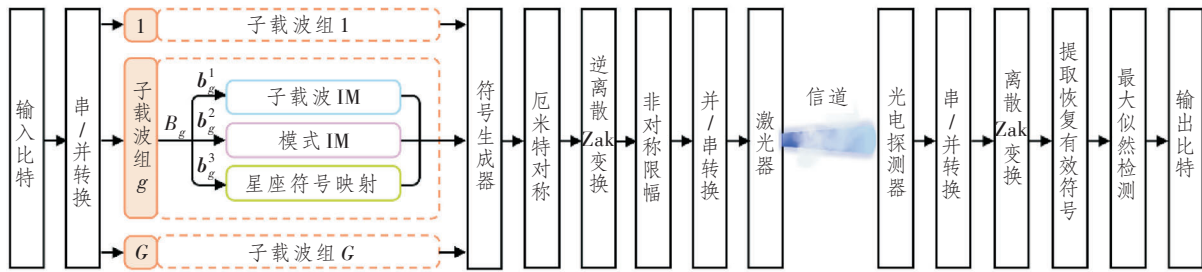
为进一步提升 OOTFS 系统的频谱效率,索引调制(Index Modulation, IM)技术被引入。IM 技术通过激活子载波索引携带附加信息而不增加发射功率<sup>[4-5]</sup>。其中,双模索引调制(Dual-Mode Index Modulation, DM-IM)采用全子载波激活机制,仅通过切换不同星座模式嵌入索引信息,避免了传统 IM 中子载波静默造成的频谱损失,因此已广泛应用于多种通信系统<sup>[6-9]</sup>。然而,现有 DM-IM 方案仍存在局限:固定全激活结构缺乏灵活性,难以适应复杂时变信道;同时,广义双模及零填充 3 模等改进方案虽然提升了频谱效率<sup>[10-12]</sup>,但其模式映射规则仍较固定,系统灵活性与信道适应能力有限。

针对上述问题,本文提出了一种稀疏双模索引调制 OOTFS(OOTFS with Sparse Dual Mode Index Modulation, OOTFS-SDM-IM)系统。该系统在保留双星座模式的基础上,引入非全激活结构与模式索引思想,并进一步设计了统一模式索引(Uniform Mode Index, UMI)与分组模式索引

(Group Mode Index, GMI)两种映射方法,以实现更灵活的索引映射和频谱效率调节。随后,给出了本文所提系统的频谱效率表达式,并基于指数威布尔(Exponential Weibull, EW)大气湍流信道模型,对所提系统与传统 OOTFS-DM-IM 系统的性能进行了对比分析,以验证本文所提方案的有效性。

## 1 OOTFS-SDM-IM 系统模型

本文所提 OOTFS-SDM-IM 系统模型如图 1 所示,设系统带宽为  $M\Delta f$  Hz,帧持续时间为  $NT$  s,其中,  $M$ 、 $\Delta f$ 、 $N$  和  $T$  分别为总子载波数、子载波间隔、OOTFS 符号数和符号持续时间。在 1 个 OOTFS 符号中,所有子载波被分为  $G=M/L$  组,定义第  $g$  个子载波组对应的信号向量为  $X_g = [x_g^1, \dots, x_g^L, \dots, x_g^L] \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ ,式中:  $x_g^l$  为该组中第  $l$  个子载波上的符号,  $g=1, \dots, G; l=1, \dots, L$ ,  $L$  为第  $g$  个子载波组中的子载波数。



注:  $B_g$  为输入比特向量;  $b_g^1$ 、 $b_g^2$  和  $b_g^3$  分别为子载波索引比特向量、模式索引比特向量和星座符号比特向量。

