

# 基于相位调制-相干检测的模分复用通信实验

张强, 郭玉彬, 陈嘉轲, 胡贵军\*

吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012

**摘要** 采用光子灯笼作为模式复用/解复用器, 搭建了  $6 \times 6$  的模分复用通信实验系统, 利用 6 个模式作为独立传输信道, 采用相位调制-相干检测的方式, 通过离线信号处理, 在 10 km 少模光纤的传输条件下实现了  $6 \times 8.5$  Gbit/s 信号的良好传输。实验结果表明: 当  $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 、 $LP_{11b}$ 、 $LP_{21a}$ 、 $LP_{21b}$ 、 $LP_{02}$  模式的接收功率分别为  $-37.84$  dBm、 $-36.47$  dBm、 $-36.20$  dBm、 $-35.27$  dBm、 $-35.37$  dBm、 $-35.79$  dBm 时, 各路信号的误码率均可达到  $10^{-3}$  以下。

**关键词** 光通信; 光纤通信; 模分复用; 光子灯笼; 少模光纤

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0306001

## A Communication Experiment Using Mode Division Multiplexing with Phase Modulation-Coherent Detection

Zhang Qiang, Guo Yubin, Chen Jiake, Hu Guijun\*

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

**Abstract** In this study, we have developed a  $6 \times 6$  mode-division-multiplexing communication experimental system using a photon lantern as the mode multiplexer/demultiplexer. Further, we can achieve a signal transmission rate of  $6 \times 8.5$  Gbit/s in a 10-km few-mode fiber using a phase modulation and coherent detection system via offline digital signal processing. The results denote that the bit error rate of each signal can be less than  $10^{-3}$  when the received signal powers of  $LP_{01}$ ,  $LP_{11a}$ ,  $LP_{11b}$ ,  $LP_{21a}$ ,  $LP_{21b}$ , and  $LP_{02}$  are  $-37.84$  dBm,  $-36.47$  dBm,  $-36.20$  dBm,  $-35.27$  dBm,  $-35.37$  dBm, and  $-35.79$  dBm, respectively.

**Key words** optical communication; optical fiber communication; mode division multiplexing; photon lantern; few-mode fiber

**OCIS codes** 060.4510; 060.1660; 060.4230

## 1 引言

随着互联网行业的快速发展, 各行各业的信息需求呈现爆炸式增长, 而光纤通信系统作为承载各类宽带业务的基础, “超大容量、超高速率、超长距离”是其发展的必然趋势<sup>[1]</sup>。目前, 光纤通信系统主要采用单芯单模光纤, 但受放大器的带宽限制以及光纤非线性的影响, 其传输容量的香农极限为  $100$  Tbit/s<sup>[2]</sup>。

有利于突破单模光纤 (SMF) 容量极限的模分复用技术受到业界的极大关注和认可<sup>[3-5]</sup>。该技术以正交的模式为独立传输信道, 通过模式复用, 成倍

地提高了光纤通信系统的传输容量。模式复用/解复用器是搭建模分复用系统的关键器件<sup>[6]</sup>, 目前主要有自由空间光学型模式复用/解复用器、波导型模式复用/解复用器、光纤耦合型模式复用/解复用器, 以及光子灯笼型模式复用/解复用器, 其中光子灯笼型模分复用/解复用器作为全光纤型器件, 具有插入损耗低、模式串扰低、工艺成本低等特性, 更具实用性。利用模式选择性光子灯笼, Randel 等<sup>[7]</sup>完成了 6 个模式  $20$  Gbit/s 正交相移键控 (QPSK) 信号的复用传输实验, 传输距离达  $1200$  km; van Weerdenburg 等<sup>[8]</sup>基于 PM-16QAM (polarization multiplexed 16-state quadrature amplitude

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2019-09-27; 录用日期: 2019-10-14

基金项目: 国家自然科学基金 (61575078)

\* E-mail: hugj@jlu.edu.cn

modulation)调制格式,将波分复用与模分复用相结合,在 650 km 的少模光纤上实现了 138 Tbit/s 的传输速率;Soma 等<sup>[9]</sup>利用 10 个模式在单芯光纤上实现了 257 Tbit/s 的传输速率,可以看出模分复用技术在提升传输容量方面潜力巨大。

