

引用格式: TANG Shenglong, WU Baojian, YAN Wei, et al. High Speed MIMO-free Transmission Experiment of Mode Division Multiplexing System with Photonic Lanterns[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(1):0106001
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

光子灯笼模分复用系统 MIMO-free 高速传输实验

唐胜龙, 武保剑, 严伟, 文峰, 赵天烽

(电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

摘 要:为考察无需多输入多输出模分复用系统的高速信号传输能力,采用模式选择光子灯笼型模式复用/解复用器构建了 2×100 Gb/s 双偏振正交相移键控模分复用通信实验系统,系统中用到的少模偏振控制器状态可由 LP_{01} 和 LP_{11b} 两个模式信道的信串比参数准确表征。测试了系统误码率与信串比关系,实现两个信道纠后无误码传输的条件为信串比约大于 8 dB。当两个信道的信串比分别为 14.25 dB 和 13.81 dB 时,与背对背收发系统相比,纠后无误码阈值(10^{-2})的接收光功率代价分别为 1.40 dB 和 4.76 dB。分析了光纤衰减、偏振模色散和模式串扰对高速传输系统的影响,估算了串扰受限系统可支持的少模光纤传输距离约为 30 km。

关键词:光纤通信;模分复用;信串比;光子灯笼;双偏振正交相移键控

中图分类号:TN913.7

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235201.0106001

0 引言

随着光纤通信网络业务日益丰富、规模不断扩大和容量快速增长,人们对光网络带宽的需求日益增大。伴随着时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)^[1]、波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)^[2]、多维多阶调制^[3]和偏振复用(Polarization Division Multiplexing, PDM)^[4]等技术的广泛使用,光通信网络的传输容量已经接近其理论极限^[5]。因此,国内外研究者开始采用基于多芯光纤(Multicore Fiber, MCF)或少模光纤(Few Mode Fiber, FMF)的空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)技术^[6]来进一步提升光纤的传输容量。在基于少模光纤的模分复用(Mode Division Multiplexing, MDM)^[7-10]系统中,利用光纤模式的正交性,用各个模式承载不同的用户信息,形成多输入多输出信道,可实现系统频谱效率和传输容量的倍增。

模式复用/解复用器作为 MDM 通信系统的关键器件,其模式相关损耗和串扰(Crosstalk, XT)等性能会直接影响系统的误码率、通信效率以及接收端进行算法补偿的难度。模式复用器主要有自由空间光学型模式复用器^[11]、光波导型模式复用器^[12]、光纤耦合器型模式复用器^[13]以及光子灯笼型模式复用器^[14]等,其中商用的模式选择性光子灯笼(Mode Selective Photonic Lantern, MSPL)模式复用器作为一种无源光器件,具有插入损耗低、结构简单、与光纤易于连接等优点,而且还能与波分复用、偏振复用等技术高效结合。因此,MSPL 模式复用器广泛地用于搭建模分复用通信系统。

基于光子灯笼的长距离少模光纤 MDM 传输系统,还需采用多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术恢复信号。2014年, GNAUCK A H 等^[8]使用低损耗的光子灯笼作为耦合器,以相干检测的方式实现了 3 路单波长 30 Gb/s 正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)信号的 1 500 km

基金项目:国家重点研发计划(Nos.2018YFB1801001, 2018YFB1801003)

第一作者:唐胜龙, 571485299@qq.com

通讯作者:武保剑, bjwu@uestc.edu.cn

收稿日期:2022-05-27;录用日期:2022-07-04

<http://www.photon.ac.cn>

少模光纤传输。2016年,RYF R等^[15]采用光子灯笼作为模分复用/解复用器,开展了 10×30 Gb/s QPSK信号在121 km多模光纤(Multimode Fiber, MMF)的传输实验。2018年,WEERDENBURG J V等^[16]利用光子灯笼模式复用器的 LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{11b} 作为传输信道完成了30 Gb/s 16态正交幅度调制(16-state Quadrature Amplitude Modulation, 16QAM)信号的2 400 km少模光纤传输。

