

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

陈健^{1,2}, 黄青青^{1,2}, 张倩武^{1,2*}, 王腾^{1,2}, 曾祥龙^{1,2}, 宋英雄^{1,2}, 李迎春^{1,2}, 张俊杰^{1,2}

¹上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444

²上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444

摘要 提出一个基于光子灯笼的正交频分复用(OFDM)/模分复用多模光纤传输系统,利用 2 个模式选择性光子灯笼分别作为模式复用与解复用器,选取 LP₀₁ 模与 LP_{11b} 模式作为发送信道,利用自适应比特加载 OFDM 调制方式在 50 m 长的 OM4 多模光纤上实现了 7.2 Gb/s 的传输。实验结果表明,调整 2 路信号的偏振态,当 LP₀₁ 端的入射光功率比 LP_{11b} 端的入射光功率低 4 dB 左右时,可以保证 2 路信号在接收端的光功率一致。当 2 路信号的接收光功率均低至 -13 dBm 时,2 路信号的误码率分别为 1.3×10^{-3} 与 3.2×10^{-3} ,均低于硬判决前向纠错(HD-FEC)门限。该系统为低成本、短距离以及大容量的数据传输场景提供了解决方案。

关键词 光纤通信; 模分复用; 光子灯笼; 多模光纤; 正交频分复用; 比特加载

中图分类号 TN915.62

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0606008

Orthogonal Frequency Division/Mode Division Multiplexing IM-DD Multimode Fiber Transmission System Based on Photonic Lanterns

Chen Jian^{1,2}, Huang Qingqing^{1,2}, Zhang Qianwu^{1,2}, Wang Teng^{1,2}, Zeng Xianglong^{1,2},
Song Yingxiong^{1,2}, Li Yingchun^{1,2}, Zhang Junjie^{1,2}

¹Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai 200444, China;

²Shanghai University Key Laboratory of Specialty Optics and Optical Access Networks,
Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract A orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)/mode division multiplexing multimode fiber transmission system based on photonic lanterns(PL) is proposed. Two mode selective PLs are used as multiplexer (MUX) and demultiplexer(DEMUX). LP₀₁ mode and LP_{11b} mode are selected as the transmission channels. An adaptive bit loading OFDM modulation is used to achieve the transmission of 7.2 Gb/s on a 50 m OM4 multimode fiber. The experimental results show that when the incident light power of LP₀₁ mode is about 4 dB lower than that of LP_{11b} mode, we can achieve the same received optical power by adjusting the polarization state of the two signals. When the received power is -13 dBm, the bit error rates(BERs) of two signals are 1.3×10^{-3} and 3.2×10^{-3} , respectively, which are lower than the threshold of hard decision-forward error correction (HD-FEC). The system provides a solution for the large capacity data transmission with low cost at short distance.

Key words optical communications; mode division multiplexing; photonic lantern; multimode fiber; orthogonal frequency division multiplexing; bit loading

OCIS codes 060.2330; 060.4230; 060.4510

收稿日期: 2018-01-26; 收到修改稿日期: 2018-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(61420106011, 61635006, 61601279, 61601277)、上海市科委项目(17010500400, 16511104100, 16YF1403900)

作者简介: 陈健(1965—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事数字通信及相关技术方向的研究。

E-mail: chenjian@shu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhangqianwu@shu.edu.cn

1 引 言

近些年来,人们对互联网产品及其应用的需求持续增长,尤其是数据量的爆炸性增长,对通信系统容量提出了新的要求,如何提升现有光纤网络的传输速率成为研究热点。从光场的基本物理维度考虑,一些扩容技术,如时分复用技术^[1]、码分复用技术^[2]、波分复用(WDM)技术^[3]、正交频分复用(OFDM)技术^[4]等以单模光纤(SMF)为传输媒质的技术,都已经得到了充分利用。而单模光纤的通信容量目前已经接近于非线性香农极限,无法满足互联网带宽日益增长的需求^[5]。所以寻找一种新型高速大容量光传输技术已成为光通信网络面临的一个巨大挑战^[6]。

目前,空间模分复用技术可将石英光纤的通信容量提高数十倍,引起了国内外学者的广泛关注^[7-9]。模分复用技术以光纤中相互正交的模式作为独立信道来加载信号并传送信息,形成一种多输入多输出(MIMO)信号通道^[10],可有效提高通信系统的传输容量。OFDM技术利用相互正交的子载波来进行信号的并行传输,在降低符号间干扰的同时,也可极大地提高系统的带宽利用率。

