

基于传统OM2光纤的大容量模分复用传输系统研究

于新阔^{1,2}, 李建平^{1,2*}, 秦玉文^{1,2}, 杨海林^{1,2}, 彭迪^{1,2}, 向梦^{1,2}, 许鸥^{1,2}, 付松年^{1,2}

(1. 广东工业大学信息工程学院先进光子技术研究院, 广东广州 510006;

2. 通感融合光子技术教育部重点实验室, 广东广州 510006)

摘要: 基于传统多模光纤的模式资源, 来构建多维复用超大容量光纤传输系统可以有效提升通信系统传输容量, 满足急剧增长的数据业务需求. 在本文中, 我们联合波分复用、偏振复用和模分复用技术, 基于传统OM2光纤实现了40个波长信道(1 535.04~1 566.31 nm)×2个模式信道(LP01和LP11b)的60 G波特偏分复用16阶正交幅度调制(Polarization Division Multiplexing 16-ary Quadrature Amplitude Modulation, PDM-16QAM)信号的短距模分复用相干光传输. 整个模分复用链路由一对基于多平面光转换(Multi Plane Light Conversion, MPLC)的模式复用/解复用器和20 m OM2光纤构成. 由于高模式隔离度的模式信道特性(< -20 dB), 本系统无需相应数字信号处理算法进行模式解复用, 而仅需2×2的多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)算法完成偏振解复用. 在实验中, 除了对系统关键参数, 包括脉冲成型滤波器的滚降因子、削峰比及接收光功率进行了优化外, 还引入了Volterra判决反馈均衡方案. 该均衡方案不仅能够补偿调制器引入的非线性信号损伤, 而且能够缓解前馈均衡方案导致的高频噪声增强问题. 最终, 实验结果显示所有80个信道的误码率皆低于20%软判决前向误码纠错(Soft Decision Forward Error Correction, SD-FEC)阈值 2.7×10^{-2} , 系统总容量达38.4 Tbit/s, 表明基于多模光纤的模式复用相干光传输方案在未来超大容量短距光互联系统中具有应用潜力.

关键词: 光纤通信; 模分复用; 波分复用; 相干检测; 非线性均衡

基金项目: 国家重点研发计划(No.2018YFB1800901); 国家自然科学基金(No.62022029)

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)07-2461-07

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230079

Research on Large-Capacity Mode Division Multiplexing Transmission System Based on Conventional OM2 Multimode Fiber

YU Xin-kuo^{1,2}, LI Jian-ping^{1,2*}, QIN Yu-wen^{1,2}, YANG Hai-lin^{1,2}, PENG Di^{1,2}, XIANG Meng^{1,2},

XU Ou^{1,2}, FU Song-nian^{1,2}

(1. Institute of Advanced Photonics Technology, School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

2. Key Laboratory of Photonic Technology for Integrated Sensing and Communication, Ministry of Education, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: Based on the multiple spatial mode channels of conventional multimode optical fiber, the optical fiber transmission system capacity can be effectively improved by adopting multi-dimensional multiplexing technology and then meet the rapidly growing demand for data services. In this paper, we demonstrate the conventional OM2 fiber based large-capacity optical transmission with a combination of wavelength division multiplexing (WDM), polarization division multiplexing (PDM) and mode division multiplexing (MDM) technologies. Each of the total 80 channels with 40 wavelengths (1 535.04~1 566.31 nm) and 2 mode (LP01 and LP11b) channels is modulated by 60 Gbaud PDM16-ary quadrature amplitude modulation (PDM-16QAM) signal. The MDM link consists of a pair of mode multiplexer/de-multiplexer based on multi-plane light conversion (MPLC) and 20 m OM2 fiber. Thanks to the high mode isolation degree of two used mode channels (< -20 dB), only 2×2 multiple input multiple output (MIMO) algorithm is applied for polarization de-multiplexing, and no need to do mode de-multiplexing. In this work, to improve the system capacity, the key system parameters have

been optimized, including the roll-off factor of pulse shaping filter, clipping ratio and the received optical power (ROP). And the Volterra decision feedback equalization (VD FE) is also adopted not only to compensate for the nonlinear impairments introduced by the optical modulator, but also alleviate the high frequency noise enhancement caused by feed forward equalization (FFE). Then, a total capacity up to 38.4 Tbit/s has been realized with the bit error rate (BER) of all 80 channels lowering than the 20% soft decision forward error correction (SD-FEC) threshold of 2.7×10^{-2} . The experimental results reveal that the MDM coherent optical transmission scheme based on multi-mode fiber has the potential in the future ultra-large capacity short-distance optical interconnection system.

