

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.230152.

光通信系统与网络技术

高天宇,王彦泽,刘亚平,等. 模分复用系统中模式轮循策略的对比研究[J]. 光通信研究, 2025(1): 230152.

Gao T Y, Wang Y Z, Liu Y P, et al. Comparative Research on Mode Permutation Strategies in Mode-division Multiplexing Systems[J]. Study on Optical Communications, 2025(1): 230152.

模分复用系统中模式轮循策略的对比研究

高天宇¹, 王彦泽¹, 刘亚平¹, 杨志群¹, 张林^{1,2}

(1. 天津大学 光电信息技术教育部重点实验室 & 天津市集成光电子技术与器件重点实验室, 天津 300072;

2. 鹏城实验室, 广东 深圳 518038)

摘要:【目的】模分复用技术是突破单模光纤传输系统容量极限的关键技术。在少模光纤链路中,随着传输距离的增大,模间色散导致的脉冲展宽使接收端多输入多输出算法的复杂度变高,这是限制模分复用系统实现长距传输的重要原因之一。而应用模式轮循方法能够有效压缩脉冲展宽,减小模式相关损耗,是目前实现长距离大容量模分复用系统传输的主流技术路径。但模式轮循策略数量众多,性能存在差异,探究更适用于长距大容量模分复用系统的模式轮循策略成为亟待解决的难题。【方法】文章提出了一种模式轮循策略匹配光纤群时延排布的设计思路,设计了配合群时延对称型少模光纤使用的对称模式轮循(MFMP)策略。通过仿真平台建模,分析了文章所提 MFMP 模分复用系统传输性能,并进行了 6 模复用传输系统实验验证。【结果】文章基于 MFMP 策略,使用 28 GBaud 正交相移键控信号,结合群时延对称型少模光纤,开展了 822 km 的 6 模实验传输。在 616 km 处,与传统依次模式轮循(CMP)和模群轮循(CMGP)策略相比,信号的脉冲展宽分别压缩了 37% 和 6%, Q 值分别提升了 3.0 和 0.4 dB。【结论】文章所提 MFMP 策略能够有效压缩脉冲展宽,提高系统传输 Q 值,通过仿真和实验分别验证了其性能优于传统的 2 类轮循策略,该工作为实现基于模式轮循的长距大容量模分复用传输提供了理论依据和实验指导。

关键词: 模分复用; 少模光纤; 模式轮循

中图分类号: TN929

文献标志码: A

Comparative Research on Mode Permutation Strategies in Mode-division Multiplexing Systems

GAO Tianyu¹, WANG Yanze¹, LIU Yaping¹, YANG Zhiquan¹, ZHANG Lin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology of Ministry of Education and Tianjin Key Laboratory of Integrated Opto-electronics Technologies and Devices, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518038, China)

Abstract: 【Objective】Mode-division multiplexing is a key technology to break through the capacity limit of single-mode fiber systems. In the few-mode fiber links, the pulse broadening caused by intermodal dispersion increases the complexity of multiple-input-multiple-output algorithms in the receiving terminal, which is one of the important reasons for limiting the implementation of long-haul transmission in mode-division multiplexing systems. The application of mode permutation methods can effectively compress pulse broadening and reduce mode-dependent loss, making it a mainstream technological approach for achieving long-distance, high-capacity mode-division multiplexing system transmission. However, there are numerous mode-permutation strategies with varying performance, and exploring mode-permutation strategies that are more suitable for long-distance, high-capacity mode-division multiplexing systems has become an urgent problem to be solved. 【Methods】In this paper, we propose that the mode permutation strategy should match the mode group delay distribution of the fiber. Besides, we design a Mirror-Flipped Mode Permutation(MFMP) strategy based on few-mode fibers with symmetric mode delay. By modeling on a simulation platform, the transmission performance of mode-division multiplexing system based on the proposed MFMP is analyzed and verified through 6-mode multiplexing transmission experiments. 【Results】In this paper, based on the proposed MFMP strategy, 822-km 6-mode transmission over a mode-delay-symmetric few-mode fiber is experimentally demonstrated, carrying quadrature phase shift keying signals at 28 GBaud. At 616 km, compared to Cyclic Mode Permutation(CMP) and Cyclic Mode-Group Permutation(CMGP) methods, the signal pulse broadening is compressed by 37% and 6%, and the Q-factor is increased by 3.0 and 0.4 dB, respectively. 【Conclusion】The proposed MFMP strategy can effectively compress pulse broadening, and improve the Q-factor of the system, while the advantages of this method over traditional two types of mode permutation strategies are verified via simulation and experiment. It should be noted that our work provides the theoretical basis and experimental guidance for achieving long-haul and high-capacity mode-division multiplexing transmissions based on mode permutation strategies.

