

降低模分复用传输中信号串扰的预编码技术

富惠雯,朱子岳,赵梦鑫,陈健*

(上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室,上海 200444)

摘要:为降低点到多点短距离模分复用传输中的模式串扰,提出了一种基于系数回传的预编码方法。设计了联合控制任意波形发生器(AWG)和示波器(DSO)的控制台,以及连接 500 m 少模光纤(FMF)的光子灯笼强度调制直接检测(IM-DD)模分复用传输系统,并选用 LP_{01} - LP_{01} 模式信道和 LP_{11a} - LP_{11b} 模式信道进行对比实验。实验结果表明:使用该方案之后的信号误码率在 $1.3E-2$ 前向纠错(FEC)(G.975.1-25%OH)门限时, LP_{01} - LP_{01} 、 LP_{11a} - LP_{11b} 进入光子灯笼的信号发送功率分别降低了约 5 dBm、2 dBm。

关键词:光通信;模分复用;模式串扰;预编码;系数回传

中图分类号:TN915.62 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2021)01-0032-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.01.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Precoding technology for reducing signal crosstalk in mode division multiplexing transmission

FU Huiwen, ZHU Ziyue, ZHAO Mengxin, CHEN Jian*

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

Abstract: In order to reduce the mode crosstalk in point to multipoint short distance mode division multiplexing transmission, a precoding method based on coefficient return is proposed. The console of arbitrary waveform generator (AWG) and digital storage oscilloscope (DSO) is designed, and the mode division multiplexing transmission system of photon lantern intensity modulation direct detection (IM-DD) connected with 500 m few mode fiber (FMF) is designed. The LP_{01} - LP_{01} mode channel and LP_{11a} - LP_{11b} mode channel are selected for comparing experiments. The experimental results show that when the bit error rate is at the $1.3E-2$ forward error correction(FEC)(G.975.1-25% OH) threshold, the signal transmission power of LP_{01} - LP_{01} and LP_{11a} - LP_{11b} entering the photonic lantern decreases by about 5 dBm and 2 dBm.

Key words: optical communication; mode division multiplexing; modal crosstalk; precoding; coefficient return

0 引言

随着光通信系统容量的需求不断增长,空分复用的研究逐渐在光通信研究领域占有重要地位。多模光纤虽然可使传输容量扩大更多倍,但其模式色散问题严重,而少模光纤(FMF)模式色散相对较小,因此基

于 FMF 的模分复用(MDM)技术逐渐得到了该领域研究人员的广泛关注^[1]。相比被广泛应用于长距离 MDM 系统的相干检测^[2],直接调制激光器在短距离传输中具有明显优势并且得以不断发展^[3-4]。

2014 年,贝尔实验室研制出模式选择性光子灯笼,并基于它实现了 MDM 传输^[5]之后,国内外研究人员基于模式选择性光子灯笼进行了不断深入的研究。2017年,陈嘉轲等人^[6]结合 10 km 低耦合 FMF 利用光子灯笼的 3 个模式成功实现了 3 路 4.25 Gb/s 信号的有效传输。2018 年,陈保峰等人^[7]结合判决反馈均衡(DFE)技术在光子灯笼 MDM 系统中成功实现了 2 路 20 Gb/s 的信号,且在一定误码率下保持了良好的传输。近年来,由于模式混叠和光纤内部缺陷造成的模式串扰严重影响着 MDM 传输的信号传输质量,相关

收稿日期:2020-05-10。

基金项目:国家自然科学基金项目(61635006)资助;国家重点研发计划(2018YFB1801800)资助;上海市科委重点项目(17010500400, 18511103400)资助;高等学校学科创新引智计划(111)(D20031)资助。

作者简介:富惠雯(1995—),女,硕士生,现就读于上海大学通信与信息工程学院通信工程专业,主要从事光通信方面的研究。参与过上海市科研计划项目和上海市科研计划重点项目。2018 年,获得全国研究生数学建模大赛三等奖。