Key words: optical fiber communications; mode division multiplexing; wavelength division multiplexing; coherent detection; nonlinear equalization

Foundation Item(s): National Key Research Development Program of China (No.2018YFB1800901); National Natural Science Foundation of China (No.62022029)

1 引言

随着物联网、云计算、增强现实等宽带业务的兴起,全球数据流量呈现爆炸式增长,这给作为全球通信基础设施基石的光传输系统和网络带来了前所未有的挑战^[1,2].近年来,随着各种先进技术的发展,包括高阶调制、波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)、偏振复用(Polarization Division Multiplexing, PDM)和掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)等,使得大容量传输系统中单模光纤容量快速接近香农理论极限^[3,4].为了打破基于单模光纤传输容量瓶颈,基于多芯光纤(Multi-Core Fiber, MCF)、多模光纤(Multi-Mode Fiber, MMF)抑或两者结合的空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)技术引起了研究者的广泛关注^[5-8].目前,覆盖范围包括几十米到几十公里的短距光传输系统,承载了全球99%以上的互联网协议(Internet Protocol, IP)流量^[9,10].其中,传统多模光纤作为主要传输光纤已被安装了数百万公里.然而,受到模式色散(Mode Dispersion, MD)限制,现有多模光纤传输系统容量难以满足指数级增长的流量需求,亟需研发新型通信技术来增加传输速率和系统容量.不过,多模光纤中不同本征模式可以作为独立的传输信道,其理论信息传输容量比单模光纤大得多,进而可以支持未来的容量需求.因此,研究基于传统多模光纤的高速大容量光传输系统具有重要意义.

目前,基于传统多模光纤的短距光传输系统容量升级方案可以分成两类:(1)多模光纤单模传输,即将传统多模光纤视为单模光纤,仅使用多模光纤中的基模,即LP₀₁模式作为传输信道;(2)多模光纤多模传输,即利用多模光纤传输多个模群或者模式来增加系统容量.图1列出了公开报道的典型多模光纤通信系统传输速率情况^[11-19].其中,在多模光纤单模传输系统中,为了克服模式色散的影响,一般采用“中心发射(Center Launch, CL)”的方式,即将标准单模光纤与传统多模光纤对准熔接,主要激发MMF的基模来进行传输,在输出端

滤除其他高阶模式(Higher-Order Modes, HOM)^[11,20-22].例如,2022年,意大利都灵理工大学Rizzelli等人^[11]演示了使用商用相干发射机在传统OM3光纤基模信道上实现了单波传输速率高达200 Gbit/s.除此之外,一些特殊模式转换器也被研发用于此类传输系统研究之中.例如,2017年,北京大学陈章渊教授团队设计并制作了用于激发传统多模光纤基模的全光纤模式选择耦合器(Mode Selection Coupler, MSC),并在此基础上实验演示了10 Gbit/s 开关键控(On Off Key, OOK)信号20 km OM3的无误码传输^[12].2022年,波兰创新光子技术公司Szostkiewicz等人^[13]展示了基于高选择性模式复用解复用器,Infinera ICE6 800G相干收发机结合波分复用和概率整形(Probabilistic Shaping, PS)正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)技术,实现了数据容量1.6 Tbit/s的3.5 km OM4光纤传输.对于第二类多模光纤多模传输系统来说,主要是利用多模光纤的多个正交模式抑或多个模群作为独立传输通道进行数据传输.例如,2015年法国CAILabs公司Labroille等人^[15]演示了使用基于多平面光转换(Multi Plane Light Conversion, MPLC)原理的模式复用解复用器、OOK调制和直接检测技术,在1 km传统OM2光纤上实现了 3×10 Gbit/s的数据传输,提升了OM2光纤的传输容量.2018年该团队结合波分复用、离散多音(Discrete Multi Tone, DMT)调制和模组波长交错技术,实现了双向总传输容量达14.5 Tbit/s^[16].2020年,本课题组采用离散傅里叶变换扩展离散多音调制(Discrete Fourier Transform Spread Discrete Multi-Tone, DFT-S-DMT)联合波分复用技术实现了太比特模分复用传输,验证了在传统多模光纤上实现模分复用无多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)处理的可行性^[17].同年,中山大学李朝晖教授团队利用脉冲幅度调制(Pulse Amplitude Modulation, PAM)及Volterra非线性均衡在20 m OM2光纤上成功实现了传输容量为1.6 Tbit/s的波分复用-模分复用光传输系统^[18].近年来,随着数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)以及光子集成技