图 1 SDM-OOTFS 系统模型

Figure 1 System model of the SDM-OOTFS system

在发送端,输入比特经串/并转换后同样被分为  $G$  组,即  $B_1, \dots, B_g, \dots, B_G$ 。以第  $g$  个子帧为例,输入比特向量  $B_g$  按功能分为 3 个部分,即  $b_g^1$ 、 $b_g^2$  和  $b_g^3$ 。其中,子载波索引比特向量  $b_g^1$  包含  $\lfloor \log_2(C_L^K) \rfloor$  个比特,用于从  $L$  个子载波中选择  $K$  个激活子载波。模式索引比特向量  $b_g^2$  用于选择  $K$  个激活子载波上的星座模式,其包含的比特数与  $K$  的取值和模式索引策略有关。当采用 UMI 方式时,无论  $K$  取何值,  $b_g^2$  均只包含 1 个比特,即所有  $K$  个激活子载波均保持相同的星座模式;当  $K \geq 3$  时,可采用 GMI 方式将  $K$  个激活子载波进一步分为  $\kappa$  组,此时  $b_g^2$  包含  $\kappa$  个比特,则每组间独立选择星座模式。对于星座符号比特向量  $b_g^3$ ,其包含的  $K \log_2(Q)$  个比特被映射为  $K$  个星座号,  $Q$  为双模星座符号的阶数。以采用 GMI 方式的 OOTFS-SDM-IM 系统为例,假设  $L=4$ 、 $K=3$ 、 $\kappa=2$ (两组激活子载波数之比为 1:2)、

$Q=2$ ,此时的比特映射关系表如表 1 所示。

表 1  $L=4$ 、 $K=3$ 、 $\kappa=2$ 、 $Q=2$  时系统的比特映射关系表

Table 1 Bit-mapping relationship table for the case of  $L=4$ 、 $K=3$ 、 $\kappa=2$  and  $Q=2$

| $b_g^1$ | $b_g^2$ | $b_g^3$ | $X_g$                                                      |
|---------|---------|---------|------------------------------------------------------------|
| 00      | 00      | 000     | $[0 \ \omega_1^{(0)} \ \omega_1^{(0)} \ \omega_1^{(0)}]^T$ |
| ...     | ...     | ...     | ...                                                        |
| 01      | 01      | 011     | $[\omega_1^{(0)} \ 0 \ \omega_2^{(1)} \ \omega_2^{(1)}]^T$ |
| ...     | ...     | ...     | ...                                                        |
| 10      | 10      | 100     | $[\omega_2^{(1)} \ \omega_1^{(0)} \ 0 \ \omega_1^{(0)}]^T$ |
| ...     | ...     | ...     | ...                                                        |
| 11      | 11      | 111     | $[\omega_2^{(1)} \ \omega_2^{(1)} \ \omega_2^{(1)} \ 0]^T$ |

注:  $\omega$  为星座符号,上标与下标分别对应星座符号的映射比特与星座模式序号。

在所有  $G$  个子载波组中的信号向量映射完成后,其构成一个完整的 OOTFS 符号,所有  $N$  个 OOTFS 符号构成一个完整的 OOTFS 信号帧。然后,将其构造为二维厄米特对称形式  $\mathbf{A}$ 。 $\mathbf{A}$  中的元素满足如下关系:

$$\begin{cases} \mathbf{A}[p, q] = 0, & q = 0, 2, \dots, N-2 \\ \mathbf{A}[p, q] = \mathbf{A}^*[p, N-q], & q = 1, 3, \dots, N-1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $(\cdot)^*$  表示复共轭;  $p$  和  $q$  分别为  $\mathbf{A}$  的行和列索引符号,  $p = 0, \dots, M-1$ 。然后,对  $\mathbf{A}$  进行逆离散 Zak 变换与理想脉冲整形得到时域信号  $\gamma$ ,可表示为

$$\gamma = \text{vec}(\mathbf{I}_M \mathbf{A} \mathbf{Z}_N^\dagger) \in \mathbb{R}^{MN \times 1}, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{I}_M$  为  $M \times M$  的单位矩阵(即理想脉冲整形波形);  $\mathbf{Z}_N^\dagger$  为  $N$  点逆离散 Zak 变换运算符;  $\mathbb{R}^{MN \times 1}$  为  $MN \times 1$  的实数矩阵空间;  $\text{vec}(\cdot)$  为向量化运算符。式(2)中,  $\gamma$  与  $\mathbf{A}$  满足如下变换关系:

$$\gamma[u] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{A}[k, u] e^{j2\pi ul/N}, \quad (3)$$