然而,对于光接入网络、数据中心和超级计算机互连等短距离应用场景,采用MIMO数字信号处理技术来提高MDM传输容量,必然会增加系统实施成本和复杂性。在这种情形下,人们更加关注低复杂MIMO技术,甚至无需多输入多输出(MIMO-free)的MDM高速信号传输。2017年,陈嘉轲等^[17]和LIU H等^[18]基于模式选择性光子灯笼分别开展了 3×4.25 Gb/s和 3×10 Gb/s的强度调制直接检测MIMO-free模分复用实验,传输距离分别为10 km和20 km。2018年,SHEN L等^[19]利用MIMO-free直接检测系统开展了 2×20 Gb/s 开关键控(On-off Keying, OOK)信号在151.1 km少模光纤的传输实验。2022年,张强等^[20]采用相位调制-相干接收方式在10 km少模光纤中完成了 3×34 Gb/s 偏振复用正交相移键控(Dual Polarization-Quadrature Phase Shift Keying, DP-QPSK)信号的调制与检测。

本文基于商用模式选择光子灯笼模分复用器建立了高速MIMO-free模分复用实验系统,研究了 2×100 Gb/s DP-QPSK信号在 LP_{01} 和 LP_{11b} 模式信道的MIMO-free传输性能。模式之间的串扰可由信串比(Signal-to-Crosstalk Ratio, SXR)参数表征,要同时实现两个信道纠后无误码传输,应保证SXR约大于8 dB。研究了较低串扰状态下输入功率不均衡和接收光功率大小对信道误码率的影响,当 SXR_1 和 SXR_2 分别为14.25 dB和13.81 dB时,与背对背收发系统相比,纠后无误码阈值($BER=10^{-2}$)的接收光功率代价分别为1.40 dB和4.76 dB。分析了光纤衰减、偏振模色散和模式串扰对高速传输系统的影响,估算了串扰受限系统可支持的少模光纤传输距离约为30 km。

1 光子灯笼模分复用系统的信道选择

图1为采用模式选择性光子灯笼搭建的 2×2 模分复用传输实验系统,主要包括光发射机Tx 1和Tx 2、MSPL模式复用器和解复用器、少模偏振控制器和光接收机Rx 1和Rx 2,它们的功能描述为:

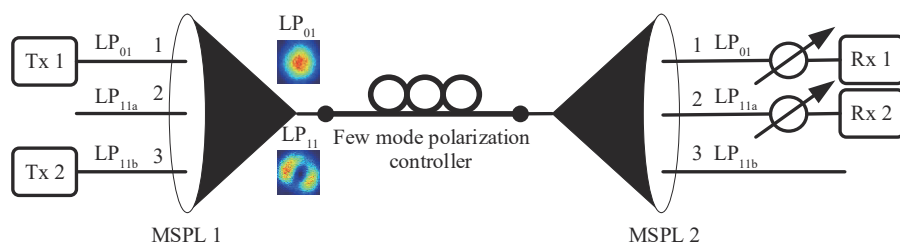


图1 基于光子灯笼的 2×2 模分复用传输系统框图

Fig. 1 Block diagram of 2×2 mode division multiplexing transmission system based on photonic lanterns

1) 实验中,光收发机采用商用光传送网(Optical Transport Network, OTN)设备,具有光复用/解复用、光放大、可调谐色散补偿和相关光板卡保护等功能。每个光发射机中,线偏振激光经过IQ调制器分别产生两个单偏振QPSK光信号,再用偏振合束器合成双偏振QPSK信号^[21]。

2) MSPL模式复用/解复用器采用英国Phoenix Photonics公司生产的三单模端口模式选择光子灯笼,其出厂参数见表1,激发或解复用 LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式。两个发射机均发射1 550 nm波长的100 Gb/s

表1 三端口模式选择光子灯笼的参数

Table 1 Parameters of three-port mode selective photon lanterns

Parameter	Value/W
Wavelength coverage/nm	1 450~1 640
Type of FMF	Two-mode graded fiber
Polarization dependent loss/dB	<0.5
Mode extinction ratio/dB	>15

DP-QPSK信号,分别输入到光子灯笼1(模式复用器)的单模端口1和3,并转换为LP₀₁和LP_{11b}模。模式之间的串扰不使用任何MIMO数字信号处理进行解耦。

3) 为了考察模式串扰对系统误码率的影响,在光子灯笼之间增加一个用长飞公司生产的少模光纤(相关参数如表2)绕制而成的(3模)偏振控制器,用于调节模式之间的串扰。LP₀₁和LP_{11b}模式的信号光,经少模偏振控制器传输后,由光子灯笼2(模式解复用器)的单模端口1和2解复用输出。

表2 渐变两模光纤的参数
Table 2 Parameters of graded two-mode fibers

Parameter	Value
Core diameter/ μm	20
Cladding diameter/ μm	125
Operating wavelength/nm	1 450~1 700
LP ₀₁ mode dispersion coefficient/(ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	21.2
LP ₁₁ mode dispersion coefficient/(ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	20.5
LP ₀₁ mode attenuation coefficient/(dB·km ⁻¹)	0.19
LP ₁₁ mode attenuation coefficient/(dB·km ⁻¹)	0.20