术的发展,相干检测方案的功耗迅速降低.同时,相干检测方案因为高接收灵敏度以及频谱效率使其在短距光传输应用中变得越来越有吸引力^[10].例如,2014年,美国贝尔实验室 Ryf 等人^[19]在 305 km OM3 多模光纤上,使用基于模式选择光子灯笼结合相干检测技术展示了 18 Tbit/s 的传输容量和 9 bit/s/Hz 的频谱效率.该方案在接收端使用 6×6 MIMO 数字信号处理以执行模式解复用.然而,这种全 MIMO 技术实现算法规模过于庞大,导致系统功耗和成本较高,不太适合短距光传输系统.

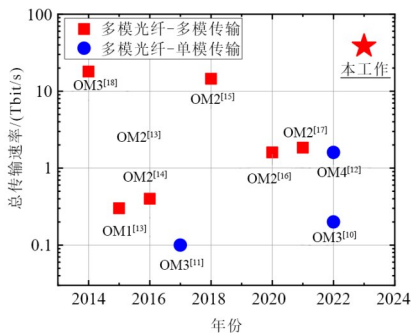


图 1 公开报道的典型多模光纤通信系统传输速率情况

本文实验演示了一种基于传统 OM2 光纤的高速大容量短距光传输系统,通过使用 80 个信道(40 个波分复用信道×2 个模式信道)结合 PDM-16QAM 信号实现了单信道速率 480 Gbit/s、总容量 38.4 Tbit/s 的数据传输.因模式信道隔离度高,本方案在接收端只需 2×2 MIMO 用于偏振解复用,而无需 MIMO 算法进行模式解复用,进而大大降低了计算复杂度.据我们所知,在基于传统多模光纤的传输系统研究报道中,本实验所演示的传输容量是目前最高的.

2 实验装置

图 2 为基于传统 OM2 光纤的高速大容量模分复用传输实验框图.在发射端,长度为 $2^{17}-1$ 的伪随机序列 (Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS) 被产生并映射成 16QAM 信号;接着进入根升余弦 (Root-Raised Cosine, RRC) 滤波器完成脉冲成型,然后进行重采样以匹配任意波形发生器 (Arbitrary Waveform Generators, AWG) 的采样率;最后,执行削峰操作以降低信号的峰均功率比 (the Peak to Average Power Ratio, PAPR) 并加载到任意波形发生器 (Arbitrary Waveform Generator, AWG) 中执行数模转换 (Digital-to-Analogue Conversion, DAC). 两个 3 dB 带宽为 40 GHz 的偏振复用相干驱动调制器 (Coherent Driven Modulator, CDM) 用于将 AWG 输出模拟电信号调制到光载波上. CDM 由一个偏振分束器 (Polarization Beam Splitter, PBS)、两个同相/正交调制器 (In-phase/Quadrature Modulator, IQM) 和一个偏振合束器 (Polarization Beam Combiner, PBC) 构成. 其中, IQM 由两个马赫曾德调制器 (Mach-Zehnder Modulator, MZM) 和一个 90° 相位调制器 (Phase Modulator, PM) 构成, MZM 偏置电压偏置在 Null 点处. 40 个线宽小于 100 kHz 的可调谐外腔激光器 (External Cavity Laser, ECL) 联合两个 20×1 的阵列波导光栅 (Arrayed Waveguide Grating, AWG) 用于实现波分复用 (MUX). 每个 CDM 调制的光载波皆由 20 个连续波长信道构成,信道间隔为 100 GHz,工作波长符合 ITU-T 标准. 波长范围从 1 535.04~1 566.31 nm 覆盖扩展 C+波段. 两个 CDM 调制输出的光信号经过掺铒光纤放大器放大之后通过一个 1×2 的光耦合器产生 40 通道 60 G 波特 PDM-16QAM 波分复用信号.