Key words: mode-division multiplexing; few-mode fiber; mode permutation

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2023-10-26; 纸质出版日期: 2025-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62105241); 天津市自然科学基金资助项目(21JCQNJC00540)

作者简介: 高天宇(1997—), 男, 河北唐山人。硕士, 主要研究方向为长距模分复用系统。

通信作者: 刘亚平, 助理研究员。E-mail: liuyp@tju.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

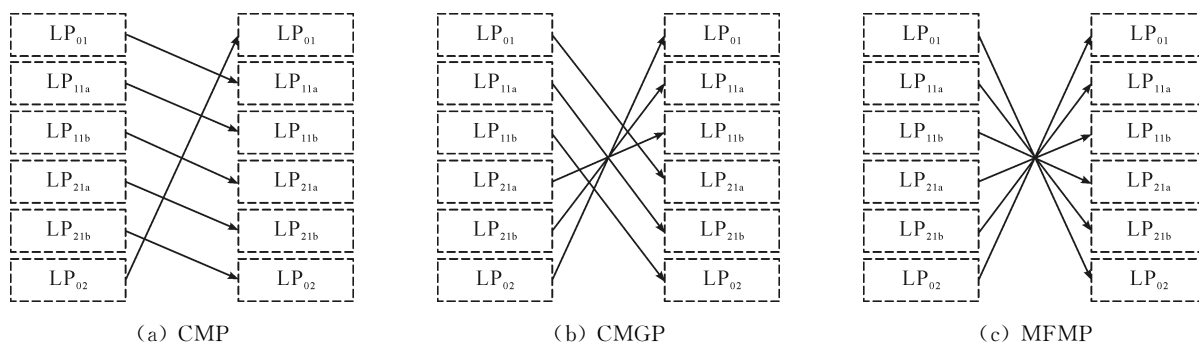
近年来,互联网流量呈指数级增长,单模光纤通信系统无法满足快速增长的容量需求^[1-2]。空分复用技术利用多芯或少模光纤中的不同空间信道来并行传输数据流,被认为是突破单模光纤容量极限的唯一解决方案^[3-4]。作为其中重要的分支路线,模分复用技术因其高空间复用密度、低非线性效应和强向下兼容性等优点,在长距离陆缆传输场景的容量提升方面具有巨大潜力^[5-6],但仍面临着链路差分模式群时延大、模式相关损耗大等挑战。模式轮循技术能够有效压缩脉冲展宽,减小模式相关损耗,近年来受到广泛关注。2019 年,日本 Shibahara 等人提出了模式轮循技术,并设计了依次模式轮循(Cyclic Mode Permutation, CMP)策略^[7];2020 年,Shibahara 等人针对 6 模传输系统设计了模群轮循(Cyclic Mode-Group Permutation, CMGP)策略^[8]。

当前针对模式轮循方案的研究较少,仅提出 CMP 和 CMGP 两种轮循策略。理论上来说,对于 M 个模式的交换,将会存在 M 阶乘个轮循策略的可能性。因此,逐一验证所有轮循策略的性能是难以实现的,因此在设计模式轮循策略时,少模光纤本身的模式群时延排布和损耗特性值得充分利用,从而筛选出性能优势的轮循策略。基于此,本文提出了一种基于群时延对称型少模光纤的对称模式轮循(Mirror-Flipped Mode Permutation, MFMP)策略,通过仿真和实验评估比较了其与传统模式轮循策略的性能。

