

# 基于光子灯笼的 $6\times 6$ 模分复用传输实验

谭越心<sup>1</sup> 陈嘉轲<sup>1</sup> 吴平<sup>2</sup> 刘峰<sup>2</sup> 胡贵军<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 温州大学 电气与电子工程学院, 浙江 温州 325035)

**摘要** 利用模式选择性光子灯笼作为模式复用/解复用器, 实验搭建了 $6\times 6$ 模分复用通信系统, 利用 $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 、 $LP_{11b}$ 、 $LP_{21a}$ 、 $LP_{21b}$ 、 $LP_{02}$ 这六个模式作为独立的传输信道, 采用强度调制和直接检测(IM-DD)的方法, 实现了 $6\times 4$ , 25 Gbit/s 伪随机信号的 B2B、10 km 少模光纤(FMF)传输, 实验观察了信号的眼图, 测试了其误码性能. 实验结果表明: 对 B2B、10 km FMF 传输, 当接收功率分别高于 $-16.77$ 、 $-12.74$  dBm 时, 误码率均能达到 $10^{-3}$ 量级.

**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

## 1 研究前言

近几年来, 由于新时代云计算、物联网、大数据等新型宽带业务的迅猛发展, 以及传统行业与互联网的深度融合, 人们对光网络带宽的需求呈现爆炸式增长, 对通信系统的容量有了更高要求<sup>[1,2]</sup>. 目前以单模光纤为传输媒质的光纤通信系统受非线性效应的影响, 网络容量逐渐趋近于理论极限<sup>[3]</sup>. 因此, 国内外研究人员纷纷利用基于少模光纤(FMF)或多芯光纤(MCF)的空分复用(SDM)技术来使光纤的传输容量得到进一步的提升<sup>[4-5]</sup>. 而基于少模光纤(FMF)的模分复用(MDM)技术作为空分复用的一个类型<sup>[6]</sup>, 利用 FMF 中有限个正交模式作为独立信道进行信息的传输, 从而成倍的提高子系统的传输容量.

作为实现模分复用通信的关键器件, 实验中所采用的模式复用/解复用器<sup>[7]</sup>发挥着重要的作用. 模式复用/解复用器主要分为光纤光栅型模式复用器<sup>[8]</sup>、非对称定向耦合型模式复用器<sup>[9]</sup>、自由空间型复用器<sup>[10]</sup>及“光子灯笼”型复用器<sup>[11]</sup>. 光纤光栅型模式复用器的原理是将具有周期性结构凹槽的刻蚀板压在少模光纤上面, 光纤中的折射率因为受到其弹光系数的影响而产生周期性变化, 从而实现模式的转换. 它易于集成, 但是需要严格控制纵向相位匹配条件, 从而限制了它们的操作带宽; 非对称定向耦合型模分复用器是目前采用较多的结构, 其利用相位匹配原理, 可以实现不同模式之间的转换; 自由空间型复用器在模式纯度和模式串扰等方面存在优势, 但因需要复杂的光学平台等受到了实验条件的限制. 光子灯笼型模式复用/解复用器可以将模式转换和模式耦合高度集成, 具有低插入损耗(IL)与低模式相关损耗(MDL)的特性, 结构相对简单, 具有更好的实用性与灵活性.

近几年来, 各国纷纷报道了一些基于少模光纤模分复用传输实验的相关内容. 2016年 ECOC 会议上, Ryf 等人采用了 10 个模式进行模分复用通信实验, 实验采用光子灯笼作为模分复用/解复用器, 完成了 30 GBaud QPSK 信号的 121 km MMF 的传输实验, 接收端利用相干接收和 MIMO 数字信号处理单元, 对信号有较好的恢复作用<sup>[12]</sup>. 2018年 OFC 会议上, John 等人利用光子灯笼作为模式复用器, 以 $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 、 $LP_{11b}$ 为独立传输信道完成了具有记录意义的 2400 km 16QAM 信号复用传输实验, 接收端采用了 MIMO 信号作为处理单元<sup>[13]</sup>. 对于上述长距离的 MDM 传输实验, 通常需要相干接收和 MIMO 数字信号处理来恢复随机模式耦合与串扰的信号, 这通常会增加传输的复杂性和成本, 不适用于短距离互连应用场景. 2017年, 吉林大学陈嘉轲等利用光子灯笼作为模式复用/解复用器, 利用三个模式作为独立信道, 完成了 $3\times 4$ , 25 Gbit/s

收稿日期: 2019-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575078); 浙江省重点研发专项(2019c05010)资助

通讯作者: 胡贵军, 男, 汉族, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 光纤通信技术和器件等, E-mail: hugj@jlu.edu.cn.

