

12 信道波分-模分-偏振混合复用光通信系统的性能分析

叶凡¹, 季珂¹, 陈鹤鸣^{2*}

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院, 南京 210023; 2. 南京邮电大学 贝尔英才学院, 南京 210023)

摘要: 为了提高光通信系统传输容量, 提出了一个新型 12 信道波分-模分-偏振混合复用系统, 将波分复用器与模分复用器组合放置, 使系统可以适应波分模分混合复用。12 个信道的信号通过少模光纤传输, 结合恒模算法对输出信号解复用。应用 VPI transmission Maker 仿真平台, 分析了波长间隔、发射机输出功率和激光器线宽对系统性能的影响。仿真结果表明: 在信噪比为 20 dB, 发射机输出功率为 0 dBm 时, 利用 2 波长 6 模式, 每个模式携带 25 Gb/s 的数据, 在误码率为 10^{-4} 量级下, 实现了 $25 \times 2 \times 6$ Gb/s 偏振复用二进制正交振幅调制(PDM-4QAM)信号 10 km 无中继传输。

关键词: 少模光纤; 波分模分混合复用; 恒模算法; 偏振复用

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)11-0054-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.11.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Performance analysis of 12 channels
WDM-MDM-PDM optical communication systemYE Fan¹, JI Ke¹, CHEN Heming^{2*}

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to improve the transmission capacity of the optical communication system, this paper proposes a new type of 12 channels wavelength-mode-polarization division hybrid multiplexing system, and the wavelength division multiplexing device is combined with the mode division multiplexer, so that the system can be adapted to the wavelength-mode division hybrid multiplexing. Signals of 12 channels are transmitted by the few-mode fiber, and the output signal is decompressed with a constant mode algorithm. Through the VPI transmission Maker simulation platform, the influence of wavelength interval, transmitter output power and laser line width on the performance of the system is analyzed. The simulation results show that under the condition that the signal-to-noise ratio is 20 dB and the transmitter output power is 0 dBm, using 2 wavelengths and 6 modes, each mode carries the 25 Gb/s data, and the bit error rate is in the 10^{-4} volume level to realize the $25 \times 2 \times 6$ Gb/s polarization division multiplexing-binary quadrature amplitude modulation(PDM-4QAM) signal transmits 10 km without relaying.

Key words: few-mode fiber; wavelength-mode division hybrid multiplexing; constant modulus algorithm; polarization division multiplexing

0 引言

数据业务飞速发展^[1], 导致 IP 网络融合的速度日

收稿日期: 2019-06-04。

基金项目: 国家自然科学基金(61077084, 61571237)资助; 江苏省自然科学基金(BK20151509)资助; 江苏省研究生科研创新计划(KYLX15_0835)资助。

作者简介: 叶凡(1995-), 男, 江苏省南京人。硕士研究生, 学士学位, 现就读于南京邮电大学光学工程专业, 主要从事波分模分混合复用器在系统中应用及均衡算法方面的研究, 参与国家自然科学基金项目“高速光波分-模分混合复用传输系统复用/解复用器研究”。

* 通信作者: 陈鹤鸣(E-mail: chhm@njupt.edu.cn)。



益加快, 所以对网络进行扩容显得尤为重要。波分复用(WDM)光传输的容量增长明显减速, 而且其系统实验正在接近非线性光纤传输的香农极限^[2], 限制了全光通信的发展, 寻求新型高速大容量光传输机理已成为未来光通信网络面临的重大挑战。从信号复用维度上来看, 空分复用(SDM)技术具有很大的潜力^[3,4], 该技术是使用多芯光纤、多模光纤或者少模光纤(FMF)在空间上的自由度来复用多路信道, 而其中利用多模光纤和 FMF 实现空间复用被称为模分复用(MDM)。相比于多模光纤, FMF 通过合理设计光纤, 传输有限个模式(可以控制模式个数), 优化模式色散和串扰。基