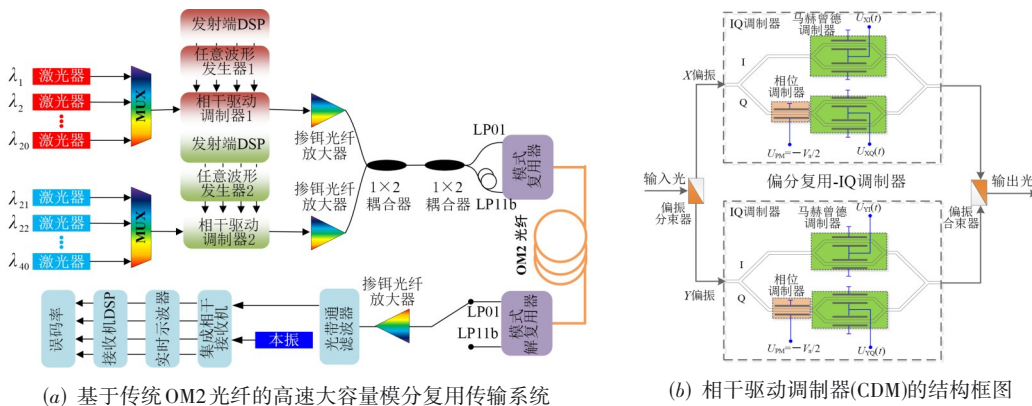


图 2 实验装置

值得注意的是,两个 CDM 的偏压控制电路以及散热装置不同.尤其 CDM2 调制器对环境温度变化较敏感,导致偏压点随时间发生波动.图 3 为 40 个通道 60 GBaud PDM-16QAM 波分复用信号光谱图.从图中

可以看出,40 个信道的功率有轻微波动,导致功率平坦度不高.这一方面是因为 EDFA 的不平坦增益谱;另一方面则是实验中使用的波分复用器不是偏振保持的,而 CDM 是偏振敏感的,导致一些偏振相关的功率代

价. 本工作使用基于多平面光转换原理的模式复用/解复用器(CAILabs),具有小于-20 dB的模式隔离度使得接收端无需进行MIMO处理即可实现模式解复用. 模式复用信号经过20 m传统OM2光纤传输后通过模式解复用器(Mode DeMUX)进行模式解复用,不同波长信道和模式信道的信号依次进行探测. 在接收端,波分复用信号首先通过掺铒光纤放大器进行光放大以补偿链路损伤以及光带通滤波器引入的插损. 这里,光带通滤波器(Optical Band Pass Filter, OBPF)用作波分解复用器并滤除带外噪声. 接着,一个3 dB带宽40 GHz的集成相干接收机(Integrated Coherent Receiver, ICR)联合一个可调谐外腔激光器作为本振(Local Oscillator, LO)激光器来完成光电转换. 然后,四通道36 GHz带宽、80 GSa/s实时示波器(Real-Time Oscilloscope, RTO)被用来执行模数转换(Analog-Digital Conversion, ADC).

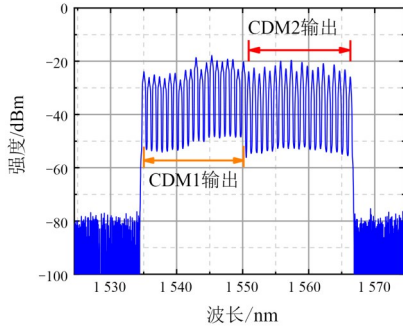


图3 40个通道60 GBaud PDM-16QAM波分复用信号光谱图

接收端数字信号处理流程如图4所示. 接收到的数字信号首先经过2倍上采样和Gram-Schmidt正交化,以补偿由于射频线缆不理想匹配或相位调制器偏置点漂移导致的正交失衡问题. 接着,对匹配滤波后的信号进行频偏(Frequency Offset, FO)估计和补偿. 然后,一个基于最小均方算法(Least-Mean Square, LMS)的2×2蝶形滤波器用于偏振解复用. 在偏振解复用模块内部,数字锁相环(Phase Lock Loop, PLL)补偿由于激光器线宽引入的相位噪声. 值得注意的是,为了便于蝶形滤波器和锁相环的预收敛,在传输开始时需要使用训练符号. 由于一组PDM-16QAM信号(20个波长)受到CDM2的非线性调制响应,我们使用基于递归最小二乘(Recursive Least Square, RLS)算法的Volterra非线性均衡器(Volterra Nonlinear Equalizer, VNE)进行非线性效应缓解^[23,24]. 通常情况下,VNE的一阶项用于缓解线性损伤,二阶项可以补偿光电器件的非线性损伤,而三阶项可以缓解光纤非线性引起的传输损伤. 由于本实验中,多模光纤链路非线性效应微不足道,二阶VNE即可满足要求. 最后,符号逆映射(demapping)后得到不同信道的误码率(Bit Error Rate, BER)性能. 本文中,我们采