式中:  $u = k + lM$ ,  $k = 0, \dots, M-1$ ,  $l = 0, \dots, N-1$ ;  $k$  为行索引符号;  $j$  为虚数单位。对  $\gamma$  进行非对称限幅和并/串转换后,由光源进行发射。

在接收端,经信道传输的光信号由光电探测器接收并转换为时域电信号  $\boldsymbol{\Theta}$ ,可表示为

$$\boldsymbol{\Theta} = \mathbf{H}\gamma + \mathbf{W}, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{H}$  为信道系数矩阵;  $\mathbf{W}$  为零均值的高斯白噪声矩阵。对于  $\mathbf{H}$  中的元素,本文使用具备良好孔径平均效应的 EW 大气湍流信道模型进行分布模拟<sup>[13]</sup>,其概率密度函数  $f_{\text{EW}}$  为

$$f_{\text{EW}} = \frac{\alpha\beta}{\zeta} \left(\frac{I}{\zeta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{I}{\zeta}\right)^\beta\right] \times \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{I}{\zeta}\right)^\beta\right]\right\}^{\alpha-1}, \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  和  $\beta$  为与闪烁指数直接相关的形状参数;  $\zeta$  为与平均辐照度直接相关的尺度参数;  $I$  为光强。在此基础上,考虑联合衰减效应,即光学效率损耗、大气衰减损耗以及平均捕获率,相应参数在第 2 节给出。对  $\boldsymbol{\Theta}$  进行串/并转换、理想脉冲整形和离散 Zak 变换后,得到时延-多普勒域接收信号数据帧  $\Psi$ ,可表示为

$$\Psi = \left(\text{vec}_{M,N}^{-1}(\mathbf{I}_M \boldsymbol{\Theta})\right) \mathbf{Z}_N \in \mathbb{C}^{M \times N}, \quad (6)$$

式中:  $\text{vec}_{M,N}^{-1}(\cdot)$  为逆向量化运算符;  $\mathbf{Z}_N$  为  $N$  点离散 Zak 变换运算符;  $\mathbb{C}^{M \times N}$  为  $M \times N$  的复数矩阵空间。

式(6)中,  $\Psi$  与  $\boldsymbol{\Theta}$  满足如下变换关系:

$$\Psi[k, l] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{u=0}^{N-1} \boldsymbol{\Theta}[k + uM] e^{-j2\pi ul/N}. \quad (7)$$

最后,从  $\Psi$  中提取并恢复有效符号,重构为完整的接收信号数据帧;进而对帧内各子载波组对应的接收信号向量  $\mathbf{Y}_g$  进行最大似然检测,可得最终结果  $\hat{\mathbf{X}}_g$  为

$$\hat{\mathbf{X}}_g = \underset{\mathbf{X} \in \mathbb{X}}{\text{argmin}} \left\| \mathbf{Y}_g - \hat{\mathbf{H}}_g \mathbf{X} \right\|_{\text{F}}^2, \quad (8)$$

式中:  $\hat{\mathbf{X}}_g$  为估计所得的信号向量;  $\mathbb{X}$  为所有可能信号向量的集合;  $\hat{\mathbf{H}}_g$  为对应于  $\mathbf{Y}_g$  估计所得的信道向量。对  $\hat{\mathbf{X}}_g$  进行逆映射即可得到输出比特。

