

双模式 80 波分通道 1000 km 少模光纤传输

郑天启¹, 王晨¹, 王凯辉¹, 丁俊杰¹, 朱博文¹, 桑博涵¹, 周雯¹, 沈磊², 张磊², 王瑞春², 闫长鹏², 余建军^{1*}¹复旦大学通信与信息工程学院通信科学与工程系, 上海 200433;²长飞光纤光缆股份有限公司, 湖北 武汉 430073

摘要 为了解决急剧提升的通信系统容量需求与长距离传输等问题,通过实验验证了超大容量的少模光纤传输。在超大容量需求的背景下,同时使用波分复用、模分复用、偏振复用三种复用技术进行信号传输,凭借自研的低损耗六模渐变型光纤(各模式衰减约为 0.2 dB/km),实现了覆盖 C 波段共 80 个通道,每个通道双模双偏振信号的 1000 km 传输。考虑到超长距离传输带来的色散和双模双偏振带来的串扰,在进行接收端离线数字信号处理(DSP)时首先使用频域色散补偿算法进行色散补偿,并在下采样和时钟恢复后联合利用多输入多输出-频域最小均方算法(MIMO-FDLMS)和多输入多输出-时域最小均方算法(MIMO-TDLMS)进行信道均衡和色散补偿。在 28% 冗余的低密度奇偶校验(LDPC)信道编码软判决前向纠错(SD-FEC)阈值 5.2×10^{-2} 条件下,实现了总的线传输速率 40.96 Tbit/s,净速率高达 32 Tbit/s。

关键词 光通信; 波分复用; 模分复用; 偏振复用; 长距离传输; 超大容量传输

中图分类号 TN92 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL230564

1 引言

近年来,数据爆发式的增长对以光纤传输为核心技术的骨干传输网提出挑战,结合偏振复用、波分复用技术进行单模光纤传输已不能满足日益增长的通信速率需要^[1-4]。多模多芯等空分复用技术一度成为打破长距离光网络传输速率瓶颈的研究热点。在过去,少模光纤被更多地应用于短距离传输场景当中,但随着传输速率需求的剧增,更加成熟的多模复用及解复用技术、低色散低损耗的多模光纤以及更加先进的数字信号处理(DSP)算法的出现,利用少模光纤和少模多芯光纤实现更大容量与更长距离传输成为可能。

单模光纤传输长期以来一直因其低损耗、高带宽而成为大容量长距离传输的首选,直到现在单模光纤仍然占据绝大部分的光传输网络(OTN),然而单模光纤的速率极限被限制在 100 Tbit/s,其在面对传输速率需求几个数量级的增加预期时愈加乏力。与此同时,少模光纤(FMF)以及少模多芯光纤(MCFMF)传输被预测将替代单模光纤传输,成为新一代光传输网络的关键。这无疑将是光纤通信产业一次重大的机遇和挑战。

少模多芯光纤可以在单模传输速率极限的基础上增加 2~3 个数量级。目前实验室级的少模多芯传输研究早已突破单模光纤速率极限。2017 年, Rademacher 等^[5]使用三模式渐变型少模光纤实现了

20% 前向纠错(FEC)阈值下 3500 km 传输距离的 33 信道正交相移键控(QPSK)信号传输,谱效率距离积高达 31500 bit/(s·Hz·km)。2018 年, Shibahara 等^[6]利用循环模式排序技术实现了 6300 km 的三模式少模光纤传输以及 2500 km 的 12 芯三模多芯少模光纤传输。2019 年, Luis 等^[7]使用 160 μm 三模 4 芯光纤实现 1.2 Pbit/s 的 3.37 km 传输。2020 年, Rademacher^[8]在 C+L 波段上实现了 38 核三模光纤 6.2 Pbit/s 的 65 km 多芯少模传输。

然而在实际应用中,多芯光纤由于光纤尺寸的增加,面临一系列物理及传输特性问题,另外实际场景中长距离多芯光纤的可靠性也有待研究。少模光纤传输技术既可以作为少模多芯技术的一部分,紧密地与多芯技术结合,与多芯技术研究同步,又在速率上数倍于目前单模光纤的传输极限。多芯与少模技术将一同有力推动实现光通信网络的下一代更迭。

2018 年,陈健等^[9]使用光子灯笼和正交频分复用(OFDM)技术实现了单通道的两模 7.2 Gbit/s 传输。同年, van Weerdenburg 等^[10]结合波分复用(120 个通道)和模分复用(6 个模式)实现了 138 Tbit/s 的 590 km 传输。2019 年, Wakayama 等^[11]借助 6 模掺铒光纤放大器(EDFA)实现 266.1 Tbit/s 速率 90.4 km 的 6 模光纤传输,使用 10 模光纤在弱耦合条件下使用 4 个 4×4 多输入多输出(MIMO)和 2 个 2×2 MIMO 实现 10 模

收稿日期: 2023-02-17; 修回日期: 2023-03-19; 录用日期: 2023-04-06; 网络首发日期: 2023-04-15

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFB1800905)、国家自然科学基金(61935005, 61720106015, 61835002, 62127802)

通信作者: *jianjun@fudan.edu.cn

48 km 光纤传输, 传输速率达 402.7 Tbit/s^[12]。2020 年, Shibahara 等^[13]在 C 波段下实现了速率为 40.2 Tbit/s 的 3060 km 传输。2021 年, 邹冬冬 (Zou) 等^[14]利用低成本的直调直检技术结合波分复用和模分复用实现了 20 m OM2 光纤的 1.6 Tbit/s 三模传输。2021 年, Rademacher 等^[15]实现 1.01 Pbit/s 15 模光纤传输。2022 年, Rademacher 等^[16]使用低损耗的 55 模少模光纤、新型高质量模式复用器以及 110×110 MIMO 的 DSP 实现了 1.53 Pbit/s 的 25.9 km 光纤传输。

