

基于光子灯笼的 3×3 模分复用通信实验系统

陈嘉轲, 胡贵军, 韩悦羽

吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 建立了一种基于模式选择性光子灯笼型模式复用/解复用器的 3×3 模分复用通信实验系统, 给出了系统的结构框图并阐述了其工作原理。分别利用模式为 LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{11b} 的信号传输信道作为独立信道, 采用强度调制和直接探测系统, 实现了 3×4.25 Gbit/s 伪随机信号在 10 km 少模光纤中的良好传输。实验测试了接收信号的波形、眼图和误码率。实验结果表明: 当接收功率分别为 -19.1 dBm、 -15.8 dBm、 -16.6 dBm 时, 模式为 LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{11b} 三路信号的误码率均可达到 10^{-3} 。

关键词 光通信; 模分复用; 光子灯笼; 少模光纤

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1106009

Communication Experimental System with 3×3 Mode Division Multiplexing Based on Photonic Lantern

Chen Jiako, Hu Guijun, Han Yueyu

College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract A 3×3 mode division multiplexing communication experimental system is built based on the pattern selectivity of photonic lantern pattern mode multiplexer/demultiplexer. The structural diagram and the operating principle of the system are given. With an intensity modulation and direct detection system, the transmission of 3×4.25 Gbit/s pseudo-random signal in 10 km few-mode fiber is achieved when we use the transmission channels of LP_{01} , LP_{11a} and LP_{11b} modes as the separate channels. The waveforms, eye diagrams and bit error ratio of the received signal are measured. Results show that when the received signal power is -19.1 dBm, -15.8 dBm, -16.6 dBm respectively, the bit error rate of LP_{01} , LP_{11a} and LP_{11b} modes can reach 10^{-3} .

Key words optical communications; mode division multiplexing; photonic lantern; few-mode fiber

OCIS codes 060.2330; 060.4230; 060.4510

1 引 言

随着在线虚拟现实、4K/8K 流媒体、云游戏等新型宽带业务的迅速发展, 人们对光网络带宽的需求日益增大。目前基于单模光纤(SMF)的光网络扩容技术主要包括时分复用^[1]、波分复用^[2]、偏振复用^[3]和相干接收^[4]等, 但受 SMF 非线性效应等的影响, 光通信网络的容量逐渐趋近于理论极限^[5]。目前, 人们开始开发空间维度来进一步提高光纤通信系统的传输容量, 尤其是基于少模光纤(FMF)的模分复用(MDM)技术^[6]。MDM 技术将 FMF 中有限个正交模式作为独立信道进行并行传输, 可以成倍提高系统的传输容量。同时, FMF 具有较大的模场面积, 其非线性容限高, 降低了非线性效应对系统性能的影响^[7]。

MDM 通信既可以用于长距离、大容量的干线传输, 也可以用于短距离的接入网。目前, 关于长距离

收稿日期: 2017-05-17; **收到修改稿日期:** 2017-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(61575078, 61177066)、吉林省科技发展计划(20140203009GX)、吉林省发改委产业技术研究专项(2014Y087)

作者简介: 陈嘉轲(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事模分复用传输方面的研究。E-mail: jackier@live.cn

导师简介: 胡贵军(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信技术和器件等方面的研究。

E-mail: hugj@jlu.edu.cn(通信联系人)