4) 采用相干光接收机恢复信号,通过OTN设备的网络管理软件读取信道的误码率和差分群时延(Differential Group Delay, DGD)^[22]等性能参数信息,其中误码率采用前向纠错编码,它是一种实现比特错误检测和纠错的编码算法,接收器仅接收检测和纠正位错误所需的信息,不请求重新传输。在背对背实验测量中,当前向纠错前误码率小于 1.75×10^{-2} 时,可实现纠后无误码传输。为了便于性能比较,本文取值为 10^{-2} ,也有文献取BER= 10^{-3} 进行比较^[17]。

在进行MDM系统传输性能实验之前,首先测量不加少模偏振控制器的光子灯笼直连系统的串扰。模式串扰测量方法如下:在LP₀₁模式信道1中输入信号光,测量模式信道1和2的输出光功率,计算它们的透射率 T_{11} 和 T_{12} ,则信道1到信道2的串扰 X_{T12} 为

$$X_{T12} = 10\lg(T_{12}/T_{11}) \quad (1)$$

同样地,也可测量信道2到信道1的 X_{T21} 为

$$X_{T21} = 10\lg(T_{21}/T_{22}) \quad (2)$$

式中, T_{22} 和 T_{21} 分别为模式信道2输入信号时到两个输出端口的透射率。

两个光子灯笼的端口1、端口2和端口3分别对应LP₀₁、LP_{11a}和LP_{11b},实验中所用的两个光子灯笼各端口的插入损耗分别为1.62 dB、2.26 dB、1.70 dB和1.95 dB、2.03 dB、2.35 dB,其中端口1的插损最小。根据MSPL的特性,两个MSPL的单模端口1和2(或3)激发不同的模式,它们之间不能用于模式信道传输。因此,只需对表3所示的五个传输路径进行串扰测量。表3中,0 dB对应的输入和输出端口为目标传输路径,括号里的数值为相应端口的插损值,其他数据为串扰值。由表3可知,LP₁₁简并模之间的串扰很大,最高可达-1.70 dB,需使用MIMO数字信号处理技术解复用。

为了实现两路MIMO-free传输,选取模式串扰最小的两个模式信道,一个是输入端口1到输出端口1的LP₀₁模(信道1),另一个是输入端口3到输出端口2的LP_{11b}模(信道2)。由表3可知,它们的光子灯笼直连系统串扰分别为-13.85 dB和-14.99 dB。

表3 光子灯笼1和2直连系统的串扰矩阵(单位: dB)
Table 3 Crosstalk matrix of directly linked system with photonic lantern 1 and photonic lantern 2 (unit: dB)

Input port	Output port		
	1	2	3
1	0(3.25)	-13.85	-10.7
2	-8.46	0(6.48)	-2.97
3	-9.43	-2.75	0(5.83)
2	-3.45	-1.70	0(7.54)
3	-14.99	0(4.31)	-7.53

2 少模偏振控制器对信串比的影响

为了开展两个信道的同时传输实验,需在两个 MSPL 之间加入少模偏振控制器来进一步提高模式信串比的大小。具体方法如下:端口 1 输入信号光,调整少模偏振控制器使输出端口 1 的功率最大,测量输出端口 1 和 2 的光功率。在相同的偏振控制器状态下,在端口 3 输入信号光,测量输出端口 1 和 2 的光功率。两个模式信道的信串比(SXR)可表示为

$$\text{SXR}_1 = 10\lg(T_{11}/T_{21}) \quad (3)$$

$$\text{SXR}_2 = 10\lg(T_{22}/T_{12}) \quad (4)$$

对于上述光子灯笼直连系统,根据式(3)和(4)可计算两个模式信道的 SXR 分别为 16.05 dB 和 12.79 dB,信道 1 的性能明显优于信道 2。

实验过程中,保持两路信道的输入光功率相同,调整三环少模偏振控制器中间环的位置,测量两个信道的信串比变化曲线,如图 2。由图 2 可知:1)少模偏振控制器状态同时影响两个模式的信串比大小,适当调节少模偏振控制器可以提高信串比;与串扰参数相比,信串比能够更直观、准确地反映出信道的传输性能,因此还可以用 SXR_1 和 SXR_2 的变化曲线来表征偏振控制器的状态。2)随着偏振控制器状态的改变, SXR_2 的变化明显,当 SXR_2 增加时 SXR_1 略有降低,但 SXR_1 仍大于 SXR_2 。3)就模式信道 2 而言,调节少模偏振控制器能够获得比光子灯笼直连系统更好的信串比性能。实验中, SXR_2 可提高至 13.81 dB,比未加偏振控制器的光子灯笼直连系统提高了 1 dB。