近年来,国内模分复用技术的相关研究也取得了一定进展。陈健等<sup>[10]</sup>采用正交频分复用强度调制-直接检测的方式,在 50 m 的 OM4 多模光纤上实现了  $2 \times 3.6$  Gbit/s 的信号复用传输;陈嘉轲等<sup>[11]</sup>采用强度调制-直接检测的方式,在 10 km 的少模光纤上实现了 3 个模式传输速率为 4.25 Gbit/s 的复用传输;Wu 等<sup>[12]</sup>采用强度调制-直接检测的方式,将波分复用与模分复用相结合,在 21 km 的 OM3 光纤上实现了  $3 \times 4 \times 10$  Gbit/s 的复用传输;Hu 等<sup>[13]</sup>采用强度调制-直接检测的方式,在 10 km 的少模光纤上实现了 4 个模式 10 Gbit/s 的复用传输。可以看出,国内在模分复用领域目前仍处于追赶的阶段,这主要是由于:目前所研究的模分复用系统利用的模式数量较少,对通信系统容量提升的效果有限;采用强度调制-直接检测方式搭建的系统仅适用于数据中心互联、本地接入网等短距离通信场景,无法满足当前国干、省干通信系统的超高速率、超长距离的使用需求。本文实验系统选择使用渐变型少模光纤和模式选择性光子灯笼,抑制传输过程中各模式间的串扰,有利于在不使用复杂多输入多

输出(MIMO)信号处理的情况下实现 6 个模式信号的同时传输;系统采用了相位调制-相干检测方式,既可以在保证信号误码性能的同时提高频谱利用率,又可以提升接收机灵敏度,延长光信号的无电中继传输距离。

## 2 基于光子灯笼的模分复用实验系统

本文设计并搭建的实验系统如图 1 所示。系统中的光源为两个可调谐连续激光器,中心波长为 1550 nm,其中一个激光器经光分束器接入两个 IQ (in-phase quadrature) 调制仪 (KG-QPSK-40G-FA),另一个激光器作为本振光源接入相干接收机 (ICR-100-EVK)。由误码分析仪 (eBERT, ET10A-10G) 发送 4 路传输速率为 4.25 Gbit/s 的二进制伪随机序列,分别接入 IQ 调制仪的 I 路和 Q 路,调制后形成速率为 8.5 Gbit/s 的 QPSK 信号,并加载到激光器发出的光束上,随后经光分束器(OS)将每路调制后的光信号分为三路。在进入光子灯笼(PL)前,需在不同光路中分别加入一定长度的光纤,通过时延去除各路光信号间的相关性。由掺铒光纤放大器(EDFA)平衡 6 路光信号的功率,再分别将光信号注入光子灯笼 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>、LP<sub>21a</sub>、LP<sub>21b</sub>、LP<sub>02</sub>对应的单模光纤输入端,通过光子灯笼实现模式转换与复用,在少模光纤(FMF)输出端得到上述 6 个模式复用后的光信号。复用信号经

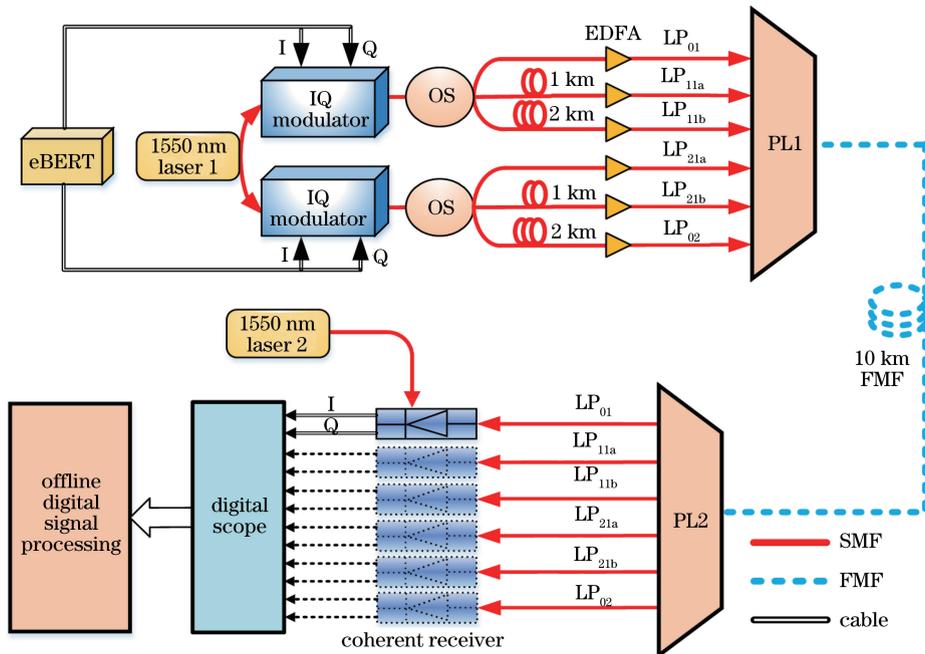


图 1 模分复用系统实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of mode division multiplexing system