在少模长距离传输实验当中, 不能直接凭借传统相干或直接检测接收算法恢复出模式信号, 需要额外对模间串扰进行干预或补偿。各种不同侧重的实验研究使用改进光纤、环路补偿、收端 MIMO 均衡等方法对色散进行补偿。改进光纤的方法主要通过降低光纤损耗、使光信号工作在弱耦合模式减小空分维度串扰; 环路补偿的方法主要使用循环模式排序方法, 令每一路信号依次经过不同模式传输, 最终在多跨距离实现强耦合模式传输特性以大幅降低模间色散; MIMO 均衡方法一般同时利用训练数据、接收信号频域和时域维度信息对信道进行估计以及补偿。

除了空分模式及空分多芯复用技术以外, 偏振复用 (PDM) 和波分复用 (WDM) 技术业已成熟。国际电信联盟电信标准分局 (ITU-T) 对波分复用的一系列设

计问题也早已提出了规范化标准。在传输系统中同时构架多种复用技术, 并不断拓宽复用维度的边界^[17-19], 可以得到更高的谱效率并在长距离传输场景下进一步增加系统的传输容量^[20-22]。

综上所述, 拓宽复用维度、探索新的信号处理方法、研制更低损耗的少模及多芯少模光纤, 是大容量长距离光传输的极为重要的研究方向。本文使用先进的 DSP 技术作为信道均衡和色散补偿的方法^[23-24], 采用 IQ 调制/外差检测的方式, 使用 ITU-T 的标准 0.4 nm 波分复用通道, 凭借自研的低损耗六模渐变型少模光纤, 同时使用偏振复用和空分模式 (两模) 复用技术, 实现了密集波分复用 (DWDM) 80 个通道双模式双偏振 16 进制正交幅度调制 (16QAM) 的 1000 km 渐变型少模光纤传输, 净速率高达 32 Tb/s。据作者所知, 该实验结果在国内处于领先地位。

2 WDM-MDM-PDM-16QAM 传输系统

该少模传输实验使用的是可传输 6 个模式的渐变型少模光纤, 光纤各参数如表 1 所示, 光纤的径向折射率变化如图 1 所示。我们在实验中选择 LP11a 和 LP11b 两个模式进行传输。LP11 模与其他模相比有更低的损耗, 且此种少模传输相比于不同线偏振模式的少模传输可以更容易地进行功率和色散控制。

表 1 光纤参数
Table 1 Fiber parameters

Few-mode fiber parameter	Value
Loss / (dB·km ⁻¹)	LP01: 0.208; LP11: 0.202; LP21: 0.207
Differential group delay / (ps·m ⁻¹)	LP01-LP11: 0.4; LP11-LP21: 0.11
Single coil fiber length / km	50
Dispersion coefficient / (ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	LP01: 21.25; LP11: 21.01; LP21: 19.5; LP02: 20.29
Effective area / μm ²	LP01: 90; LP11: 121; LP21: 159; LP02: 161

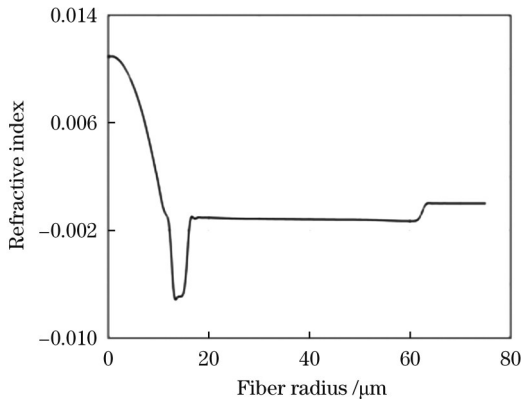


图 1 光纤剖面折射率分布
Fig. 1 Refractive index distribution of fiber section

长距离少模光纤环路实验的实验装置以及 DSP 流程如图 2 所示。在发送端, 80 路频率间隔为 50 GHz 的激光源输出 ITU 标准 C20~C59、H20~H59 信道下共 80 路载波 (1530~1562 nm), 通过阵列波导光栅

(AWG) 控制输出。在数字域, 首先生成伪随机二进制码并将其映射成 16QAM 符号, 然后对其进行两倍上采样并通过根升余弦滤波器完成基带成型。然后通过任意波形发生器输出两路不同的 IQ 信号, 在 IQ 调制器中, 两路信号分别对 79 个通道的 WDM 信号和另一路测试信号进行调制, 之后再分别通过偏振分束器 (PBS) 等分成偏振正交的两路并在保偏光纤中进行传输, 其中一路经过一段 1 m 的延时线延时 5 ns (160 个符号) 进行解相关并与另一路通过偏振合束器 (PBC) 合路复用。随后 1×2 耦合器耦合两路偏振波分复用信号, 通过 EDFA 放大后再一次通过 1×2 光耦合器等分成两路, 一路信号通过 3 m 的延时线延时 15 ns (480 个符号) 以解相关, 然后两路信号共同进入环路并在环路中经模式复用器复用。进入环路前, 每一路模式信号功率约为 23.5 dBm, 为了避免接收端接收信号时间重叠, 放置声光调制器 (AOM) 用以选通环路输入信号。

进入环路后,两路独立信号在模式复用器中以 LP11a 和 LP11b 进行模式复用调制并输出。环路中包括 50 km 长的少模光纤、模式复用及解复用器、EDFA、波长选择开关(WSS)以及 AOM。EDFA 平衡每个模式信号的光功率, WSS 则控制 EDFA 功率平衡后每一路模式信号各通道间的平坦度。FMF 链路在所有光纤模式中的色散约为 $21.01 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, 所用光纤在传输 LP11 模式时的有效面积为 $121 \mu\text{m}^2$ 。在经过 20 个 FMF 环路传输共 1000 km 后,使用波分解复用器选出测量信道信号,相干光接收机对信号进行探测,探测信号被采样率为 80 GSa/s 的示波器捕获并进