2015年,Chang等^[11]设计了一种全光纤型的模式复用器,利用 LP_{01} 和 LP_{11} 的2个简并模式,实现了3路 $32\text{ WDM} \times 120\text{ Gb/s}$ 脉冲宽度调制-正交相移键控(PDM-QPSK)信号的复用传输。Luo等^[12]采用模分复用技术,在200 m多模光纤(MMF)上成功地传输2路OFDM信号,其传输速率均为40 Gb/s。Corral等^[13]利用模式选择耦合器,实现了模式为 LP_{01} 和 LP_{11} 的2路信号在标准单模光纤中的传输。Ren等^[14]使用级联模式选择耦合器,在12 km的少模光纤(FMF)上完成了3路信号的复用传输。Leon-Saval等^[15-17]制作出了基于光子灯笼(PL)的模式复用/解复用器(MUX/DEMUX),将纤芯尺寸相同的单模光纤阵列放于一个具有较低折射率的毛细玻璃管中,经过一定的处理,使毛细玻璃管管道半径渐进收缩,通过渐进收缩形成的少模光纤有效地避免了模式间相互串扰带来的损耗。在之后的研究中,通过使用纤芯尺寸不相同的单模光纤来制作光子灯笼,可获得不同的高阶模式,所以称这样的模式复用/解复用器为模式选择光子灯笼,它具有更好的实用性及灵活性。Ryf等^[18]提出使用低损耗的光子灯笼作为耦合器,并且以相干检测的方式,在少模

光纤上实现了3路单波长信号1500 km的复用传输。Amezcuacorrea等^[19]采用直接检测的方式,通过使用光子灯笼作为耦合器实现了在20 km长少模光纤上信号传输速度达 $3 \times 10\text{ Gb/s}$ 的复用传输。陈嘉轲等^[20]利用2个光子灯笼分别作为模式复用和解复用器,采用强度调制直接检测的方式,实现了非归零(NRZ)码在少模光纤中的传输。目前大部分研究使用外调制器和少模光纤以提供较好的调制性能以及信道质量,但较高的实施成本限制了其应用。

本文采用强度调制/直接检测(IM-DD)的方式,利用模式选择性光子灯笼,同时选取低成本的直调分布反馈(DFB)激光器以及应用广泛的OM4多模光纤,以 LP_{01} 模与 LP_{11b} 模式作为发送信道,利用自适应比特加载OFDM调制方式,在50 m长多模光纤上实现了7.2 Gb/s的传输,并将具有高阶调制格式的OFDM信号应用于模式选择光子灯笼。根据信道特性在OFDM子载波上灵活地选用多种不同的正交幅度调制(QAM)方式,如4QAM、8QAM、16QAM,极大地提高了系统的性能。同时,相比于传统的NRZ码,采用高阶调制格式,进一步提高了系统的频谱利用率。

2 基于光子灯笼的 OFDM 模分复用传输系统

使用的光子灯笼由美国贝尔实验室制备,如图1所示,它可以激发出1个 LP_{01} 模和2个 LP_{11} 模(LP_{11a} 与 LP_{11b})。对使用的光子灯笼进行测试:将2个光子灯笼A和B的少模光纤端相连接,向光子灯笼A的3个单模输入端分别输入光功率为 -15.6 dBm 的信号;将光子灯笼B的单模光纤作为输出端,分别接收各模式的信号。接收光功率如表1所示:发送端为 LP_{01} 模,且接收端也为 LP_{01} 模时,入射光功率的损耗最小;发送端为 LP_{11b} 模,接收端为 LP_{11a} 模时,入射光功率的损耗次小。