10 km少模光纤传输后,在接收端利用另一个光子灯笼对复用信号进行模式解复用与转换,用相干接收机分别对6路单模光纤输出端进行信号检测接收,通过示波器(11000-11G)观测并记录各路信号波形及星座图的变化情况,最后使用 Matlab 对采样得到的信号数据进行离线处理。

模式选择性光子灯笼作为模分复用系统的关键器件,可实现模式的转换和模式的复用/解复用,其工作原理如图 2 所示。光子灯笼是通过将单模光纤阵列放于一个具有较低折射率的毛细玻璃管中,再经一定的处理使细玻璃管管道半径渐进收缩控制而成。在拉锥的过程中,单模光纤的纤芯直径都逐渐减小,光逐渐从纤芯泄漏到包层中,纤芯最终将成为无效波导,单模光纤的包层也在同步进行着融合,新的导光纤芯逐渐形成,最外面的毛细玻璃管则逐渐成为新的包层。在此过程中各个单模光纤中的基模通过耦合逐渐形成超模,随着直径的变小

以及耦合作用的加强,超模成为多个高阶模的叠加,最终进入与拉锥结构末端相连接的少模光纤中传输,从而实现了多个基模向高阶模的转换与复用<sup>[14]</sup>。模式选择性光子灯笼作为无源光组件,可实现从多个单模波导复用到一段多模波导的低损耗传输,根据光路具有可逆性,亦可实现从一段多模波导解复用到多个单模波导的低损耗传输<sup>[15]</sup>。实验中使用的光子灯笼订制于 Olkin Optics 公司,可以同时实现 6 个模式的转换与复用/解复用,所有端口的插入损耗小于 3 dB,模式纯度大于 8 dB。将基模信号从各模式端口注入光子灯笼,在输出端得到相应模式的光信号,图 3 为基模光从 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>、LP<sub>21a</sub>、LP<sub>21b</sub>、LP<sub>02</sub> 端口入射时,使用图像传感器 CCD 在光子灯笼少模输出端测得的模态图,可以看出两个光子灯笼均能实现从基模到各个高阶模式的模式转换,且具有较好的模式转换效率。