1 MFMP 策略

在模分复用系统中,随着传输距离的增加,少模光纤的差分模式时延(Differential Mode Delay, DMD)几乎以线性关系增加。模式轮循能够缓解 DMD 和模式耦合引起的信号脉冲展宽,从而降低接收端均衡算法的计算复杂度。一般来说,模式轮循方法是通过交换链路中模式复用器和解复用器的单模尾纤顺序,使每个模式信号在传输至下一个跨度时被转换为其他模式信号继续传输,经过一个循环周期后,所有模式回到初始模式。应用模式轮循有两个好处:一方面,各模式信息在传输几个跨度后将周期性地循环经过每个空间通道。不考虑模式耦合的理想情况下,经过 1 个完整的循环周期后,系统累积的 DMD 为零。另一方面,在轮循过程中非简并模间的能量也会发生简并模式间才能发生的强耦合。

图 1(a)和图 1(b)分别为 CMP 和 CMGP 策略的模式交换方式,其设计思路更重视模群间的耦合,意在把非简并的模群通过轮循沟通起来。实际上光纤的模式群时延排布和损耗同样影响着轮循策略的效果。将群时延和损耗较大的模式与群时延和损耗较小的模式相互交换的轮循策略是更有意义的。通常少模光纤中基模传播速度最快,而模式阶数越高,传播速度越慢。根据上述设计思路,本文设计了一种 MFMP 策略,如图 1(c)所示。基模 LP_{01} 与最高阶模 LP_{02} 交换,次低阶模 LP_{11a} 和次高阶模 LP_{21b} 交换,以此类推,所有模式镜像交换到对称的模式。



注: LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b} 、 LP_{21a} 、 LP_{21b} 和 LP_{02} 为光纤支持的 6 个线偏振模,其中 LP_{11a} 和 LP_{11b} 、 LP_{21a} 和 LP_{21b} 均互为简并模,文中所指高阶/低阶模式为相对概念

图 1 各类模式轮循策略示意图

Figure 1 Different types of mode permutation strategies

以 LP_{01} 模为基准,计算推知光纤各模式对应的 DMD 值,假设少模光纤的群时延按照模式阶数由低到高排布。图 2(a)所示为常规型和理想的群时延对称型光纤的群时延排布示意图,图中忽略了简

并模间的 DMD,其中 $\tau_1 \sim \tau_4$ 均为各模式的群时延。常规型光纤模群的时延分布并不存在既定规律,为了使 MFMP 策略轮循效果更优,群时延对称型光纤的群延迟排布被设计为 LP_{01}/LP_{11} 和 LP_{21}/LP_{02}

对称分布。此设计确保了最低阶 LP_{01} 和最高阶 LP_{02} 模式的模式组延迟之和等于第 2 低阶 LP_{11} 和第 2 高阶 LP_{21} 模式的延迟之和。

MFMP 策略结合群时延对称型少模光纤使用, 该策略的优势在于模式交换更频繁, 每传两个跨段就能实现 1 次完整循环, 无需遍历所有信道就能实现 DMD 均衡。图 2(b) 所示为理想情况下计算得出的 3 种轮循策略脉冲展宽随跨段数的变化。CMP 策略需要传输与模式数相等的跨段才能完成 1 次循环周期, 在 6 模系统中需传输 6 个跨段; CMGP 策

略是 4 跨段 1 循环周期; MFMP 策略是两跨段 1 循环周期, 为交换最频繁, 周期最短的轮循策略。理想情况下, 基于 MFMP 策略的 6 模传输系统, 如跨度长度相等, 在偶数跨段时系统的 DMD 可以完全减小到 0, 奇数跨段时系统最多累积 1 个跨段的 DMD; 而 CMP/CMGP 策略仅在每 4/6 个跨段处对 DMD 进行完全补偿。更重要的是, MFMP 策略的两跨 1 周期特性可以推广到支持更多模式数的模分复用系统中, 相比于其他方案其优势会更加显著。

