

基于光子灯笼的 $2 \times 20 \text{ Gb/s}$ PAM4 信号模分复用传输陈保峰^{1,2}, 吴雅婷^{1,2}, 张倩武^{1,2}, 汪 敏^{1,2}

(1. 上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444; 2. 上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444)

摘要: 为了解决大容量数据传输场景下数据传输速率的问题, 基于模式选择性光子灯笼型模式复用/解复用器, 建立了 2×2 的模分复用通信系统。利用 LP_{01} 与 LP_{11} 模式作为独立传输信道, 采用强度调制-直接检测(IM-DD)系统配置, 在 50m 少模光纤(FMF)的传输条件下实现了 $2 \times 20 \text{ Gb/s}$ PAM4 信号的传输, 为大容量数据传输场景提供了一种解决方案。实验结果表明: 在采用判决反馈均衡器(DFE)均衡的情况下, 当发送光功率分别为 -13.9 dBm 和 -10.7 dBm 时, LP_{01} 和 LP_{11} 模式的误码率均可以达到 3.8×10^{-3} , 且在 2 路通道同时传输情况下仍能保持良好的传输性能。

关键词: 光纤通信; 模分复用; 光子灯笼; PAM4

中图分类号: TN915.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)03-0016-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.03.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



$2 \times 20 \text{ Gb/s}$ PAM4 signal mode division multiplexing transmission based on photon lantern

CHEN Baofeng^{1,2}, WU Yating^{1,2}, ZHANG Qianwu^{1,2}, WANG Min^{1,2}

(1. Key laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to solve the data transmission rate problem in the large-capacity data transmission scenario, based on the mode-selective photonic lantern mode multiplexer/demultiplexer, a 2×2 modular-multiplexed communication system is established. The system design block diagram and its working principle are given. The LP_{01} and LP_{11} modes are used as independent transmission channels, and the intensity modulation-direct detection (IM-DD) system configuration is adopted. The transmission of $2 \times 20 \text{ Gb/s}$ PAM4 signals is realized under the transmission condition of 50m few mode fiber (FMF), which provides a solution for high-capacity data transmission scenarios. The experimental results show that the bit error rate of LP_{01} mode and LP_{11} mode can reach 3.8×10^{-3} when the transmitted optical power is -13.9 dBm and -10.7 dBm respectively under the condition of decision feedback equilibrium(DFE) equalization.

Key words: optical fiber communication; mode multiplexing; photonic lantern; PAM4

0 引言

随着光纤通信网络规模不断扩大、容量快速增长和业务日益丰富, 新型高速大容量光传输机理成为

收稿日期: 2018-09-10。

基金项目: 国家自然科学基金(61601279、61420106011、61601277、616-35006)资助; 上海市科技发展基金(17010500400、15530500600、16511-104100、16YF1403900)资助。

作者简介: 陈保峰(1993-), 男, 汉族, 山东聊城人, 硕士研究生, 就读于上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网实验室。主要从事光载无线通信、模分复用传输方式的相关研究, 研究生期间多次获得学业奖学金。



未来光通信网络面临的重大挑战。伴随着时分复用(TDM)^[1]、波分复用(WDM)^[2]、偏振复用(PDM)^[3]和多维多阶调制^[4]等技术的广泛使用, 单模光纤的传输容量已经接近其香农极限。从信号复用维度上来看, 基于多芯光纤的空分复用(SDM)技术^[5]和基于少模光纤(FMF)的模分复用技术^[6-9]具有很大的潜力, 被广泛研究。模分复用技术是利用光纤各个模式间的正交性, 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。

目前, 关于模分复用的研究大多集中在长距离传输方面。2014年, Gnauck A 等学者提出使用低损耗的

光子灯笼作为耦合器,以相干检测的方式,在 1500km FMF 上实现了 3 路单波长信号的复用传输^[9];2015 年,Ref 等人使用 6 个模式搭建了最大速率为 71Tb/s、光纤长度为 179km 的传输系统^[7];2016 年,Esmaelpour 等人在 1050km 的 FMF 上实现了 3 路信号的复用传输^[8]。近年来,关于模分复用短距离接入网方面也出现较多的报道。2016 年, Jiawei Luo 等人采用模分复用技术在 200m 的多模光纤上实现了 2 路 40Gb/s 正交频分复用 (OFDM) 信号传输^[9];2017 年, Fang Ren 等人使用级联模式选择耦合器在 12km 的 FMF 上完成了 3 路信号的复用传输^[10]。