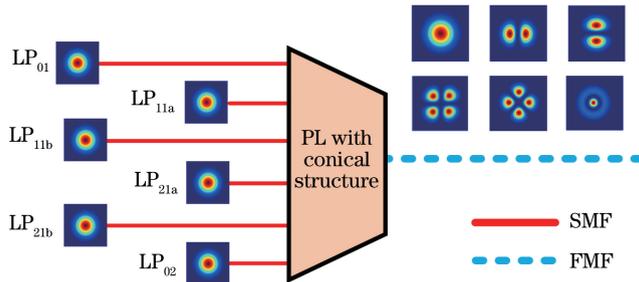


图 2 光子灯笼原理图

Fig. 2 Schematic of PL

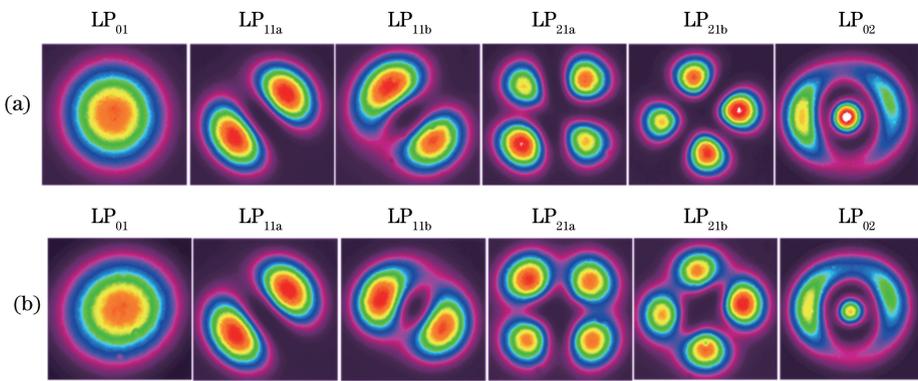


图 3 光子灯笼少模输出端的模态图。(a) 1 号光子灯笼;(b) 2 号光子灯笼

Fig. 3 Modal graphs of the few-mode outputs of PLs. (a) No. 1; (b) No. 2

实验中用到的传输光纤为 10 km 长的 4 模渐变型光纤,渐变型光纤的纤芯折射率沿径向呈抛物线变化,由内向外递减,具有自聚焦特性,可以降低模式色散,有效抑制多个模式之间的时延差以及模式耦合。当工作波长为 1550 nm 时,光纤的归一化

截止频率  $V$  介于 3.823~5.136 之间,支持 4 种 LP 模式(LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>和 LP<sub>02</sub>)传输,且 LP<sub>11</sub>和 LP<sub>21</sub>均具有 2 个简并模式,所以该光纤可用于实现 6×6 的模分复用传输。

实验中采用了基于 IQ 调制器和相干接收机的

相位调制-相干检测系统,与强度调制-直接检测系统的主要差异在于调制方式与检测方式。实验系统的发送端采用外调制,利用发送信号来改变光载波的相位,在接收端将信号光与本振光输入混频器实现相干混频,再利用平衡探测器得到输出信号。

实验中利用示波器采集相干接收机输出端的信号波形和星座图,导入 Matlab 对信号进行离线处理。受限于少模光纤长度较短,模式相关损耗、模式色散对系统传输性能影响不明显,因此未对上述因素进行离线算法补偿,信号处理主要有以下三个步骤:一是采用 Gram-Schmidt 算法对 I/Q 不平衡进行补偿,消除星座图的压缩或者拉伸;二是采用 4 阶 Viterbi-Viterbi 算法对相位偏移进行估计和补偿;三是采用 Gardner 算法进行时钟恢复,消除示波器与误码仪时钟不同步造成的采样失真。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 插入损耗与模式串扰的测量

在实验系统中,将光信号从发送端光子灯笼某一模式端口注入时,大部分光能从接收端对应端口出射,但也会有小部分光流失,即产生了插入损耗;流失的光中又有部分会串扰到其他模式信道中,并与该信道原有光信号发生耦合,对原有光信号造成额外干扰,影响模分复用系统的传输质量。本文需要对光子灯笼各个模式的插入损耗与模式串扰进行测量,以便对光子灯笼的模式转换效率和工作性能进行更全面的评估。

各模式端口的插入损耗值的计算式为

$$L_1 = P_{in} - P_{out}, \quad (1)$$

表 2 光子灯笼背靠背连接时各模式间的串扰值

Table 2 Crosstalks of different modes in back-to-back connection of PLs

Mode	Crosstalk /dB					
	Input LP <sub>01</sub>	Input LP <sub>11a</sub>	Input LP <sub>11b</sub>	Input LP <sub>21a</sub>	Input LP <sub>21b</sub>	Input LP <sub>02</sub>
Output LP <sub>01</sub>		-20.20	-20.93	-31.81	-28.32	-31.67
Output LP <sub>11a</sub>	-34.38		-19.4	-25.54	-20.61	-26.17
Output LP <sub>11b</sub>	-24.55	-18.42		-29.22	-24.41	-25.06
Output LP <sub>21a</sub>	-36.69	-24.5	-24.63		-18.53	-19.32
Output LP <sub>21b</sub>	-34.52	-20.77	-19.94	-16.87		-18.16
Output LP <sub>02</sub>	-23.05	-21.62	-19.96	-17.94	-18.22	

#### 3.2 系统传输性能测试

在实验中,测试了同时承载 8.5 Gbit/s QPSK 信号的模式 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>、LP<sub>21a</sub>、LP<sub>21b</sub>、LP<sub>02</sub> 经 10 km 少模光纤传输后的性能。6 个模式的输入信号按等光功率接入时,LP<sub>02</sub> 模式因插入损耗大其接收功率较小,与其他模式间的串扰更为严重,传输性能下降明显。在不影响其他模式的前提下,实验中