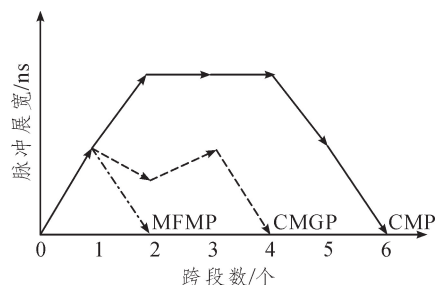
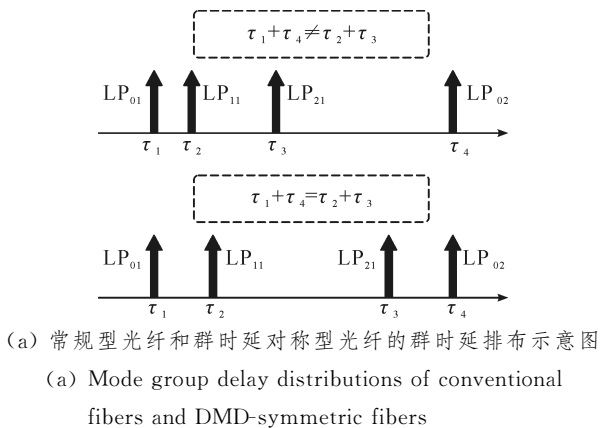


图 2 对称模式轮循方案在群时延展宽压缩方面的优势分析

Figure 2 Advantage analysis on signal pulse spread for MFMP scheme

2 不同模式轮循策略传输性能对比

2.1 少模传输系统仿真平台及参数设置

为对比不同轮循策略的性能, 首先在 VPI transmission maker 光通信仿真软件中设计并搭建了基于模式轮循的 6 模仿真平台, 传输系统由光发射机、少模光纤链路、光接收机和数字信号处理构成。6 个双偏发射机发射 12 路伪随机比特序列, 经过同相正交 (In-phase Quadrature, IQ) 调制后, 28 GBaud 偏振复用—正交相移键控 (Polarization

表 1 光纤链路仿真的参数设定

Table 1 Parameters of fiber link simulation

参数名称	参数值	参数名称	参数值
光源波长/nm	1 550	6 模光纤	80
		长度/km	
传输信号	28 GBaud	符号数	250 000
	PM-QPSK		
模群分布	$LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}$	DMD/ps/km	0, 100, 900, 1 000
色散/ps/(km · nm)	20	模间耦合	—30
		强度/dB	
各模群损	0.20, 0.21, 0.22, 0.23	放大器噪声	4
耗/dB/km		系数/dB	

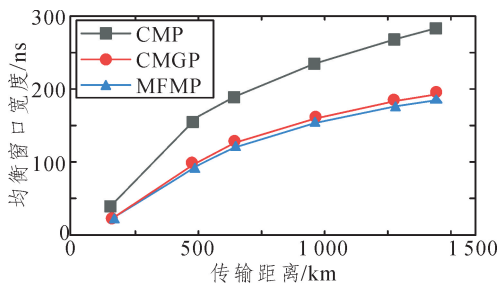
Multiplexed-Quadrature Phase Shift Keying, PM-QPSK) 信号通过模式复用器复用进入少模链路。信号经由少模光纤、少模放大器和模式轮循模块组成的少模环路传输后, 由 6 个相干接收机采集解复用后的 6 路传输信号, 用于后续数字信号处理并计算脉冲展宽和系统 Q 值。少模链路仿真参数设置如表 1 所示, 其中少模光纤 DMD 的仿真参数设置的绝对值量级 (~ 1 ns/km) 参考了后续实验用到的群时延对称型少模光纤的 DMD 实测值。