*通信作者:陈健(E-mail: chenjian@shu.edu.cn)。



学者对基于光子灯笼 MDM 传输系统的串扰抵消和均衡技术展开了一系列的研究。2018 年,Guijun Hu 等人^[8]提出了一种变步长无约束自适应频域最小均方(FD-LMS)算法,用于 6×6 MDM 系统传输中的解复用,该算法比原有的有约束和无约束的 FD-LMS 算法收敛速度有较大的提升。2019 年,Zhang 等人^[9]通过在接收端使用导频辅助的最小二乘算法,减小了正交频分复用(OFDM)信号在 MDM 强度调制直接检测(IM-DD)传输中的信号串扰;陈健等人^[10]使用了数字正交滤波器结合最小二乘算法,成功减小 MDM 传输中的 2 路信号之间的信号串扰,使误码率降低 2 个数量级;Bishal Poudel 等人^[11]利用有监督深度学习神经网络在 MDM 光传输系统中设计了一种新型多输入多输出(MIMO)检测器。2020 年,Neng Bai 等人^[12]使用光纤的 LP_{01} 和 2 个简并的 LP_{11} 模经过 50 km FMF 传输后采用 6×6 时域 MIMO 均衡器对传输数据进行恢复。然而,这些研究的解串扰均面临着需要在集中的接收端获取光纤信道的模式传输矩阵,才能恢复各个模式的原始传输信号的问题。由于光纤经扰动后传输矩阵会发生改变,在实际使用中必须不断地重复传输矩阵的测量和校准过程,费时、费力,这种集中在接收端设备部署的局限性影响了该技术的推广使用。为此,本文提出一种系数回传的信号预编码方法,以减小点到多点短距离 MDM 传输中的模式串扰。

1 基于预编码的 IM-DD MDM 传输实验

本文使用的模式复用/解复用器是贝尔实验室研制的 2 个相同的模式选择性光子灯笼,选用其中的 LP_{01} - LP_{01} 和 LP_{11a} - LP_{11b} 作为信道传输四电平脉冲幅度调制(PAM4)信号。表 1 为接入 500 m FMF 后测量得到的光子灯笼的插入损耗情况(由于本文使用的光子灯笼并非正式产品,因此只有光功率耦合参数)。

由表 1 可知,当复用端由 LP_{01} 模进入光子灯笼时,解复用端也由 LP_{01} 模出时,光功率的损耗最小;当复用端由 LP_{11a} 进入光子灯笼时,解复用端由 LP_{11b} 出时光功率的损耗相对较小。因此,本文选用 LP_{01} - LP_{01} 和 LP_{11a} - LP_{11b} 这 2 个模式信道开展复用与解复用传输实验。

表 1 经过 500 m FMF 传输后的光子灯笼插入损耗

解复用端 输出模	复用端输入模插入损耗/dB		
	LP_{01}	LP_{11a}	LP_{11b}
LP_{01}	1.65	14.9	16.4
LP_{11a}	12.0	5.96	6.47
LP_{11b}	12.8	5.65	7.00

基于系数回传的预编码技术降低串扰的 IM-DD MDM 系统信号传输实验框图如图 1 所示。在发送端,将 Matlab 产生的 txt 文件导入任意波形发生器(AWG),产生 2 路 1 GSa/s 的电信号;2 路信号经过 10 倍的前置放大器(AMP)放大后,再由 2 个中心波长为 1550 nm 的直接调制激光器(DML)将电信号转换为光信号;调制后的光信号先经过可变光衰减器(VOA)和偏振控制器(PC),再分别进入模式复用光子灯笼的 LP_{01} 和 LP_{11a} 输入端进行复用。在接收端,经过 500 m 的 FMF 后,配用完全相同的光子灯笼进行解复用。光信号由 LP_{01} 和 LP_{11b} 端输出后,再由相匹配的光电探测器(PIN)接收机接收;2 路异地的接收端根据帧头的训练数据获得串扰系数,各自返回它们在训练时测得的串扰系数到发送端。实验系统的参数设置如表 2 所示。

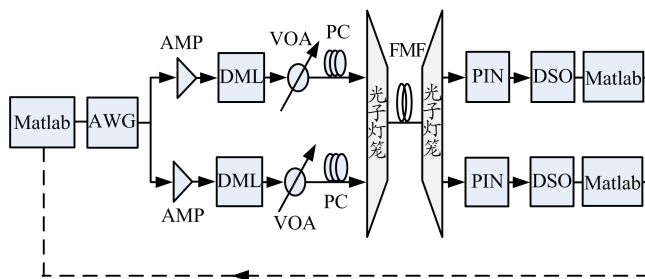


图 1 串扰系数回传的预编码 MDM 系统信号传输实验框图

表 2 实验系统参数

参数名称	数值	参数名称	数值
调制格式	PAM4	接收机带宽/GHz	1.5
训练序列长度	100 个符号	激光波长/nm	1550
DFB 射频驱动电压/ V_{pp}	2.1	激光带宽/GHz	1.4
少模光纤长度/m	500	AWG 采样率/(GSa $\cdot$ s $^{-1}$)	1
放大器放大/dB	10	DSO 采样率/(GSa $\cdot$ s $^{-1}$)	10