MDM 传输方面的报道较多。2015 年 Ryf 等^[8]使用 6 个模式,搭建了最大速率为 72 Tbit/s、光纤长度为 179 km 的传输系统;2016 年 Esmaelpour 等^[9]实现了三路信号在 1050 km FMF 上的复用传输;2017 年 Hayashi 等^[10]在一根 19 芯 6 模光纤上实现了 114 个空间模式的复用传输。在长距离应用方面,受 FMF 固有的模式耦合、差分群时延及模式相关损耗等因素影响,需要在接收端进行复杂的多输入多输出(MIMO)信号处理来补偿信号在传输过程中引入的损耗。近年来,有较多关于 MDM 在短距离传输方面的应用的报道。2015 年 Gasulla 等^[11]通过光耦合器在 1 km FMF 上实现了 4 路不同开关键控调制信号的复用传输;2016 年 Lenglé 等^[12]通过多平面光转换实现了 4×10 Gbit/s 信号在 2 km 光纤上的 MDM;2017 年 Ren 等^[13]通过级联模式选择耦合器在 12 km FMF 上实现了 3×10 Gbit/s 信号的复用传输。与长距离应用不同,短距离 MDM 通信主要应用于接入网,其基本要求是低成本,主要采用强度调制和直接检测方式,且接收端无需使用复杂的 MIMO 信号处理技术。该技术需要使用低损耗、弱耦合的 FMF,低串扰的模式复用器(MUX)/解复用器(DEMUX)也是实现高质量复用传输的关键。目前使用的 MUX/DEMUX 主要分为自由空间光学、模式选择型耦合器和光子灯笼(PL)型的 MUX/DEMUX。其中,模式选择性 PL 模式串扰低,能实现模式转换与模式复用的高度集成。本文采用低耦合 FMF 和基于 PL 的 MUX/DEMUX,建立了 3×3 MDM 实验系统,实现了三路 4.25 Gbit/s 信号的同时传输。系统采用强度调制和直接检测方式,且无需进行 MIMO 处理,具有低成本的优势。

2 基于 PL 的 MDM 实验系统

设计并搭建的基于 PL 的 MDM 实验系统如图 1 所示。通过电光调制器(EOM, LN56S-FC 型, Thorlabs 公司,美国)将码发生器(eBERT, ET10A-10G 型, 奥特林光电公司,中国)输出的 4.25 Gbit/s 伪随机序列加载到 1550 nm 激光器输出的光波上,光分束器(OS)将调制后的光信号分成三路。实验使用的激光器为分布式反馈半导体激光器,中心波长为 1550.16 nm。在进入 PL 之前,为了使三路光信号互不相关,上、中两路分别加入 2 km 和 1 km 的 SMF,以产生不同时间的信号时延。在入射 PL 前,各路光功率会出现不同程度的损耗,通过增加一级掺铒光纤放大器(EDFA)可实现光信号的功率补偿。将经 EDFA 放大后的三路光信号分别送入 MUX(PL1)的线偏振(LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b})模式光的输入端,由 PL 实现模式转换和 3 个模式的复用。复用信号经 10 km FMF 传输后,到达接收端。先将复用信号经 DEMUX(PL2)进行解复用并转换为基模传输,再用光电探测器(PD, THORLABS-5G 型, Thorlabs 公司,美国)对模式为 LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b} 三路信号进行探测,最后通过数字示波器(SDA 11000-11G 型, Lecroy 公司,美国)观测并记录各路信号波形、眼图的变化情况。

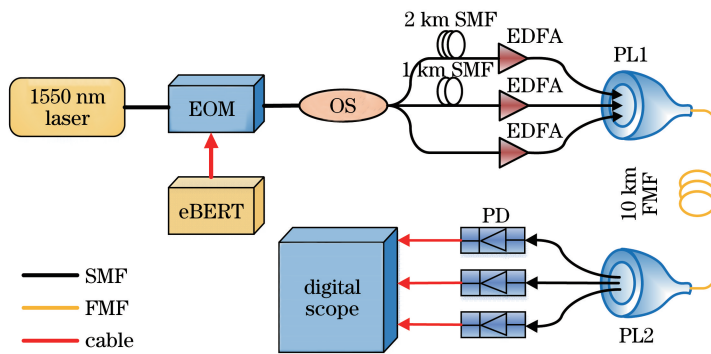


图 1 基于 PL 的 MDM 系统实验装置图

Fig. 1 Experimental setup diagram for MDM system based on PL

在本实验系统中,可通过 PL 实现模式转换和模式的复用/解复用。作为无源光组件,该系统能够实现从一段多模波导到复数单模波导的低损耗传输,反之亦然^[14]。由于光路具有可逆性,实验系统中 MUX 和 DEMUX 的结构相同,接入系统时方向相反,在解复用端需将 PL2 的 FMF 端作为输入端、SMF 端作为输出端接入系统。