2.2 不同模式轮循策略的传输仿真结果分析和对比

信号脉冲展宽决定着均衡器所需的时间窗口宽度, 也将体现均衡算法所需的抽头数量和等效的计算复杂度。脉冲展宽可近似估计为时域抽头矩阵平均强度响应的高斯拟合曲线半高全宽^[9], 通过比较脉冲响应宽度即可评估不同轮循策略压缩群时延展宽的效果。图 3(a) 所示为不同轮循策略下信号脉冲展宽随传输距离变化的曲线。对比 3 种轮循策略, 在 1 440 km 处, MFMP 与 CMP 和 CMGP 策略的脉冲展宽压缩效果相比分别提高了 36% 和 3%。图 3(b) 所示为不同轮循策略下各模式平均 Q 值随传输距离变化的曲线, 由图可见, 应用 MFMP 策略的信号 Q 值最高, 这说明 MFMP

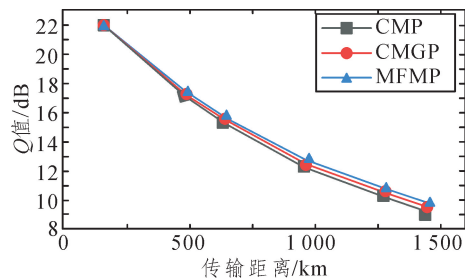
策略使链路的模式耦合更加频繁,最终传输性能

也会更优。



(a) 均衡窗口宽度随传输距离的变化

(a) The required equalizer window vs. transmission distance



(b) 各模式平均 Q 值随传输距离的变化

(b) Averaged Q-factor of each mode vs. transmission distance

图 3 不同轮循策略下 6 模传输的仿真结果

Figure 3 Simulation results for 6-mode transmission based on different mode permutation strategies

2.3 6 模传输环路实验系统

本文搭建了 6 模传输环路实验系统,旨在获得真实实验验证的对比结果,图 4 所示为其系统架构。发射端,线宽为 100 kHz 的窄线宽外腔激光器输出 14 dBm 的 1 550 nm 信号光到发射模块中。长度为 $2^{20}-1$ 的伪随机序列,经 I/Q 调制模块调制成 28 GBaud QPSK 信号以 0 dBm 功率输出。随后信号通过一个 1×6 分束器均分成 6 路信号,并在第 2 至第 6 路分别经过 400、800、1200、1 600 和 2 000 m 的延迟线实现 6 路信号模式解相关。6 路信号均经 2×2 耦合器,进入环路部分传输。

环路部分由复用/解复用器、少模光纤、放大器 and 光开关组成。群时延对称型 6 模光纤长度为 51.4 km, $LP_{01}/LP_{11}/LP_{21}/LP_{02}$ 模式的 DMD 实测值($DMD_{01}/DMD_{11}/DMD_{21}/DMD_{02}$)分别为 0、110、

920 和 970 ps/km,基本满足 $DMD_{01} + DMD_{02}$ 和 $DMD_{11} + DMD_{21}$ 的对称关系。各模式平均损耗约为 0.3 dB/km,模式相关损耗约为 0.08 dB/km。信号通过复用器复用进 6 模光纤进行传输,再由解复用器分成 6 路信号。解复用器的单模端口和各支路的连接顺序决定了所使用的模式轮循策略。随后 6 路信号分别通过放大器和光开关 2 重回到 2×2 耦合器输入端,实现环路传输。光开关 1 和 2 共同控制环路信号通断,避免不同跨段数的光信号间产生交叠。

在接收端,应用分时接收模块使相干接收机能够成功接收所有信号^[10-11]。电信号由带宽为 36 GHz 实时示波器以 80 GSamples/s 速率采样,采集的数据做离线数字信号处理,其均衡处理多输入多输出算法的抽头数量固定设置为 4 096 个。