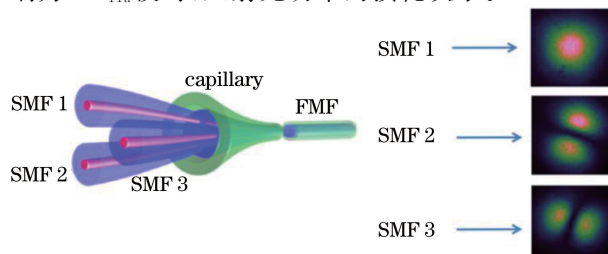


图1 光子灯笼及其模式转换

Fig. 1 Photonic lantern and its mode conversion

表 1 光子灯笼入射端口损耗
Table 1 Insertion losses of photonic lantern dBm

Receiving port	Sending port		
	LP ₀₁ port	LP _{11a} port	LP _{11b} port
LP ₀₁ port	-16.5	-27.2	-29.5
LP _{11a} port	-29.1	-21.5	-20.1
LP _{11b} port	-28.1	-20.9	-22.1

因为在少模光纤中,LP₁₁的2个模式是简并的,不能进行模式选择输出,所以在本次实验中,选取3个输入端中的LP₀₁和LP_{11b}进行传输。通过调整入射端的偏振控制器,可以调节LP₁₁2个模式之间的耦合。为了验证偏振控制器的效果,同时输入2路信号:LP₀₁与LP_{11b},在接收端示波器上可以看到2路信号的幅值变化情况,如图2所示。在图2(a)和图2(b)中,未调整偏振控制器之前,LP₀₁与LP_{11a}接收端的幅值分别为232 mV与62 mV。通过控制偏振控制器,将2路信号调整至最佳情况,此时LP₀₁与LP_{11a}接收端的幅值分别为238 mV与121 mV,如图2(c)和(d)所示。所以,实验选择的2路发送信号分别为LP₀₁至LP₀₁和LP_{11b}至LP_{11a},并且通过调整偏振控制器以保证OFDM信号的最佳传输。

基于光子灯笼的OFDM模分复用传输系统的实验框图如图3所示。在发送端,将产生的伪随机序列(PRBS-15)进行串/并转换,然后将得到的信息流进行4QAM、8QAM、16QAM等不同类型的QAM调制。将得到的实数信号送入到一个任意波形发生器(AWG)中,生成2路模拟信号,设置AWG的采样率为2 GSa/s。将2路OFDM信号分别送入到放大倍数为10 dB的前置放大器中进行放大,再由2个带宽为1.4 GHz的DFB激光器将电信

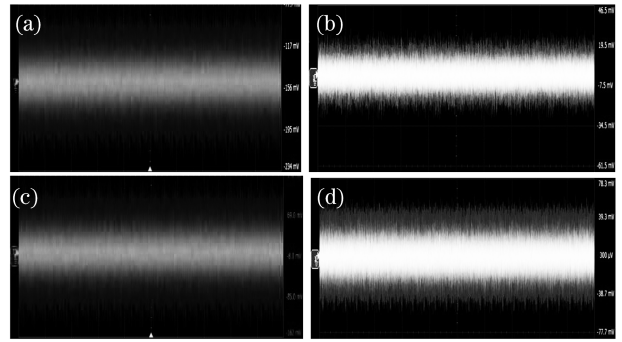


图 2 接收信号峰峰值。(a)调整前 LP₀₁; (b)调整前 LP_{11a}; (c)调整后 LP₀₁; (d)调整后 LP_{11a}

Fig. 2 Peak-to-peak value of received signals amplitude.
(a) Value for LP₀₁; (b) value for LP_{11a};
(c) adjusted value for LP₀₁; (d) adjusted value for LP_{11a}

号转换为光信号,分别送入到光子灯笼 A 的 LP₀₁与 LP_{11b}输入端。因为入射光的偏振对光子灯笼的影响很大,尤其会影响 LP₁₁高阶模式的转换,所以在光子灯笼 A 之前增加 2 个偏振控制器,以改变入射光的偏振态,降低模式串扰。信号经过 50 m 长的 OM4 多模光纤传输后,分别由光子灯笼 B 的 LP₀₁与 LP_{11a}端输出。在接收端,将信号分别通过 2 个带宽为 1.5 GHz 的光电探测器(PIN+TIA)进行接收,并且将接收到的信号送入带宽为 4 GHz 的示波器中进行信号采样。设置示波器采样率为10 GSa/s,进行 5 倍的过采样。使用 MATLAB 对采样得到的实验数据进行离线处理,先进行符号的同步、移除长训练序列与循环前缀(CP),然后进行快速傅里叶变换(FFT),之后根据长训练序列对信道进行估计与均衡,并将信号解映射,最后将得到的数据进行处理,计算误码率(BER, R_{BER})等。实验过程中的系统参数如表 2 所示。