信号的 10 km 传输<sup>[14]</sup>. 2018 年 OFC 会议上, Liu 等人利用模式选择性光子灯笼作为复用/解复用器, 以 LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub>, LP<sub>21</sub> 三个模式群作为三个独立传输信道, 建了 3×10 Gbit/s 信号的模式群复用通信系统, 传输距离为 20km, 并采用 OOK 调制格式时实现了信号的直接探测<sup>[15]</sup>.

目前关于直接检测且不需要 MIMO 信号处理的 MDM 传输实验通常以 3 个模式作为独立信道, 而要实现更大容量的信息传输, 必须实现更多模式信道的模分复用. 本文采用了六个模式作为独立的传输信道, 采用强度调制/直接检测(IM-DD)的方法, 实现了 6 路 4.25 Gbit/s 伪随机信号 B2B 和 10 km 少模光纤(FMF)的传输实验, 观察了信号的眼图, 并测试了系统的误码性能. 在接收端未采用 MIMO 信号处理条件下, 对于 B2B、10 km FMF 传输, 当接收功率分别高于 -16.77、-12.74 dBm 时, 误码率均能达到 10<sup>-3</sup> 量级.

## 2 基于光子灯笼的 6x6 模分复用通信实验系统

本文搭建的 MDM 通信实验系统如图 1 所示. 在发送端, 用两个码发生器(e-BERT)输出 4.25 Gbps 伪随机序列, 序列长度为 2<sup>-31</sup>. 通过电光调制器(EOM), 伪随机序列被分别加载到由中心波长为 1550.16nm 的分布式反馈半导体激光器经光分束器(OS)输出的两路光波上. 经调制后的光信号再次被两个 1×3 的光分束器分别分成三路, 形成了总共六路光信号. 为了使六路信号互不相关, 加入了不同距离的延时光纤(SMF), 以产生不同时间的信号时延, 其中, 1 km SMF 的延时为 4.9 μs, 2 km SMF 的延时为 9.8 μs. 在进入光子灯笼(PL)前, 首先采用增加掺铒光纤放大器(EDFA), 实现对入射光子灯笼前各路光功率的一些调整. 此后, 将六路调整过的光信号分别送入光子灯笼 1(PL1)的 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>、LP<sub>21a</sub>、LP<sub>21b</sub>、LP<sub>02</sub> 的输入端, 首先由第一个光子灯笼(PL1)实现对六路模式

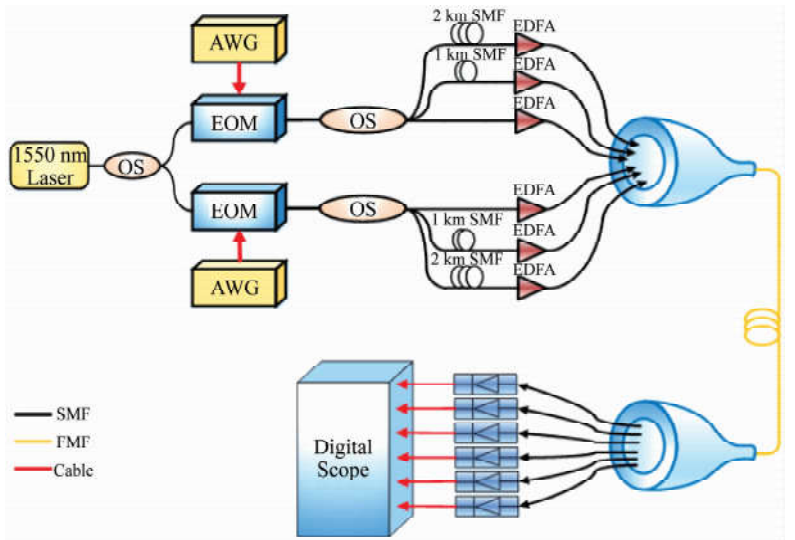


图 1 基于光子灯笼的 MDM 通信实验系统框图

笼 1(PL1)的 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>、LP<sub>21a</sub>、LP<sub>21b</sub>、LP<sub>02</sub> 的输入端, 首先由第一个光子灯笼(PL1)实现对六路模式