## 2 频谱效率与复杂度分析

依据 OOTFS-SDM-IM 系统的调制原理,系统的频谱效率为子载波组中每子载波在单位符号持续时间内可传输的比特数(单位:  $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ),系统采用 UMI 和 GMI 方式时的频谱效率  $R_{\text{UMI}}$  和  $R_{\text{GMI}}$  可表示为

$$\begin{cases} R_{\text{UMI}} = \frac{\lfloor \log_2(C_L^K) \rfloor + 1 + K \log_2(Q)}{L} \\ R_{\text{GMI}} = \frac{\lfloor \log_2(C_L^K) \rfloor + \kappa + K \log_2(Q)}{L} \end{cases}. \quad (9)$$

OOTFS-DM-IM 系统的频谱效率  $R_{\text{OOTFS-DM-IM}}$  可表示为

$$R_{\text{OOTFS-DM-IM}} = \frac{\lfloor \log_2(C_L^K) \rfloor + L \log_2(Q)}{L}. \quad (10)$$

图 2 所示为 OOTFS-DM-IM 系统与本文所提 OOTFS-SDM-IM 系统在不同参数配置下的可达频谱效率。其中, OOTFS-DM-IM 和 OOTFS-SDM-IM 系统分别以  $(L, Q)$  与  $(L, K, Q)$  标注。由图可知, OOTFS-DM-IM 系统的可选参数配置较为有限,仅能实现  $1.5$  和  $2.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  两种离散的频谱效率水平,调节粒度较粗,难以适应多样化的传输需求。相比之下,本文所提 OOTFS-SDM-IM 系统在参数配置上具有更高的灵活性,其可实现的频谱效率范围由  $1.0$  扩展至  $2.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,并能够以  $0.25 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  的步长对该范围进行细粒度覆盖。该特性使得系统在不同信道条件和服务需求下可实现更加精细的频谱资源分配,尤其是能够提升系统的自适应传输能力与资源利用效率。

系统在接收端采用最大似然检测方式时,检测复杂度主要由激活子载波组合数、模式选择数以及

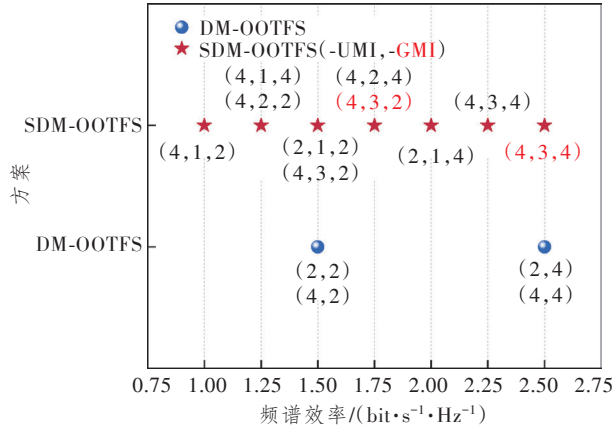


图 2 OOTFS-DM-IM 与 OOTFS-SDM-IM 系统在不同参数配置下的可达频谱效率

Figure 2 Achievable spectral efficiency of OOTFS-DM-IM and OOTFS-SDM-IM system under different parameter configurations

星座符号搜索空间共同决定。对于 UMI 方式,每个子帧对应的候选信号向量总数为  $2^{\lfloor \log_2(C^L) \rfloor + 1} Q^K$ , 因此,其检测复杂度可表示为  $O(2^{\lfloor \log_2(C^L) \rfloor + 1} Q^K)$ ; 对于 GMI 方式,由于激活子载波被进一步划分为  $\kappa$  组,其候选信号向量总数进一步扩展为  $2^{\lfloor \log_2(C^L) \rfloor + \kappa} Q^K$ , 对应检测复杂度为  $O(2^{\lfloor \log_2(C^L) \rfloor + \kappa} Q^K)$ 。传统 OOTFS-DM-IM 系统由于子载波全部激活,因此复杂度为  $O(2Q^L)$ 。可以看出,本文所提 OOTFS-SDM-IM 系统通过引入子载波组合自由度与模式索引机制,实现了频谱效率的细粒度调节,但同时也增加了系统搜索空间。注意到,由于星座搜索维度由  $Q^L$  降低为  $Q^K$ ,系统复杂度的增长并不显著。因此,本文所提 OOTFS-SDM-IM 系统能够在频谱效率、BER 性能与检测复杂度之间实现更加灵活的折中。