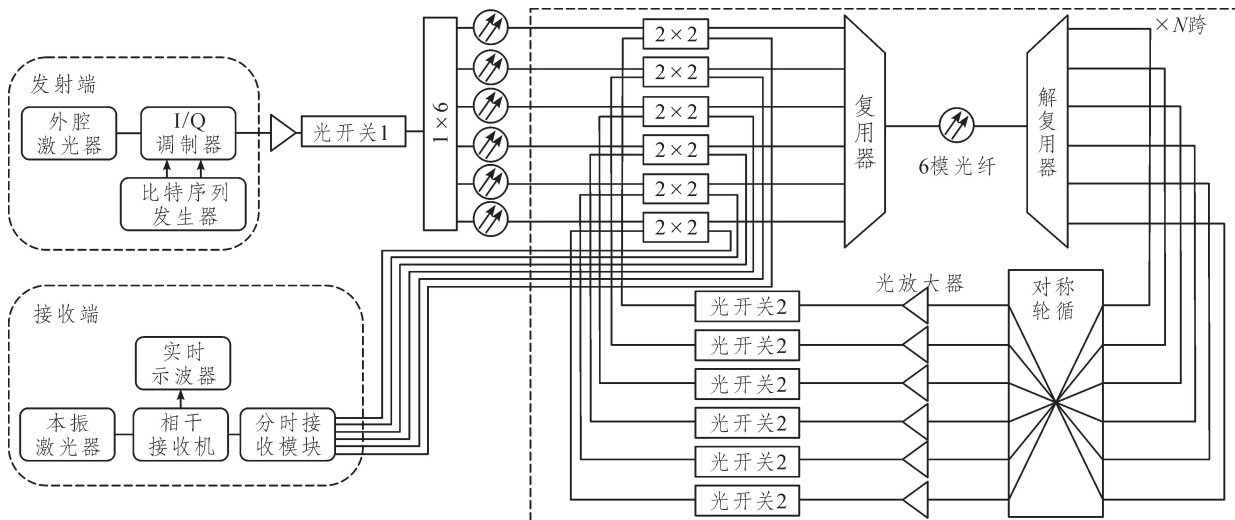


图 4 基于对称模式轮循的 6 模传输实验系统架构图

Figure 4 Experimental setup for the 6-mode transmission system based on MFMP

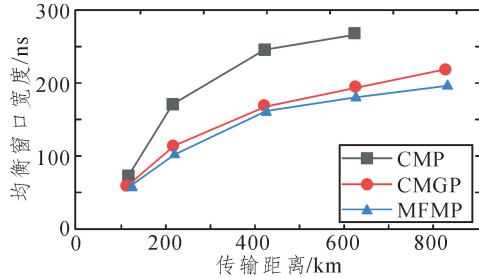
2.4 不同模式轮循策略的传输实验结果分析和对比

图 5(a)所示为不同轮循策略下信号脉冲展宽随传输距离变化的曲线。对比 3 种轮循策略,在

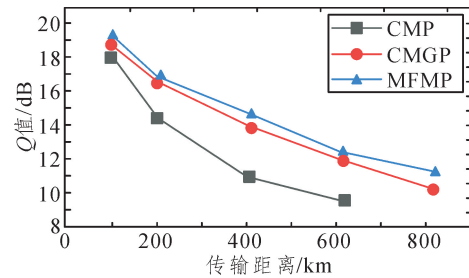
616 km 处, MFMP 与 CMP 和 CMGP 相比策略压缩脉冲展宽的效果分别提高了 37% 和 6%。经过 822 km 的传输,与不使用模式轮循的系统相比,应

用 MFMP 策略后,系统累积的脉冲展宽可减少 76%,从 797 ns ($0.97 \text{ ns/km} \times 822 \text{ km}$) 减少到 196 ns,这证明了 MFMP 策略压缩脉冲展宽的效果十分显著。图 5(b) 所示为不同轮循策略下各模式平均 Q 值随传输距离变化的曲线。在 616 km 处,基于 CMP 策略下系统传输距离几乎达到上限, MFMP 策略下的 Q 值与 CMP 和 CMGP 策略相比

