

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240238.

光通信系统与网络技术

巩小雪,刁志宏,王超,等.低复杂度偏分自零差相干光正交频分复用系统[J].光通信研究,2026(4):109–114.

Gong X X, Diao Z H, Wang C, et al. Low-Complexity Polarization-Multiplexed Self-Homodyne Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing System[J]. Study on Optical Communications, 2026(4):109–114.

低复杂度偏分自零差相干光正交频分复用系统

巩小雪,刁志宏,王超,张宇坤,张琦涵,郭磊

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院,重庆 400065)

摘要:【目的】为了在控制相干光通信系统功耗的同时提升光通信网络性能,解决正交频分复用(OFDM)-索引调制(IM)系统在高阶调制下频谱效率降低以及星座点间欧氏距离减小导致的误码率(BER)性能下降等问题,文章提出了一种 OFDM-索引-块功率调制(IBPM)系统。【方法】OFDM-IBPM 系统通过将输入比特信息映射到子载波块内激活子载波的功率上进行调制,保留了 IM 中的静默子载波,通过功率调制增加了星座点间欧氏距离。为进一步降低系统成本,OFDM-IBPM 与偏分自零差相干光通信系统相结合,在相干光通信框架下进行了系统设计与优化。【结果】仿真结果表明,OFDM-IBPM 系统在频谱效率和 BER 性能方面均优于传统 OFDM-IM 和 OFDM 系统。与 OFDM-IM 系统相比,OFDM-IBPM 系统的频谱效率提升了约 12.6%,且在相同的 BER 条件下获得了约 0.8 dBm 的信噪比(SNR)增益。得益于功率调制的引入,该系统有效缓解了欧氏距离减小的问题,同时保持了较低的系统复杂度。【结论】文章所提 OFDM-IBPM 系统为优化高阶调制相干光通信网络的频谱效率和 BER 性能提供了一种新思路。该系统在不显著增加硬件复杂度的情况下,通过结合偏分自零差相干光通信技术,兼顾了高频谱效率和低 BER 的需求,验证了其在光网络传输中的实际应用潜力,为下一代高效光通信系统的设计提供了理论与实践支持。

关键词:索引-块功率调制;正交频分复用;频谱效率;偏分自零差相干检测

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Low-Complexity Polarization-Multiplexed Self-Homodyne Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing System

GONG Xiaoxue, DIAO Zhihong, WANG Chao, ZHANG Yukun, ZHANG Qihan, GUO Lei

(School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: 【Objective】To enhance the performance of optical communication networks while controlling the power consumption of coherent optical communication systems, this study addresses the issues of reduced spectral efficiency and degraded Bit Error Rate (BER) performance caused by the decreased Euclidean distance between constellation points in high-order modulated Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) with Index Modulation (IM). A novel OFDM system with Index-Block Power Modulation (IBPM) is proposed. 【Methods】The OFDM-IBPM system maps input bit information onto the power of activated subcarriers within a subcarrier block while retaining the silent subcarriers inherent to IM. This approach leverages power modulation to increase the Euclidean distance between the constellation points. To further reduce the system costs, OFDM-IBPM is integrated with polarization-multiplexed self-homodyne coherent optical communication systems. The system design and optimization were performed under a coherent optical communication framework. 【Results】Simulation results demonstrate that the proposed OFDM-IBPM system outperforms both OFDM-IM and conventional OFDM in terms of spectral efficiency and BER performance. Specifically, compared to OFDM-IM, the spectral efficiency of OFDM-IBPM is improved by approximately 12.6%, and a Signal-to-Noise Ratio (SNR) gain of about 0.8 dB is achieved at the same BER level. By introducing power modulation, the proposed system effectively alleviates the reduction in Euclidean distance while maintaining a low system complexity. 【Conclusion】The proposed OFDM-IBPM system offers a novel approach to optimize spectral efficiency and BER performance in high-order modulated coherent optical communication networks. Without significantly increasing hardware complexity, the system combines polarization-multiplexed self-homodyne coherent optical communication technology to achieve both high spectral efficiency and low BER. The results validate its potential for practical applications in optical network transmission and provide theoretical and practical support for the design of next-generation high-efficiency optical communication systems.