表 2 实验系统参数

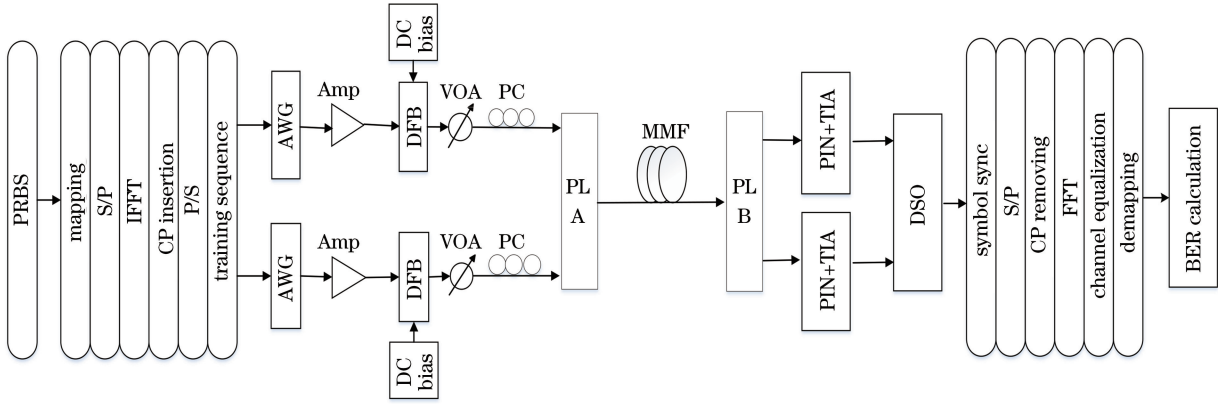
Table 2 Experimental system parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Modulation format	32/16/4 QAM	PIN detector bandwidth /GHz	1.5
IFFT/FFT size	64 points	Fiber type	OM4
OFDM symbols per frame	100 symbols	Laser wavelength /nm	1550
Cyclic prefix length	16 points	AWG sampling rate / (GSa · s ⁻¹)	2
DFB driving voltage	2.1V _{pp}	DSO sampling rate / (GSa · s ⁻¹)	10
MMF length /m	50	Laser bandwidth /GHz	1.4
Amp /dB	10	DC voltage /V	12

Note: V_{pp} is peak-to-peak value of received signal amplitude

为了克服信道衰落对系统的影响,对 OFDM 信号的子载波采用动态比特加载的方式。由于受直流分量的影响,关闭 OFDM 信号的前 2 个子载波,而

对受到信道衰落影响的最后 3 个子载波降低其调制格式,OFDM 信号每一个子载波上的比特加载数如图 4 所示。在此条件下,每路信号的传输速率为



Amp: amplifier; S/P: serial-to-parallel; P/S: parallel-to-serial; VOA: variable optical attenuator; IFFT: inverse fast Fourier transform; PC: polarization controller; DC: direct current; TIA: transimpedance amplifier; DSO: digital storage oscilloscope