2014 年,贝尔实验室制作出了基于光子灯笼的模式复用/解复用器,通过将纤芯尺寸相同的单模光纤阵列放在一个具有较低折射率的毛细玻璃管中,进行处理后使得其管道半径渐进收缩,通过渐进收缩形成的 FMF 有效地避免了模式间相互串扰所带来的损耗。在之后的研究中,通过使用纤芯尺寸不相同的单模光纤来制作光子灯笼可以获得不同的高阶模式,这样的模式复用/解复用器我们称之为模式选择光子灯笼,它具有更好的实用性和灵活性。2017 年, Jiake Chen 等人采用强度调制-直接检测 (IM-DD) 的方式,通过使用光子灯笼作为耦合器实现了在 10km 的 FMF 上 3x4.25Gb/s 伪随机信号的复用传输^[11]。Jian Chen 等人采用 IM-DD 系统,通过使用光子灯笼在 50m OM4 多模光纤上实现了 2x3.6Gb/s 自适应比特加载的 OFDM 信号传输^[12]。但是,大部分研究都集中在使用外调制器和 FMF,造成较高的实施成本限制了其广泛应用。

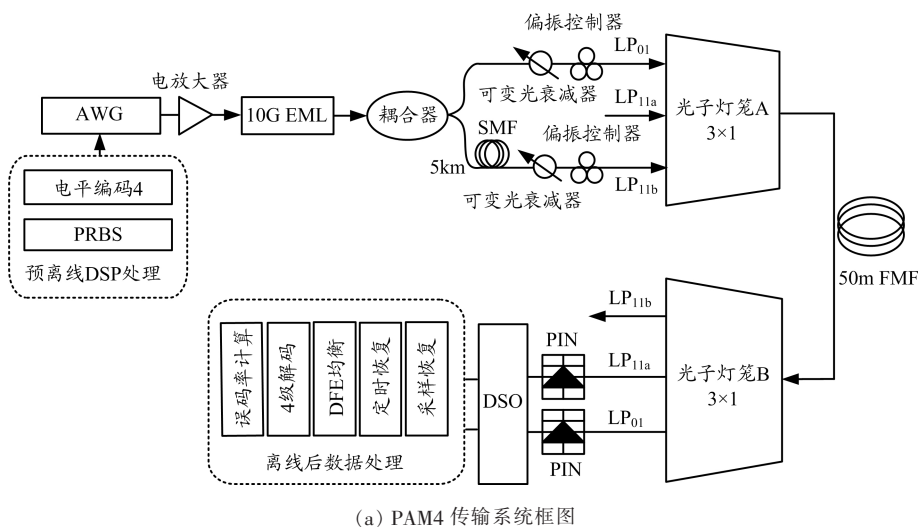
因此,本文利用模间串扰较低的模式选择性光子灯笼作为模式复用/解复用器和低成本的 IM-DD 系统,为短距离大容量数据传输场景提供解决方案。

1 基于光子灯笼的 IM-DD 模分复用 PAM4 信号传输系统

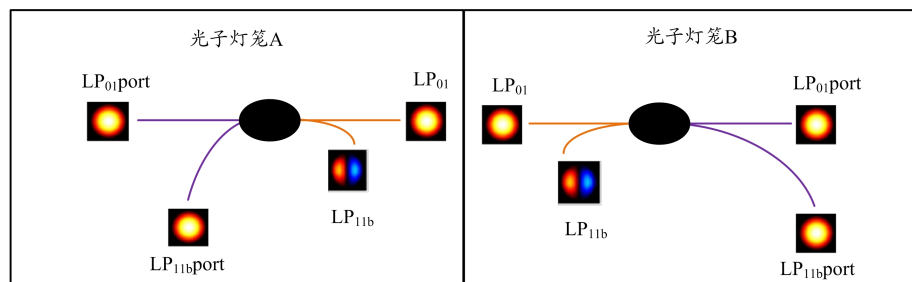
本文基于光子灯笼设计并搭建了 IM-DD 模分复用传输系统,如图 1 所示。实验系统中使用模式选择性光子灯笼实现模式转换和模式

复用/解复用。其中,模式选择性是通过控制入射 FMF 的传播常数来实现,简并模的分离通过控制入射 FMF 的尺寸实现,光子灯笼 A 和光子灯笼 B 的结构相同,接入系统时方向相反。