表 1 少模光纤参数

Parameter	Value
The diameter of core	12.85 μm
The diameter of cladding	124.96 μm
The relative refractive index of the core	1.4702
The relative refractive index of the cladding	1.4574
Loss Factor of LP <sub>01</sub>	0.162 dB/km
Loss Factor of LP <sub>11a</sub>	0.173 dB/km
Loss Factor of LP <sub>11b</sub>	0.178 dB/km
Loss Factor of LP <sub>21a</sub>	0.180 dB/km
Loss Factor of LP <sub>21b</sub>	0.183 dB/km
Loss Factor of LP <sub>02</sub>	0.188 dB/km
Mode coupling coefficient(LP <sub>01</sub> -LP <sub>11a</sub> )	-27.75 dB/km
Mode coupling coefficient(LP <sub>01</sub> -LP <sub>11b</sub> )	-26.16 dB/km
Mode coupling coefficient(LP <sub>01</sub> -LP <sub>21a</sub> )	-26.73 dB/km
Mode coupling coefficient(LP <sub>01</sub> -LP <sub>21b</sub> )	-24.55 dB/km
Mode coupling coefficient(LP <sub>01</sub> -LP <sub>02</sub> )	-24.68 dB/km
Differential Mode Delay(LP <sub>01</sub> -LP <sub>11</sub> )	2.548 ps/m
Differential Mode Delay(LP <sub>01</sub> -LP <sub>21</sub> )	5.658 ps/m
Differential Mode Delay(LP <sub>01</sub> -LP <sub>02</sub> )	5.992 ps/m

的转换和复用,实现对高阶模的转化,复用后的信号经 FMF 传输后到达接收端.由第二个光子灯笼(PL2)进行解复用并转换为 LP01 模,采用光电探测器(PD)对转换为基模后的六路光信号进行直接探测,最后通过数字示波器观测并记录各路信号眼图的变化情况.

实验使用的少模光纤为烽火公司生产的 6 模光纤,表 1 给出了它的相关参数,实验测量了 10km 少模光纤系统(含两个光子灯笼)的串扰矩阵,如下表 2 所示.我们可以看出  $LP_{11a}$  与  $LP_{11b}$ ,  $LP_{21a}$  与  $LP_{21b}$  两组简并模之间的串扰与其他模式之间串扰相比较较大,但仍能满足传输要求.

表 2 10 km FMF 传输后系统各个模式串扰

Input Output/dB	LP01	LP11a	LP11b	LP21a	LP21b	LP02
LP01	-	-18.91	-16.23	-24.78	-23.87	-19.13
LP11a	-15.76	-	-13.22	-16.86	-13.47	-17.20
LP11b	-18.86	-14.16	-	-15.30	-14.93	-15.94
LP21a	-22.13	-15.85	-16.84	-	-13.78	-17.68
LP21b	-20.16	-16.42	-15.06	-14.75	-	-19.02
LP02	-20.51	-26.42	-20.92	-16.87	-16.43	-

本实验采用了 OLkin Optics 公司生产的具有模式选择性光子灯笼作为模式复用/解复用器,该光子灯笼具有 6 个端口,可以同时实现 6 个模式的转换和复用/解复用,如图 2 所示.表 3 是 OLkin Optics 公司给出的光子灯笼的主要技术指标,表 4 是实际测量得到的光子灯笼各个端口的插入损耗,表 5 是实际测量得到的光子灯笼的串扰矩阵.

