

基于少模光纤的 3×34 Gb/s PDM-QPSK 信号模分复用实验

张强,韩伟,熊振,李新强

(中国人民解放军 61905 部队)

摘要:为了成倍地提高通信系统的传输容量,采用 10 km 少模光纤构建 3×3 模分复用实验平台,模式的转换及复用通过模式选择性光子灯笼实现,以相位调制-相干接收方式完成光信号的调制与检测,最终实现 3×34 Gb/s 偏振复用-正交相移键控(PDM-QPSK)信号的有效传输。研究表明:如果保持 LP_{01} 、 LP_{11} 和 LP_{21} 的接收功率不低于 -25.32 dBm,可以使误码率始终低于 10^{-3} 。

关键词:复用通信;误码率;少模光纤

中图分类号:TN929;O436 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)01-0077-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.01.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



3×34 Gb/s PDM-QPSK signal mode division multiplexing experiment based on few-mode fiber

ZHANG Qiang, HAN Wei, XIONG Zhen, LI Xinqiang

(No.61905 Troops of PLA)

Abstract: In order to increase the transmission capacity of communication system exponentially, a 3×3 mode division multiplexing experiment platform is constructed using 10 km few-mode optical fiber, the mode conversion and multiplexing are realized by the mode-selective photon lantern, and the modulation and detection process is carried out in the phase modulation-coherent receiving mode, and the effective transmission of the 3×34 Gb/s polarization division multiplexed-quadrature phase shift keying (PDM-QPSK) signal is finally completed. The results show that if the received power of LP_{01} , LP_{11} and LP_{21} is not less than -25.32 dBm, the bit error rate can be certainly reduced to less than 10^{-3} .

Key words: multiplexed communication, bit error rate, few-mode fiber

0 引言

近年来,随着 5G、物联网、云计算和大数据等各类业务的兴起,对光纤通信网络的大带宽需求愈加急迫。光纤通信系统已经相继使用了单模光纤中关于光波的各个自由度来提高传输容量,包含频率、极化、幅度和相位等,但受激光光源、调制器件的物理特性限制,速率提升和波道扩展达到了瓶颈期。于是,基于空间维度的空分复用技术应运而生并被广泛研究。基于少模光纤的模分复用技术是空分复用中的一种,因其

具有更易实现光功率放大的特性,逐步成为了研究热点。2017 年,陈嘉轲等人^[1]使用低模串扰少模光纤和基于光子灯笼的模式复用器,通过强度调制和直接检测(IMDD)的方式实现了 3 个模式 4.25 Gb/s 速率的复用传输。2018 年,HU T 等人^[2]采用 IMDD 方式,在 10 km 的少模光纤上实现了 4 个模式 10 Gb/s 的可靠传输。2019 年,RADEMACHER G 等人^[3]利用三模渐变光纤和 C+L 频段的 348 个波分复用(WDM)波道,实现了 24.5 Gbaud 基于偏振复用的 16 阶正交振幅调制(PDM-16QAM)信号的 1045 km 传输,使系统传输容量达到了 159 Tb/s;同年,2019 年,WAKAYAMA Y 等人^[4]首次使用 6 模的掺铒光纤放大器(EDFA),实现了对 6 个模式和 580 个 WDM 波道的放大,传输距离超过 90.4 km,总容量和谱效率分别达到 266.1 Tb/s 和 36.7 b/(s·Hz⁻¹);同年,GE D W 等人^[5]设计了一种双环型的少模光纤,采用 6 个模式和 4 个 WDM 波道,无需任

收稿日期:2021-04-18。

作者简介:张强(1985—),男,吉林长春人,工程师,2008 年于国防科学技术大学获得学士学位,2021 年于吉林大学获得硕士学位,主要从事光纤通信、光组网技术的相关研究工作。负责或参与国家级、省部级等项目 20 余项;获省级优秀设计二等奖 1 项。



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

何数字信号处理,实现了 71 km 的可靠传输。2020 年,SHIBAHARA K 等人^[6]通过循环模式置换技术抑制了差分模式时延引起的脉冲展宽,将少模光纤的差分模式时延控制在 33.7~44.3 ps/km 之间,实现了 3060 km 的三模式多路复用全 C 波段传输,除去纠错开销,传输容量达到了 40.2 Tb/s。现阶段,国内模分复用领域的研究还处于追赶阶段,且多采用 IMDD 方式,更适用于短距离通信场景。

本文采用相位调制-相干检测的方式,对基于少模光纤的 3×34 Gb/s 偏振复用—正交相移键控(PDM-QPSK)信号进行模分复用传输实验,为大容量长距离的传输需求提供解决方案。