于 FMF 的 MDM 技术是利用光纤各模式间的正交性, 将每一个模式视为独立的信道加载信号形成多输入多输出(MIMO)通道以提高系统传输容量和频谱效率。

当 MDM 和 WDM 或偏振复用(PDM)相结合, 可以极大地扩展现有的光通信系统的传输容量, 而波分模分混合复用的器件也受到广泛的关注。现有的光通信传输系统一般只考虑单个波长下多模式数的传播, 2012 年的 OFC 会议报道了 S.Randel 等人^[9]首次使用模式差分群时延(MDGD)补偿 FMF, 搭建了包括 LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{11b} 在内 3 个模式的 MDM 系统, 在 25+5 km 两段 FMF 开展 40 次环路传输实验, 实现了 6×20 Gb/s 信号无中继稳定传输。随着对 MDM 的研究深入, 在 MDM 系统的基础上引入 WDM 以进一步扩大传输容量。2016 年, CHEN Yuanxiang 等人^[6]提出了利用自零差检测技术进行高速/容量接入网, 并演示了使用低模式串扰 FMF 和复用/解复用器件(MUX/DEMUX)传输 2 模式 4 波长、速率为 40 Gb/s 的 OFDM 信号, 传输距离超过 55 km, 但是未考虑 LP_{11} 存在的简并模 LP_{11a} 和 LP_{11b} 。2017 年, GUO Meng、HU Guijun 等人^[7]提出 56×5×3 Gb/s PDM 正交相移键控(QPSK)数据信号通过 6 模式弱耦合 FMF 传输, 并使用自零差检测进行无差错通信, 传输容量进一步上升, 但是该方案先将多波长组合为系统光源再进行 IQ 调制, 须采用分离的 WDM 器件与 MDM 器件, 增加了插入损耗。

为进一步提高系统容量、降低插入损耗, 本文在 VPI transmission Maker 仿真平台设计一个新型 WDM-MDM-PDM 系统, 采用弱耦合 FMF 作为系统传输链路, 通过恒模算法(CMA)进行信号恢复^[8,9], 并对系统中不同波长间隔下, 发射机输出功率和激光器线宽对信号误码率(BER)的影响进行研究。

1 WDM-MDM-PDM 系统模型与原理分析

本文设计的 2×6 WDM-MDM-PDM 系统包含 2 个波长和 6 种模式(LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b} 、 LP_{21a} 、 LP_{21b} 、 LP_{02}), 系统由发射机(Tx)、FMF、接收机(Rx)和多输入多输出数字信号处理(MIMO DSP)组成, 如图 1 所示。应用 VPI transmission Maker 平台进行仿真实验, 2 组发送端中心波长设置为 1552.5 nm 和 1551.7 nm, 波长间隔为 0.8 nm。发送端每个波长每个模式所对应的 Tx 均由内置集成器件组成, 如图 2 所示。在调制区域中, 伪随机序列(PBRS)经过数据映射生成二进制正交振幅调制(4QAM)电信号, 经过 IQ 调制实现脉冲整形。然后由一组波长为 1552.5 nm、参考频率为 193.1 THz 的

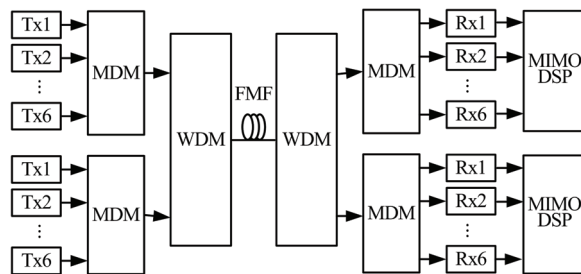


图1 基于 FMF 的 WDM-MDM-PDM 仿真实验系统

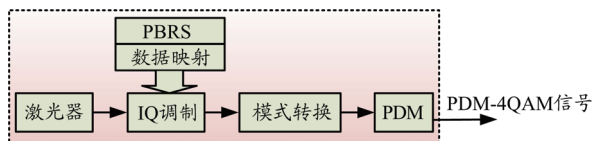


图2 光发射机结构示意图

激光器产生连续波光信号, 与 4QAM 电信号一同输入到 IQ 调制器进行调制, 并通过模式转换进行选模, 得到基模与其它高阶模, 再经过 PDM 实现了每个模式(包括偏振模式)携带速率为 25 Gb/s 的 PDM-4QAM 信号。

由图 1 可知, 通过 MDM 器件, 同一波长下的 6 种模式(其中有 4 个偏振模式)耦合为一组光信号, 再将 2 组不同波长的光信号通过 WDM 器件复用在 FMF 上传输, 使用光谱仪(可用 SOL™2.6 阵列光谱仪)对耦合光信号进行观察分析。