用二阶Volterra判决反馈均衡器(Volterra Decision Feedback Equalizer, VDFE),其表达式为

$$y(n) = \sum_{l_1=-L_1}^{L_1} h(l_1)x(n+l_1) + \sum_{l_1=-L_2}^{L_2} \sum_{l_2=l_1}^{L_2} h(l_1, l_2)x(n+l_1)x(n+l_2) + \sum_{k_1=-K_1}^0 \omega(k_1)\tilde{y}(n+k_1) + \sum_{k_1=-K_2}^0 \sum_{k_2=k_1}^0 \omega(k_1, k_2)\tilde{y}(n+k_1)\tilde{y}(n+k_2) \quad (1)$$

其中, $x(n)$ 、 $\tilde{y}(n)$ 和 $y(n)$ 分别表示接收样值、训练样值和输出样值(注意,这里样值采样率等于波特率); $h(l_1)$ 和 $h(l_1, l_2)$ 分别表示前向1阶和2阶核; $\omega(k_1)$ 和 $\omega(k_1, k_2)$ 分别表示后向1阶和2阶核; L_1 、 L_2 、 K_1 和 K_2 分别对应相应核的记忆长度,本文中分别设置为100、5、100和5.



图4 基于传统OM2光纤的大容量模分复用传输系统接收端DSP流程

3 结果和讨论

首先,对影响系统性能的关键参数进行了优化研究,包括脉冲成型滤波器的滚降因子(Roll-Off Factor, ROF)、削峰比(Clippling Ratio, CR)以及接收光功率(Received Optical Power, ROP)等.

滚降因子较大将导致信道间干扰以及引入更多的放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)噪声;然而其若过小将增加信号的PAPR从而增大量化噪声,并且将对系统配置提出更高要求,导致成本增加. 图5给出了系统性能随脉冲成型滤波器的滚降因子的变化趋势. 从图中可以看出,当滚降因子ROF=0.1时,系统可获得最佳性能. 因此,在研究中,滚降因子ROF=0.1被用于后续实验研究. 此时,其他两个关键系统参数设置为:接收光功率ROP=-10 dBm、削峰比CR=1. 接着,为了防止PDM-16QAM信号的PAPR过高引起性能恶化,在滚降因子ROF=0.1、接收光功率ROP=-10 dBm的条件下,研究了削峰操作对系统性能的影响情况. 如

图 6 所示,当进行 95% 的削峰操作时,系统可取得最佳性能;而随着削峰程度的增加(从 95% 变化到 80%),削峰操作引入了非线性损伤进而恶化了系统性能. 因此,取削峰比 CR=0.95 用于后续的实验研究. 最后,考虑到光电探测器(Photo-Detector, PD)的非线性和接收灵敏度的权衡,我们还在滚降因子 ROF=0.1、削峰比 CR=0.95 的系统参数设置下研究了接收光功率对系统性能的影响. 注意在整个实验研究中本振光(Local Oscillator, LO)的输出功率皆设定为 16 dBm. 通过图 7 给出的系统性能随接收光功率变化趋势可以得到,最佳接收光功率为 -11 dBm.