Key words: IBPM; OFDM; spectral efficiency; polarization-multiplexed self-homodyne detection

收稿日期:2024-11-21; 修回日期:2024-12-10; 纸质出版日期:2026-08-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFB2905900);国家自然科学基金资助项目(62075024, 62025105, 62071076, 62221005);重庆市教委创新研究群体资助项目(CXQT21019)

作者简介:巩小雪(1988-),女,辽宁沈阳人。副教授,博士,主要研究方向为光接入网信号损伤补偿技术、高速安全光传输理论与技术和数字信号处理算法设计与实现。

通信作者:巩小雪,副教授。E-mail:gongxx@cqupt.edu.cn

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

0 引言

为满足第五代移动通信技术(5th Generation Mobile Communication Technology, 5G)网络和物联网快速发展的需求,光通信技术正向高速、大容量和低时延方向迈进^[1]。传统的强度调制直接检测(Intensity Modulation Direct Detection, IM-DD)技术因灵敏度低和平方检测等缺陷,已难以支撑光网络的进一步发展^[2-3]。相较之下,相干光通信凭借高频谱效率、高灵敏度和线性检测的优势,成为未来大容量光传输的主流方案。然而,其数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)算法复杂、硬件成本和功耗过高的问题阻碍了实际应用^[4]。为此,偏分自零差相干光通信系统被提出,其通过在光域完成载波恢复,降低了DSP的资源需求,同时简化了接收端的硬件结构^[5-7]。

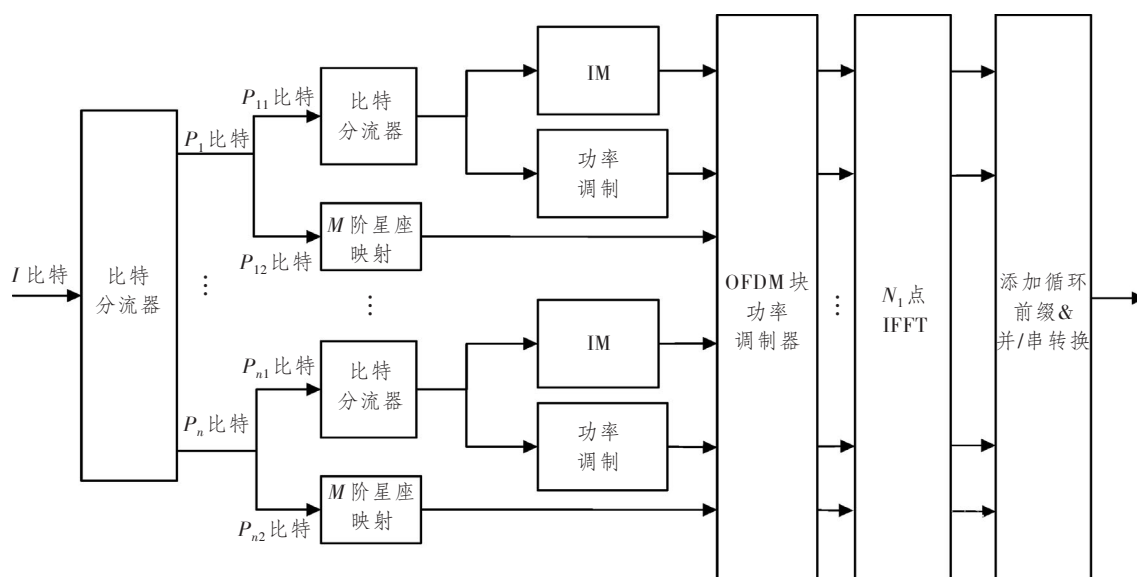
为了进一步提升传输容量与速率,正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术被引入相干光通信,形成相干光(Coherent Optical, CO)-OFDM技术。CO-OFDM技术具备高频谱效率和易于实现信号处理的特点,是提高传输速率和信道容量的重要方法^[8-9]。然而,其高峰均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)及对载波频率偏移和相位噪声的敏感性限制了其性能^[10]。为了减轻这些限制,Basar等人将空间调制思想引入OFDM,提出了OFDM-索引调制(Index Modulation, IM)^[11]。该技术利用比特信