表 3 光子灯笼主要技术指标

Parameter	Specification
Input Fiber	6 SMF fiber pigtaills
Output Fibers	6 modestepp index fiber, 1m
Insertion loss	<3 dB for all ports
Mode purities	>8 dB

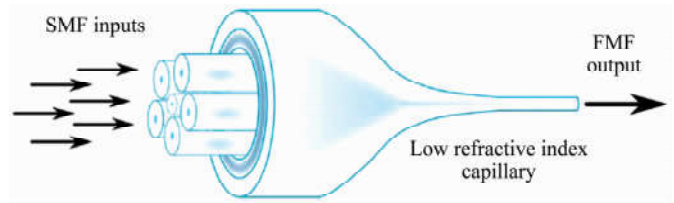
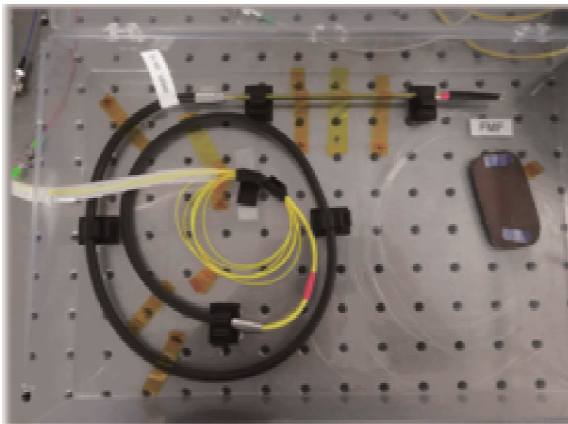


图 2 光子灯笼原理框图

表 4 光子灯笼各端口插入损耗

Insertion Loss/dB	LP <sub>01</sub> Port	LP <sub>11a</sub> Port	LP <sub>11b</sub> Port	LP <sub>21a</sub> Port	LP <sub>21b</sub> Port	LP <sub>02</sub> Port
PL1	1.467	1.549	2.194	2.932	3.411	4.984
PL2	1.167	1.278	2.094	2.802	3.365	4.390

表 5 光子灯笼各个模式串扰

Input Output/dB	LP <sub>01</sub>	LP <sub>11a</sub>	LP <sub>11b</sub>	LP <sub>21a</sub>	LP <sub>21b</sub>	LP <sub>02</sub>
LP <sub>01</sub>	-	-21.90	-21.15	-29.45	-29.12	-21.86
LP <sub>11a</sub>	-18.90	-	-18.80	-22.41	-19.67	-20.48
LP <sub>11b</sub>	-19.19	-18.26	-	-20.50	-20.85	-20.10
LP <sub>21a</sub>	-26.82	-23.91	-25.93	-	-18.40	-21.63
LP <sub>21b</sub>	-23.49	-20.74	19.75	-17.62	-	-22.03
LP <sub>02</sub>	-24.03	-29.35	-24.26	-20.43	-21.63	-

光子灯笼的一端为少模光纤,中间为锥形过渡区.该器件的基本工作原理是将 $N$ 根单模光纤放置于低折射率的毛细管道中,通过光纤拉锥技术,使管道半径逐渐收缩,直到单模光纤的纤芯消失,原来的单模光纤包层变成了少模光纤的纤芯,而毛细管道则变成了少模光纤的包层, $N$ 根单模光纤中的基模在毛细管中演变成“超模”,演变的“超模”的光场分布与少模光纤中的高阶模式的光场分布具有一致性,从而实现模式转换和模式复用.而根据光路可逆原理,将其进行反向应用时,即可实现模式解复用的功能.

### 3 实验结果及分析

我们在实验中,测试了六个模式( $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 、 $LP_{11b}$ 、 $LP_{21a}$ 、 $LP_{21b}$ 、 $LP_{02}$ )同时在MDM通信系统中传输的传输性能,记录了它们在背对背(B2B)传输下和在10 km六模FMF传输下的眼图.如图3所示为6路信号在两种情况下分别传输后的眼图,图4给出了6路信号在10 km FMF传输后的眼图.