式中: $L_1$ (单位:dB)表示各模式的插入损耗, $P_{in}$ (单位:dBm)为输入端激发该模式时的入射功率, $P_{out}$ (单位:dBm)为在输出端该模式对应的出射功率。表 1 给出了两个光子灯笼背靠背连接和经 10 km 的 4 模渐变型光纤连接后各模式端口的插入损耗值。

表 1 光子灯笼各模式端口的插入损耗值

Table 1 Insertion loss of each mode port of PL

Mode	Insertion loss after	Insertion loss
	back to back transmission /dB	after 10 km FMF transmission /dB
LP <sub>01</sub>	3.64	5.56
LP <sub>11a</sub>	2.85	5.61
LP <sub>11b</sub>	4.31	6.56
LP <sub>21a</sub>	5.84	7.16
LP <sub>21b</sub>	6.89	8.81
LP <sub>02</sub>	10.22	12.01

各个模式间的串扰值可表示为

$$C_{i \rightarrow j} = P_{ji} - P_i, \quad (2)$$

式中: $C_{i \rightarrow j}$ (单位:dB)表示输入端  $i$  模式在输出端  $j$  模式上的模式串扰, $P_{ji}$ (单位:dBm)为在输入端激发  $i$  模式时输出端  $j$  模式的出射功率, $P_i$ (单位:dBm)为输入端激发  $i$  模式时的入射功率。表 2 给出了两个光子灯笼背靠背连接时各模式间的串扰,表 3 所示为两个光子灯笼经 10 km 长的 4 模渐变型光纤连接后各模式间的串扰。通过测量结果可以看出,背靠背连接时各模式间的串扰小于 -16.87 dB,而在经 10 km 少模光纤传输之后串扰小于 -15.31 dB,各模式间的串扰均有所增大,但总体相差不大,传输系统的性能并未严重劣化。

单独将 LP<sub>02</sub> 模式的输入信号光功率提高了 3 dBm,并记录了 6 路输入信号光功率分别为 -15.5 dBm、-15.5 dBm、-15.5 dBm、-15.5 dBm、-15.5 dBm、-12.5 dBm 时的信号波形和星座图,再使用 Matlab 对 6 路接收信号进行 I/Q 不平衡补偿、时钟恢复和载波恢复等离线处理,实验结果如图 4 所示。

表 3 光子灯笼经 10 km 光纤连接后各模式间的串扰

Table 3 Crosstalk between different modes of PLs connected by 10 km optical fiber

Mode	Crosstalk /dB					
	Input LP <sub>01</sub>	Input LP <sub>11a</sub>	Input LP <sub>11b</sub>	Input LP <sub>21a</sub>	Input LP <sub>21b</sub>	Input LP <sub>02</sub>
Output LP <sub>01</sub>		-19.01	-19.51	-28.16	-23.66	-30.76
Output LP <sub>11a</sub>	-29.26		-16.61	-25.06	-18.11	-24.51
Output LP <sub>11b</sub>	-21.76	-17.56		-19.31	-21.91	-22.01
Output LP <sub>21a</sub>	-29.81	-19.76	-22.71		-15.96	-17.41
Output LP <sub>21b</sub>	-29.51	-18.86	-18.86	-15.31		-16.16
Output LP <sub>02</sub>	-21.41	-20.56	-18.96	-17.51	-18.01	