息选择部分子载波激活并将星座符号映射到激活子载波上,提升了无线领域中OFDM的误码率(Bit Error Rate, BER)性能^[12-15]。但在相干光通信中,OFDM-IM由于中心零点的引入导致星座点间欧氏距离减小,BER性能低于CO-OFDM。此外,部分子载波未承载信息使其频谱效率在高阶调制下显著降低^[16]。

为解决上述问题,本文提出了OFDM-索引-块功率调制(Index-Block Power Modulation, IBPM)系统。该系统在OFDM-IM系统的基础上,通过激活子载波功率调制引入额外信息比特,保留了静默子载波并增大了星座点间欧氏距离。在正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)偏分自零差相干光检测系统中的仿真表明,相比于OFDM-IM系统,OFDM-IBPM系统在频谱效率和BER性能上均有所提升,并可根据应用场景灵活调整激活子载波数量,在BER和频谱效率之间实现平衡。

1 系统模型分析

OFDM-IBPM系统发送端调制框图如图1所示,OFDM-IBPM符号中的所有子载波块数为 G ,每个子载波块中的子载波数为 J 。发送端共有 I 个信息比特输入,经由比特分流器分为 n 个包含 P 位比特的信息块, P 位比特如图所示被分流为IM比特、 M 阶星座映射比特以及OFDM块功率调制比特,分别用于IM选择激活子载波、 M 阶星座映射以及对子载波块中选出的激活子载波进行功率调制。



注:IFFT为逆快速傅里叶变换。

图1 OFDM-IBPM发送端调制原理框图

Figure 1 The principle of block diagram of OFDM-IBPM transmitter modulation.

首先,根据索引位对子载波应用 IM。基于索引比特,从 1 个块的子载波 J 中选择 K 个子载波,而其余的子载波 $J \sim K$ 保持静默。每个 OFDM-IBPM 符号块可以传输的索引位数 Num_{Index} 为

$$Num_{Index} = \frac{G}{J} \lfloor \log_2(C_J^K) \rfloor. \quad (1)$$

然后将功率调制位映射到激活的子载波上。若信息位=1,则块的所有激活子载波都配置为高功率;若信息位=0,则设置为低功率。每个 OFDM-IBPM 符号块中可以通过功率调制传输的比特数 Num_{Power} 为

$$Num_{Power} = \frac{G}{J}. \quad (2)$$

最后,将经过 M 阶符号调制的比特映射到激活子载波上,符号调制传输的信息比特数 Num_{Symbol} 为

$$Num_{Symbol} = \frac{G}{J} \times K \times (\log_2 M). \quad (3)$$

其余步骤与传统的 OFDM 调制相同。所以 1 个 OFDM-IBPM 符号所能传输的信息比特数 $Num_{OFDM-IBPM}$ 为

$$Num_{OFDM-IBPM} = Num_{Index} + Num_{Power} + Num_{Symbol}. \quad (4)$$

当调制格式为 QPSK,每个子载波块中有 4 个子载波,且激活 3 个子载波时,OFDM-IBPM 中索引比特与子载波块功率调制比特的映射表如表 1 所示, S 为激活子载波,其既承载了正常 OFDM 调制的比特信息,又承载了 IM 和功率调制比特信息;0 表示未激活也就是未承载比特信息的子载波; H 为高功率调制参数; L 为低功率调制参数。

表 1 索引比特与功率比特映射表

Table 1 Mapping table of index bits to power bits

索引比特 [功率调制比特]	激活子载波位置与功率	索引比特 [功率调制比特]	激活子载波位置与功率
0 0 [1]	[S1H S2H 0 S3H]	0 0 [0]	[S1L S2L 0 S3L]
0 1 [1]	[S1H S2H S3H 0]	0 1 [0]	[S1L S2L S3L 0]
1 0 [1]	[S1H 0 S2H S3H]	1 0 [0]	[S1L 0 S2L S3L]
1 1 [1]	[0 S1H S2H S3H]	1 1 [0]	[0 S1L S2L S3L]