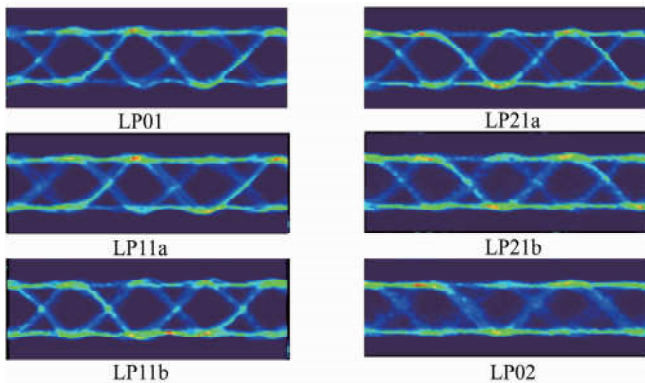


图3 MDM通信实验系统B2B传输接收信号眼图

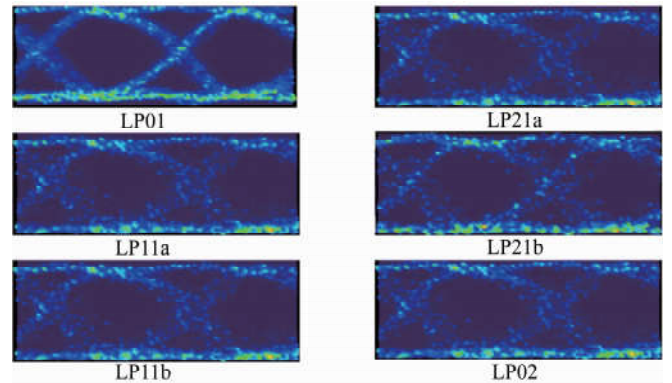


图4 MDM通信实验系统10 km FMF传输接收信号眼图

由图3和图4可以看出,与B2B传输相比,经10 km FMF传输后,各路信号接收的眼图质量变差,眼图张开幅度减小,且高阶模式尤为明显.其原因主要是:受到了模间串扰的影响,模间串扰随着传输距离的增加而变大,使接收信号的质量从而受到影响; $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 、 $LP_{21a}$ 和 $LP_{21b}$ 为同模组的简并模,由表3可以看出模间串扰在 $-18$  dB左右,相对较大;并且由表1知,高阶模的传输损耗较大.这些均影响着MDM通信实验系统的通信质量及信号的传输距离.图5给出了上述6个模式在B2B和10 km的6模少模光纤传输中,误码率(BER)随接收功率变化曲线.

从图5可知,MDM通信实验系统的误码率随接收功率的增大而减小.在B2B传输中,六个模式接收功率分别为 $-19.51$ 、 $-18.22$ 、 $-18.03$ 、 $-18.47$ 、 $-18.84$ 、 $-16.77$  dBm,此时系统的误码率达到 $10^{-3}$ 的要求.当经过10 km六模FMF传输后,六个模式的接收功率需要分别增加至 $-16.83$ 、 $-13.97$ 、 $-13.83$ 、 $-14.91$ 、 $-14.68$ 、 $-12.74$  dBm,我们所搭建的实验系统才能达到 $10^{-3}$ 误码率要求.与B2B相比,在经10 km FMF传输后,六个模式所对应的信道分别需要付出2.68、4.25、4.20、3.56、4.16、4.03 dBm的代价,才能拥有相同的传输性能.