1 模分复用系统原理

1.1 模分复用系统结构

PDM-QPSK 信号的模分复用传输系统框图如图 1 所示。2 个激光器的工作波长均为 1550 nm,将激光器 1 经偏振分束器(PBS)分成 2 路偏振态相互正交的光,分别接入 2 个 IQ 调制器;激光器 2 作为本振光源接至相干接收机。实验系统工作原理如下:在发送端,首先由数/模转换器(DAC)发送 4 路 8.5 Gb/s 二进制伪随机序列,分别接入 2 个 IQ 调制器的 I 路和 Q 路,得到 2 路 17 Gb/s 的 QPSK 信号;接着,将 2 路载有 QPSK 信号的光经过偏振合束器(PBC)合为一路,形成速率为 34 Gb/s 的 PDM-QPSK 信号,并接入一分三的光分束器;然后,通过在不同的光路中各加入一定长度的光纤,使得各路光信号出现时延;最后,将消去相关性后的 3 路光信号经 EDFA 平衡功率,分别接入光子

灯笼 LP₀₁、LP₁₁ 和 LP₂₁ 模式所对应的各个单模光纤输入端,系统中的光子灯笼 1 根据需要对得到的光信号进行转换和复用,在少模光纤输入、输出端获取对应模式的复用信号。在接收端,经 10 km 少模光纤传输后的复用信号通过光子灯笼 2 实现模式的解复用和转换,经相干接收机实现对 3 路单模光纤输出端光信号的相干检测,然后通过模/数转换器(ADC)观测并记录各路信号波形、星座图的变化情况,最后使用 Matlab 进行离线数字信号处理(DSP)。

1.2 模式选择

实验中使用的少模光纤为四模渐变型光纤,相比于制备简单、成本较低的阶跃型少模光纤,渐变型少模光纤自身的特性是自聚焦,能在一定程度上控制模式色散,减小模式间的耦合。四模渐变型光纤的主要参数如表 1 所示。假设系统的工作波长为 1550 nm,通过计算可得到光纤的归一化截止频率 V 值在 3.823~5.136 范围内^[7],至多可以传输 4 种模式。

在本实验系统中,模式选择性光子灯笼不仅具有较佳的模式转化作用,还可以实现良好的模式复用/解复用。随着光子灯笼在理论、制作工艺等方面的不断成熟,通过控制单模光纤和少模光纤的参数,光子灯笼便可实现模式的选择。光子灯笼本质上属于典型的全光纤型器件,能够实现在光纤链路的快速链接,具有模式串扰小、隔离度高等特性。2 个光子灯笼连接后的参数指标测量值如表 2 和表 3 所示。可以看出,LP₀₂ 模插入损耗较大,比其它模式串扰损耗更严重,传输性能下降明显。因此,本文选用其它 3 种模式进行试验。实验结果表明:当在光子灯笼 3 种模式输入端等

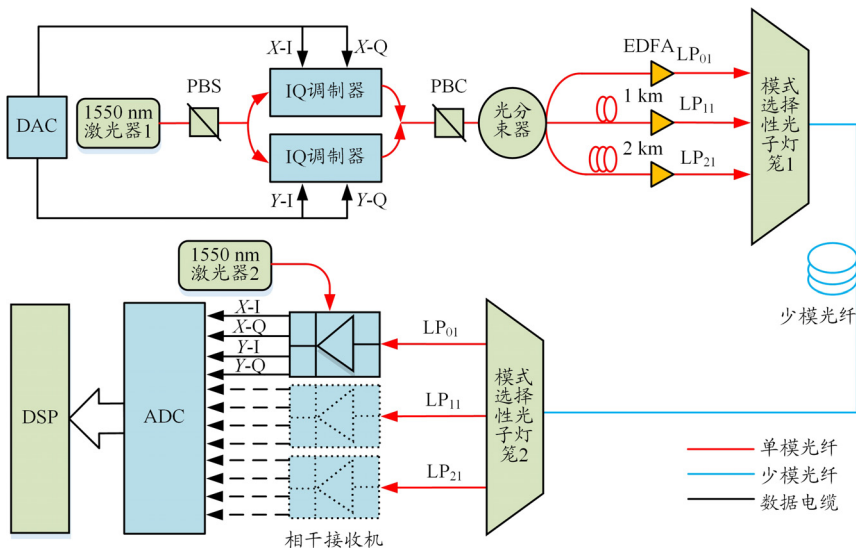


图 1 PDM-QPSK 信号模分复用传输实验系统框图

表 1 四模渐变型光纤主要参数

参数名称	数值
纤芯直径/ μm	13.28
包层直径/ μm	125.26
纤芯折射率	1.4722
包层折射率	1.4560

表 2 光子灯笼各模式的插入损耗

模式	插入损耗/dB	
	背靠背传输	10 km 少模光纤传输
LP ₀₁	3.64	5.56
LP ₁₁	2.85	5.61
LP ₂₁	5.84	7.16
LP ₀₂	10.22	12.01