图 2 所示为每个子载波在 OFDM、OFDM-IM 和 OFDM-IBPM 3 种调制格式下可以传输的比特数。如图所示,在 QPSK 调制下,OFDM 可以为 4 个子载波传输 8 位信息。然而,OFDM-IM 只有在激活的子载波数 $K=3$ 时才能达到这个位数。此外,OFDM-IBPM 总是允许比 OFDM-IM 多传输 1 个比特。而且,当启用 3 个子载波时,OFDM-IBPM 总比 OFDM 多传输 1 位。

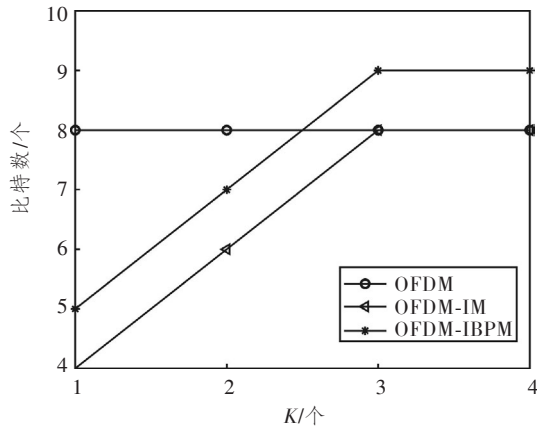


图 2 3 种调制格式下每个子载波块所能传输的比特数

Figure 2 Number of bits that can be transmitted per subcarrier block in the three modulation formats

频谱效率是光通信系统的一个重要指标^[17],对于 CO-OFDM-IBPM,频谱效率 $SE_{CO-OFDM-IBPM}$ 可表示为

$$SE_{CO-OFDM-IBPM} = \frac{G(K \log_2 M + \lfloor \log_2 C_J^K \rfloor + N_{Block})}{N \cdot T \cdot B}, \quad (5)$$

式中: N_{Block} 为 OFDM-IBPM 子块的个数; N 为子载波总数; T 为信号传输时间; B 为所需带宽。假设 $G = 256$, $J = 4$, $K = 3$, 循环前缀长度为 32, 采用 QPSK 调制格式时,在偏分自零差相干光通信系统中,CO-OFDM-IM 的频谱效率约为 1.736 bit/s/Hz。而 CO-OFDM-IBPM 的频谱效率能达到 1.953 bit/s/Hz,提升了约 12.6%。

2 仿真设置与结果分析

本文在偏分自零差相干光通信系统中对 OFDM-IBPM 系统的性能进行了仿真验证。系统结构如图 3 所示,其中采用 VPItransmissionMaker 9.5(VPI)搭建光传输链路,采用 Matlab 2020 仿真软件来进行生成 OFDM-IBPM 电信号以及对接收端的信号解调等电域操作。

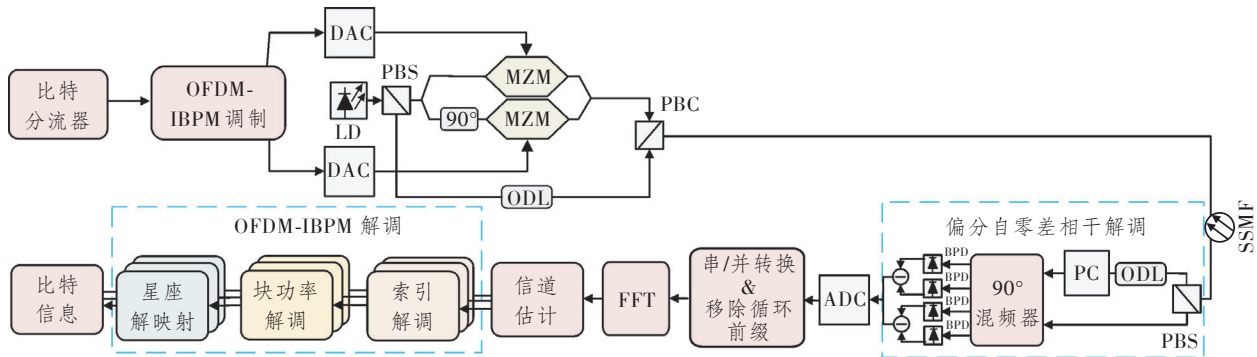
在发送端,首先生成 1 串伪随机二进制比特序

列,经过 OFDM-IBPM 调制处理。比特流被分为 3 部分,分别用于 IM、子载波块功率调制和星座映射(采用 QPSK 信号)。通过 OFDM 复用将 QPSK 符号加载到经过 IM 和功率调制的激活子载波上形成 OFDM 块,经 IFFT 生成 OFDM-IBPM 信号,并添加长度为 32 的循环前缀。随后,信号经过并/串转换和数/模转换(Digital to Analog Converter, DAC)后完成电域调制。