从图 1(a)可以看出,首先,在发送端将产生的伪随机序列 (PRBS) 进行串/并转换,当信息流进行 PAM4 后,将得到的实数信号 (-3,-1,1,3) 送入到一个任意波形发生器 (AWG) 中,以 10GS/s 的采样率生成 20Gb/s 的模拟 PAM4 信号;PAM4 信号经过一个带宽为 14GHz、放大倍数为 10dB 的前置放大器放大,再经过一个 3dB 的衰减器衰减后,由带宽为 10GHz、中心波长为 1550nm 的电吸收调制激光器 (EML) 将电信号转换为光信号;光信号经过一个 3dB 的耦合器后被分为完全相同的 2 路,其中为了使 2 路信号在进入光子灯笼之前互不相关,避免干涉效应对接收信号的影响,在 LP₁₁ 路加入了 5km 的单模光纤。然后,2 路光信号被分别送入到光子灯笼 A 的 LP₀₁ 与 LP₁₁ 输入端。由于入射光的偏振态对光子灯笼模式转换的影响很大,尤其是 LP₁₁ 高阶模式的转换,所以在光子灯笼之前增加 2 个偏振控制器,以改变入射光的偏振态,从而降低模



(a) PAM4 传输系统框图



(b) 模式选择性光子灯笼的原理图

图 1 基于光子灯笼的 IM-DD 模分复用 PAM4 信号传输系统

式之间的串扰;经过 50m FMF 传输后,分别从光子灯笼 B 的 LP_{01} 与 LP_{11} 端输出,将 2 路光信号通过 2 个带宽为 12GHz 的光电探测器(PIN)进行接收后分别送入到实时示波器(DSO)中,以 80GS/s 的采样率进行采样。最后,使用 Matlab 对采样得到的数据进行采样恢复、定时恢复、判决反馈均衡器(DFE)均衡、解调和误码率计算等离线处理。实验过程中的系统参数如表 1 所示。

表 1 实验系统参数

参数名称	数值或类型	参数名称	数值或类型
调制方式	PAM4	PIN 管带宽	12GHz
AWG 采样率	10GS/s	光纤类型	FMF
激光器波长	1550nm	FMF 长度	50m
激光器带宽	10GHz	DSO 采样率	80GS/s
电放大器带宽	14GHz	—	—

实验中我们选出传输质量相对较好、光功率衰减相对较小的 LP_{01} - LP_{01} 端口和 LP_{11b} - LP_{11a} 端口来传输信号。经 50m FMF 传输后, LP_{01} - LP_{01} 、 LP_{01} - LP_{11a} 、 LP_{11b} - LP_{11a} 和 LP_{11b} - LP_{01} 模式的光功率衰减分别是 0.9dBm、13.9dBm、5.3dBm 和 12.5dBm。

2 实验结果与分析

由于 FMF 价格昂贵,未能商用化,基于实验条件的限制,本文只使用了光子灯笼自带的 50m 的 FMF 来验证 PAM4 信号在光子灯笼中的损耗传输性能。多阶 FMF 支持 2 种模式传输,特别对于小模式差分群时延 FMF,模式间耦合较大、串扰增强,长距离传输不可预测性加大^[13]。在相同传输速率情况下,随着光纤长度的增加,其码间串扰和模式串扰也会随之加剧。因此,我们首先进行了单路的传输实验,将 2 路速率为 20Gb/s 的 PAM4 信号分别输入到光子灯笼 A 的 LP_{01} 、 LP_{11a} 与 LP_{11b} 的端口,然后由光子灯笼 B 的 LP_{01} 、 LP_{11a} 与 LP_{11b} 端口输出,并检测其误码率随发送光功率的变化如图 2(a) 所示。可以看出, LP_{01} - LP_{01} 、 LP_{11a} - LP_{11a} 、 LP_{11a} - LP_{11b} 、 LP_{11b} - LP_{11a} 和 LP_{11b} - LP_{11b} 5 种情况下的 PAM4 信号传输的发送光功率灵敏度分别为 -15.1dBm、-11.4dBm、-11.9dBm、-12.9dBm 和 -10.8dBm。为了保证信号的传输质量和 2 信道同时传输时光信号的偏振态对模式串扰的影响,本文选取了传输性能相对较