实验信号的产生流程如图 2(a)所示。发送端发送的数据帧由帧头和测试数据组成,其中帧头内含有用于信道估计的 Gold 码序列。测试数据由 100000 bit 伪随机二进制序列(PRBS7)调制成 PAM4 格式的信号序列构成,2 路测试数据在发送端控制台经预编码和成帧处理后由 AWG 产生波形信号。在接收端,接收信号的帧头部分用于符号同步和信道串扰系数测量,去帧头后对 PAM4 信号解调并进行误码率统计,接收端信号处理流程图如图 2(b)所示。

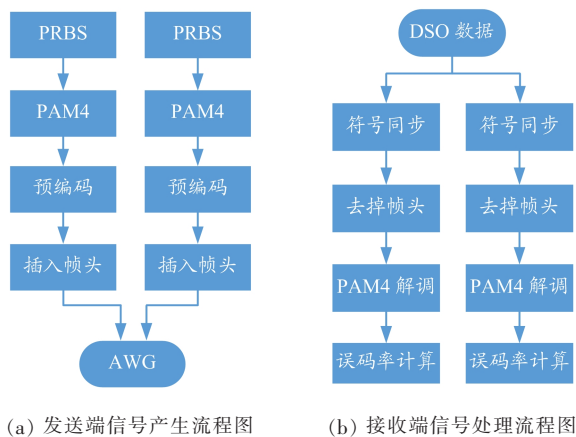


图2 发送端信号产生和接收端信号处理流程图

2 预编码抵消技术

因为实验所用光器件和电器件的带宽大于传输信号的带宽,所以可以认为数据传输是无符号间干扰的,引起误码的主要原因是信号串扰。

光纤中的模式描述的是一种在光纤中传播的场的分布,在理想的少模(多模)光纤中,模式正交,各个模式信号相互独立传播,不存在信号串扰。但在实际的光纤中,由于芯材的制造变化、芯材-包层边界的粗糙度以及芯材半径的变化、微弯曲、宏观弯曲或扭转等制造工艺不完善或者使用过程操作不当等都会造成模式之间的正交性遭到破坏,造成在模式中传播的信号之间的串扰。

假设光沿着 z 轴方向传播, D 个模式之间的模式功率耦合方程为^[13]:

$$\frac{dp_{\mu}}{dz} = -\alpha_{\mu}p_{\mu} + \sum_{\nu \neq \mu} h_{\mu\nu}(p_{\nu} - p_{\mu}), \mu, \nu = 1, \dots, D \quad (1)$$

其中, p_{μ} 和 p_{ν} 分别是不同模式的模式功率, α_{μ} 是功率衰减系数, $h_{\mu\nu}$ 是描述耦合的系数, D 是模式数量。针对本文中的 2 个模式的模型, $D=2$,则 $\mu, \nu=1, 2$ 。

$$\begin{aligned} \frac{dp_1}{dz} &= \alpha_1 p_1 + h_{21}(p_2 - p_1) \\ \frac{dp_2}{dz} &= \alpha_2 p_2 + h_{12}(p_1 - p_2) \end{aligned} \quad (2)$$

本文采用基于训练序列的方式来获得信道的功率传输矩阵,并使用训练序列作帧头获得模式之间的串扰系数 h_{12} 和 h_{21} 。帧头由 Gold 码错位组成,一路信号帧头处信号为 Gold 码段时,另一路信号帧头处信号值为 0(0 值段);相反,一路信号帧头处信号为 0 时,另一路为 Gold 码段。接收端 2 路信号可分别在帧头的 0 码段处得到另外一路信号的功率耦合值,由此得到