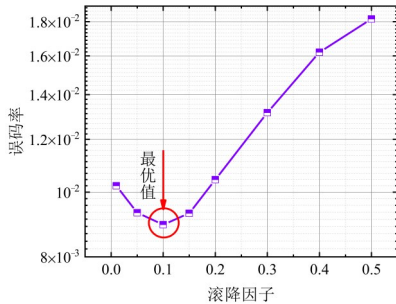


图 5 系统性能随脉冲成型滤波器的滚降因子变化趋势

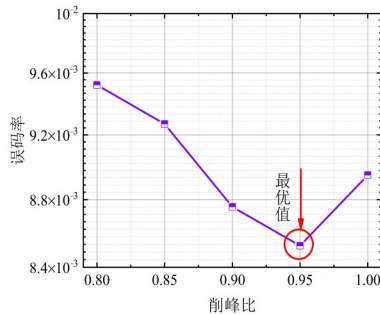


图 6 系统性能随削峰比变化趋势

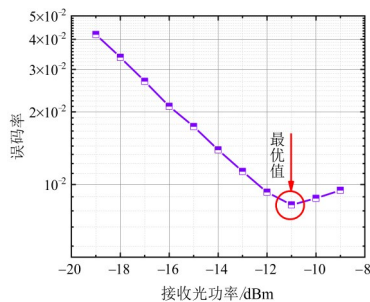
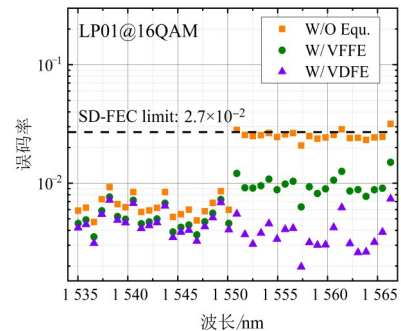


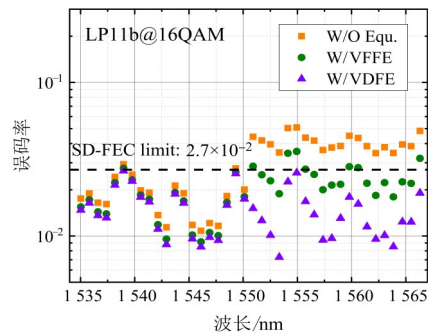
图 7 系统性能随接收光功率变化趋势

通过参数优化,80 个信通所对应的误码率性能被依次测量,结果如图 8 所示. 在这里,我们对比了不使用二阶 VNE、使用二阶 Volterra 前馈均衡(Volterra Feed Forward Equalization, VFFE)以及使用二阶 Volterra 判决反馈均衡的性能. 值得注意的是,相比 Volterra 前馈均衡方案,Volterra 反馈均衡方案由于不会增强

高频部分的噪声分量使均衡效果更佳,但复杂度略有增加. 从图 8(a)中可以看到,对于 LP01 模式,在不使用二阶 Volterra 非线性均衡器时,有少数几个信道的误码率略高于 20% 软判决前向纠错(Soft Decision-Forward Error Correction, SD-FEC) 门限 2.7×10^{-2} [25,26]. 通过使用 Volterra 前馈均衡和 Volterra 判决反馈均衡,平均误码率分别从 1.6×10^{-2} 下降到 7×10^{-3} 和 4×10^{-3} ,即实现了无误码传输. LP11b 模式不同波长信道的误码率性能如图 8(b)所示. 可以看出,在不使用二阶 Volterra 非线性均衡器时,长波长组(CDM2 调制的 20 个波长信道)的误码率皆高于 2.7×10^{-2} ,相比同等条件下 LP01 模式的误码率性能,长波长组的性能恶化,这是高阶模式的模式耦合较大导致的. 相比无均衡处理的系统性能,在使用二阶 Volterra 前馈均衡器均衡后,LP11b 模式信道的 40 个波长信道的平均误码率从 2.9×10^{-2} 降到 2×10^{-2} . 尽管平均误码率满足无误码传输条件,但是仍存在几个波长信道的误码率不满足要求. 不过,在通过使用二阶 Volterra 判决反馈均衡器进行性能均衡后,40 个波长信道的误码率皆低于 2.7×10^{-2} ,平均误码率降至 1.5×10^{-2} ,满足 20% 软判决前向纠错门限,即实现了无误码传输. 在本实验中,单波长信道速率为 $60 \text{ GBaud} \times 4 \times 2 = 480 \text{ Gbit/s}$,总容量达到 $480 \text{ Gbit/s} \times 80 = 38.4 \text{ Tbit/s}$,频谱效率(Spectral Efficiency, SE)为 $480 \text{ Gbit/s} \times 2 / (1 + 20\%) / 100 \text{ GHz} = 8 \text{ bit/s/Hz}$.



(a) LP01 模式不同波长信道系统性能



(b) LP11b 模式不同波长信道系统性能

图 8 不同模式系统性能

4 结论

本文研究一种基于传统多模光纤的高速大容量模分复用光纤传输系统,联合波分复用、偏振复用以及相干检测技术,通过参数优化,系统总传输容量达到 38.4 Tbit/s. 据我们所知,这是基于传统多模光纤实现的最高传输容量记录. 考虑到下一代短距光互连系统指数级增长的流量需求以及相干检测技术的不断发展,本方案将具有一定的应用潜力.