表 3 光子灯笼各模式之间的串扰损耗

输出模式	背靠背传输串扰损耗/dB				10 km 少模光纤传输串扰损耗/dB			
	输入 LP ₀₁	输入 LP ₁₁	输入 LP ₂₁	输入 LP ₀₂	输入 LP ₀₁	输入 LP ₁₁	输入 LP ₂₁	输入 LP ₀₂
LP ₀₁	—	-20.20	-31.81	-31.67	—	-19.01	-28.16	-30.76
LP ₁₁	-34.38	—	-25.54	-26.17	-29.26	—	-25.06	-24.51
LP ₂₁	-36.69	-24.5	—	-19.32	-29.81	-19.76	—	-17.41
LP ₀₂	-23.05	-21.62	-17.94	—	-21.41	-20.56	-17.51	—

功率激发时,在相应模式的出射端的光功率将比其它模式的串扰功率大 12 dB 以上,不仅有效抑制传输过程中各模式间的串扰,还可降低系统 DSP 的复杂度,保证了传输系统的稳定性能。

1.3 信号处理

本文使用 ADC 采集、保存相干检测接收机的 X-I、X-Q、Y-I 和 Y-Q 共 4 路信号的数据,再使用 Matlab 对数据进行离线 DSP,主要包括正交不平衡补偿、时钟恢复、偏振解复用和载波相位恢复等步骤,如图 2 所示。如果继续延长少模光纤的长度,就会出现较大的模式相关损耗和模式色散,加速劣化系统整体的传输性能,届时需加入各类信道均衡算法,以提升系统性能。例如,通过 Gram-Schmidt 正交化算法使 I 路和 Q 路能保持正交化状态,便于信号继续处理^[8];通过 Gardner 正交化算法对定时误差进行检测估计,减小收发两端的频率偏差和相位抖动的影响^[9];通过恒模算法(CMA)消除输出端信号与恒模值的偏差,实现对偏振解复用和偏振复用等的补偿^[10-11];通过 4 次方频偏估计算法和 Viterbi-Viterbi 算法对频率偏移进行补偿,消除接收端的相位噪声,实现载波相位恢复^[12-13]。

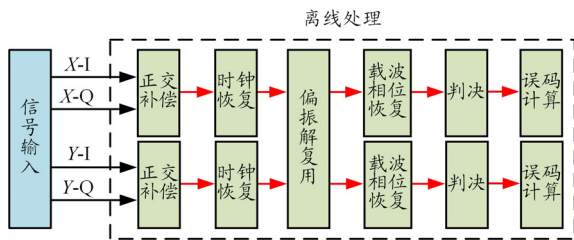


图 2 离线处理流程图

2 实验结果与分析

本文按照图 1 搭建了 PDM-QPSK 信号模分复用实验系统进行实验,实验过程如下:

首先,使用 ADC 分别测试、记录 DAC 发出 8.5 Gb/s 伪随机信号的波形图和眼图,信号的波形规整,星座图清晰。

然后,把 DAC 发出的 2 路 8.5 Gb/s 伪随机信号分别接入 IQ 调制器,将调制后的光信号直接用相干接收机检测解调,通过 ADC 测试记录信号的波形、星座图。此时信号的星座图均清晰可见,IQ 调制器与相干接收机工作正常。

最后,测试了 LP₀₁、LP₁₁ 和 LP₂₁ 这 3 种模式同时承载 34 Gb/s PDM-QPSK 信号经 10 km 少模光纤传输后的传输性能,记录 3 路输入相同光功率信号后得到的对应信号波形图和星座图,再结合 Matlab 软件进行数据的处理分析,实验结果如图 3 所示。可以看出,3 种模式下的星座图清晰,PDM-QPSK 信号可以在模分复用系统中实现有效传输。