### 3 系统仿真及结果分析

为了分析本文所提 OOTFS-SDM-IM 系统的 BER 性能,本文通过 Matlab 软件仿真平台对其进行了蒙特卡洛数值仿真,仿真参数如表 2 所示。EW 大气湍流信道模型参数如表 3 所示。

在仿真过程中,信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)以 2 dB 为步长进行设置。发送端随机生成比特序列,并分别独立生成满足 EW 分布的大气湍流信道系数与加性高斯白噪声样本。针对每一组参数设置,对系统进行 50 次独立的传输与检测过程,并对所有获得的 BER 结果进行统计平均。此外,所有参数设置下的系统均在发送端进行功率归一化,

表 2 OOTFS-SDM-IM 系统仿真参数

Table 2 Simulation parameters of the OOTFS-SDM-IM system

| 参数名                   | 数值                      |
|-----------------------|-------------------------|
| 总子载波数 $M$             | 512                     |
| OOTFS 符号数 $N$         | 256                     |
| 采样率/MSa/s             | 250                     |
| 子载波间隔 $\Delta f$ /MHz | 0.488 3                 |
| 符号持续时间 $T$ /s         | $2.0479 \times 10^{-6}$ |
| 发射光波长/nm              | 780                     |
| 光电转换效率 $\eta$         | 0.7                     |
| 传输距离/km               | 1                       |
| 光学效率损耗                | 0.64                    |
| 大气衰减损耗                | 0.951 2                 |
| 平均捕获率                 | 0.606 2                 |

表 3 EW 大气湍流信道模型参数

Table 3 Parameters of the EW atmospheric turbulence channel model

| 湍流强度 | Rytov 方差 | $\alpha$ | $\beta$ | $\zeta$ |
|------|----------|----------|---------|---------|
| 弱    | 0.317    | 3.67     | 1.97    | 0.73    |
| 强    | 15.851   | 5.50     | 0.74    | 0.29    |

以确保系统的发射功率严格一致。系统的仿真结果如图 3~图 5 所示,并以  $1 \times 10^{-4}$  作为目标 BER 进行性能评估。

图 3 所示为  $K=1$  时 OOTFS-SDM-IM 系统的 BER 仿真结果,此时的模式选择方式为 UMI。首先,所有参数配置下的系统在弱湍流和强湍流下的性能差异均约为 6 dB,表明系统对湍流强度变化的响应具有一致性。其次,在相同的星座符号阶数下,组内子载波数  $L$  越多,系统的 BER 性能越好;当星座符号阶数由  $Q=2$  增加到  $Q=4$ ,  $L=2$  和  $L=$