图 3 IM-DD OFDM 实验系统框图

Fig. 3 Structure of IM-DD OFDM experimental system

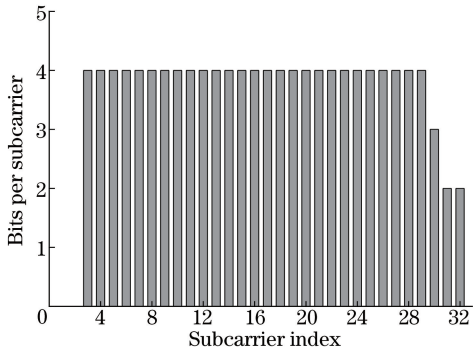


图 4 OFDM 信号子载波上比特加载数

Fig. 4 Subcarrier bit allocation profile for OFDM signals

3.6 Gb/s,总的传输速率为 7.2 Gb/s。

3 实验结果分析

因为少模光纤价格昂贵,未能商用化,所以在本次实验中,通过使用标准商用 OM4 多模光纤来替代少模光纤的传输,降低系统成本。为了进一步验证 OFDM 信号在光子灯笼中的传输性能,首先进行单路背靠背 (BTB) 的传输实验。连接光子灯笼 A 的少模光纤端与光子灯笼 B 的少模光纤端,将 OFDM 信号输入到光子灯笼 A 的 LP₀₁、LP_{11a} 与 LP_{11b} 的输入端,然后由光子灯笼 B 输出。将输出的信号送入到示波器中进行采样,采样率为 10 GSa/s,所得到的数据通过 MATLAB 进行解调,并计算其误码率。误码率随发送光功率的变化如图 5(a) 所示。可以看出,当光功率大于 -12 dBm 时,3 种情况下背靠背传输误码率均低于硬判决前向纠错 (HD-FEC) 门限。其中 LP_{11a} 到 LP_{11a} 与 LP_{11b} 到 LP_{11a} 误码率曲线的趋势基本相同,主要是由于在少模光纤中,LP_{11a} 和 LP_{11b} 的有效折射率非常接近,

2 种模式不能完全分离,存在模间串扰、模式相互耦合的现象。LP_{11a}、LP_{11b} 在误码率为 10⁻⁴ 处与 LP₀₁ 模式相比大概有 3 dB 的功率差,这主要是由于 LP_{11a} 与 LP_{11b} 在传输过程中受到的损耗更多。因此,为了得到较好的传输质量,分别选用 1 路基模和 1 路高阶模式来传输信号。

作为比较,在 2 个光子灯笼之间加入 50 m 长的 OM4 多模光纤,同样调整每一路信号输入端的光功率,并计算误码率,结果如图 5(b) 所示。在相同的测

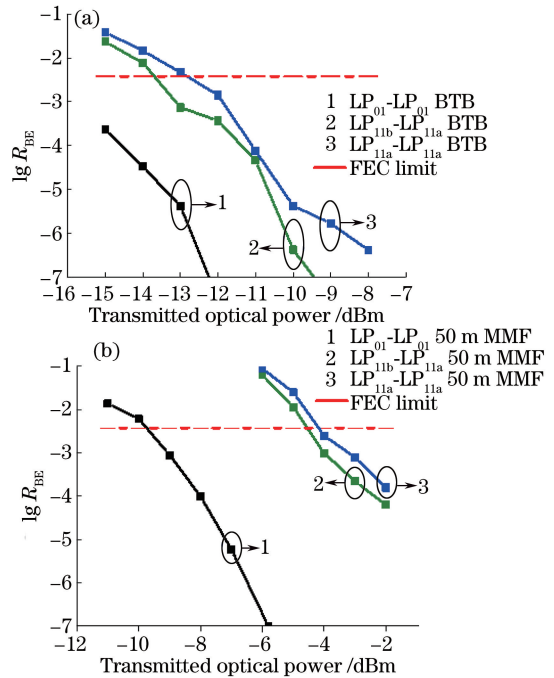


图 5 单路信号发送光功率与误码率关系。

(a) 背靠背; (b) 经过 50 m 长的 OM4 多模光纤

Fig. 5 Relationships between transmitted optical power and BER for one-channel signal. (a) BTB; (b) over OM4 MMF with the length of 50 m

量条件下,加入光纤后的误码率变化趋势与背靠背条件下相似。在相同误码率下整体光功率相比背靠背时的光功率相差 8 dB,这主要是因多模光纤与少模光纤耦合的接头之间的损耗较大造成的。在今后的研究中,可通过提高不同光纤的熔接效果来降低损耗。

以上实验结果表明,采用 LP₀₁端输入,LP₀₁端接收,其信号传输的性能最佳,其次为 LP_{11b}端传送,LP_{11a}端接收。通过改变入射到光子灯笼 A 的光功率,得到入射光功率与接收误码率的曲线如图 6(a)所示。因为在 2 路信号复用传输的过程中,LP₀₁模对 LP₁₁模的影响相比 LP₁₁模对 LP₀₁模的影响较大,所以由图 6(a)可以看到,当 LP₀₁与 LP_{11b}以相同的入射光功率进行传输时,LP₀₁的一路信号的误码率很低,可视为 0,而模式为 LP_{11b}的一路的信号,不管其入射光功率为何值,都有较高的误码率。而且当 2 路光功率同时增大时,LP₀₁对 LP_{11b}产生的干扰也会变大,导致 LP_{11b}的性能变差。为了使得 2 路信号都可以正常的传输,降低其模间串扰所带来的影响,在实验中改变 2 路信号的入射光功率,在保持 LP₀₁入射端的光功率为 -10 dBm 不变的情况下,逐步提高 LP_{11b}端的入射光功率,然后经过解调后,计算其对应的误码率,如图 6(b)所示。由图 6(b)可知,当