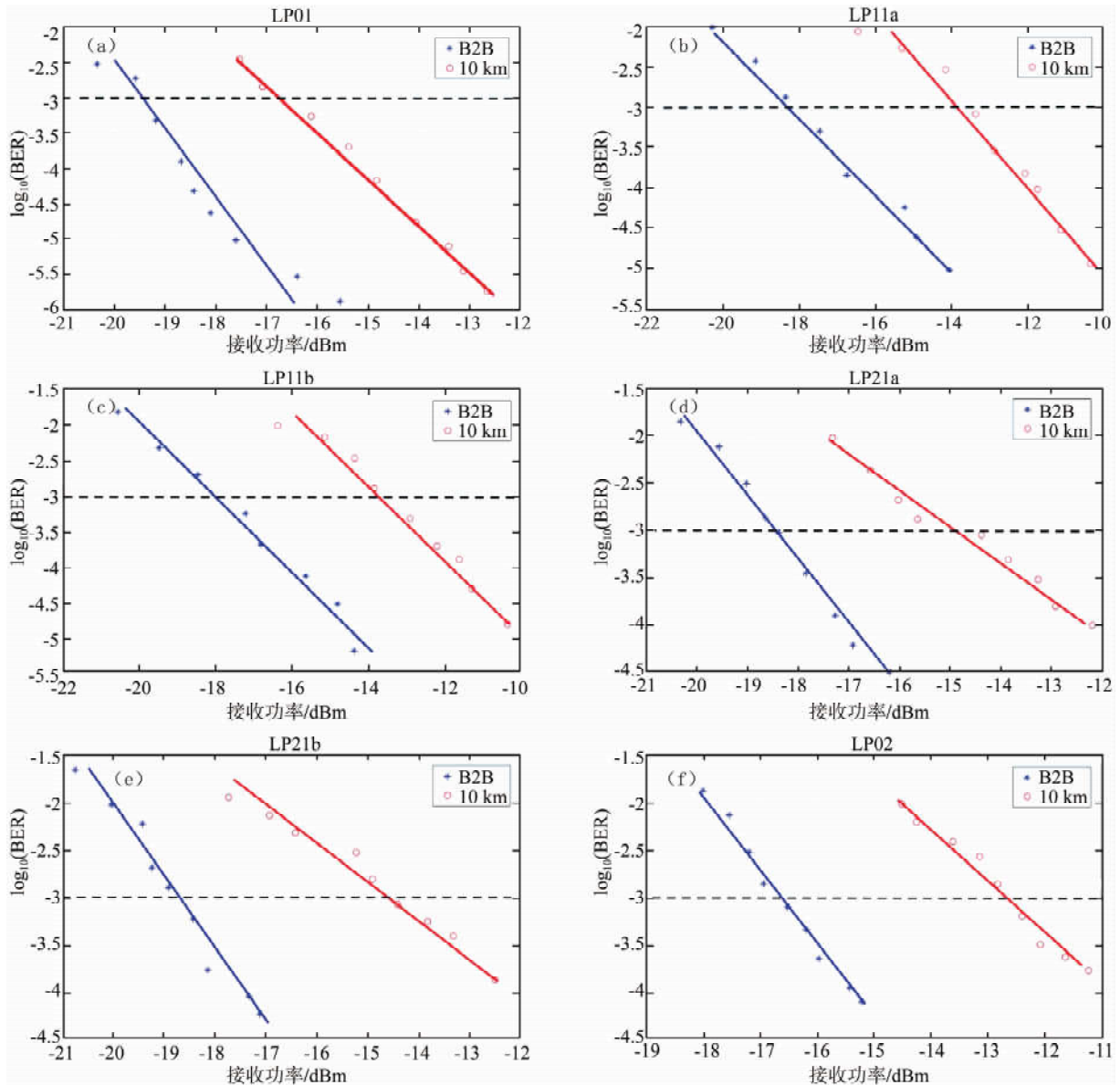
对比分析该模分复用通信实验系统中六路信号的误码率曲线可以看出, $LP_{01}$ 路信号的误码特性略优于其他各路,这与各路模式信号在眼图方面表现出的特性是一致的.总体来说,对采用直接检测且不需要MIMO信号处理的MDM传输而言,在经过10 km FMF传输后,接收到的6路模式对应的眼图仍能保持较为清晰的程度,且在接收功率高于 $-12.74$  dBm时,6路模式同时传输,接收信号的BER低于 $10^{-3}$ 量级.

### 4 结论及展望

本文采用强度调制和直接检测(IM-DD)的方法,搭建了基于光子灯笼的 $6\times 6$ MDM通信实验传输系统.实验结果显示,当接收功率分别高于 $-16.77$ 、 $-12.74$  dBm时,该模分复用系统接收端无需采用MIMO信号处理,即可分别实现在B2B和10 km少模光纤下较为良好的信号传输,此时各信道误码率均低于 $10^{-3}$ .