信号串扰系数。图 3 为 DSO 采集的数据点形成的帧形图。其中,蓝色线条为 1 路信号;绿色线条为 2 路信号。

根据帧头得到需要返回的信号串扰系数 h_{12} 、 h_{21} 。将得到的系数返回到发送端联合控制 AWG 和 DSO 的控制台,通过控制台实时对输入信号进行预编码处理,如式(3)所示。

$$\begin{aligned} I_1(k)' &= I_1(k) - h_{21}I_2(k) \\ I_2(k)' &= I_2(k) - h_{12}I_1(k) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $I_1(k)$ 和 $I_2(k)$ 为预编码之前的原始输入信号, h_{12} 为 1 路信号对 2 路信号的串扰系数, h_{21} 为 2 路信号对 1 路信号的串扰系数, $I_1(k)'$ 和 $I_2(k)'$ 分别为预编码处理之后的输入信号。

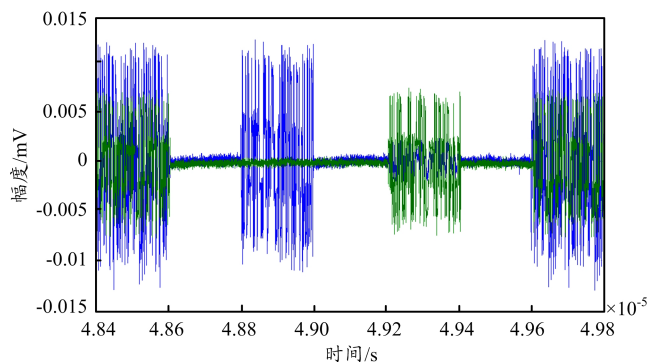


图3 帧头结构图

3 实验结果分析

实验选用的 2 路信道是 LP_{01} - LP_{01} 模式信道和 LP_{11a} - LP_{11b} 模式信道,并对这 2 个模式信道进行对比。首先,本文检测了在没有串扰情况下单路信号的误码率。第一路 LP_{01} - LP_{01} 信道、第二路 LP_{11a} - LP_{11b} 信道传输 PAM4 信号,调节输入端信号功率从 $-5 \sim -13$ dBm,经过 500 m FMF 传输后分别得出无串扰情况下第一路、第二路模式信号在各种功率情形下的误码率曲线。然后,研究 LP_{01} - LP_{01} 和 LP_{11a} - LP_{11b} 这 2 个模式信道同时传输 PAM4 信号(即存在信号串扰时的信号)的传输质量。调节 VOA 使得 2 路信号输入光功率相同,并使模式复用光子灯笼处模式信道输入功率从 -5 dBm 不断变化到 -13 dBm,然后对接收到的数据进行处理得到有串扰情况下 2 路模式信道的误码率曲线,如图 4 所示。可以看出,在同时传输信号(即有串扰)时,2 路信号的误码情况都发生明显的恶化,信道的误码率在低于 $1.3E-2$ FEC(G.975.1-25%OH)门限时,接收光功率比各自在无串扰时提高了约 5 dBm。

2路信号输入光功率相同,经过500 m FMF传输后调节输入功率从-5 dBm 不断变化到-13 dBm 经过预编码降低串扰前后的误码率对比曲线图如图5所示。可以看出,与未使用预编码技术时的情况相比,使用本文所提的预编码技术后,LP₀₁-LP₀₁信道的误码率在低于1.3E-2 FEC(G.975.1-25%OH)门限时接收光功率降低了约5 dBm,LP_{11a}-LP_{11b}信道的接收光功率降低了约2 dBm。