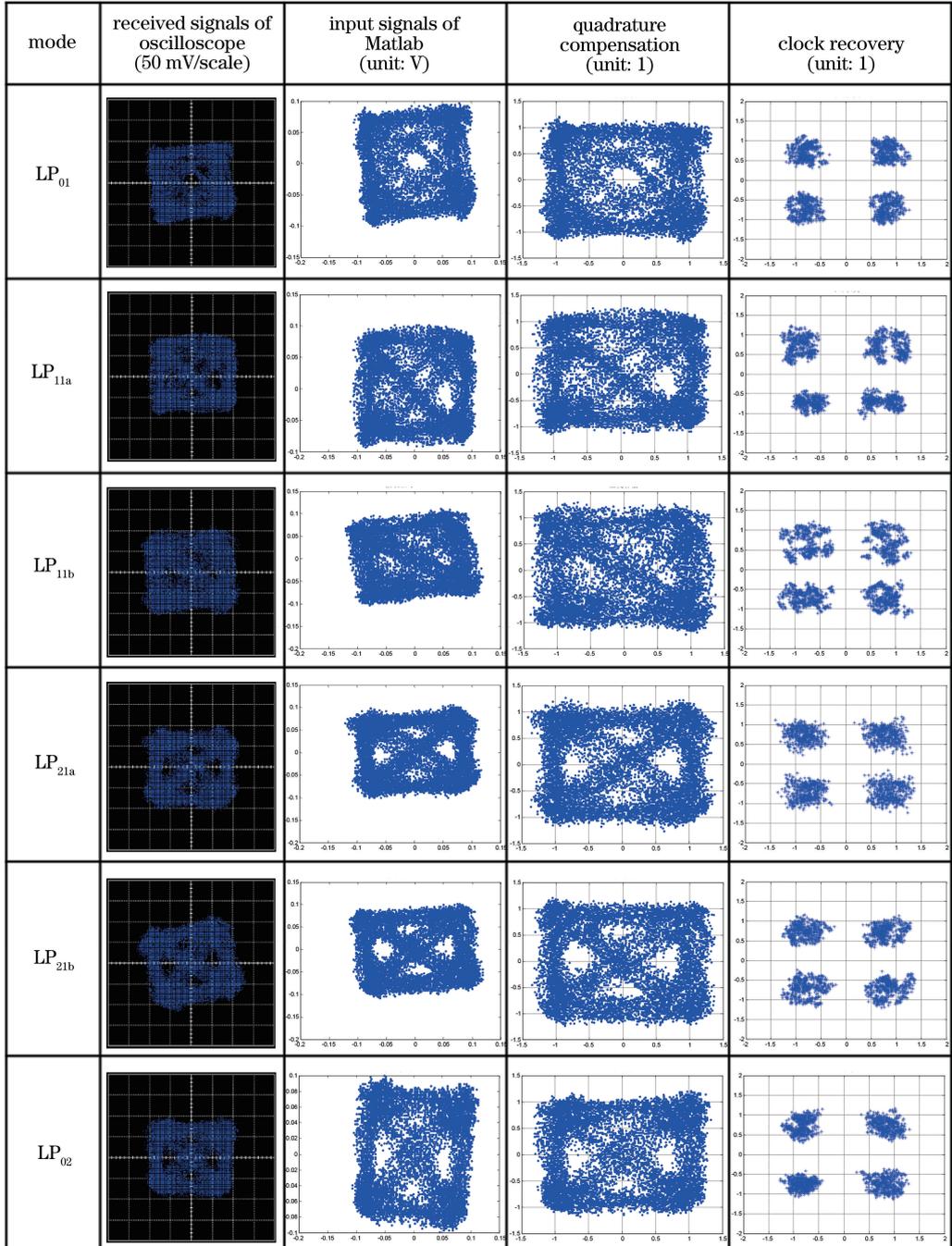


图 4 经 10 km 少模光纤传输后接收到的和 Matlab 处理过程中的信号星座图

Fig. 4 Constellation diagrams of received signals after 10 km FFMF transmission and processed by Matlab

为进一步测试模分复用系统的可靠性与通信质量,同步逐渐降低6路输入信号的光功率,实验记录经10 km少模光纤传输后6路信号的误码率随接收功率的变化规律,并绘制了误码特性曲线,如图5所示。测试中同步调整6路信号的入射功率,始终保持LP<sub>02</sub>模的输入信号光功率较其他模式大3 dBm。根据线性拟合结果,传输速率为8.5 Gbit/s,6个模式的接收功率分别高于-37.84 dBm、-36.47 dBm、-36.20 dBm、-35.27 dBm、-35.37 dBm、-35.79 dBm时,信号的误码率R<sub>BE</sub>低于10<sup>-3</sup>,满足前向纠错硬判决(20%开销)后无误码传输的阈值要求。