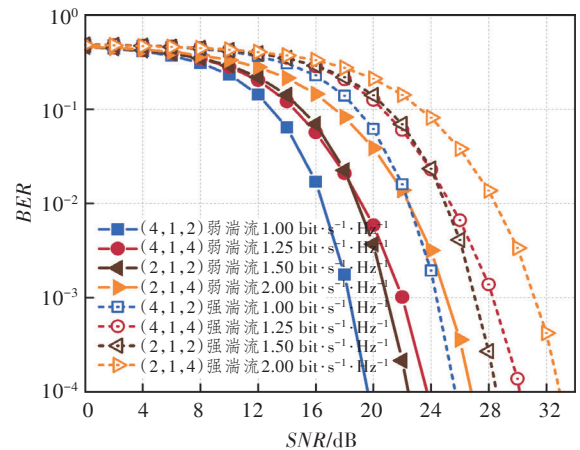


图 3  $K=1$  时 OOTFS-SDM-IM 系统的 BER

Figure 3 BER of OOTFS-SDM-IM system for  $K=1$

4时系统的 SNR 损失均约为 4 dB,而频谱效率间隔则分别为 0.50 和 0.25  $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,表明增加  $L$  可使系统实现更细粒度的频谱效率调节,从而在 BER 与频谱效率之间提供更灵活的权衡。此外,相较于 (4,1,4)配置,系统在(2,1,2)配置时可获得约 1.5 dB 的 SNR 增益,且频谱效率提升了 0.5  $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,表明子载波组的划分粒度对所提 OOTFS-SDM-IM 系统的性能具有关键影响,从而体现出更优的 BER 性能-频谱效率协同增益。

图 4 所示为不同参数配置下 OOTFS-SDM-IM 系统在频谱效率相同时的 BER 性能比较结果。首先,对 UMI 方式而言,(4,2,2)配置相较于(4,1,4)配置可获得约 2 dB 的 SNR 增益,表明组内子载波数  $L$ 、激活子载波数  $K$  以及星座符号调制阶数  $Q$  之间的联合配置对系统性能具有重要影响,合理的子载波结构与调制参数联合配置能够在相同频谱效率条件下进一步提升系统可靠性。其次,UMI-(4,2,4)与 GMI-(4,3,2)两种参数配置呈现出一致的 BER 性能,表明不同星座模式选择策略在参数组合达到相同频谱效率或等效自由度时,其对系统 BER 性能的影响趋于一致,系统性能主要由整体参数结构主导而非模式选择策略。值得注意的是,随着 SNR 的增大,UMI-(4,2,4)(GMI-(4,3,2))配置和 UMI-(4,1,4)配置的 BER 性能趋于一致,前者相较于后者还具有 0.5  $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  的频谱效率增益。这表明,本文所提系统不仅可实现频谱效率的灵活调节,且部分高频谱效率的配置还不会牺牲高 SNR 条件下的传输可靠性。

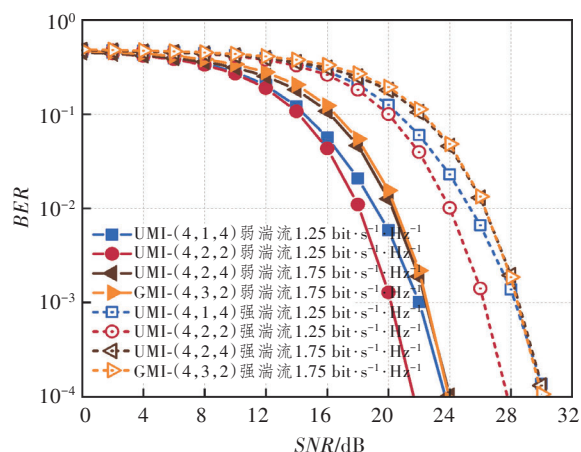


图 4 不同参数配置下 OOTFS-SDM-IM 系统在频谱效率相同时的 BER 性能比较 ( $L=4$ )

Figure 4 BER comparison of OOTFS-SDM-IM system under different configurations at equal spectral efficiency ( $L=4$ )

图 5 所示为激活子载波数  $K$  对 OOTFS-SDM-IM 系统在 GMI 方式下 BER 性能的影响。其中, GMI-(8,3,2)与 GMI-(8,5,2)两种配置的模式索引比特数相同,而 GMI-(8,7,2)配置所包含的模式索引比特数最少。由图可知,相较于 GMI-(8,3,2)配置, GMI-(8,5,2)配置在弱湍流与强湍流条件下均存在约 2 dB 的 SNR 损失,但其频谱效率提升了 0.25  $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。这表明,随着  $K$  的增加,系统可承载更多星座映射比特,从而提升频谱效率,但同时也会导致有效最小欧氏距离减小,进而产生一定的 BER 性能损失,体现了频谱效率与 BER 性能之间的典型权衡关系。此外,与 GMI-(8,5,2)配置相比, GMI-(8,7,2)配置的频谱效率与之相同,但在两种湍流条件下均存在约 1.5 dB 的 SNR 损失。这说明,在相同频谱效率条件下,单纯通过增加  $K$  来提升传输比特数会进一步削弱系统的 BER 性能;相比之下,通过结构索引机制提升频谱效率能够获得更优的 BER 性能。