模式选择性 PL 的原理图如图 2 所示。PL 的模式选择性是通过控制入射 FMF 的传播常数来实现的,其中,简并模的分离是通过控制入射 FMF 的尺寸来实现的^[15]。光波经过锥形结构时发生模态转换,不同 FMF 中入射的基模会转变为特定的高阶模式^[16],各模式在锥形体的末端进行复用并经 FMF 出射端输出^[17]。表 1 给出了实验所使用的 PL1、PL2 各端口的插入损耗。

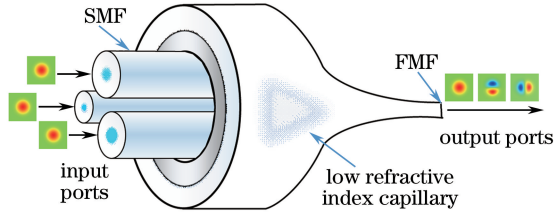


图 2 PL 原理图

Fig. 2 Schematic of PL

表 1 PL 各端口插入损耗

Table 1 Insertion loss of each port of PL

PL No.	Insertion loss /dB		
	LP ₀₁	LP _{11a}	LP _{11b}
1	2.48	1.74	2.72
2	3.49	1.78	2.65

实验系统中使用的传输光纤为长度为 10 km 且具有低模式损耗的弱耦合阶跃型 FMF,相关参数如表 2 所示。表 2 中 d_{core} 、 d_{cladding} 分别为纤芯和包层直径, n_{core} 、 n_{cladding} 分别为纤芯和包层折射率。

表 2 FMF 的主要参数

Table 2 Main parameters of FMF

Parameter	Value
$d_{\text{core}} / \mu\text{m}$	13.938
$d_{\text{cladding}} / \mu\text{m}$	125
n_{core}	1.4632
n_{cladding}	1.4571
LP ₀₁ mode attenuation coefficient / (dB·km ⁻¹)	0.25
LP ₁₁ mode attenuation coefficient / (dB·km ⁻¹)	0.27
Mode dependent loss (LP ₀₁ & LP ₁₁) / (dB·km ⁻¹)	0.02
Mode coupling coefficient (LP ₀₁ & LP ₁₁) / (dB·km ⁻¹)	-26
LP ₀₁ mode dispersion coefficient / (ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	23
LP ₁₁ mode dispersion coefficient / (ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	24

FMF 的归一化截止频率 ν 与实验系统工作波长 λ 的关系可表示为

$$\nu = \pi d_{\text{core}} / (\lambda \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2}) \quad (1)$$

计算可知,当光纤链路的工作波长为 1550 nm 时,该 FMF 的 $\nu=3.696$ 。该归一化截止频率值低于 3.823 且高于 2.405,说明当光波波长在 1550 nm 波长时,该 FMF 支持 LP₀₁ 和 LP₁₁ (LP_{11a}, LP_{11b}) 两种模式的传输。

3 实验结果与分析

3.1 模式串扰测量

在测试系统传输性能之前,先利用表达式^[18]

$$C_{A \rightarrow B} = P_{B-A} / P_A \quad (2)$$

测量并计算背靠背(B2B)传输和经 10 km FMF 传输后,各模式之间的模式串扰情况。(2)式中 $C_{A \rightarrow B}$ 为 A 模式在 B 模式上的模式串扰; P_{B-A} 为在 MUX 端激发 A 模式时,DEMUX 端 B 模式的出射功率,单位为 mW; P_A 为在 MUX 端激发 A 模式时,A 模式的入射功率,单位为 mW。以 LP₀₁ 模在 LP_{11a} 模上的串扰为例,在

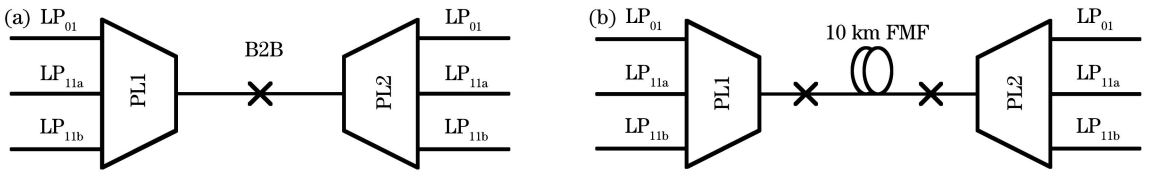


图 3 MUX/DEMUX 熔接示意图。(a) B2B 传输;(b)经 10 km FMF 传输

Fig. 3 Schematic of welding between MUX and DEMUX. (a) Transmission of B2B; (b) Transmission through 10 km FMF
 MUX 端测得 LP_{01} 的入射功率, 记为 $P_{LP_{01}}$; 在 DEMUX 端测得 LP_{11a} 的出射功率, 记为 $P_{LP_{11a}-LP_{01}}$, 再利用(2)式求得模式串扰 $C_{LP_{01} \rightarrow LP_{11a}}$ 的值。