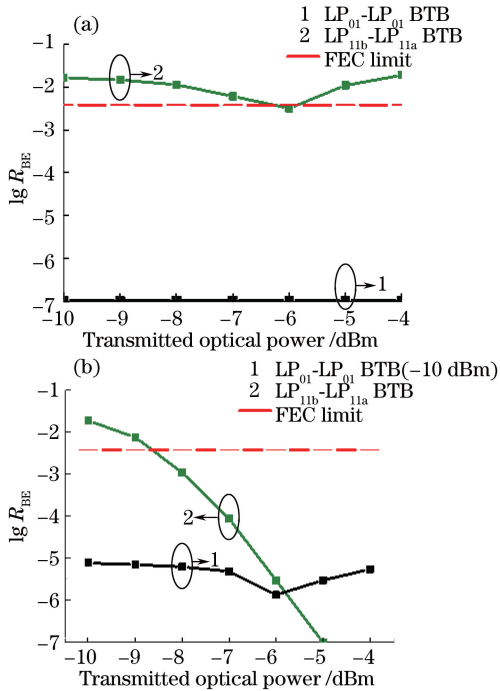


图 6 2 路信号发送光功率与误码率关系。
(a) 入射光功率相同; (b) 入射光功率不同

Fig. 6 Relationships between transmitted optical power and BER for two-channel signals. (a) Same transmitted optical power; (b) different transmitted optical powers

2 条误码率曲线相交时,LP₀₁和 LP_{11b}端入射光功率分别为 -10 dBm 和 -5.9 dBm,所以,当 LP₀₁端入射光功率比 LP_{11b}端入射光功率低 4 dB 左右时,2 路信号在接收端的误码率可以保持一致。

2 路信号经过 50 m 长的 OM4 MMF 传输后,在 LP₀₁端入射光功率为 -7 dBm,LP_{11b}端入射光功率为 -3 dBm 时,其接收端信号的误码率分别为 2.2×10^{-4} 与 6.8×10^{-4} ;当 LP₀₁端入射光功率为 -8 dBm,LP_{11b}端入射光功率为 -4 dBm 时,接收光功率都约为 -13 dBm,接收端信号的误码率分别为 1.3×10^{-3} 与 3.2×10^{-3} 。通过 MATLAB 对 2 路信号进行处理,根据示波器所采集到的数据,对每一个采样点进行计算,画出子载波的星座图。分别选取 2 路 OFDM 信号的第 3、16、30、32 号子载波的星座图,如图 7(a)和(b)所示。实验选用的激光器和接收机的带宽分别为 1.4 GHz 与 1.5 GHz,因此限制了数据的传输速率。本次实验验证了将高阶调制格式的信号应用在光子灯笼上进行复用传输的可行性,今后可以选用高带宽的实验器件以实现更

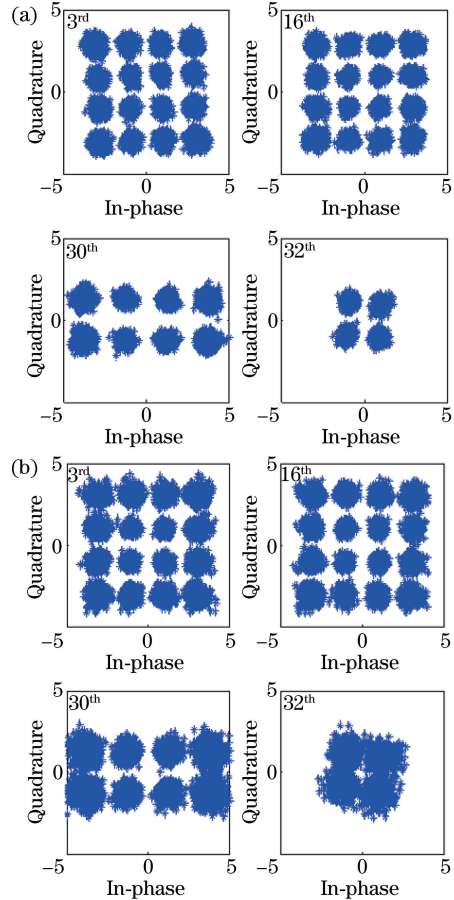


图 7 接收端子载波星座图。(a) LP₀₁端; (b) LP_{11a}端
Fig. 7 Constellations of the subcarriers at receiving port. (a) LP₀₁ port; (b) LP_{11a} port