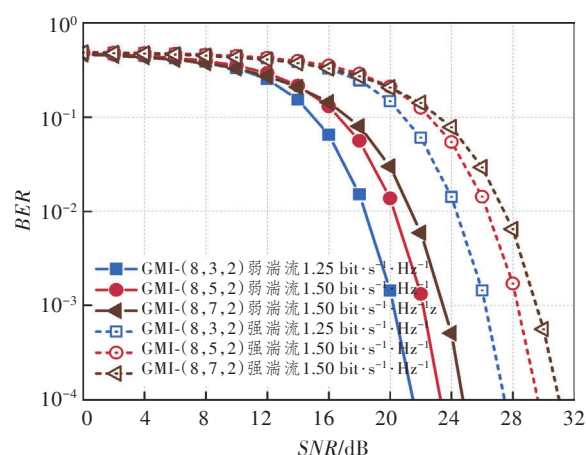


图 5  $K$  对 OOTFS-SDM-IM 系统在 GMI 方式下 BER 性能的影响

Figure 5 Effect of  $K$  on the BER performance of the OOTFS-SDM-IM system under the GMI scheme

图 6 所示为本文所提 OOTFS-SDM-IM 系统与传统 OOTFS-DM-IM 系统在相同频谱效率条件下的 BER 性能比较。由图可知,两种系统在相同频谱效率下具有基本一致的 BER 性能。这是由于在等效频谱效率条件下,两者具有相同的平均发射功率与等效星座搜索维度,同时其有效最小欧氏距离也保持一致,因此系统 BER 性能趋于一致。该结果表明,本文所提 OOTFS-SDM-IM 系统在降低系统可靠性的前提下,实现了更加灵活的参数配置与频谱效率调节能力。

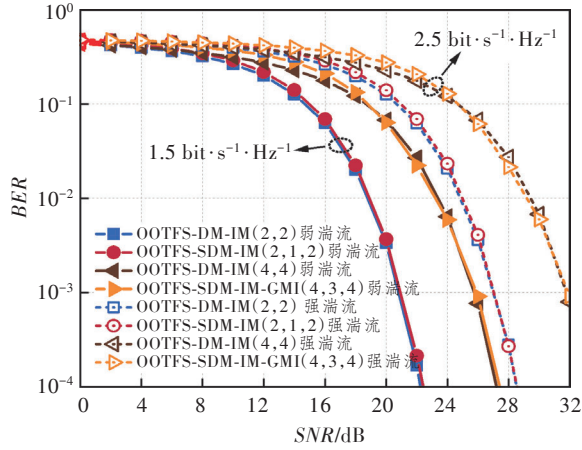


图6 OOTFS-SDM-IM 与 OOTFS-DM-IM 系统在相同频谱效率下的 BER 性能

Figure 6 BER performance of OOTFS-SDM-IM and OOTFS-DM-IM system under equal spectral efficiency

### 3 结束语

本文针对复杂大气湍流环境下 OOTFS-DM-IM 系统频谱效率调节粒度有限的问题,提出了一种 OOTFS-SDM-IM 系统。通过引入非全激活子载波组结构与模式索引机制,扩展了系统的索引映射自由度,实现了频谱效率的灵活调节与细粒度覆盖。仿真结果表明,本文所提系统可在  $1.0 \sim 2.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  范围内实现连续可调的频谱效率,并保持  $0.25 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  的调节步长。不同参数配置下的分析结果进一步表明,子载波组划分粒度及调制参数联合设计对系统 BER 性能具有显著影响,在合理配置下可实现更优的性能-频谱效率折中关系。同时,在相同频谱效率条件下,本文所提系统与传统 OOTFS-DM-IM 系统具有一致的 BER 性能,验证了其在提升灵活性的同时未引入性能损失。此外,不同配置在高 SNR 区域呈现一致的渐近 BER 特性,说明系统在实现频谱效率扩展的同时保持了可靠的传输性能。总体而言,本文所提 OOTFS-SDM-IM 系统在不牺牲 BER 性能的前提下实现了频谱效率的灵活调节与细粒度控制,为 OOTFS 系统提供了一种兼顾传输可靠性与频谱利用效率的有效设计方法。