将两个 PL 进行如图 3(a)所示的熔接过程, 测量 B2B 情况下各端口的出射功率。将 10 km FMF 接入两个 PL 之间, 如图 3(b)所示, 测量 10 km 传输情况下各端口的出射功率。在测量过程中, 每一路输入功率均为 0 dBm, 最后将所得数据依次代入(2)式, 测得 3 个模式之间的模式串扰, 如表 3 所示。

表 3 实验系统的模式串扰

Table 3 Mode crosstalk of experimental system

Input port	Output port	Mode crosstalk after	Mode crosstalk after
		B2B transmission /dB	10 km FMF transmission /dB
LP_{01}	LP_{11a}	-14.8	-14.4
LP_{01}	LP_{11b}	-16.1	-15.8
LP_{11a}	LP_{01}	-14.3	-13.6
LP_{11a}	LP_{11b}	-13.7	-12.7
LP_{11b}	LP_{01}	-14.6	-13.9
LP_{11b}	LP_{11a}	-13.2	-11.4

由表 3 可知, 在 B2B 传输条件下, 各模式之间的模式串扰低于 -13.2 dB; 经过 10 km FMF 传输后, 各模式之间的模式串扰低于 -11.4 dB。由于 10 km FMF 的接入, 各个模式间的串扰增大了 0.3 dB~1.8 dB。其中 LP_{11b} 与 LP_{11a} 模式间的串扰最为严重, 在 B2B 传输情况下为 -13.2 dB, 引入 10 km FMF 后, 模式串扰增加了 1.8 dB, 增大至 -11.4 dB。在该实验系统中, 模式串扰主要发生在 MUX/DEMUX、光纤熔接点处以及 FMF 内。从表 3 中的数据可以看出, 在经过 10 km FMF 传输后, 虽然模式之间的模式串扰均有所增大, 但总体不大, 不会严重劣化传输信号的性能。

3.2 系统传输性能测试

模式为 LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{11b} 的三路传输信道分别承载速率为 4.25 Gbit/s 的伪随机信号, 经 B2B 传输和 10 km FMF 传输后, 测量信号波形和眼图的变化情况。在测量过程中, 三路光信号的入射功率均为 0 dBm, 并同时射入 PL1, FMF 的入射功率为 0.24 dBm。图 4 给出了三路信号分别经 B2B 和 10 km 传输后的波形。可以看出, 在经过 10 km FMF 传输后, 三路信号的波形均发生劣化并出现毛刺。显然, FMF 内引起的模式串扰对信号传输造成了一定影响。

图 5 给出了经 B2B 和 10 km FMF 传输后, 模式为 LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{11b} 三路信号的眼图。为了定量分析眼图质量, 在表 4 中列出了图 5 中各种情况下的 Q 因子。Q 因子能通过示波器直接测得, 可综合反映眼图质量。Q 值越高, 表明眼图质量越好, 信噪比越大。结合图 5 与表 4 可以看出, B2B 传输后的各模式眼图质量均优于 10 km FMF 传输后的眼图质量。经 10 km FMF 传输后, 各路信号 Q 值均减小, 接收眼图的张开幅度减小, 信号抖动增强, 这主要是由于在长距离传输时信号的传输受模式串扰的影响比 B2B 传输时严重。在两种传输条件下, 模式为 LP_{01} 的信号对应的 Q 值始终大于模式为 LP_{11a} 和 LP_{11b} 两路信号对应的 Q 值, 说明模式为 LP_{01} 的信号质量优于其他两路信号, 这是由于在 FMF 传输过程中, 简并模之间的模式耦合相对严重, 引起的模式串扰更为明显。另外, 模式为 LP_{11b} 的信号的眼图质量优于模式为 LP_{11a} 的信号, 结合表 3 中的