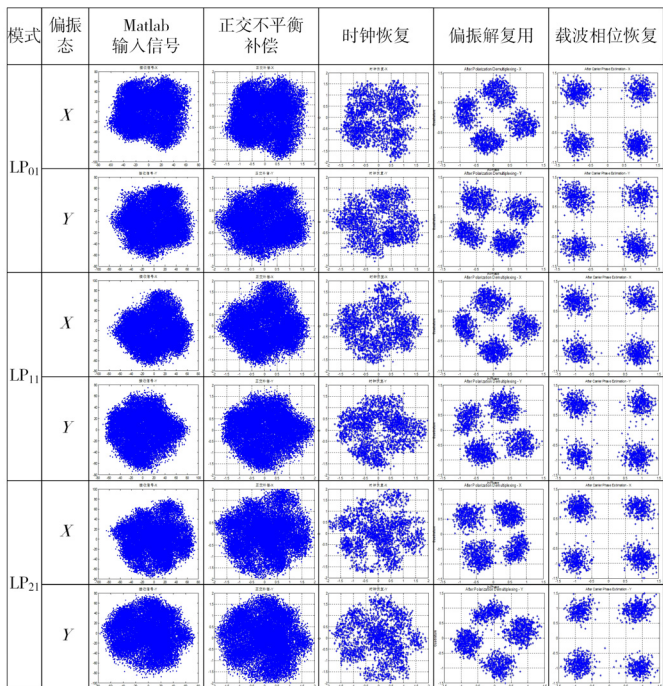


图 3 3×34 Gb/s PDM-QPSK 信号经传输后接收到的信号星座图

为进一步测试系统的可靠性,本文同时将 3 路输入信号的光功率进行下调,对传输后的信号进行记录,并根据记录的数据绘制出误码特性曲线,具体结果如图 4 所示。根据线性拟合结果可以看出,LP₀₁-X、

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

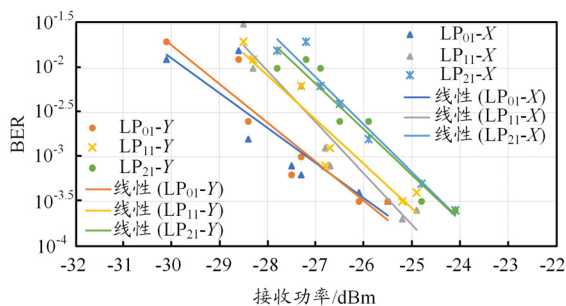


图4 接收信号的误码特性曲线

LP₀₁-Y、LP₁₁-X、LP₁₁-Y、LP₂₁-X 和 LP₂₁-Y 的接收功率分别高于-27.17 dBm、-27.12 dBm、-26.32 dBm、-26.16 dBm、-25.32 dBm 和-25.39 dBm 时,信号的误码率(BER)为 10⁻³,经前向纠错处理后能实现数据的无误码传输。

3 结束语

本文搭建了基于少模光纤的模分复用通信系统,使用 PBS、PBC 得到了 34 Gb/s 的 PDM-QPSK 信号,测试了 3×34 Gb/s 传输速率下相应信号的星座图,然后借助离线 DSP 技术,得到了误码特性曲线;验证了 PDM-QPSK 信号模分复用通信系统的可行性,为模分复用系统能实现更长的通信距离、更大的传输容量奠定了基础。

参考文献:

[1] 陈嘉轲,胡贵军,韩悦羽. 基于光子灯笼的 3×3 模分复用通信实验系统[J]. 中国激光,2017,44(11):222-228.
[2] RADEMACHER G,LUIS R S,PUTTNAM B J, et al. High capacity transmission with few-mode fibers [J]. Journal of Lightwave Technology,

2019, 37(2): 425-432.

[3] HU T, LI J, GE D, et al. Weakly-coupled 4-mode step-index FMF and demonstration of IM/DD MDM transmission [J]. Optics Express, 2018: 8356-8363.

[4] WAKAYAMA Y, SOMA D, BEPPU S, et al. 266.1-Tbit/s transmission over 90.4-km 6-mode fiber with inline dual C+L-band 6-mode EDFA[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2): 404-410.

[5] GE D W, GAO Y Y, YU Y, et al. A 6-LP-mode ultralow-modal-crosstalk double-ring-core FMF for weakly-coupled MDM transmission [J]. Optics Communications, 2019, 45: 97-103.

[6] SHIBAHARA K, MIZUNO T, KAWAKAMI H, et al. Full C-band 3060-km DMD-unmanaged 3-mode transmission with 40.2-Tb/s capacity using cyclic mode permutation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 514-521.

[7] 郭玉彬,霍佳雨,李玉权,等. 光纤通信技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.

[8] FATADIN I, SAVORY S J, IVES D. Compensation of quadrature imbalance in an optical QPSK coherent receiver[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20: 1733-1735.

[9] GARDNER F M. A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receivers[J]. IEEE Transactions on Communications, 1986, 34(5): 423-429.

[10] XU K, CHEN M H, JIA Z S, et al. Measurement methods and statistics of polarization mode dispersion in optical transmission systems with polarization dependent loss [C]//SPIE. Proceedings of SPIE. Beijing: SPIE, 2001: 202-207.

[11] XIE X, YAMAN F, ZHOU X, et al. Polarization demultiplexing by independent component analysis [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(11): 805-807.

[12] CARTWRIGHT K V, KAMINSKY E J. A simple improvement to the viterbi and viterbi monomial-based phase estimators[C]//IEEE. Proceedings of globecom 2006. San Francisco: IEEE, 2006:1-6.

[13] VITERBI A J, VITERBI A M. Nonlinear estimation of PSK modulated carrier phase with application to burst digital transmission [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1983, IT-29: 543-551.