参考文献

- [1] 谈仲伟, 吕超. 光纤通信技术发展现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 100-107.
TAN Z W, LU C. Optical fiber communication technology: Present status and prospect[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 100-107. (in Chinese)
- [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] 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106003.
TU J J, LI Z H. Review of space division multiplexing fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106003. (in Chinese)
- [4] WINZER P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. Nature Photonics, 2014, 8: 345-348.
- [5] PUTTNAM B J, RADEMACHER G, LUÍS R S. Space-division multiplexing for optical fiber communications[J]. Optica, 2021, 8(9): 1186-1203.
- [6] SILLARD P, BENYAHYA K, SOMA D, et al. Few-mode fiber technology, deployments, and systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(11): 1804-1820.
- [7] LI G F, BAI N, ZHAO N B, et al. Space-division multiplexing: The next frontier in optical communication[J]. Advances in Optics and Photonics, 2014, 6(4): 413-487.
- [8] 兰子林, 邹喜华, 白文林, 等. 光载信息能量同传方案及其通信检测应用[J]. 电子学报, 2022, 50(4): 804-810.
LAN Z L, ZOU X H, BAI W L, et al. Information and power over fiber scheme and its applications for communications and detections[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(4): 804-810. (in Chinese)
- [9] CHANG F. Datacenter Connectivity Technologies: Principles and Practice[M]. Aalborg: River Publishers, 2018.
- [10] XIE C J, CHENG J C. Coherent optics for data center networks[C]//2020 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (SUM). Piscataway: IEEE, 2020: 1-2.
- [11] RIZZELLI G, FERRERA P T, FORGHIERI F, et al. Coherent communication over multi mode fibers for intradatatcenter ultra-high speed links[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(15): 5118-5127.
- [12] WU Z Y, LI J H, ZHU J L, et al. Experimental demonstration of MMF fundamental-mode MMF transmission enabled by mode conversion[C]//2017 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Piscataway: IEEE, 2017: 1-3.
- [13] SZOSTKIEWICZ L, WILCZYŃSKI K, TENDERENDA T, et al. C-band coherent transmission at 1.6 TB/s over 3.5 km of OM4 fiber using a fundamental mode operation[J]. Optics Letters, 2022, 47(16): 4107-4110.
- [14] LENGLE K, INSOU X, JIAN P, et al. 4 × 10 Gbit/s bidirectional transmission over 2 km of conventional graded-index OM1 multimode fiber using mode group division multiplexing[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 28594-28605.
- [15] LABROILLE G, JIAN P, GARCIA L, et al. 30 Gbit/s transmission over 1 km of conventional multi-mode fiber using mode group multiplexing with OOK modulation and direct detection[C]//2015 European Conference on Optical Communication (ECOC). Piscataway: IEEE, 2015: 1-3.
- [16] BENYAHYA K, SIMONNEAU C, GHAZISAEIDI A, et al. High-speed bi-directional transmission over multimode fiber link in IM/DD systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(18): 4174-4180.
- [17] LI J P, HU J K, ZOU D D, et al. Terabit mode division multiplexing discrete multitone signal transmission over OM2 multimode fiber[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(4): 4501308.
- [18] 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.
- [19] RYF R, FONTAINE N K, GUAN B, et al. 305-km combined wavelength and mode-multiplexed transmission over conventional graded-index multimode fibre[C]//2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC). Piscataway: IEEE, 2014: 1-3.
- [20] DOWNIE J D, HURLEY J E, KUKSENKOV D V, et al. Transmission of 112 Gb/s PM-QPSK signals over up to 635 km of multimode optical fiber[C]//2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication. Piscataway: IEEE, 2011: 1-3.
- [21] KIM M, KIM B G, KIM H, et al. Transmission of 56-Gb/s PAM-4 signal over 2.3 km of MMF using mode-field matched center-launching technique[C]//2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC). Piscataway: IEEE, 2017: 1-2.
- [22] 刘焕淋, 王展鹏, 陈勇, 等. 物理损伤感知的多芯光纤网络动态路由资源分配方法[J]. 电子学报, 2022, 50(2): 502-507.