表 4 Q 因子

Table 4 Q factors

Transmission condition	B2B- LP_{01}	B2B- LP_{11a}	B2B- LP_{11b}	10 km- LP_{01}	10 km- LP_{11a}	10 km- LP_{11b}
Q factor	15.42	12.32	13.28	12.94	10.65	11.34

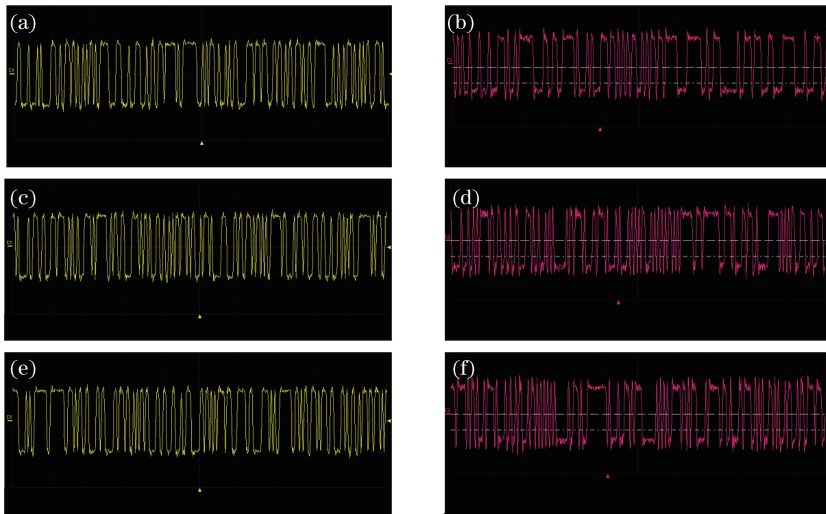


图 4 经 B2B 传输与 10 km FMF 传输后得到的接收信号波形。(a) B2B-LP₀₁; (b) 10 km-LP₀₁; (c) B2B-LP_{11a}; (d) 10 km-LP_{11a}; (e) B2B-LP_{11b}; (f) 10 km-LP_{11b}

Fig. 4 Received signal waveforms after B2B transmission and 10 km FMF transmission. (a) B2B-LP₀₁; (b) 10 km-LP₀₁; (c) B2B-LP_{11a}; (d) 10 km-LP_{11a}; (e) B2B-LP_{11b}; (f) 10 km-LP_{11b}

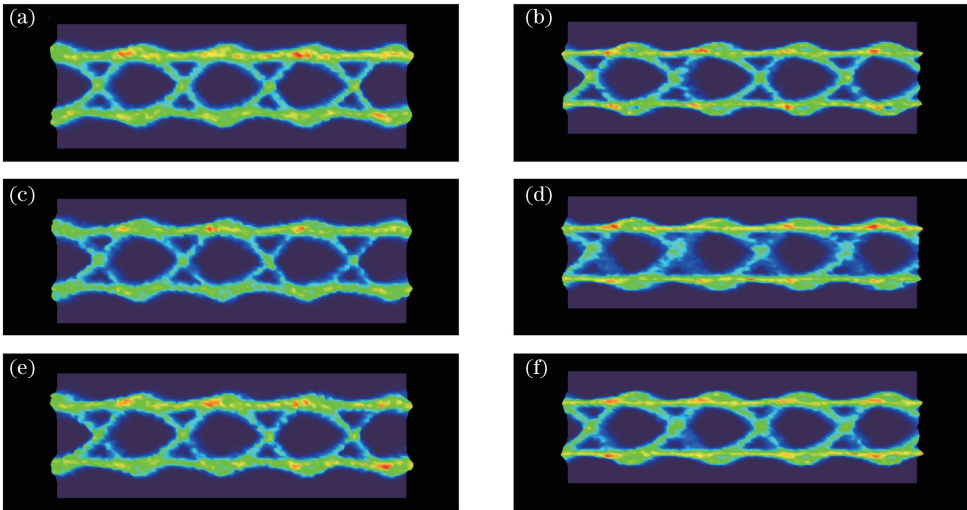


图 5 经 B2B 传输与 10 km FMF 传输后接收到的信号眼图。(a) B2B-LP₀₁; (b) 10 km-LP₀₁; (c) B2B-LP_{11a}; (d) 10 km-LP_{11a}; (e) B2B-LP_{11b}; (f) 10 km-LP_{11b}

Fig. 5 Eye diagrams of received signals after B2B transmission and 10 km FMF transmission.