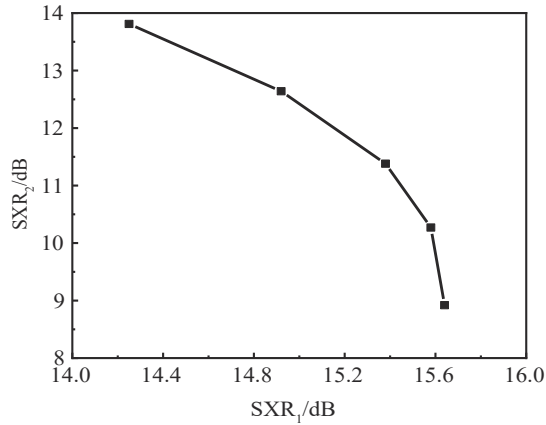


图 2 少模偏振控制器对 SXR_1 和 SXR_2 的影响

Fig. 2 The influence of few-mode polarization controller on SXR_1 and SXR_2

3 2×100 Gb/s DP-QPSK 信号传输性能

3.1 误码率随 SXR 的变化

为了研究信道误码率与 SXR 的关系,保持两路信道的输入光功率为 -1.40 dBm,通过调节偏振控制器来改变两个信道的串扰,记录每个信道的前向纠错码率(Bit Error Rate-forward Error Correction, BER-FEC)随信串比的变化关系,如图 3。其中,用到的少模光纤长度约为 4 m,包括少模偏振控制器(2 m)和两个光子灯笼少模端的光纤(2 m)。信道 1 和信道 2 的最大输出光功率分别为 -4.90 dBm 和 -6.50 dBm,为了保持两者的接收光功率一致,调整信道 1 的衰减器使其输出功率也降为 -6.50 dBm。

由图 3 可知,在纠后无误码条件下,信道的 BER 随 SXR 的增大近似线性降低,相应的拟合曲线分别为

$$\begin{cases} \lg(\text{BER}_1) = -0.65 \cdot \text{SXR}_1 + 3.78 & 14 \text{ dB} \leq \text{SXR}_1 < 16 \text{ dB} \\ \lg(\text{BER}_2) = -0.42 \cdot \text{SXR}_2 + 1.22 & 8 \text{ dB} \leq \text{SXR}_2 < 14 \text{ dB} \end{cases} \quad (5)$$

在相同少模偏振控制器状态下,信道 1 的信号质量始终比信道 2 好,因此,系统的传输性能取决于信道 2 的信串比性能,即纠后无误码传输条件为 SXR_2 约大于 8 dB。由图 3 可知,在误码率为 10^{-6} 时,信道 2 的 SXR (理论)约为 17.19 dB,比信道 1 所要求的 SXR 大 2.14 dB。

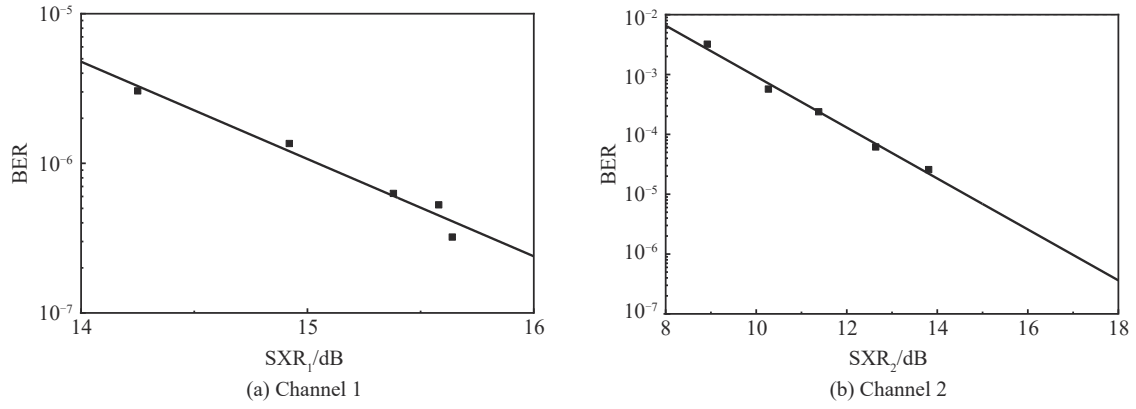


图3 纠前误码率随SXR的变化
Fig. 3 Change of BER with SXR

3.2 信道误码率性能的均衡

3.1节研究表明,在相同功率输入时,信道2较信道1有更大的误码率。为了进一步提高信道2的性能,在两信道SXR分别为14.25 dB和13.81 dB的偏振控制器状态下(如图2),改变两个信道的输入光功率差,即