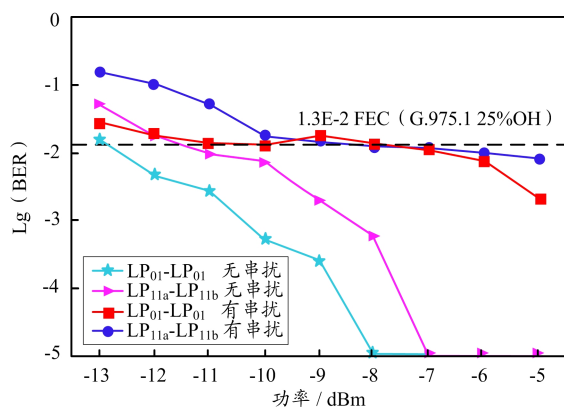


图4 单路传输无串扰及2路同时传输有串扰时的BER曲线

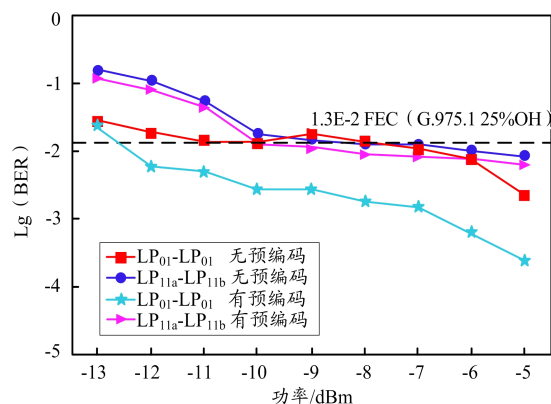


图5 预编码前后的误码率曲线图

4 结束语

在使用基于系数回传的预编码技术的MDM传输系统中,本文选用了光子灯笼的LP₀₁-LP₀₁模式信道和LP_{11a}-LP_{11b}模式信道,在接入500 m FMF的情况下传输PAM4信号。实验结果表明:本文所提出的预编码的方法在经过500 m FMF的传输后,LP₀₁-LP₀₁和LP_{11a}-LP_{11b}信道误码率均有一定改善,误码率在低于

1.3E-2 FEC(G.975.1-25%OH)门限时,比未经过预编码处理时的接收光功率均有降低。该方法具有低成本、简便灵活的特点,为解决点到多点短距离MDM传输系统中的信号串扰问题提供了一种有效的解决方案。

参考文献:

- [1] FRANZ B, BÜLOW H. Mode group division multiplexing in graded-index multimode fibers[J]. Bell Labs Technical Journal, 2013, 18(3): 153-172.
- [2] ARIK, SERCAN O, KAHN, et al. MIMO signal processing for mode-division multiplexing: an overview of channel models and signal processing architectures[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 3(12): 25-34.
- [3] LING W A, MATSUI Y, DAGHIGHIAN H M, et al. 112 Gb/s transmission with a directly-modulated laser using FFT-based synthesis of orthogonal PAM and DMT signals[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19202-19212.
- [4] GAO Y, CARTLEDGE J C, YAM S H, et al. 112 Gb/s PAM-4 using a directly modulated laser with linear pre-compensation and nonlinear post-compensation [C]//European Conference on Optical Communication 2016, September 18-22, 2016, Dusseldorf, Germany. New York: IEEE, 2016: 121-123.
- [5] RYF R, FONTAINE N K, MONTOLIU M, et al. Photonic-lantern-based mode multiplexers for few-mode-fiber transmission[C]//Optical Fiber Communication Conference 2014, March 9-13, 2014, San Francisco, America. Washington: OSA, 2014: 1-3.
- [6] 陈嘉轲, 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(11): 222-228.
- [7] 陈保峰, 吴雅婷, 张倩武, 等. 基于光子灯笼的2×20Gb/s PAM4信号模分复用传输[J]. 光通信技术, 2019, 43(3): 20-23.
- [8] HU Guijun, HUANG Chengbin. A variable step-size unconstrained adaptive FD-LMS algorithm for MDM transmission [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 1-12.
- [9] ZHANG Q W, WANG F, HUANG Q Q, et al. Modal crosstalk mitigated IM/DD mode-multiplexed transmission based on pilot assisted least square algorithm [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2018, May 13-18, 2018, San Jose, California. New York: IEEE, 2018: 1-2.
- [10] 陈健, 王芳, 李正璇, 等. 利用数字正交滤波降低IM-DD模分复用传输中的信号串扰[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 67-74.
- [11] POUDEL B, OSHIMA J, KOBAYASHI H, et al. MIMO detection using a deep learning neural network in a mode division multiplexing optical transmission system[J]. Optics Communications, 2019, 440: 41-48.
- [12] NENG B, EZRA I, YUE-KAI H, et al. Mode-division multiplexed transmission with inline few-mode fiber amplifier[J]. Optics Express, 2012, 20(3): 2668-2680.
- [13] KEANG-PO HO, JOSEPH M KAHN. Mode coupling and its impact on spatially multiplexed systems [J]. optical fiber telecommunications, 2013, 10(2): 491-568.