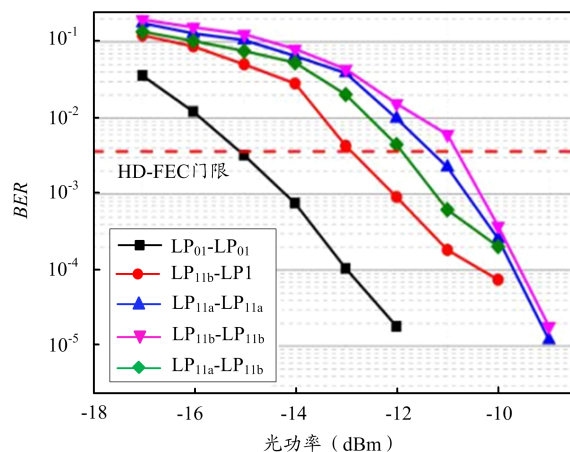
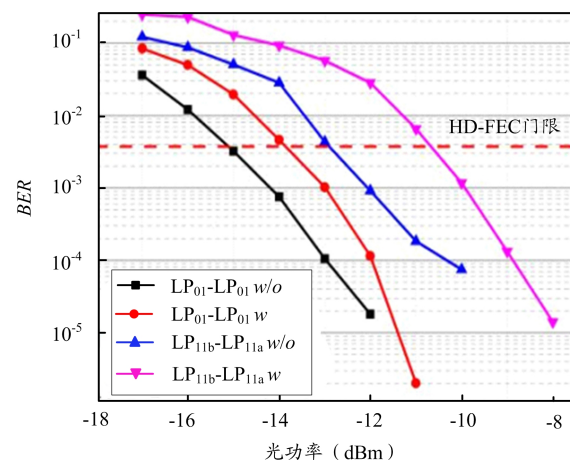
(a) LP_{01} - LP_{01} 、 LP_{11a} - LP_{11a} 、 LP_{11a} - LP_{11b} 、 LP_{11b} - LP_{11a} 、 LP_{11b} - LP_{11b} 信道单独传输(b) LP_{01} - LP_{01} 、 LP_{11b} - LP_{11a} 信道共同传输

图 2 发送光功率与误码率相关曲线

好的 LP_{01} - LP_{01} 和 LP_{11b} - LP_{11a} 2 种模式作为独立的传输信道来进行同时传输,其误码率随发送光功率变化如图 2(b) 所示(w/o 表示 LP_{01} 与 LP_{11b} 2 个模式单独传输信号,而 w 表示 2 个通道复用共同传输信号时的误码率)。可以看出,2 路达到 HD-FEC 门限时的发送功率灵敏度分别为 -13.9dBm、-10.7dBm。与 2 路单独传输时发送功率的灵敏度相比, LP_{01} - LP_{01} 和 LP_{11b} - LP_{11a} 2 种模式同时传输时由于受到模式串扰影响的灵敏度差值分别有 1.3dBm、2.2dBm 的功率损耗。同时,通过直观地观察正弦波的传输质量来量化。入射光信号的偏振态对信号传输质量的影响如图 3 所示。可以看出,在未改变偏振态之前,正弦波波形已经严重地变形,其中, LP_{11b} - LP_{11a} 信道的信号受到的影响更加严重。通过调整偏振控制器来调整 2 路入射光信号的偏振态,从图 3(b) 中正弦波的形状可知,2 路信号可以相对稳定地传输,相互之间的影响减小,且在改变了偏