从模分复用通信系统未来的发展角度来看,可从三个方面来进一步改善模分复用通信系统的性能:更大的信息容量 制作具有更多模式的光子灯笼,从而提升其传输信息的容量;更小的串扰增加光子灯笼的模式

隔离度,从而增加其传输信号的质量;更高的速率引入多种复用方式,从而实现系统更高速率的信号传输。



注:(a)LP<sub>01</sub>模;(b)LP<sub>11a</sub>模;(c)LP<sub>11b</sub>模;(d)LP<sub>21a</sub>模;(e)LP<sub>21b</sub>模;(f)LP<sub>02</sub>模。

图5 各路信号接收功率与误码率的相关曲线

模分复用通信系统作为近年来重要的研究热点之一,在提升传输容量方面拥有着巨大的潜力,被认为是当今快速增长的系统带宽情况下最具可行性的光扩容方案.期待在未来的若干年里,模分复用通信系统能够获得更多的关注,得到更加快速的发展。

### 参 考 文 献

- [1] 吴建平,李星,刘莹.下一代互联网体系结构研究现状和发展趋势[J].中兴通讯技术,2011,17(2):10-14.
- [2] Chen C L P,Zhang C Y. Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies; a survey on big data[J]. Information Sciences,2014,275(11): 314-347.
- [3] 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):285-290.
- [4] Liang Xiaojun,Li Wei-Ling,Willim A Wood,et al. Transmission of wireless signals using space division multiplexing in few mode fibers [J]. Optics Express,2018,26(16):20507-20518.
- [5] Taiji Sakamoto,Kunimasa Saitoh,Shota Saitoh,et al. Six-mode seven-core fiber for repeated dense space-division multiplexing transmission [J]. Journal of Lightwave Technology,2018,36(5):1226-1232.
- [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] 常玉鑫,胡贵军,柏松,等.非对称平面光波导型模式复用/解复用器研究[J].中国激光,2014,41(12):131-135.

- [8] Zhao Yunhe, Wang Tingyun. All-fiber mode converter based on long-period fiber gratings written in few-mode fiber[J]. *Opt Lett*, 2017, 42:4708-4711.
- [9] Chang S H, Moon S R, Chen H, et al. All-fiber 6-mode multiplexers based on fiber mode selective couplers[J]. *Opt Express*, 2017, 25(5): 5734-5741.
- [10] Prieto B X, Montero O C, Moreno V, et al. Chromatic characterization of ion-exchanged glass binary phase plates for mode-division multiplexing[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(11): 3308-3314.
- [11] Leon-Saval, Sergio G. The photonic lantern[C]. // *Optical Fiber Communication Conference*, 2017.
- [12] Ryf R, Chen H, Fontaine N K, et al. 10-Mode mode-multiplexed transmission with inline amplification[C]. // *42nd European Conference on Optical Communication*, 2016.
- [13] John van Weerdenburg, Roland Ryf, Roberto Alvarez-Aguirre, et al. Mode-multiplexed 16-QAM transmission over 2400-km large-effective-area depressed-cladding 3-mode fiber[C]. // *Optical Fiber Communication Conference*, 2018.
- [14] 陈嘉轲, 胡贵军, 韩悦羽. 基于光子灯笼的  $3 \times 3$  模分复用通信实验研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 222-228.
- [15] Amezcuaacorrea A, Li G, Wen H, et al.  $3 \times 10$  Gb/s mode group-multiplexed transmission over a 20 km few-mode fiber using photonic lanterns[C]. // *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, Los Angeles, CA, USA, 2017.

## Six-mode Mode Division Multiplexing Transmission Experiment Based on Photonic Lantern

TAN Yue-xin<sup>1</sup> CHEN Jia-ke<sup>1</sup> WU Ping<sup>2</sup> LIU Feng<sup>2</sup> HU Gui-jun<sup>1</sup>

(1. School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

**Abstract** In this paper, a mode selective photonic lantern is used as a mode multiplexing/demultiplexer to build a  $6 \times 6$  mode multiplexing communication system in the experiment, using LP01, LP11a, LP11b, LP21a, LP21b, LP02 as independent transmission channels, using intensity modulation and direct The detection (IM-DD) method realizes B2B and 10 km mode-less optical fiber (FMF) transmission of  $6 \times 4$ . 25 Gbit/s pseudo-random signals. The eye diagram of the signal was observed experimentally and its bit error performance was tested. The experimental results show that for B2B and 10 km FMF transmission, when the received power is higher than  $-16.77$  and  $-12.74$  dBm respectively, the bit error rate can reach  $10^{-3}$ .

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