行 DSP 处理。为了减少示波器输入口的端口数量,采用外差相干探测,这样只需要使用一个 4 通道的示波器就能实现两个模式信号的相干探测,本振(LO)信号与探测的传输信号频率差约为 18 GHz。

在离线 DSP 中,对接收信号首先进行频域色散补偿,然后依次进行下采样(保留两倍符号速率)和时钟恢复,最后通过 MIMO 频域最小均方算法(MIMO-TDLMS)、MIMO 时域最小均方算法(MIMO-FDLMS)、载波相位恢复和直接判决最小均方算法(DDLMS),均衡解调完成后进行正交幅度调制(QAM)解映射和误码率(BER)计算。

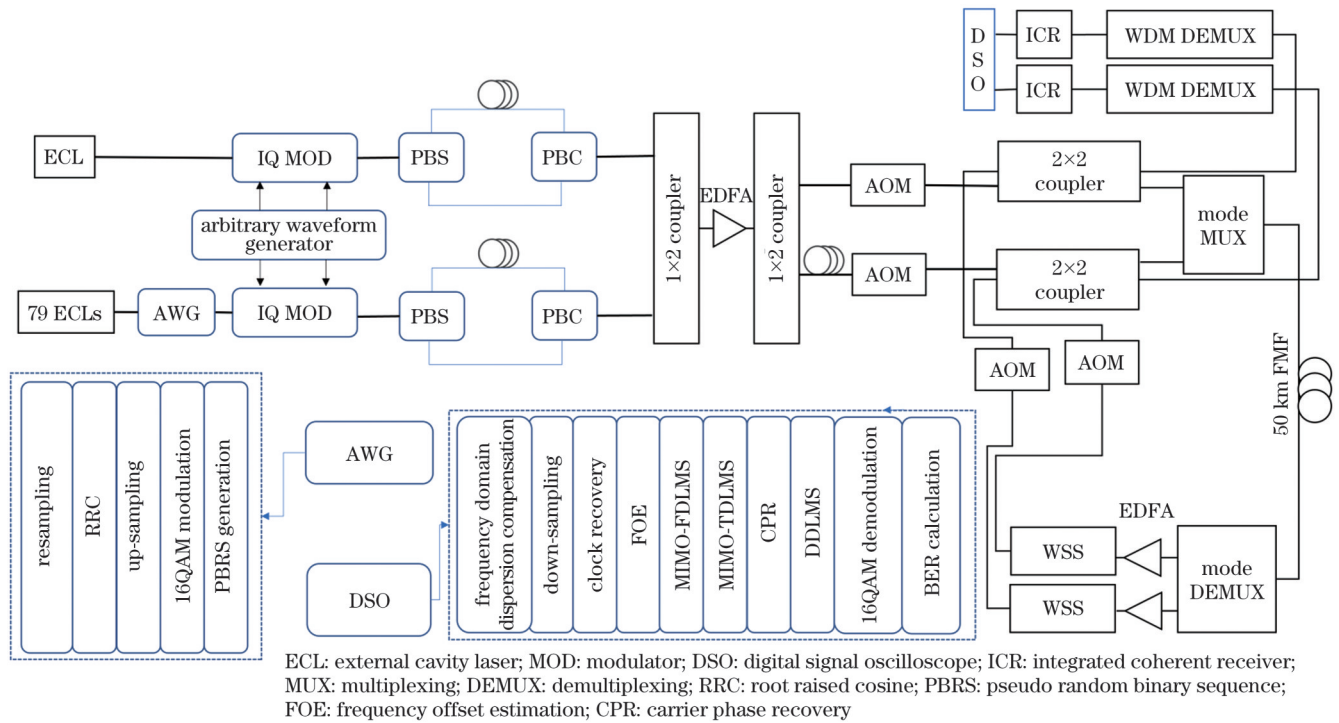


图 2 实验装置图及 DSP 流程

Fig. 2 Experimental setup diagram and DSP process

3 多模偏振解复用算法

少模传输相比于单模多核传输信号间串扰更大,加上信号两偏振态间的串扰,在经过多个器件以及 1000 km 传输后,需要在接收端对 2 个模式 \times 2 个偏振态共 4 路调制信号进行信道均衡以恢复出每一路独立信号。本实验在信道均衡中同时使用 MIMO-TDLMS 和 MIMO-FDLMS 算法以获得最佳的解串扰效果。本文将该联合算法命名为 MIMO-FTDLMS。另外,在信号经过色散补偿、下采样和时钟恢复之后,为了能有效同步,我们预先在信道均衡之前对恢复信号进行频偏估计并加以补偿。

在 MIMO-TDLMS 中,使用从 4 输入 \times 4 输出共 16 个权重向量组合成的权重矩阵对信号进行均衡,每一路的权重矩阵中,输入与输出对应路的权重向量中心位置置 1,权重矩阵输出的 4 个值与训练序列比较判决以最小均方(LMS)准则返回误差并更新权重矩阵,

误差收敛后改为直接判决的自适应均衡模式。算法结构及过程如图 3 所示。

MIMO-FDLMS 中,保留两倍上采样的信号分成奇偶两路分别进行傅里叶变换,变换后的频域信号通过权重矩阵后输出求和,此时权重矩阵作为频域抽头系数进行更新并对频域信号均衡。与时域均衡方法不同,频域方法输出与输入窗口长度等长,运行速度更快,但须恰当选择窗口滑动步长和窗口量级,以保证收敛并避免各路信号相互耦合,最快运行速度下,窗口滑动步长可以等同于窗口长度。此种情况下,MIMO 阶数越高,频域方法在计算复杂度上相比时域方法的优势就越明显。在通过权重矩阵后,再对输出序列进行快速傅里叶逆变换(IFFT)得到时域估计信号并进行判决和返回误差,得到的返回误差再次经快速傅里叶变换(FFT)变换回频域并更新权重矩阵。算法结构及过程如图 4 所示。