接下来,信号送入光调制模块。连续光经过偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)被分为两路:一路作为接收端本地振荡(Local Oscillator, LO)传输,另一路与 OFDM-IBPM 电信号在马赫曾德尔调制器(Mach Zehnder Modulator, MZM)中调制生成光信号。调制光信号与 LO 经偏振合束器(Polarization Beam Combiner, PBC)复用至两个偏

振态后,进入标准单模光纤(Standard Single Mode Fiber, SSMF)传输。

在接收端,先采用偏分自零差相干解调,接收信号光经 PBS 分离出两偏振态的信号光和 LO,通过光纤延时线(Optic Delay Lines, ODL)消除两者的相对延迟,并用偏振控制器(Polarization Controller, PC)对齐偏振态。信号经 90° 混频器分离为 I 路和 Q 路,经过平衡光电探测器(Balanced PhotoDetector, BPD)转换为电信号完成偏分自零差相干解调。随后电信号通过模/数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)转为数字信号送入 DSP 模块。DSP 完成快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)、信道估计、索引解调、块功率解调和星座解映射,最终恢复出原比特序列。



注:LD为激光二极管。

图3 基于索引-块功率调制的偏分自零差相干光 OFDM 系统原理图

Figure 3 Schematic diagram of indexed self zero difference coherent optical OFDM system based on indexed-block power modulation

仿真参数设置为:OFDM-IBPM 符号数为 1 000,每个 OFDM-IBPM 符号的子载波数为 $G=256$,子载波块数为 64,每个子载波块中包含 $J=4$ 个子载波,每个子载波块中的激活子载波数 $K=3$,高功率调制参数 $H=2.2$,低功率调制参数 $L=1$,循环

前缀长度=0.125,如表 2 所示。SSMF 的传输距离设置为 100 km,其中 SSMF 源于长飞公司全贝低水峰 SSMF 数据^[18],如表 3 所示。表 4 所示为系统有关器件的参数设置。

表2 OFDM-IBPM 参数

Table 2 OFDM-IBPM parameters

参数	数值
信号调制格式	QPSK
OFDM-IBPM 符号数	1 000
H	2.2
L	1
G	256
J	4
K	3
循环前缀长度	0.125
采样率/GSa/s	100
比特率/Gbit/s	25

表3 SSMF 参数设置

Table 3 SSMF parameter settings

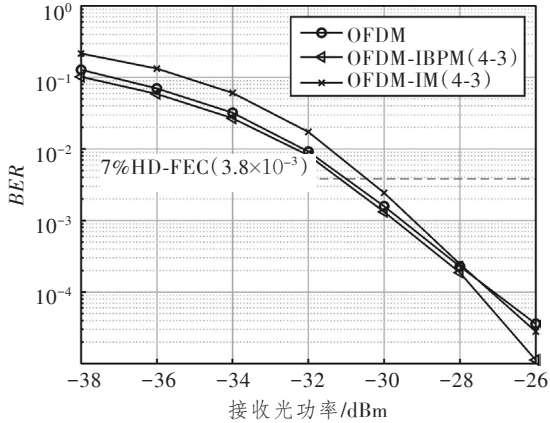
参数	数值
色散系数/ps/(nm.km)	16
色散斜率/ps·nm ⁻² /km	86
偏振模色散系数/s/m	$0.4 \times 10^{-13}/31.62^{1/2}$
非线性指数/m ² /W	2.6×10^{-20}
纤芯面积/m ²	80×10^{-12}
衰减系数/dB/km	0.2
光纤长度/km	100