信号经过 FMF 传输后, 通过波分解复用器被恢复成 2 组不同波长的光信号, 再由模分解复用器进行反向操作, 解复用为 6 路信号并将高阶模转换成基模。在接收端采用相干接收方式^[10], 内置集成器件中接收到的光信号通过分束器生成水平和垂直 2 路信号, 与由本振光源分出的水平和垂直信号分别进入 90°混频器, 经过光电二极管(PIN)检测和低通滤波器后转化为电信号, 然后进入模数转换模块, 实现模拟信号到数字信号的转换。所有接收到的基模数字信号进入 DSP 模块, 在这个模块加载由 Python 语言编写的 6×6 MIMO CMA^[11]进行信道均衡处理, 有效地消除各模式信道间的串扰, 通过 BER-4D 模块对光通信系统进行性能评估。

2 性能分析

本文的仿真实验由 VPI transmission Maker 和 Python 仿真平台联合实现。对基于 FMF 的 WDM-MDM-PDM 传输系统的性能进行仿真分析, 主要分析了该系统在 2 波长 6 模式并行传输和 300 Gb/s 高数

叶凡,季珂,陈鹤鸣,等:12 信道波分-模分-偏振混合复用光通信系统的性能分析

据速率传输条件下的系统性能。为了保证仿真结果的可靠性,在 VPI transmission Maker 软件中设置仿真的数据序列长度为 2048 bit,每 bit 采样数为 64,系统发射端的信号发送功率预设置为 0 dBm,单路数据速率为 25 Gb/s,DSP 中抽头个数设置为 39,迭代步长为 10^{-3} 。FMF 的参数采用文献[7]中的 6 模式 FMF,其仿真参数如表 1 所示,光纤长度设置为 10 km,MDGD 为 LP_{01} 与另外 5 种模式之间的相对时延。

表 1 6 模式 FMF 仿真参数

模式	色散(ps/(nm·km))	MDGD(ns/km)	损耗(dB/km)
LP_{01}	20	0	0.2
LP_{11a}/LP_{11b}	21	4	
LP_{21a}/LP_{21b}	19	8	
LP_{02}	9	7	

2.1 波长间隔对系统传输性能的影响

对比传统模分复用系统(如文献[12]的单波长 6 模式的仿真),本文采用 2 个波长,增加信道容量的同时要保证性能相当,所以需要 2 个波长参数对系统的影响进行分析。通过调整其中一个波长的大小,比较 2 个不同的波长间隔对系统 BER 的影响,确定仿真实验系统中波长间隔最佳值,结果如图 3 所示。

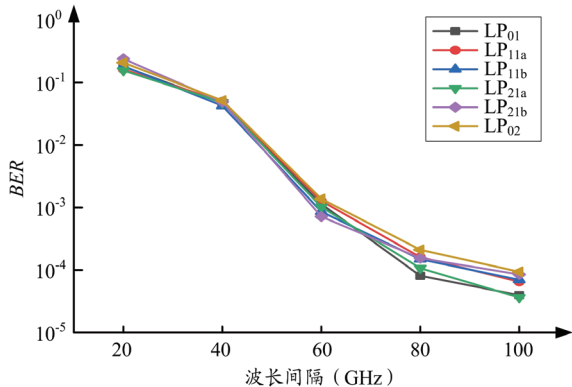


图 3 BER 与波长间隔关系图

从图 3 可以看出,系统在传输相同距离时,随着波长间隔的增大,系统的 BER 逐渐减小。当波长间隔大于 100 GHz 时,系统 BER 变化放缓且处于 10^{-4} 量级,再增加波长间隔对系统影响较小,因此固定波长间隔为 100 GHz。

2.2 发射机输出功率对系统传输性能的影响

在激光器线宽为 100 kHz,波长间隔为 100 GHz 的条件下,通过改变发射机的输出功率测量 6 个模式信号的 BER 性能,实验结果如图 4 所示。可以看出,随着发射机输出功率的增加,信号的 BER 性能逐步变