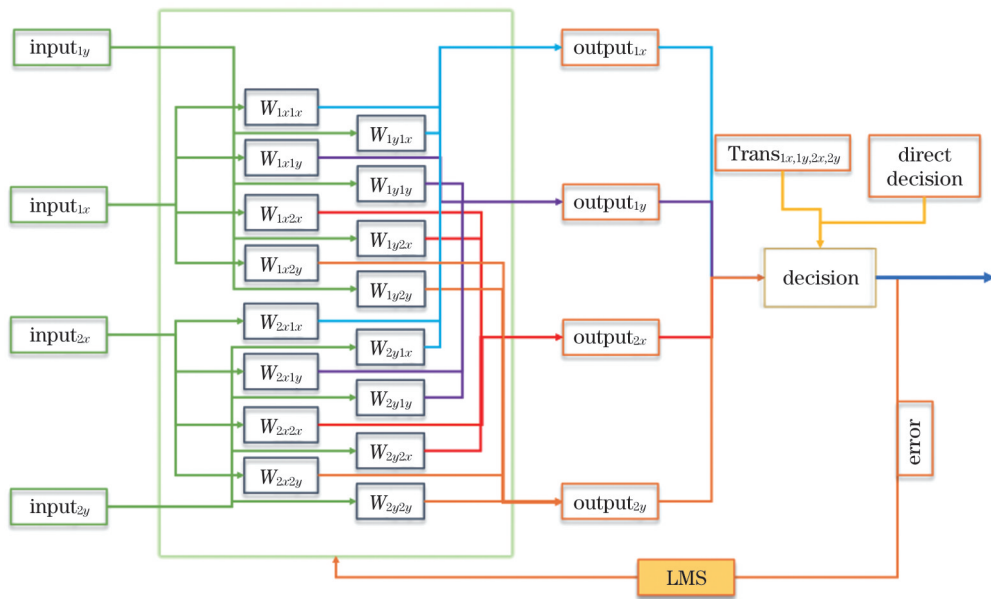


图 3 4×4 多输入多输出时域最小均方算法
Fig. 3 4×4 MIMO-TDLMS

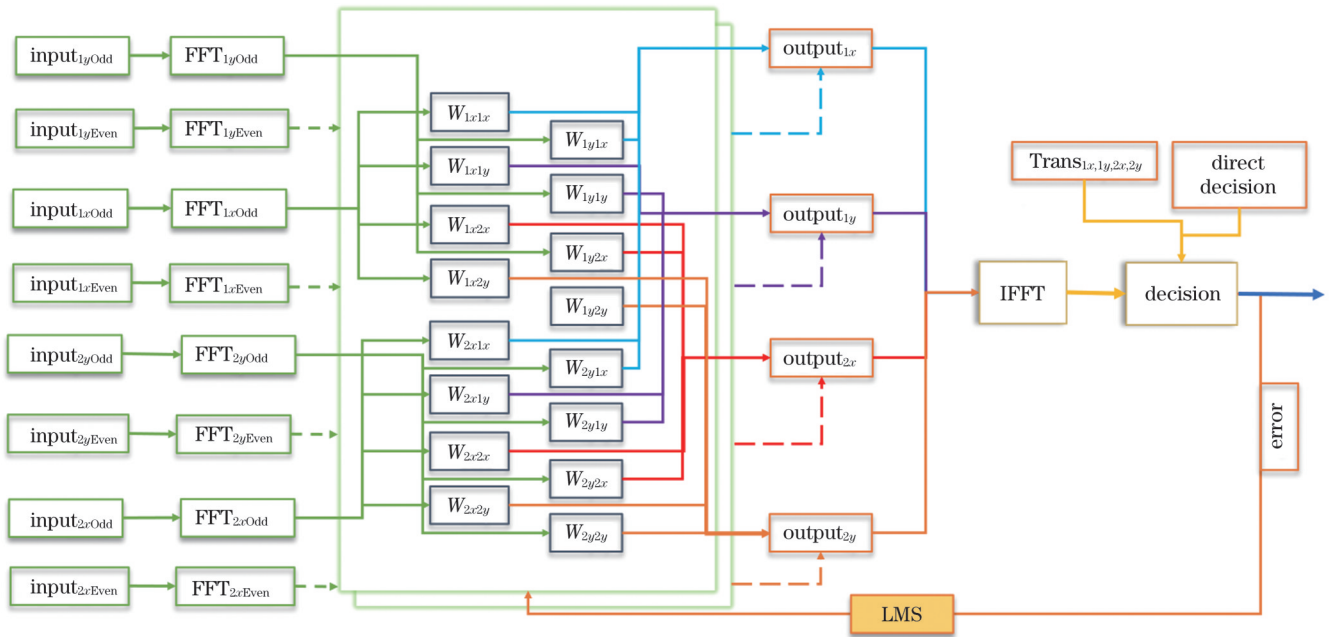


图 4 8×8 多输入多输出频域最小均方算法
Fig. 4 8×8 MIMO-FDLMS

4 实验结果和分析

图 5 为传输前的光谱图,各信道的光信噪比(OSNR)相对平坦,相邻信道 OSNR 之差不超过 1 dB,信道间 OSNR 之差不超过 2 dB。经过长距离传输后由于模式串扰,光谱不能稳定呈现。

我们将实验测试的两种模式(LP11a和LP11b)在不同 OSNR 下的传输性能与加性高斯白噪声(AWGN)信道仿真测试作对比,传输性能对比图如图 6 所示。在实验中各信道 OSNR(17~20 dB)所处的区间内,低信噪比情况下误码率接近理论信道结果,由

于高信噪比时模间偏振间串扰成为噪声主导,在不能完全解除串扰的情况下,可能会导致高信噪比时误码性能与理论值相差较远。

图 7 显示了两个模式下波分复用中 7 个信道(C31~C37)的 BTB(back-to-back)误码性能。由于 EDFA 后 WSS 能良好地控制信道平坦度,在不同 EDFA 输出光功率下,1000 km 传输后信号的误码率十分接近,且均处于 5.2×10^{-2} 的软判决前向纠错(SD-FEC)阈值以下。此外,由于 LP11a 和 LP11b 两种模式的有效折射率非常接近,各对比测试中两模式均表现出相近的性能。