表 4 系统器件参数

Table 4 System device parameters

参数	数值设置
激光器线宽/kHz	100
MZM 分光比/dB	30
BPD 响应度/A/W	0.55
BPD 暗电流/A	1×10^{-9}
BPD 热噪声/A/Hz	$(1 \times 10^{-12})^{1/2}$

本文首先分析了偏分自零差 CO-OFDM、CO-OFDM-IM 和 CO-OFDM-IBPM 的 BER 性能。图 4 所示为接收光功率与 BER 之间的关系曲线，由图 5 可知，当 BER 为 3.8×10^{-3} ，即硬判决前向纠错门限 (Hard Decision-Forward Error Correction, HD-FEC) 时，CO-OFDM-IBPM 与 CO-OFDM-IM 相比有约 0.8 dBm 的接收机灵敏度增益，与 CO-OFDM 相比有约 0.4 dBm 的接收机灵敏度增益。在接收功率为 -28 dBm 时 CO-OFDM-IBPM 的 BER 能达到 1.76×10^{-4} ，优于 CO-OFDM-IM 以及 CO-OFDM。这是由于经过子载波块功率调制后，降低了不同星座点之间的干扰，并且提供了较好的信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)，从而提高了系统的抗干扰能力。图 4 和图 5 中，OFDM、OFDM-IBPM 和 OFDM-IM 分别为 CO-OFDM、CO-OFDM-IBPM 和 CO-OFDM-IM。



注：(4-3)为激活每个子载波块里的3个子载波，也就是用其中3个子载波来承载比特信息，剩余1个子载波不激活。

图 4 3 种调制格式在偏分自零差相干光通信系统中的 BER 曲线图

Figure 4 BER of the three modulation formats in a polarized self-zero-difference coherent optical communication system

CO-OFDM-IBPM 的信号解调与 CO-OFDM-IM 相比多出子载波块功率解调部分。在接收端对 CO-OFDM-IBPM 的子载波块功率进行解调时，由

于每个子载波块中的激活子载波功率相同，所以在解调时将 3 个激活子载波的功率均值与设置的阈值 (即 $(H_{\text{POWER}} + L_{\text{POWER}})/2$, H_{POWER} 为高功率调制参数, L_{POWER} 为低功率调制参数) 进行比较, 这样可以在很大程度上降低由于索引解调错误引起的功率解调错误。

图 5 所示为利用功率均值进行解调的块功率调制 BER (OFDM-IBPM (Power Mean))、只用单个子载波功率进行解调时的块功率调制 BER (OFDM-IBPM (NonPower Mean))、利用功率均值进行解调时的总 BER (BER-POWER (Mean Value)) 和只用单个子载波功率进行解调时的总 BER (BER-POWER (Non-Mean Value))。仿真结果表明, 利用功率均值进行解调的 CO-OFDM-IBPM 的 BER 在接收光功率为 -28 dBm 时能达到约 1.87×10^{-4} , 而仅用单个子载波功率时, BER 只有约 2.45×10^{-3} 。

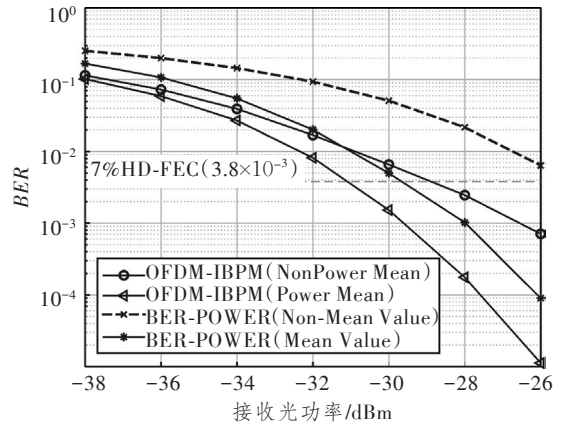


图 5 功率均值与单个功率解调 BER 曲线图

Figure 5 BER versus power average with different power demodulation methods

3 结束语

本文提出了 OFDM-IBPM 系统, 该技术在 OFDM-IM 系统的基础上利用比特信息对子载波块中的激活子载波功率进行了调制, 并且将每个子载波块中的子载波设置为相同功率, 在利用功率调制携带额外的信息比特的同时, 保留了 IM 中的静默子载波, 并且能在一定程度上增大星座点间欧氏距离。在偏分自零差相干光通信系统基础上, 本文所提系统的仿真结果显示比 CO-OFDM-IM 系统更好的 BER 性能, 获得了 0.8 dBm 的增益, 并且在相同的传输性能下, 相较于 OFDM-IM 系统, 其频谱效率提升了约 12.6%。