分别高了 3.0 和 0.4 dB,且基于 MFMP 策略的系统传输距离更远,极限距离可达 822 km(在 4 096 个抽头的限制下)。与仿真相比,由于实际实验中的光纤与复用解复用器引入了更大的串扰和模式相关损耗,实验结果展示的脉冲展宽和 Q 值在更短的距离下达到极限。在脉冲展宽压缩和系统 Q 值提升方面,实验结果与仿真结果十分吻合。



(a) 均衡窗口宽度随传输距离的变化



(b) 各模式平均 Q 值随传输距离的变化

(a) The required equalizer window vs. transmission distance (b) Averaged Q -factor of each mode vs. transmission distance

图 5 不同轮循策略下 6 模传输的实验结果

Figure 5 Experimental results of 6-mode transmission based on different mode permutation strategies

3 结束语

本文在分析总结前人提出的 6 模 CMP 和 CMGP 策略的基础上,设计了结合群时延对称型少模光纤使用的 MFMP 策略,搭建了 6 模传输仿真和实验平台,对上述 3 种策略进行了性能评估和对比验证。在传输 616 km 处,本文所提 MFMP 策略与 CMP 和 CMGP 策略相比脉冲展宽压缩分别提升了 37% 和 6%,传输 Q 值分别提高了 3.0 和 0.4 dB,这与仿真结果相符,验证了 MFMP 在 6 模传输系统中的优势。与传统的轮循策略相比, MFMP 循环周期短,模式耦合频繁的特性在更长距离和更多模式数的模分复用传输中仍然能充分发挥作用。对于本文所提的演示系统,后续如能迭代使用本征群时延更低且排布更对称的少模光纤,基于 MFMP 策略的系统传输性能提升会更加显著。

参考文献:

- [1] Li G, Bai N, Zhao N, et al. Space-division Multiplexing: The Next Frontier in Optical Communication [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, 6(4): 413–487.
- [2] Winzer P J, Neilson D T, Chraplyvy A R. Fiber-optic Transmission and Networking: The Previous 20 and the Next 20 Years[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 24190–24239.
- [3] Sleiffer V A J M, Jung Y, Veljanovski V, et al. 73.7 Tb/s ($96 \times 3 \times 256 \text{ Gb/s}$) Mode-division-multiplexed DP-16QAM Transmission with Inline MM-EDFA[J]. *Op-*

tics Express, 2012, 20(26): B428–B438.

- [4] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, et al. Terabit-scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545–1548.
- [5] Rademacher G, Puttnam B J, Luís R S, et al. Petabit-per-second Optical Communications System Using a Standard Cladding Diameter 15-mode Fiber[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4238.
- [6] Rademacher G, Luís R S, Puttnam B J, et al. High Capacity Transmission with Few-mode Fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 425–432.
- [7] Shibahara K, Mizuno T, Lee D, et al. DMD-Unmanaged Long-haul SDM Transmission over 2 500 km 12 Core $\times$ 3 Mode MC-FMF and 6 300 km 3 Mode FMF Employing Intermodal Interference Canceling Technique [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(1): 138–147.
- [8] Shibahara K, Mizuno T, Ono H, et al. Long-haul DMD-Unmanaged 6-Mode-Multiplexed Transmission Employing Cyclic Mode-group Permutation[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, San Diego, USA: Optica Publishing Group, 2020: th3h.3.
- [9] Soma D, Beppu S, Wakayama Y, et al. 50.47-Tbit/s Standard Cladding Coupled 4-core Fiber Transmission over 9 150 km[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(22): 7099–7105.
- [10] van Uden R G H, Okonkwo C M, Chen H, et al. Time Domain Multiplexed Spatial Division Multiplexing Receiver[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 12668–12677.
- [11] 林少衡. 一种 64 GBaud 双通道差分线性跨阻放大器[J]. *光通信研究*, 2023(6): 57–63.
- Lin S H. A 64 GBaud Dual Channel Differential Linear Trans-impedance Amplifier[J]. *Study on Optical Communications*, 2023(6): 57–63.