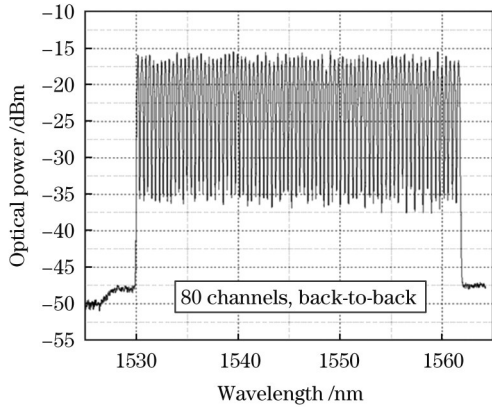


图 5 1000 km 传输前光谱图

Fig. 5 Spectral diagram before 1000 km transmission

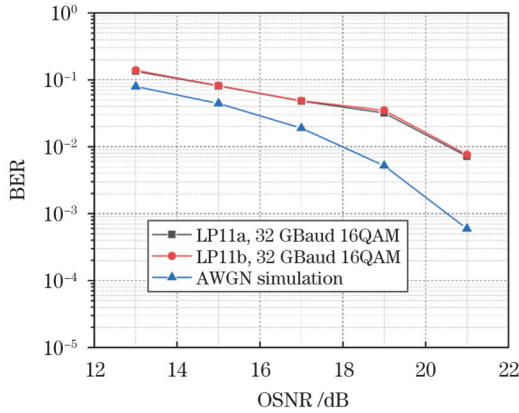


图 6 不同 OSNR 下传输性能

Fig. 6 Transmission performance under different OSNRs

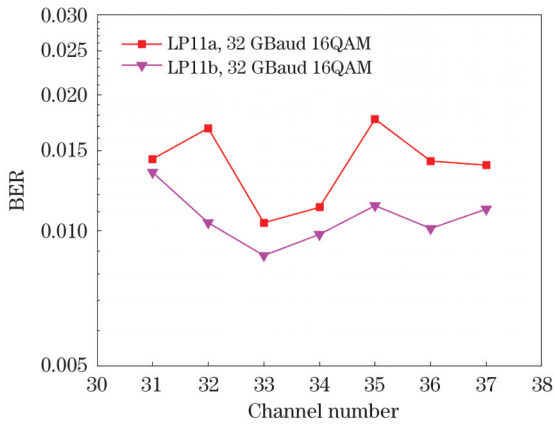


图 7 C31~C37 信道 BTB 性能

Fig. 7 BTB performance for channels C31-C37

我们分别测试了 C30 信道 (中心波长 1553.329 nm) BTB、250 km、500 km 以及 1000 km 距离下两种模式的误码表现,如图 8 所示。图 9 展示了 1000 km 传输后的接收信号在经过数字均衡后的星座图,可以看出,在加入联合算法 MIMO-FTDLMS 后,即使伴随着另外 3 路串扰造成的巨大信道间符号干扰以及不可避免的各信道扰动叠加引起的信道状态变化,也能有效地恢复出每一路信号,这极大地显示了该算法在多模传输中的有效性。同样地,两种模式在传输中均表现出相似

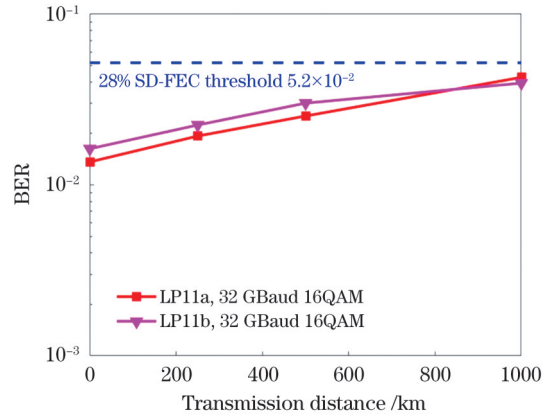


图 8 C30 信道不同传输距离下误码性能

Fig. 8 BER performance of C30 channel at different transmission distances

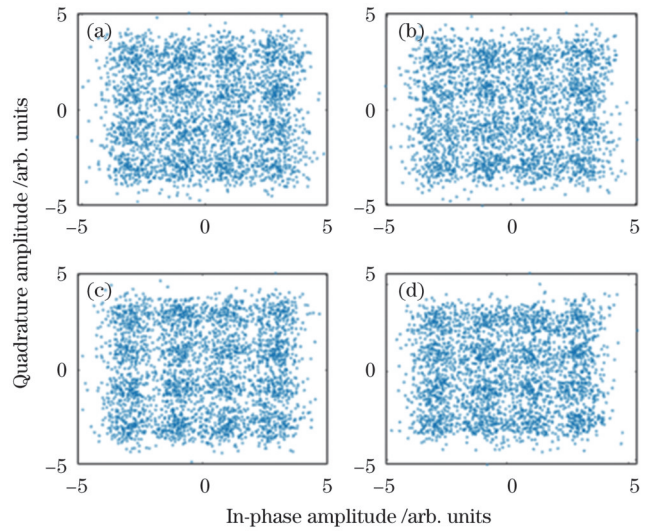


图 9 均衡后星座图。(a) X 偏振 LP11a; (b) X 偏振 LP11b; (c) Y 偏振 LP11a; (d) Y 偏振 LP11b

Fig. 9 Constellation diagram after equalization. (a) X polarization LP11a; (b) X polarization LP11b; (c) Y polarization LP11a; (d) Y polarization LP11b