参考文献:

- [1] Guo H, Wang Y, Liu J, et al. Super-Broadband Optical Access Networks in 6G: Vision, Architecture, and Key Technologies [J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(6): 152–159.
- [2] Zhou X, Urata R, Liu H. Beyond 1 Tb/s Intra-Data Center Interconnect Technology: IM-DD OR Coherent? [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 475–484.
- [3] Chaaban A, Rezki Z, Alouini M S. On the Capacity of Intensity-Modulation Direct-Detection Gaussian Optical Wireless Communication Channels; a Tutorial [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(1): 455–491.
- [4] Gui T, Wang X, Tang M, et al. Real-Time Demonstration of Homodyne Coherent Bidirectional Transmission for Next-Generation Data Center Interconnects [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(4): 1231–1238.
- [5] Wen Y J, Li A, Guo Q, et al. 200 G Self-Homodyne Detection with 64QAM by Endless Optical Polarization Demultiplexing [J]. Optics Express, 2020, 28(15): 21940.
- [6] 唐明, 李伟昊, 章明明, 等. 同源自零差相干光传输技术[J]. 中国激光, 2022, 49(12): 1206002.
Tang M, Li W H, Zhang M M, et al. Self-Homodyne Coherent Optical Transmission Techniques [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(12): 1206002.
- [7] Chen Y, Wang X, Zeng Y, et al. All-Optical Polarization Split of the Signal and LO for a Bi-Directional Self-Homodyne Coherent System [J]. Optics Letters, 2021, 46(12): 2819–2822.
- [8] 童峥嵘, 刘颖慧, 曹晔. 100 Gb/s 高速PDM-CO-OFDM系统峰值平均功率比抑制性能研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 106002.
Tong Z R, Liu Y H, Cao Y. Research on Peak-to-Average Power Ratio Reduction Performance for 100 Gb/s High-Speed PDM-CO-OFDM Systems [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 106002.
- [9] Sachdeva S, Sindhvani M. Performance Investigation of Various Modulation Techniques in Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (CO-OFDM) System [J]. Journal of Optical Communications, 2025, 46(1): 161–167.
- [10] Hussein H S, Hagag M. Optical MIMO-OFDM with Fully Generalized Index-Spatial LED Modulation [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(9): 1556–1559.
- [11] Basar E, Aygolu U, Panayirci E, et al. Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(22): 5536–5549.
- [12] Başar E, Aygölü Ü, Panayircı E. A New Technique for OFDM: OFDM-Index Modulation [C]//2013 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Haspolat, Turkey: IEEE, 2013: 6531212.
- [13] Azim A W, Le Guennec Y, Chafii M, et al. Enhanced Optical-OFDM with Index and Dual-Mode Modulation for Optical Wireless Systems [J]. IEEE Access, 2020, 8: 128646–128664.
- [14] 郭漪, 王翊卿, 樊媛媛, 等. 基于子载波补给索引调制的OFDM传输方案[J]. 通信学报, 2023, 44(2): 104–111.
Guo Y, Wang Y Q, Fan Y Y, et al. OFDM Transmission Scheme with Subcarrier Supply Index Modulation [J]. Journal on Communications, 2023, 44(2): 104–111.
- [15] Li J, Dang S, Wen M, et al. Hybrid Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Subcarrier Number Modulation [C]//ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2021: 9500748.
- [16] Chen Y, Huang Y, Yin P, et al. Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation [C]//2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). Huangshan, China: IEEE, 2019: 8934349.
- [17] Fang Y, Zhuo J, Ma H, et al. Design and Analysis of a New Index-Modulation-Aided DCSK System with Frequency- and Time Resources [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(6): 7411–7425.
- [18] YOFC. Single Mode Fiber [EB/OL]. (2024-06-11) [2024-12-10]. <https://www.yofc.com/view/862.html>.