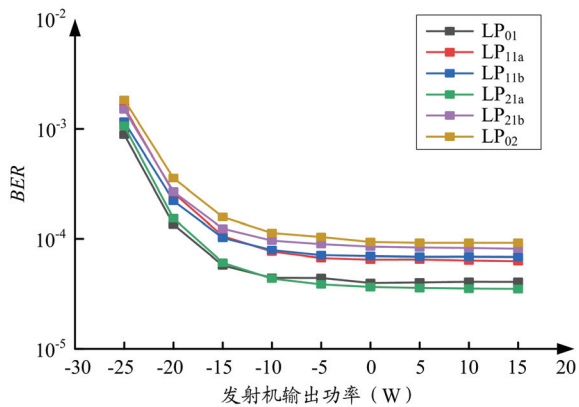


图 4 BER 与发射机输出功率关系图

好,输出功率到达 0 dBm 时,BER 变化放缓,表明此时发射机的输出功率对系统的影响较小。因此,系统发射机的输出功率为 0 dBm,可以满足系统传输需要。

通过分析,确定系统中的波长间隔为 100 GHz,发射机输出功率为 0 dBm,在 FMF 上传输 10 km 后,通过 BER 分析器得到星座图如图 5 所示。可以看到系统星座图不仅收敛,而且没有相位上的偏移,此时相对

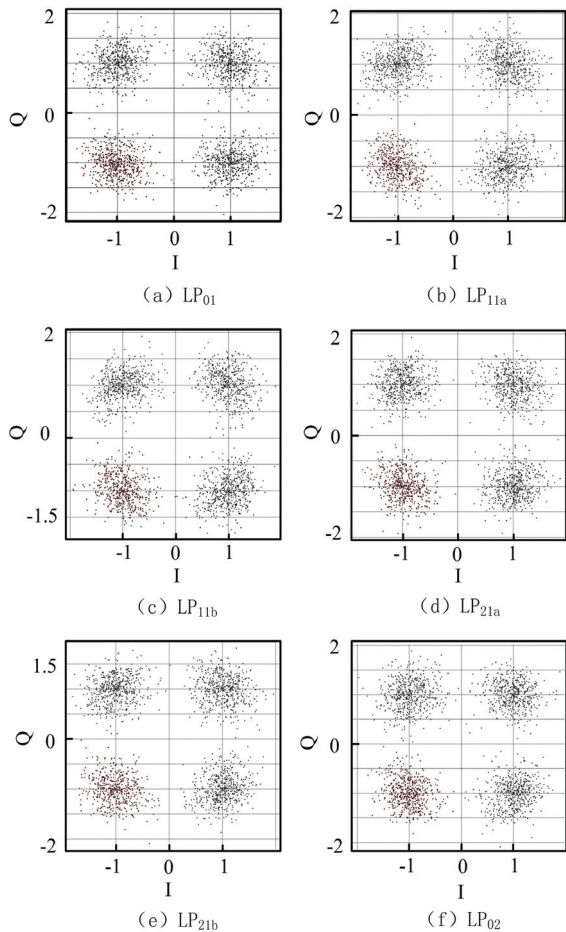


图 5 仿真系统的 6 种模式星座图

于文献[13]的系统而言, 传输容量增大, 性能相对较好且传输距离更长。

2.3 激光器线宽对系统传输性能的影响

在实际应用场景下, 可以通过使用兆赫兹分布反馈(DFB)激光器代替外腔半导体(ECL)激光器来降低系统的成本^[7], 以进一步讨论不同线宽激光器对系统性能的影响。本文为了研究系统中的线宽容差, 通过使用具有不同线宽的激光器来比较系统平均 BER 性能, 结果如图 6 所示。可以看出, 随着线宽的增大, BER 性能逐渐劣化。BER 在 10^{-4} 量级时, 与 100 kHz ECL 激光器相比, 系统使用 1 MHz DFB 激光器的光信噪比(OSNR)损失为 9 dB 左右, 而 10 MHz DFB 激光器性能较差不予采用。由于使用线宽较宽激光器可以有效地降低系统成本, 因此在实际应用当中 OSNR 损失在可接受范围时可以采用线宽较宽激光器。