$$\Delta P_{in} = P_{in1} - P_{in2} \quad (6)$$

在信道1和2的输入功率均为-1.40 dBm,即 $\Delta P_{in}=0$ dB的初始条件下,通过降低其中一个信道输入功率的方式实现输入功率不均衡。图4为信道的BER随两信道输入光功率差的变化曲线,两信道的接收光功率仍保持为-6.50 dBm。

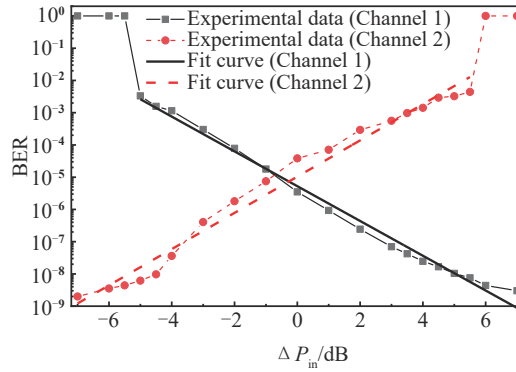


图4 信道误码率随入射光功率之差 ΔP_{in} 的变化曲线
Fig. 4 Variations of BER-FEC with the difference between incident optical powers

由图4可知,当信道1的输入功率降至-2.40 dBm,即 $\Delta P_{in}=-1.00$ dB时,两个信道的BER达到均衡,此时 $BER=1.25 \times 10^{-5}$ 。要想实现两路信号同时通信,它们的入射光功率相差不能太大,相应的拟合曲线分别为

$$\begin{cases} \lg(BER_1) = -0.54 \cdot \Delta P_{in} - 5.27 \\ \lg(BER_2) = 0.56 \cdot \Delta P_{in} - 4.98 \end{cases} \quad -7 \text{ dB} \leq \Delta P_{in} < 7 \text{ dB} \quad (7)$$

3.3 信道灵敏度曲线的测试

为了研究两个信道同时传输信号时接收灵敏度的变化情况,需要调节每个信道光接收机前面的衰减器。在 $SXR_1=14.25$ dB和 $SXR_2=13.81$ dB状态下,测量每个信道的纠前误码率随接收光功率的变化曲线,如图5。由图5可知,当接收光功率相同时,信道1的误码率始终低于信道2的误码率;信道1和信道2纠后无误码通信($BER-FEC=10^{-2}$)的最小接收光功率分别为-33.72 dBm和-30.36 dBm,与背对背光收发系统相比,它们的光接收机灵敏度代价分别为1.40 dB和4.76 dB。造成上述结果的原因与信道2的信串比SXR较低有关。

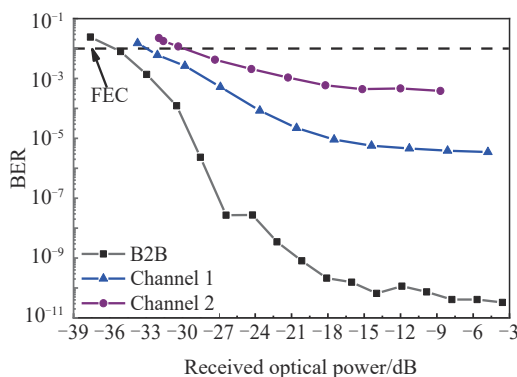


图5 两信道纠错前误码率随接收光功率的变化曲线

Fig. 5 The BER-FEC curve of two channels dependent on the received optical power

4 系统受限因素分析

从光纤衰减影响、偏振模色散和串扰劣化三个方面分析它们对高速传输系统的影响。

1) 光纤衰减的影响

在3.1节和3.2节的实验中,信道1和信道2的接收光功率均为 -6.50 dBm。按图5给出的光接收机灵敏度(-30.36 dBm)计算,还可以允许系统的光功率进一步衰减23.86 dB。若在该系统中加入衰减系数为0.20 dB/km的商用少模光纤(相关参数如表2),则光纤长度接近120 km。从文献结果看来^[20],光纤的衰减并不是限制系统传输距离的主要因素。