(a) B2B-LP₀₁; (b) 10 km-LP₀₁; (c) B2B-LP_{11a}; (d) 10 km-LP_{11a}; (e) B2B-LP_{11b}; (f) 10 km-LP_{11b}

数据可以看出,在接入 10 km FMF 后, $C_{LP_{01} \rightarrow LP_{11b}} < C_{LP_{01} \rightarrow LP_{11a}}$, 说明 LP₀₁ 中串扰至 LP_{11a} 的功率高于 LP_{11b}。这可能是造成 LP_{11a} 模式信道的传输质量低于 LP_{11b} 模式信道的原因。

为了进一步分析系统的传输性能,实验记录了模式为 LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 三路信号在 B2B 传输和 10 km FMF 传输情况下误码率 B_{ER} 随接收功率的变化。测试过程中,对三路信号的入射功率同时进行调整,并保持大小一致。实验结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,在 B2B 传输条件下,当接收功率分别为 -20.4 dBm、-17.6 dBm、-18.5 dBm 时,模式为 LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 的三路信号的误码率均能达到 10^{-3} ; 在接入 10 km FMF 后,模式为 LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 三路信号的接收功率分别增加至 -19.1 dBm、-15.8 dBm、-16.6 dBm 时,误码率才能达到 10^{-3} 。相比于 B2B 传输,在经 10 km FMF 传输后,LP₀₁ 模式、LP_{11a} 模式和 LP_{11b} 模式分别需要付出 1.3 dBm、1.8 dBm、1.9 dBm 的代价后才能达到相同的传输性能。

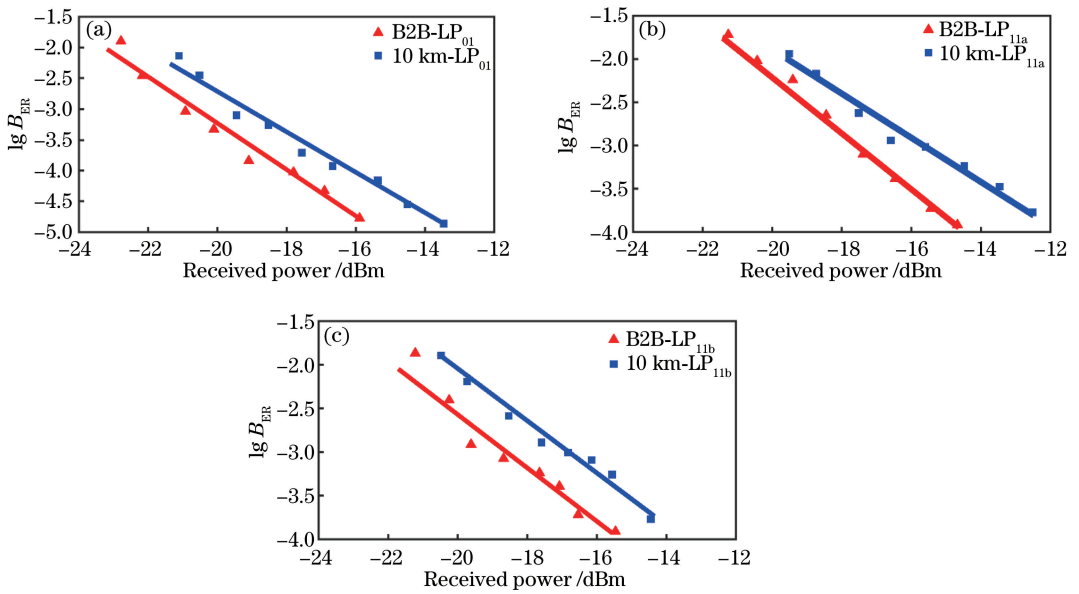


图 6 接收功率与 B_{ER} 的相关曲线。(a) LP_{01} 模式；(b) LP_{11a} 模式；(c) LP_{11b} 模式

Fig. 6 Correlation curves of B_{ER} versus received power. (a) LP_{01} mode; (b) LP_{11a} mode; (c) LP_{11b} mode