LIU H L, WANG Z P, CHEN Y, et al. Physical impairment aware-based dynamic routing resource allocation method for multi-core fiber network[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(2): 502-507. (in Chinese)

- [23] ZHANG J W, TAN H Y, HONG X J, et al. Improved weighted volterra DFE for C-band 100-Gbit/s PAM-4 transmission over 60-km SSMF[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(4): 163-166.
- [24] HUANG L Y, XU Y X, JIANG W Q, et al. Performance and complexity analysis of conventional and deep learning equalizers for the high-speed IMDD PON[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(14): 4528-4538.
- [25] ZHANG L, HONG X Z, PANG X D, et al. Nonlinearity-aware 200 Gbit/s DMT transmission for C-band short-reach optical interconnects with a single packaged electro-absorption modulated laser[J]. Optics Letters, 2018, 43(2): 182-185.
- [26] GAO Y F, YANG C C, WANG J X, et al. 288 Gb/s 850 nm VCSEL-based interconnect over 100 m MMF based on feature-enhanced recurrent neural network[C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE, 2022: 1-3.

作者简介



于新阔 男, 1995年6月出生于山东省菏泽市。现为广东工业大学信息工程学院先进光子技术研究院、通感融合光子技术教育部重点实验室博士研究生。主要研究方向为短距光纤通信和多维复用。

E-mail: yuxinkuo@sina.com



李建平 男, 1982年4月出生于湖南省张家界市。2012年毕业于博士毕业于北京邮电大学。现为广东工业大学“百人计划”特聘教授, 博士生导师, 国家优青。长期从事高速光纤通信领域研究, 主持完成多项国家和省部级科研项目, 发表SCI论文80余篇, 国际国内特邀报告10余次, 授权发明专利10余项。

E-mail: jianping@gdut.edu.cn



秦玉文 男, 1960年4月出生于河南省。1996年博士毕业于天津大学。现为广东工业大学“百人计划”特聘教授, 博士生导师, 先进光子技术研究院院长。主要从事光纤通信、光纤传感等方面的研究工作, 主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目、广东省重大科技专项项目、“珠江人才计划”项目等, 发表科研论文100余篇。

E-mail: qinyw@gdut.edu.cn



杨海林 男, 1996年11月出生于广东省茂名市。现为广东工业大学信息工程学院先进光子技术研究院、通感融合光子技术教育部重点实验室博士研究生。主要研究方向为短距光互联和新型光纤。

E-mail: 2111903129@mail2.gdut.edu.cn



彭迪 女, 1988年11月出生于广东省韶关市。2017年博士毕业于电子科技大学。现为广东工业大学“青年百人计划”特聘副教授, 硕士生导师。主持国家自然科学基金面上项目、青年项目; 参与国家重点研发计划项目、广东省重点领域研发计划项目等。发表SCI/EI学术论文30余篇, 获国家发明专利授权9项。主要研究方向为微波光子技术在雷达和无线通信系统中的应用。

E-mail: dipeng@gdut.edu.cn



向梦 男, 1987年5月出生于湖北省荆州市。2017年博士毕业于华中科技大学。现为广东工业大学“青年百人计划”特聘副教授, 硕士生导师。近年来累计在光通信领域核心期刊OE、OL、JLT等期刊上发表论文40篇, 并多次在国际/国内学术会议做特邀、口头报告。主要从事高速相干光收发机研究、数据中心光互连系统与算法和机器学习智能光网络等方面的研究。

E-mail: meng.xiang@gdut.edu.cn



许鸥 女, 1981年12月出生于山西省太原市。2009年博士毕业于北京交通大学。现为广东工业大学信息工程学院副教授, 硕士生导师。主持国家重点研发计划项目子课题两项、NSFC专项项目一项、广东省自然科学基金项目一项。以第一作者发表SCI检索论文十余篇。目前研究领域为光纤通信及传感应用、光纤光栅器件、微波/毫米波的光学生成等。

E-mail: xuou@gdut.edu.cn



付松年 男, 1975年10月出生于云南省昆明市。2004年博士毕业于北京交通大学。现为广东工业大学“百人计划”特聘教授, 博士生导师, 国家杰青。主持国家重点研发计划项目、国家973项目课题、国家863项目课题、重大科学仪器设备研制专项课题、自然科学基金及教育部留学归国人员基金。以第一作者及通信作者发表论文98篇, 授权中国发明专利15项。主要从事宽带光接入技术方面的研究工作。

E-mail: songnian@gdut.edu.cn