2) 信道的偏振模色散特性

双偏振信号对光纤的偏振模色散是非常敏感的,偏振模色散可用DGD参数表示。根据现有的实验条件,在上述基于光子灯笼的 2×100 Gb/s DP-QPSK信号MDM系统中,分别连接100 m、200 m、300 m和12 km的两模渐变光纤(相关参数如表2),测试两个模式信道的DGD。实验中,调节偏振控制器保持 T_{12} 和 T_{21} 基本不变。两个模式信道的DGD随少模光纤传输长度的变化如表4。由表4可知,LP₀₁模式的DGD基本维持在4 ps左右,LP_{11b}模式的DGD在传输几百米时为10 ps左右,而传输12 km时为81 ps。可见,LP_{11b}模式信道的DGD也会成为限制该MDM系统通信性能的重要因素。相干检测光纤通信系统中最常用的偏振模色散补偿技术是在接收端用恒模算法(Constant Modulus Algorithm, CMA)^[23]在电域上对偏振模色散进行补偿。CMA能自动匹配追踪信道的变化,利用某些信号具有模值恒定的特点,将两个混在一起的信号分离到某一近似的恒定的模值,即将偏振复用信号解复用,同时补偿信道中引入的线性损伤^[24]。

表4 不同少模光纤长度时两个信道的DGD(单位:ps)

Table 4 The DGD parameters of two channels in different FMF lengths (unit: ps)

Transmission channel	Transmission distance/km			
	0.1	0.2	0.3	12
Channel 1	4	2	3	3
Channel 2	7	8	9	81

3) 串扰劣化影响

实验中,加入12 km少模光纤后,通过调整少模偏振控制器,使实验系统处于最小串扰状态,此时系统的透射率 T_{11} 和 T_{22} 相比之前下降了大约3 dB,而 T_{12} 和 T_{21} 基本没有变化,由式(3)和(4)可知,SXR₁和SXR₂也会相应地下降约3 dB。即对于串扰受限系统,每增加一定长度的少模光纤后,调整少模偏振控制器使实验系统处于最小串扰状态后,此时SXR₁和SXR₂会降低,与传输光纤的透射功率变化基本一致。例如,传输5 km的衰减系数为0.20 dB/km的少模光纤,调整少模偏振控制器使实验系统处于最小串扰状态后, T_{12} 和 T_{21} 基本没有变化,SXR₁和SXR₂会下降 $0.2 \times 5 = 1$ dB。

根据4.1节的结论可知,要同时实现两个信道纠错后无误码传输,LP_{11b}模式信道的SXR应在8 dB以上,而实验中能够达到的最大SXR₂=13.81 dB,系统的SXR劣化容限约为5.8 dB。按上述规律估算,采用衰减系

数为 0.20 dB/km 的商用少模光纤(相关参数如表 2),则系统能够 MIMO-free 传输的最长距离为 $5.8/0.2=29$ km,约为 30 km。需指出的是,这是针对本文所用的少模光纤和 100 Gb/s DP-QPSK 信号进行的估算结果,通过优化设计少模光纤有可能传输更长的距离^[25]。

将本文研究与目前已报道技术进行比较,如表 5。可以看出,本文研究具有最高的信道速率,且 MIMO-free 串扰受限距离约为 30 km。已进行的 2×2 高速 MIMO-free 的模分复用实验,100 Gb/s DP-QPSK 对信道的信串比要求较高,采用同样实验系统,适当降低信道数据率可以实现 3×3 模分复用系统。

表 5 MIMO-free MDM 实验结果比较
Table 5 Comparison of MIMO-free MDM experimental results

Year	Modulation format of signal	Baud rate/(Gb·s ⁻¹)	Transmission mode	Transmission distance/km	Reference
2017	OOK	4.25	LP ₀₁ 、LP _{11a,b}	10	[17]
2017	OOK	10	LP ₀₁ 、LP ₁₁ 、LP ₂₁	20	[18]
2018	OOK	20	LP ₀₁ 、LP ₀₂	151.5	[19]
2022	DP-QPSK	34	LP ₀₁ 、LP ₁₁ 、LP ₂₁	10	[20]
2022	DP-QPSK	100	LP ₀₁ 、LP _{11b}	30	This article