高速率的复用传输。

4 结 论

提出利用模间串扰较低的模式选择性光子灯笼分别作为模式复用与解复用器,采用低成本的直调DFB激光器,选取 LP₀₁模式与 LP_{11b}模式作为发送信道,利用自适应比特加载 OFDM 调制方式在50 m长的 OM4 多模光纤上实现了 7.2 Gb/s 的传输。

实验结果表明,调整 2 路信号的偏振态,当 LP₀₁端的入射光功率比 LP_{11b}端的入射光功率低 4 dB左右时,2 路信号在接收端的光功率一致;当 2 路信号的接收光功率均低至 -13 dBm 时,2 路信号的误码率分别为 1.3×10^{-3} 与 3.2×10^{-3} ,均低于 HD-FEC 门限。

所搭建的 IM-DD OFDM 模分复用传输系统,通过多模光纤进行信号的传输,具有结构简单、易实现的优势,且系统中利用具有模式选择性的光子灯笼相比于用其他模式复用与解复用器,模间串扰低,为低成本短距离大容量数据传输场景提供了解决方案。

参 考 文 献

- [1] Gu H, Wang Z, Zhang B, *et al.* Time-division-multiplexing wavelength division multiplexing based architecture for ONoC [J]. *Journal of Optical Communications & Networking*, 2017, 9(5): 351-363.
- [2] Aqrab I S, Aljunid S A, Rashidi C B M, *et al.* High performance with avalanche photodiode in wavelength/time optical code division multiple access[J]. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2017, 10(15): 306-314.
- [3] Luo L W, Ophir N, Chen C P, *et al.* WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3069.
- [4] Yu J, Huang M L, Zou Y Z, *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, 邹钰昭, 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] 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 少模光纤长距离单模双向传输的实验研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0206001.
- [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] Ip E, Li M J, Bennett K, *et al.* 146λ×6×19-Gbaud wavelength- and mode-division multiplexed transmission over 10×50-km spans of few-mode fiber with a gain-equalized few-mode EDFA [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(4): 790-797.
- [8] Bai N, Ip E, Huang Y K, *et al.* Mode-division multiplexed transmission with inline few-mode fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2668-2680.
- [9] Zhang J, Li F, Li J, *et al.* 95.16-Gb/s mode-division-multiplexing signal transmission in free-space enabled by effective-conversion of vector beams [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 7202809.
- [10] Arik S O, Kahn J M, Ho K P. MIMO signal processing for mode-division multiplexing: an overview of channel models and signal processing architectures [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(2): 25-34.
- [11] Chang S H, Chung H S, Ryf R, *et al.* Mode-and wavelength-division multiplexed transmission using all-fiber mode multiplexer based on mode selective couplers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7164-7172.
- [12] 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.
- [13] Corral J L, Garcia R D, Llorente R. Mode-selective couplers for two-mode transmission at 850 nm in standard SMF [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(4): 425-428.
- [14] Ren F, Li J, Wu Z, *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.
- [15] Leon-Saval S G, Fontaine N K, Salazar-Gil J R, *et al.* Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing [J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 1036-1044.
- [16] Chen H, Fontaine N K, Ryf R, *et al.* Design constraints of photonic-lantern spatial multiplexer based on laser-inscribed 3-D waveguide technology [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(6): 1147-1154.
- [17] Huang B, Fontaine N K, Ryf R, *et al.* All-fiber

- mode-group-selective photonic lantern using graded-index multimode fibers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 224-234.
- [18] Ryf R, Fontaine N K, Montoliu M, *et al.* Photonic-lantern-based mode multiplexers for few-mode-fiber transmission[C]//Optical Fiber Communication Conference. San Francisco, California United States, 2014, W4J: W4J. 2.
- [19] Amezcuacorrea A, Li G, Wen H, *et al.* 3×10 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, 935: 16929816.
- [20] Chen J K, Hu G J, Han Y Y. Experimental research of three-mode mode division multiplexing communication system 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 3×3 模分复用通信实验研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106009.