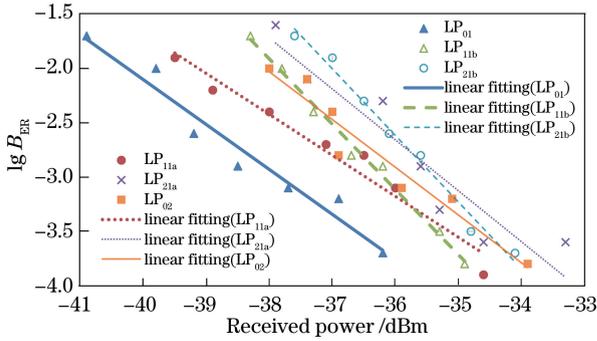


图5 接收信号的误码特性曲线

Fig. 5 Bit error rate curves of received signals

## 4 结 论

本文建立了一种光子灯笼作为模式复用/解复用器的6×6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LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>、LP<sub>21a</sub>、LP<sub>21b</sub>和LP<sub>02</sub>的信号传输信道作为独立信道,采取相位调制-相干检测的方式,通过正交不平衡补偿、时钟恢复、载波恢复等离线信号处理,实现了传输速率为6×8.5 Gbit/s的伪随机信号在10 km少模光纤中的良好传输。实验结果表明:当6路信号的接收功率分别大于-37.84 dBm、-36.47 dBm、-36.20 dBm、-35.27 dBm、-35.37 dBm、-35.79 dBm时,各路信号的误码率可低于10<sup>-3</sup>。在保证信号误码性能的前提下提高了信号的频谱利用率,同时大幅提升了接收机的灵敏度,使得光信号可以在更长的距离进行无中继传输,为进一步扩展模分复用系统的比特率-距离积(B·L积)打下了基础。

## 参 考 文 献

[1] Lü X D, Liang X R, Yu Q C, et al. Research status

and development trend of optical communication technology[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(2): 70-78.

吕向东, 梁雪瑞, 喻千尘, 等. 光通信技术研究现状及发展趋势[J]. 电信科学, 2019, 35(2): 70-78.

[2] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(1): 3-55.

[3] Chen C G, Hu G J, Liu F, et al. Measurement of mode coupling in few-mode fiber based on Rayleigh backscattering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0806002.

陈翠光, 胡贵军, 刘峰, 等. 基于背向瑞利散射的少模光纤模式耦合测量[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0806002.

[4] Li C, Zhao J, Wang W, et al. 4×100 Gbit/s long-distance quasi-single-mode bi-directional transmission with few-mode fiber[J]. Chinese Journal of 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.

[5] Chen J, Wang F, Li Z X, et al. Reducing signal crosstalk in IM-DD-mode-division multiplexing transmission via digital orthogonal filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0806005.

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): 0806005.

[6] Fu P D, Chen H M. Design and performance analysis of three-mode division multi/demultiplexer based on two-dimensional photonic crystals [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 020602.

付培栋, 陈鹤鸣. 基于二维光子晶体三模式模分复用/解复用器的设计与性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 020602.

[7] Randel S, Ryf R, Gnauck A, et al. Mode-multiplexed 6×20-GBd QPSK transmission over 1200-km DGD-compensated few-mode fiber [C] // Optical Fiber Communication Conference, March 4-8, 2012, Los Angeles, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2012: PDP5C.5.

[8] van Weerdenburg J, Ryf R, Alvarado-Zacarias J C, et al. 138 Tbit/s transmission over 650 km graded-index 6-mode fiber[C] // 2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE, 2017: 17733473.

[9] Soma D, Beppu S, Wakayama Y, et al. 257-Tbit/s weakly coupled 10-mode C + L-band WDM

- transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(6): 1375-1381.
- [10] Chen J, Huang Q Q, Zhang Q W, et al. Orthogonal frequency division/mode division multiplexing IM-DD multimode fiber transmission system based on photonic lanterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0606008.  
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): 0606008.
- [11] Chen J K, Hu G J, Han Y Y. Communication experimental system with  $3 \times 3$  mode division multiplexing based on photonic lantern[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106009.  
陈嘉轲, 胡贵军, 韩悦羽. 基于光子灯笼的  $3 \times 3$  模分复用通信实验系统[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106009.
- [12] Wu Z Y, Li J H, Tian Y, et al.  $3 \times 4 \times 10$ -Gb/s MDM-WDM transmission over 21-km OM3 MMF with OOK modulation and direct detection [C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 11-15, 2018, San Diego, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2018: W4J.3.
- [13] Hu T, Li J H, Ge D W, et al. Weakly-coupled 4-mode step-index FMF and demonstration of IM/DD MDM transmission[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8356-8363.
- [14] Yerolatsitis S, Gris-Sánchez I, Birks T A. Adiabatically-tapered fiber mode multiplexers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 608-617.
- [15] Eznaveh Z S, Lopez J E A, Galmiche G L, et al. Few mode multicore photonic lantern multiplexer [C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 20-22, 2016, Anaheim, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2016: Tu3I.5.