的性能,且在所有传输距离下均小于 28% 冗余的低密度奇偶校验(LDPC)SD-FEC 阈值 (5.2×10^{-2})。实验中经过 1000 km 传输后,80 个信道两种模式两种偏振复用信号的误码率均处于软判决门限以下,由此得到总的净传输速率为 $32 \text{ Tbit/s} [32 \text{ GBaud} \times 4 \text{ bit/symbol} \times 2(\text{polarizations}) \times 2(\text{modes}) \times 80(\text{channel}) / (1 + 0.28)] = 32 \text{ Tbit/s}$ 。

使用乘加计算数(MACC)来统计均衡算法的复杂度,如表 2 所示。表 2 中 C 表示信道数, N 表示输入/

表 2 算法复杂度比较

Table 2 Algorithm complexity comparison

Algorithm	MACC
MIMO-TDLMS	$C^2 \times N^2$
MIMO-FDLMS	$2C(2N \times C + \log_2 N)$
MIMO-FTDLMS	$2C(2N_{\text{FD}} \times C + \log_2 N_{\text{FD}}) + C^2 \times N_{\text{FD}}^2$

输出端口数, N_{FD} 和 N_{TD} 分别表示联合算法中频域和时域的输入/输出端口数。

在当前场景下各算法以 MACC 为衡量标准的复杂度如图 10 所示。频域均衡方法一次最多可以均衡一半抽头数的数据, 复杂度远低于时域方法; 时域方法虽然所需抽头数更小, 但由于滑窗步长只能为 1, 在此场景下, 复杂度约为频域的 15 倍; 时频域方法复杂度为前述两者之和, 其时间复杂度为 $O(n^3)$, 其中 n 为时频域方法中时域的窗长度。在算法执行时间方面, 当算法收敛、工作于均衡模式下执行时间较短, 并不会产生明显延时, 当算法工作于训练模式时, 频域部分由于收敛时间较长, 需要 30 s 左右的时间才能进入均衡模式。由于信号在长达 1000 km 的少模光纤中传输累积的色散效应, 任何单独的时域或频域算法均无法在不耦合多路信号的情况下有效解出 16QAM 信号。降低复杂度, 一方面需要更低色散的光纤以及通过循环排序等方法降低色散, 另一方面还需要从级联结构上做出调整, 提升算法的并行效率以降低计算时间复杂度。

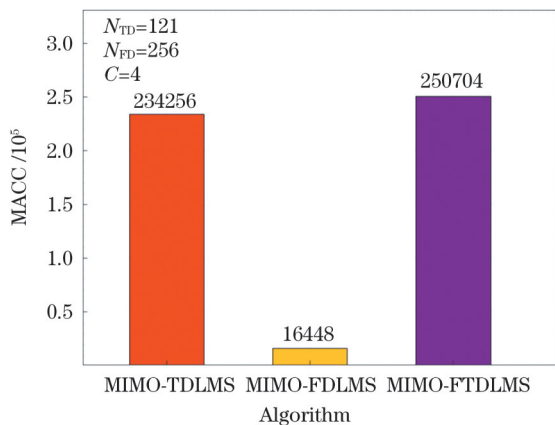


图 10 三种算法复杂度

Fig. 10 Complexity of three algorithms

该系统优异性能得益于两级级联的 MIMO 均衡算法以及自制的低损耗低色散少模光纤。该少模长距离传输系统为下一代光骨干网传输提供了新的方案, 以接收端的算法复杂度为代价, 将传统长距离传输使用的 QPSK 格式换为具有更高谱效率的 16QAM, 使用同等速率下成本更低的少模光纤进行空间多路传输, 最终大幅提升系统速率。本实验采用外差接收, 如采用零差接收, 则可额外获得约 3 dB 的增益。

在实际应用中, 无源的模式复用/解复用器使每一个中继器只需包含 EDFA 这一个有源器件。此外, 极化复用和波分复用技术业已成熟, 复用维度受纤内功率限制, 少模光纤的有效面积更大, 容许更大功率传输。目前商用的超大面积单模光纤 (ULAF) 有效面积为 30~60 μm^2 , 实验室级使用的有效面积可达 120 μm^2 , 这很接近本文使用的少模光纤规格 (约 161 μm^2), 但少模光纤实现的传输速率却数倍于单模

光纤传输速率, 在算法加持下, 少模光纤的传输距离也得到进一步提升。

目前系统的主要限制源于算法的复杂度, 级联时频域的 LMS 算法会给系统带来较大的延迟, 需要从反馈结构和并行度上对算法进行优化。

5 结 论

实验设计验证了 WDM-MDM-PDM-16QAM 系统 1000 km 少模光纤传输。通过 WSS 调整信道平坦度, 并在接收端使用 MIMO-TDLMS 和 MIMO-FDLMS 两级 MIMO 算法进行信道均衡, 最终实现了 80 个通道双模双偏振总计 32 Tbit/s 的传输速率。该传输系统在与多芯光纤结合后还有望实现 1~2 个数量级的传输速率提升。