5 结论

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 MIMO-free 模分复用通信系统,利用 LP₀₁与 LP_{11b}模式信道,实现了 2×100 Gb/s DP-QPSK 信号的传输。实验结果表明,少模偏振控制器状态可由 LP₀₁和 LP_{11b}两个模式信道的信串比参数准确表征;系统的传输性能受限于信道 2 的信串比性能,即纠后无误码传输条件为 SXR_2 约大于 8 dB;要想实现两路信号同时通信,两路入射光功率相差不能太大;当 LP₀₁和 LP_{11b}两模信道信串比分别为 14.25 dB 和 13.81 dB 时,与背对背系统相比,纠后无误码阈值下两个信道的接收光功率代价分别为 1.40 dB 和 4.76 dB。分析了光纤衰减、偏振模色散和模式串扰对高速传输系统的影响,估算出串扰受限系统可支持的少模光纤传输距离为 30 km,这对于短距离的应用场景具有指导价值。

参考文献

- [1] WONG E. Survivable architectures for time and wavelength division multiplexed passive optical networks [J]. *Optics Communications*, 2014, 325(6): 152-159.
- [2] HAN Yishi, LUO Zhixiao, QIN Xinyu, et al. Frequency-selectable and multi-channel wavelength division multiplexing radio-over-fiber system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0505007.
韩一石, 罗志霄, 覃新宇, 等. 可选频的多路波分复用光纤无线系统[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0505007.
- [3] YE C, HU X, ZHANG K. 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 10Gbps [C]. *European Conference on Optical Communication*, 2016: 427-429.
- [4] YU Jun, HUANG Mingliu, ZOU Yaozhao, et al. Phase noise elimination in polarization diversity coherent optical OFDM communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0806001.
余骏, 黄鸣柳, 邹垚昭, 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.
- [5] MECOZZI A. Nonlinear shannon limit in pseudolinear coherent systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(12): 2011-2024.
- [6] 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.
- [7] LUO J, LI J, SUI Q, et al. 40 Gb/s mode-division multiplexed DD-OFDM transmission over standard multi-mode fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 8(3): 7905207.
- [8] GNAUCK A H, ERCAN B, CHEN H, et al. Photonic-lantern-based mode multiplexers for few-mode-fiber transmission[C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition*, 2014.
- [9] ESMAEELPOUR M, RYF R, TOULOUSE J, 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.
- [10] RYF R, FONTAIN N K, CHEN H, et al. 72 Tb/s transmission over 179km all-fiber 6 mode span with two cladding pumped in-line amplifiers[C]. *European Conference on Optical Communication*, 2015.
- [11] WANG S, WU H, TSANG H K, et al. Monolithically integrated reconfigurable add-drop multiplexer for mode-division-multiplexing systems[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5298-5301.

- [12] HANZAWA N, SAITOH K, SAKAMOTO T, et al. Mode multi/demultiplexing with parallel waveguide for mode division multiplexed transmission[J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29321–29330.
- [13] WU Z, LI J, TIAN Y, et al. 4-mode MDM Transmission over MMF with direct detection enabled by cascaded mode-selective couplers[C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition*, 2017.
- [14] SILLARD P, OKONKWO C M, ALVARADO J C, et al. Six mode selective fiber optic spatial multiplexer[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1663–1666.
- [15] RYF R, CHEN H, FONTAINE N K, et al. 10-Mode mode-multiplexed transmission with inline amplification[C]. *European Conference on Optical Communication*, 2016.
- [16] WEERDENBURG J V, RYF R, GROSS S, et al. Mode-multiplexed 16-QAM transmission over 2400-km large-effective-area depressed-cladding 3-mode fiber[C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition*, 2018.
- [17] CHEN Jiak, HU Guijun, HAN Yueyu, et al. Experimental system of 3×3 mod multiplexing communication based on photon Lantern[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 222–228.
陈嘉轲, 胡贵军, 韩悦羽, 等. 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): 222–228.
- [18] LIU H, WEN H, ZACARIAS J C A, et al. 3×10 Gb/s mode group-multiplexed transmission over a 20 km few-mode fiber using photonic lanterns[C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition*, 2017.
- [19] SHEN L, GE D, LIU Y, et al. MIMO-free 20-Gb/s 4×2 WDM-MDM transmission over 151.5-km single-span ultra low-crosstalk FMFs[C]. *European Conference on Optical Communication*, 2018.
- [20] ZHANG Qiang, HAN Wei, XIONG Zhen, et al. Experiment of 3×34 Gb/s PDM-QPSK signal mode-division multiplexing based on less mode fiber[J]. *Optical Communication Technology*, 2022, 46(1): 77–80.
张强, 韩伟, 熊振, 等. 基于少模光纤的 3×34 Gb/s PDM-QPSK 信号模分复用实验[J]. *光通信技术*, 2022, 46(1): 77–80.
- [21] 宋晓强. 高速 DP-QPSK 相干光通信系统的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [22] 王铁城. 偏振模色散和偏振相关损耗效应在偏振复用中的影响[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [23] 聂鑫慧. 偏振复用光传输系统中 DSP 算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- [24] FARUK M S, KIKUCHI K. Blind equalization and carrier-phase recovery in QPSK coherent optical receivers based on modified constant-modulus algorithm[C]. *Optoelectronics and Communications Conference*, 2013.
- [25] ZUO M, GE D, LIU J, et al. Long-haul intermodal-MIMO-free MDM transmission based on a weakly coupled multiple-ring-core few-mode fiber[J]. *Optics Express*, 2022: 5868–5878.