4 结 论

采用弱模式耦合 FMF 和模式选择性 PL 型 MUX/DEMUX, 建立了 3×3 的 MDM 通信实验系统。以 LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b} 三个模式信号通道作为独立信道, 采用强度调制和直接检测方式, 实现了 3×4.25 Gbit/s 非归零编码信号的 10 km 有效传输, 实验测试了信号的波形、眼图及误码率。当三路信号的接收功率分别为 -19.1 dBm、 -15.8 dBm、 -16.6 dBm 时, 各路信号的误码率均达到 10^{-3} 。所建立的 MDM 实验系统接收端不需要复杂的 MIMO 信号处理过程, 结构简单, 具有低成本优势, 适用于光接入网等短距离通信场景。

参 考 文 献

- [1] Wong E. Survivable architectures for time and wavelength division multiplexed passive optical networks[J]. Optics Communications, 2014, 325: 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 J 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] Yu Jun, Huang Mingliu, Zou Yaozhao, *et al.* Phase noise cancellation for coherent optical OFDM system based on polarization diversity[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0806001.
余骏, 黄鸣柳, 邹焱昭, 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.
- [4] Xu Yunxiang, Xu Mengmeng, Sun Jianfeng, *et al.* Integrated technology of communication and velocity measurement in satellite coherent optical communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 120603.
许云祥, 许蒙蒙, 孙建锋, 等. 卫星相干光通信测速一体化技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 120603.
- [5] Li Chao, Zhao Jian, Wang Wei, *et al.* 4×100 Gbit/s long-distance quasi-single-mode bi-directional transmission with few-mode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(2): 0206001.
李超, 赵健, 王伟, 等. 4×100 Gbit/s 少模光纤长距离准单模双向传输的实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0206001.
- [6] Ercan B, Salazargil J R, Blandhawthorn J, *et al.* Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 1036-1044.
- [7] Fang Yan, Hu Guijun, Gong Caili, *et al.* Mode demultiplexing based on cascaded independent component analysis for mode division multiplexing system with high mode group delay[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(8): 0806001.

- 方妍, 胡贵军, 宫彩丽, 等. 高模式群时延模分复用系统的级联独立成分分析解复用技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0806001.
- [8] Ryf R, Fontaine N K, Chen H, *et al.* 72-Tb/s transmission over 179-km all-fiber 6-mode span with two cladding pumped in-line amplifiers[C]. IEEE European Conference on Optical Communication, 2015: 15636220.
- [9] Esmaelpour M, Ryf R, Fontaine 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.
- [10] Hayashi T, Nagashima T, Yonezawa K, *et al.* Six-mode 19-core fiber with 114 spatial modes for weakly-coupled mode-division-multiplexed transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 748-754.
- [11] Gasulla I, Kahn J M Performance of direct-detection mode-group-division multiplexing using fused fiber couplers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(9): 1748-1760.
- [12] Lenglé K, Insou X, Jian P. 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.
- [13] Ren F, Li J H, Wu Z Y, *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.
- [14] Eznavah Z S, Lopez J E A, Galmiche G L, *et al.* Few mode multicore photonic lantern multiplexer[C]. Optical Fiber Communications Conference, 2016: Tu31.5.
- [15] Velazquez-Benitez A M, Alvarado J C, Lopez-Galmiche G, *et al.* Six mode selective fiber optic spatial multiplexer[J]. Optics Letters, 2015, 40(8): 1663-1666.
- [16] Yerolatsitis S, Gris-Sánchez I, Birks T A. Adiabatically-tapered fiber mode multiplexers[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 608-617.
- [17] Le Yansi, Wang Zhi, Li Qiang, *et al.* Research of three mode fiber multiplexers and demultiplexers[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(6): 0606004.
乐燕思, 王智, 李强, 等. 光纤型三模式复用解复用器的研究[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0606004.
- [18] Han Y Y, Hu G J. A novel MUX/DEMUX based on few-mode FBG for mode division multiplexing system[J]. Optics Communications, 2016, 367: 161-166.