#### 参考文献:

- [1] 高晓梅,舒玉婷,梁静远,等. 通信激光器及其调制技术研究进展[J]. 光通信研究, 2024(2): 220048.  
Gao X M, Shu Y T, Liang J Y, et al. Research

Progress of Communication Laser and Its Modulation Technology [J]. Study on Optical Communications, 2024(2): 220048.

- [2] Xu C, Zhang X, Petropoulos P, et al. Optical OTFS Is Capable of Improving the Bandwidth-, Power- and Energy-Efficiency of Optical OFDM[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(2): 938–953.
- [3] Wang Z, Wang H, Tang Q, et al. Grouped Multi-Mode Index Modulation-Integrated OOTFS for OWC: Design and Experimental Evaluation[J]. Optics & Laser Technology, 2026, 195: 114586.
- [4] Nie Y, Chen C, Zeng Z, et al. Interference Mitigation for Faster-than-Nyquist  $m$  CAP in Bandlimited VLC: a Low-Complexity Gapped Index Modulation Approach[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(14): 6533–6546.
- [5] 王真,王惠琴,唐崎涵,等. 混合模双域索引调制 OOTFS 系统研究[J]. 光通信研究, 2026(2): 250382.  
Wang Z, Wang H Q, Tang Q H, et al. Investigation of OOTFS with Hybrid-Mode Dual-Domain Index Modulation [J]. Study on Optical Communications, 2026(2): 250382.
- [6] Mao T, Jiang R, Bai R. Optical Dual-Mode Index Modulation Aided OFDM for Visible Light Communications[J]. Optics Communications, 2017, 391: 37–41.
- [7] Zhao Y, Yang P, Zhu J, et al. Dual-Mode Index Modulation Aided AFDM for Future High Mobility Communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(11): 3485–3489.
- [8] Ouyang S, Chen Z. Orthogonal Time Sequency Multiplexing with Dual-Mode Index Modulation[J]. IEEE Communications Letters, 2026, 30: 174–178.
- [9] Chen X, Cao M, Zhang Y, et al. Deep Learning-Aided Dual-Mode Index Modulation FBMC for Optical Wireless Communications[J]. Optics Communications, 2026, 606: 132906.
- [10] Mao T, Wang Q, Wang Z. Generalized Dual-Mode Index Modulation Aided OFDM[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(4): 761–764.
- [11] 王惠琴,周伟煜,唐崎涵,等. 零填充双模光正交频分复用索引调制的三级分步检测算法[J]. 光学学报, 2024, 44(11): 1106003.  
Wang H Q, Zhou W Y, Tang Q H, et al. Three-Stage Stepwise Detection Algorithm for Zero-Padded Dual-Mode Optical OFDM Index Modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(11): 1106003.
- [12] 周伟煜,王惠琴,王真,等. 湍流信道中零填充三模光

正交频分复用索引调制的性能分析[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2024, 36(1): 191–198.

Zhou W Y, Wang H Q, Wang Z, et al. Performance Analysis of Zero-Padded Tri-Mode Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation in Turbulent Channels[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Sci-

ence Edition), 2024, 36(1): 191–198.

- [13] Barrios R, Dios F. Exponentiated Weibull Model for the Irradiance Probability Density Function of a Laser Beam Propagating through Atmospheric Turbulence[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 13–20.