参 考 文 献

- [1] 朱子岳, 赵梦鑫, 张一尘, 等. 高速 IM-DD 模复用通信系统中基于神经网络的 MIMO 均衡技术[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1406003.
Zhu Z Y, Zhao M X, Zhang Y C, et al. MIMO equalization technology based on neural network in high-speed IM-DD mode division multiplexing transmission system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1406003.
- [2] 雷晓, 任芳, 张艺赢, 等. 面向模复用的沟槽-纳米孔辅助双包层弱耦合少模光纤[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2306003.
Lei X, Ren F, Zhang Y Y, et al. Trench-nanopore assisted double-clad weakly coupled few-mode fiber for mode division multiplexing [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2306003.
- [3] 欧阳远江, 张倩武, 黄焯恬, 等. 基于 MIMO 预均衡的模分复用无源光网络模式间串扰的消除方法[J]. 中国激光, 2023, 50(6): 0606002.
Ouyang Y J, Zhang Q W, Huang Y T, et al. MIMO pre-equalization based mode crosstalk mitigation method in mode division multiplexing passive optical network[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(6): 0606002.
- [4] 唐胜龙, 武保剑, 严伟, 等. 光子灯笼模分复用系统 MIMO-free 高速传输实验[J]. 光子学报, 2023, 52(1): 0106001.
Tang S L, Wu B J, Yan W, et al. High speed MIMO-free transmission experiment of mode division multiplexing system with photonic lanterns[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(1): 0106001.
- [5] Rademacher G, Ryf R, Fontaine N K, et al. 3500-km mode-multiplexed transmission through a three-mode graded-index few-mode fiber link[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2018.
- [6] Shibahara K, Mizuno T, Doowhan L, et al. DMD-unmanaged long-haul SDM transmission over 2500-km 12-core \times 3-mode MC-FMF and 6300-km 3-mode FMF employing intermodal interference cancelling technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 37(1): 138-147.
- [7] Luis R S, Rademacher G, Puttnam B J, et al. 1.2 Pb/s throughput transmission using a 160 μm cladding, 4-core, 3-mode fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(8): 1798-1804.
- [8] Rademacher G, Puttnam B J, Luis R S, et al. Multi-span transmission over 65 km 38-core 3-mode fiber[C]//2020 European Conference on Optical Communications (ECOC), December 6-10, 2020, Brussels, Belgium. New York: IEEE Press, 2021.
- [9] 陈健, 黄青青, 张倩武, 等. 基于光子灯笼的正交频分/模分复用 IM-DD 多模光纤传输系统[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0606008.
Chen J, Huang Q Q, Zhang Q W, et al. Orthogonal frequency division/mode division multiplexing IM-DD multimode fiber

- transmission system based on photonic lanterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0606008.
- [10] van Weerdenburg J, Ryf R, Alvarado-Zacarias J C, et al. 138-Tb/s mode- and wavelength-multiplexed transmission over six-mode graded-index fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(6): 1369-1374.
- [11] Wakayama Y, Soma D, Beppu S, et al. 266.1-Tbit/s transmission over 90.4-km 6-mode fiber with inline dual C+L-band 6-mode EDFA[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 404-410.
- [12] Soma D, Beppu S, Sumita S, et al. 402.7-Tb/s weakly-coupled 10-mode-multiplexed transmission using rate-adaptive PS PDM-16QAM WDM signals[C]//45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019), September 22-26, 2019, Dublin, Ireland. London: IET, 2020.
- [13] Shibahara K, Mizuno T, Kawakami H, et al. Full C-band 3060-km DMD-unmanaged 3-mode transmission with 40.2-Tb/s capacity using cyclic mode permutation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 514-521.
- [14] Zou D D, Li F, Wang W, et al. Beyond 1.6 Tb/s net rate PAM signal transmission for rack-rack optical interconnects with mode and wavelength division multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(2): 340-346.
- [15] Rademacher G, Puttnam B J, Luis R S, et al. Ultra-wide band transmission in few-mode fibers[C]//2021 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 13-16, 2021, Bordeaux, France. New York: IEEE Press, 2021.
- [16] Rademacher G, Luis R S, Puttnam B J, et al. 1.53 peta-bit/s C-band transmission in a 55-mode fiber[C] //2022 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 18-22, 2022, Basel, Switzerland. New York: IEEE Press, 2022.
- [17] 张超, 王元赫. 论涡旋电磁波轨道角动量传输新维度[J]. *通信学报*, 2022, 43(6): 211-222.
Zhang C, Wang Y H. New dimension in vortex electro-magnetic wave transmission with orbital angular momentum[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(6): 211-222.
- [18] 马子洋, 吴琼琼, 李启华, 等. 超密集波分复用无源光网络的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0500006.
Ma Z Y, Wu Q Q, Li Q H, et al. Ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500006.
- [19] 刘丰年, 翁艳彬, 刘志, 等. 基于模分与波分混合复用的直接检测光纤传输系统研究[J]. *光通信技术*, 2022, 46(5): 64-69.
Liu F N, Weng Y B, Liu Z, et al. Research on direct detection fiber transmission system based on hybrid multiplexing of mode division and wavelength division[J]. *Optical Communication Technology*, 2022, 46(5): 64-69.
- [20] Kong M, Shi J T, Sang B H, et al. 800-Gb/s/carrier WDM coherent transmission over 2000 km based on truncated PS-64QAM utilizing MIMO Volterra equalizer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(9): 2830-2839.
- [21] 余建军, 迟楠, 陈林. 基于数字信号处理的相干光通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
Yu J J, Chi N, Chen L. Coherent optical communication technology based on digital signal processing[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2013.
- [22] Kong M, Li X Y, Zhang J, et al. High spectral efficiency 400 Gb/s transmission by different modulation formats and advanced DSP [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(20): 5317-5325.
- [23] 余建军, 迟楠. 基于数字信号处理的光纤通信技术(第一卷): 单载波信号传输[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
Yu J J, Chi N. Optical fiber communication technology based on digital signal processing (Volume 1): single carrier signal transmission[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.
- [24] 余建军, 迟楠. 基于数字信号处理的光纤通信技术(第二卷): 多载波调制和人工智能新技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
Yu J J, Chi N. Optical fiber communication technology based on digital signal processing (Volume 2): new technology of multi-carrier modulation and artificial intelligence[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.

1000 km Dual-Mode Transmission with 80 WDM Channels Through Few-Mode Optical Fiber

Zheng Tianqi¹, Wang Chen¹, Wang Kaihui¹, Ding Junjie¹, Zhu Bowen¹, Sang Bohan¹, Zhou Wen¹, Shen Lei², Zhang Lei², Wang Ruichun², Yan Changkun², Yu Jianjun^{1*}

¹Department of Communication Science and Engineering, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;

²Yangtze Optical Fibre and Cable Joint Stock Limited Company, Wuhan 430073, Hubei, China

Abstract

Objective In recent years, the explosive growth of data volume has challenged the backbone transmission network whose core technology is optical fiber transmission. In the past, single-mode fiber transmission has long been the first choice for large-capacity and long-distance transmission due to its low loss and high bandwidth. Till now, single-mode fiber still occupies most of the optical transmission networks. However, the rate of single-mode fiber transmission which combines polarization division multiplexing (PDM) and wavelength division multiplexing (WDM) technologies is limited to 100 Tbit/s. It becomes weaker and weaker in the face of the expected increase of several orders of magnitude in the demand for transmission rate. With the emergence of more mature mode division multiplexing (MDM) and demultiplexing technologies, low-dispersion, low-loss few-mode fibers (FMFs), and more advanced digital signal processing (DSP) algorithms, it becomes possible to use few-mode fibers to achieve greater capacity and longer distance transmission.