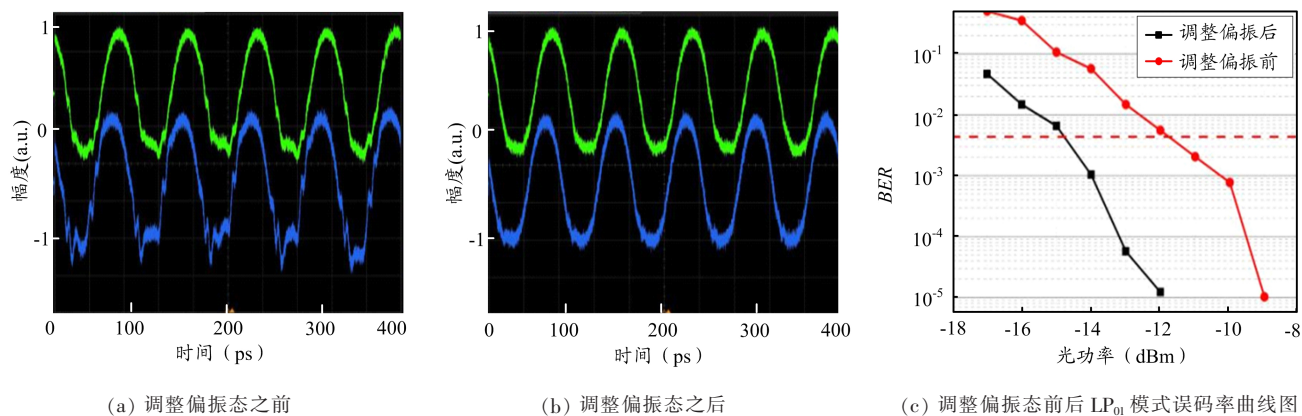


图3 入射光信号的偏振态对信号传输质量的影响

振态后,输入光功率灵敏度提升了3dBm。

因此,2路信号经过50m的FMF传输后,在 LP_{01} 端与 LP_{11} 端的入射光功率为-3dBm的情况下,2路信号号均可以进行无误码地传输,眼图清晰。

3 结束语

本文基于模式选择性光子灯笼型模式复用/解复用器建立了2×2 PAM4信号的模分复用通信系统,给出了系统框图和工作原理。利用 LP_{01} 与 LP_{11} 模式作为独立传输信道,采用IM-DD系统,在50m的FMF的传输条件下实现了2×20Gb/s PAM4信号的传输。实验结果表明:在采用DFE均衡的情况下,当发送光功率分别为-13.9dBm和-10.7dBm时,模式 LP_{01} 和模式 LP_{11} 的误码率均可以达到HD-FEC门限值(3.8×10^{-3});与非归零码(NRZ)等调制格式相比较,PAM4高阶调制格式大大提升了系统容量,且在增加激光器带宽的情况下,可以使该系统的传输速率得到进一步提升。

参考文献:

- [1] GU H, WANG Z, ZHANG B, et al. Time-division-multiplexing-wavelength-division-multiplexing-based architecture for ONoC [J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2017, 9(5): 351–363.
- [2] WONG E. Survivable architectures for time and wavelength division multiplexed passive optical network [J]. Optics Communications, 2014, 325: 152–159.
- [3] 余骏,黄鸣柳,邹壹昭,等. 偏振分集相干光 OFDM 通信系统中的相位噪声消除[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0806001–35–0806001–39.
- [4] YE C, HU X, ZHANG K, et al. Demonstration and Analysis on

PAM-4/8, DB-PAM-2/4 and DMT formatted TDM-PON with 25Gbps, 40Gbps, 50Gbps capacity per lane using economical 10Gb/s [J]. European Conference on Optical Communication (ECOC), Sept 18–22, 2016, Dusseldorf, Germany. Dusseldorf: VDE, 2016.

[5] LI A, CHEN X, AMIN A A, et al. Space-Division Multiplexed High-Speed Superchannel Transmission Over Few-Mode Fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3953–3964.

[6] GNAUCK A, ERCAN B, CHEN H, et al. Photonic-Lantern-Based Mode Multiplexers for Few-Mode-Fiber Transmission[C]//Optical Fiber Communications Conference (OFC). March 9–13, 2014, San Francisco, California. United States: Optical Society of America, 2014.

[7] RYF R, FONTANIE N K, CHEN H, et al. 72Tb/s transmission over 179-km all-fiber 6-mode span with two cladding pumped in-line amplifiers [C]//IEEE European Conference of Optical Communication (ECOC 15), Sept. 27–Oct. 1, 2015, Valencia, Spain. New York: IEEE.

[8] ESMAEELPOUR M, RYF R, FONTANIE N K, et al. Transmission over 1050-km few-mode fiber based on bidirectional distributed Raman amplification[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(8): 1864–1871.

[9] LUO J, LI J, SUI Q, et al. 40Gb/s Mode-Division Multiplexed DD-OFDM Transmission Over Standard Multi-Mode Fiber [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 8(3): 1–7.

[10] REN F, LI J, WU Z, et al. Three-mode mode-division-multiplexing passive optical network over 12-km low mode-crosstalk FMF using all-fiber mode MUX/DEMUX[J]. Optics Communications, 2017, 383: 525–530.

[11] 陈嘉骅,胡贵军,韩悦羽. 基于光子灯笼的 3×3 模分复用通信实验系统[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106009–222–1106009–228.

[12] 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): 02532239–102–02532239–108.

[13] 陈鹤鸣,庄煜阳. 模分复用系统关键技术研究进展[J]. 南京:南京邮电大学学报, 2018, 38(1): 1014832–37–1014832–44.

欢迎投稿, 欢迎订阅, 欢迎刊登广告!