High Speed MIMO-free Transmission Experiment of Mode Division Multiplexing System with Photonic Lanterns

TANG Shenglong, WU Baojian, YAN Wei, WEN Feng, ZHAO Tianfeng

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: With the continuously increasing demand for optical network bandwidth, high-speed data transmission and large-capacity optical fiber communication technologies are being developed to meet the goal. In Mode Division Multiplexing (MDM) systems, the orthogonal fiber modes are made advantage of carrying different user information in the form of Multiple-input and Multiple-output (MIMO) channels. In the case, both the system spectral efficiency and transmission capacity can be effectively improved by means of MIMO digital signal processing technology. At the same time, to save the system cost and reduce complexity of implementation, more attention is being paid to low-complexity MIMO technology, or even MIMO-free MDM high-speed signal transmission, with applications to short-distance application scenarios such as optical access networks, data centers, and supercomputer interconnections.

On the other hand, the mode multiplexer/demultiplexer, as a key component for MDM communication systems, are required for a low mode-dependent loss and mode crosstalk as possible. Their performance parameters can directly affect the system's bit error rate and the difficulty of algorithm compensation at the receiver. There are several kinds of mode multiplexers, including those of free space type, optical waveguide, fiber coupler, and photonic lantern. Free-space multiplexers have some advantages in mode purity and mode crosstalk, but are limited by complex optical platforms. The multiplexing/demultiplexing scheme based on the waveguide structure has large connection loss with few-

mode fibers since the width of the optical waveguides is much smaller than the core radius of the few-mode fibers. The other two multiplexer/demultiplexer are in the form of fiberization and capable of seamless connection to few-mode fiber systems. Among them, the commercially available Mode-selective Photonic Lantern (MSPL) mode multiplexer, as a passive optical device, has the advantages of simple structure, low insertion loss, and multi-port input. The MSPLs are also compatible with other technologies such as wavelength division multiplexing, polarization multiplexing.

In the paper, we focus on the high-speed signal transmission capability of MIMO-free Mode Division Multiplexing (MDM) system constructed by the 3-port MSPLs, where each mode channel carries a Dual-polarization Quadrature Phase Shift Keying (DP-QPSK) signal at a bit rate of 100 Gb/s. The state of the Few-mode Polarization Controller (FMPC) used in the experiment can be accurately characterized by the Signal-to-crosstalk Ratios (SXR) of LP_{01} and LP_{11} mode channels. The relationship between the Bit Error Rate (BER) and the SXRs is measured by adjusting the FMPC. The experimental results show that, no bit error after forward error correction can be achieved when the SXR of each mode channel is more than about 8 dB. When the SXRs of the two channels are respectively 14.25 dB and 13.81 dB, the corresponding degradation of received optical power relative to the back-to-back transceiver system are 1.40 dB and 4.76 dB at the BER threshold of 10^{-2} , respectively. The effects of fiber attenuation, polarization mode dispersion and mode crosstalk on the high speed transmission system are analyzed, and the transmission distance limited by crosstalk is estimated to be about 30 km for the few-mode fiber system of interest. Compared with the technologies reported so far, the research in this paper has the highest channel rate, and indicates that the MIMO-free crosstalk limited distance is about 30 km. The 2×2 high-speed MIMO-free mode division multiplexing experiment is carried out before. 100 Gb/s DP-QPSK has higher requirements on the SXR of the channel. Using the same experimental system, appropriately reducing the channel data rate can achieve 3×3 mode division multiplexing system.

Key words: Optical fiber communication; Mode division multiplexing; Signal-to-crosstalk ratio; Photonic lantern; Dual polarization-quadrature phase shift keying

OCIS Codes: 060.1810; 060.2330; 060.4230; 060.4510