Methods Our few-mode transmission experiment uses a self-developed graded few-mode fiber that can transmit six modes. In the experiment, we choose two modes of LP11a and LP11b for transmission. Compared with other modes, the LP11 mode has a lower loss, and this kind of few-mode transmission can perform power control and dispersion control more easily than the few-mode

transmission of different linear polarization modes. The transmission distance of each loop is 50 km, and 1000 km transmission is achieved by transmitting 20 loops. In terms of the experimental setup of the long-distance few-mode fiber loop experiment, at the transmitting end, 80 laser sources with a frequency interval of 50 GHz output a total of 80 carriers through the arrayed waveguide grating control. The two IQ signals output by the arbitrary waveform generator modulate the WDM signal of 79 channels and another test signal in the IQ modulator respectively, and then a section of decorrelation signal is generated through the delay line and is used to perform polarization division multiplexing. After being amplified by the erbium-doped fiber amplifier (EDFA), it is divided into two independent signals through delay and de-correlation again, and then multiplexed and transmitted by the mode multiplexer in the loop.

After entering the loop, the two independent signals are mode multiplexed and modulated in two modes of LP11a and LP11b in the mode multiplexer and output. The ring includes 50 km of few-mode fiber, mode multiplexer/demultiplexer, EDFA, wavelength selective switch (WSS), and acoustic-optic modulator (AOM). EDFA balances the optical power of each mode signal, and WSS controls the flatness between channels of each mode signal after the EDFA power balancing. The dispersion of the FMF link in all fiber modes is about 21.01 ps/(nm·km), and the effective area of the used fiber is 121 μm^2 when transmitting the LP11 mode. After 20 FMF loop transmissions for a total of 1000 km, the measurement channel signal is selected using a wavelength division multiplexer, and the coherent optical receiver detects the signal. The detected signal is captured by an oscilloscope with a sampling rate of 80 GSa/s and processed by DSP. In order to reduce the number of oscilloscope input ports, we use heterodyne coherent detection, so we only need to use a 4-channel oscilloscope to achieve coherent detection of two-mode signals. The frequency difference between the local oscillator signal and the detected transmission signal is about 18 GHz.

In offline DSP, the signal passes through frequency domain dispersion compensation, down-sampling (retaining twice the symbol rate), clock recovery, multiple-input multiple-output (MIMO) frequency domain least mean square (FDLMS), MIMO time domain least mean square (FTLMS), carrier phase recovery, and direct decision least mean square (DDLMS) in sequence and quadrature amplitude modulation (QAM) demapping and bit error rate (BER) calculation.

Results and Discussions We experimentally tested the transmission performance of the two modes (LP11a and LP11b) under different optical signal-to-noise ratios (OSNRs) and compared them with additive white Gaussian noise (AWGN) channel simulation tests. In the interval of the OSNR of each channel in the experiment, the BER is close to the theoretical channel result under the condition of low signal-to-noise ratio (SNR). Since the crosstalk between modes and polarizations is dominant in the noise when the SNR is relatively high and cannot be completely eliminated, it may lead to a large difference between the BER performance and the theoretical value when the SNR is high.

We tested the C30 channel BER performance of the two modes under back-to-back (BTB) case and transmission distances of 250 km, 500 km and 1000 km, respectively. After adding the frequency- and time-domain joint algorithm called MIMO-FTDLMS, even with the huge inter-channel symbol interference caused by the other three-way crosstalk and the channel state changes caused by the inevitable disturbance superposition of each channel, every channel can be effectively recovered. This greatly shows the effectiveness of the algorithm in multimode transmission. Likewise, both modes exhibit similar performance in transmission, and the BER is less than the low-density parity check (LDPC) soft decision threshold of 28% redundancy at all transmission distances. In the experiment, the BERs of 80 channels, two modes and two polarization multiplexing signals transmitted over 1000 km are all below the soft decision threshold, thus the total net transmission rate is 32 Tbit/s.

The excellent performance of the system benefits from the two-stage cascaded MIMO equalization algorithm and self-made low-loss, low-dispersion few-mode fiber. This few-mode long-distance transmission system provides a new solution for the next generation optical backbone network transmission. At the cost of algorithm complexity at the receiving end, the quaternary phase shift keying (QPSK) format used in traditional long-distance transmission is replaced by 16QAM with higher spectral efficiency. In addition, less costly few-mode fibers are used at the same rate for spatial multiplexing.

The main limitation of the current system is the complexity of the algorithm. The least mean square (LMS) algorithm in the cascaded time-frequency domain will bring a large delay to the system, and the algorithm needs to be optimized in terms of feedback structure and parallelism.

Conclusions Our experimental design verified the transmission of the WDM-MDM-PDM-16QAM system over a 1000 km few-mode fiber. By adjusting channel flatness through WSS, and using MIMO-TDLMS and MIMO-FDLMS two-stage MIMO algorithms for channel equalization at the receiving end, we finally achieve a transmission rate of 32 Tbit/s with 80 channels of two-mode and dual-polarization signals. After the transmission system is combined with multi-core optical fiber, it is expected to achieve a transmission rate increase of 1–2 orders of magnitude.

Key words optical communications; wavelength division multiplexing; mode division multiplexing; polarization division multiplexing; long haul transmission; ultra-high-capacity transmission