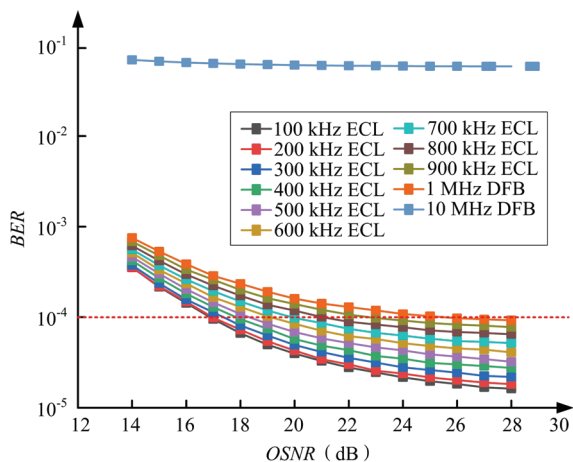


图 6 不同线宽激光器与 LP_{01} 模式 BER 的关系图

3 结束语

本文提出了一个单信道传输速率为 25 Gb/s 的 4QAM-PDM 信号 12 信道混合复用 WDM-MDM-PDM 系统方案, 并在 VPI transmission Maker 仿真平台上进行模拟。相对传统的波分模分复用系统, 本文提出将 WDM 器件与 MDM 器件相组合放入系统中, 结合 CMA 算法进行分析。结果表明: 在信噪比为 20 dB, 发射机输出功率为 0 dBm 的条件下, 利用 2 个波长 6 种模式, 每个模式携带 25 Gb/s 的数据, 在 BER 处于 10^{-4} 量级下实现了 $25 \times 2 \times 6$ Gb/s PDM-4QAM 信号无中继

10 km 距离传输, 且 OSNR 损失在可接受范围时可以采用线宽较宽激光器取代 100 kHz ECL 激光器, 以此降低系统成本。本系统容量上有了很大提高, 且性能优良, 对于未来的大容量光纤通信系统具有重要意义。

参考文献:

- [1] BARI MF, BOUTABA R, STEVES R. Data center network virtualization: A survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15 (2): 909–928.
- [2] ESSIAMBRE R J, KRAMER G, WINZER P J, et al. Capacity Limits of Optical Fiber Networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 662–701.
- [3] CHAN F Y M, LAU A P T, TAM H Y. Mode coupling dynamics and communication strategies for multi-core fiber systems [J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4548–4563.
- [4] RYF R, RANDEL S, GNAUCK A H, et al. Mode-Division Multiplexing Over 96 km of Few-Mode Fiber Using Coherent 6x6 MIMO Processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 521–531.
- [5] RANDEL S, RYF R, GNAUCK A H, et al. Mode-multiplexed 6x20GB QPSK transmission over 1200km DGD-compensated few-mode fiber [C] //Optical Fiber Communication Conference and Exposition, March 4–8, 2012, Los Angeles, USA. Los Angeles: OFC/NFOFC, 2012.
- [6] CHEN Yuanxiang, LI Juhao, ZHU Paikun, et al. A Novel WDM-MDM PON Scheme Utilizing Self-homodyne Detection for High-speed/capacity Access Networks[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, March 20–22, 2016, Anaheim, USA. Anaheim: 2016.
- [7] GUO Meng, HU Guijun. Analysis of self-homodyne detection for 6-mode fiber with low-modal crosstalk [J]. Optics Communications, 2017, 405(1): 205–210.
- [8] 郭业才. 通信信道盲均衡算法与仿真[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 14–20.
- [9] BAI Song, HU Gui-jun, YAN Li, et al. Parameters optimization for the incident signal light in MGDMsystems[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2015, 26(5): 869–876.
- [10] RYF R, MESTRE M A, RANDEL S, et al. Mode multiplexed transmission over a 209-km DGD-compensated hybrid few-mode fiber span[J]. Photonics Technology Letters IEEE, 2012, 24(21): 1965–1968.
- [11] 罗霄, 任勇, 山秀明. 基于 Python 的混合语言编程及其实现[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(12): 17–18.
- [12] KARELIN N, LOUCHET H, KROUSHKOV D, et al. Modeling and design framework for SDMtransmission systems [C]//International Conference on Transparent Optical Networks, July 5–9, 2015, Budapest, Hungary. Budapest: IEEE, 2015.
- [13] 程吉喆, 刘战胜, 吴庆典. 基于模分复用的 100 Gb/s OFDM 传输系统研究[J]. 通信技术, 2018, 51(12): 2824–2828.

欢迎投稿, 欢迎订阅, 欢迎刊登广告!