

色散平坦光纤中的高速率 PM-16QAM 信号传输研究

朱龙洋¹, 郑宏军¹, 黎昕¹, 白成林¹, 胡卫生², 许恒迎¹, 刘山亮¹

- (1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院 山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059;
2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 提出了一种高速率、偏振复用、正交幅度调制信号的色散平坦光纤传输系统, 传输速率分别为 160 Gbps 和 256 Gbps, 调制格式为 PM-16QAM。实验研究了色散平坦光纤链路系统的传输特性, 并分别与非零色散位移光纤和标准单模光纤链路传输特性做了比较。实验结果表明, 较低输入光功率情况下, PM-16QAM 信号在 160 Gbps 传输 50 km 时, 经色散平坦光纤传输后的误差矢量幅度 EVM 优于经非零色散位移光纤传输情况 0.5%, 比特误码率 BER 优于非零色散位移光纤传输情况两个数量级; 色散平坦光纤链路能更好地衰减旁瓣噪声; 256 Gbps 传输 50 km 和 75 km 时, 仅在色散平坦光纤链路传输后可以较好地解调出信号; 传输距离越长, 保持较好特性时输入光功率范围越小。对比 160 Gbps 和 256 Gbps 情况, 高速率 PM-16QAM 信号在色散平坦光纤链路的传输特性优于非零色散位移光纤和标准单模光纤链路的传输特性, 传输速率越高、传输距离越长效果越明显。

关键词: 正交幅度调制; 色散平坦光纤; 非零色散位移光纤; 标准单模光纤; 传输特性
中图分类号: TN913.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0922003

Research on high bitrate PM-16QAM signal transmission over dispersion flattened fiber

Zhu Longyang¹, Zheng Hongjun¹, Li Xin¹, Bai Chenglin¹, Hu Weisheng², Xu Hengying¹, Liu Shanliang¹

- (1. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A dispersion flattened fiber (DFF) transmission system was proposed with high bitrate, polarization multiplexing and quadrature amplitude modulation (QAM) signal. The modulation format of the system was PM-16QAM, the bitrates were 160 Gbps and 256 Gbps. The transmission characteristics over DFF link system were experimentally studied, which were compared with those of non-zero dispersion shifted fiber (NZDSF) link and standard single mode fiber (SSMF) link. The experimental results show that the Error Vector Magnitude (EVM) of 160 Gbps and PM-16QAM over 50 km DFF link is 0.5% better than those over 50 km NZDSF link, the BER is 2 orders of magnitude better than that of NZDSF,

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2018-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61671227, 61431009, 61501213); 山东省自然科学基金(ZR2011FM015);

“泰山学者”建设工程专项资助

作者简介: 朱龙洋(1991-), 男, 硕士生, 主要从事光纤通信系统方面的研究。Email: 1069301759@qq.com

导师简介: 郑宏军(1970-), 男, 教授, 博士, 主要从事光纤通信系统与器件方面的研究。Email: hjzheng@yahoo.com

and the DFF link can better reduce side-mode noise. When bitrate is 256 Gbps and transmission distance are 50 km and 75 km, the PM-16QAM signal can be well demodulated only after the DFF link. And the longer the transmission distance, the smaller the input optical power range is while maintaining good characteristics. Comparing 160 Gbps with 256 Gbps, high bitrate PM-16QAM signal transmission characteristics over the DFF link are superior to those over NZDSF and SSMF links. The higher the transmission rate and the longer the transmission distance, the more obvious the transmission effects are.

Key words: quadrature amplitude modulation; dispersion flattened fiber; non-zero dispersion shifted fiber; standard single mode fiber; transmission characteristics

0 引言

近年来,移动通信业务需求及业务量指数增长,而现有的通信网络前端传输接口 CPRI (Common Public Radio Interface) 或 OBSAI (Open Base Station Architecture Initiative) 在数据速率、带宽、时延均存在很大的局限性;中国移动通信研究院等单位提出了下一代前传接口 NGFI (Next Generation Front-haul Interface)^[1],以满足第五代移动通信(5G)发展的需求;NGFI是指下一代无线网络主设备中基带处理功能与远端射频处理功能之间的前传接口,提供了五种接口划分方案,既可以采用模拟传输,又可采用数字传输技术以降低对系统参量要求,可灵活取舍,为移动通信 Front-haul 网络的进一步研究提供了重要参考^[2]。NGFI中的无线云中心(Radio Cloud Center, RCC)集中点与远端射频系统(Radio Remote System, RRS)的单跨距传输距离一般限于 20 km,考虑到我国复杂的地理环境以及现代信息社会通信需求的迅猛增长,实现 Front-haul 长跨距光纤传输变得日益迫切。

在高速率光通信系统中,色散是影响通信系统信号质量的最重要因素之一^[3-4]。通常使用色散补偿或者色散管理技术来弥补色散不利影响,如使用低色散光纤、色散补偿光纤或后置色散补偿技术。色散平坦光纤(Dispersion Flattened Fiber, DFF)的二阶色散值很小且分布平坦,可消除色散引起的窄谱信号畸变和避免色散失真;而且 DFF 能够保证超连续谱的光谱范围更宽和光谱分布更加平坦^[5]。参考文献[6]使用长距离 DFF 和非零色散平坦光纤(NZDSF)对 RZ-DPSK (Return-to-Zero Differential Phase Shift Keying)信号系统性能进行理论研究;结果表

明,RZ-DPSK 信号在 DFF 系统的传输性能优于在 NZDSF 系统的性能。参考文献[7]实验研究了色散平坦光纤中正常色散区域处的较好脉冲传播特性。参考文献[8]实验演示了 10 Gbps、40 GHz 光毫米波在近色散平坦光纤中长跨距均衡放大传输的良好特性。参考文献[9]研究了色散平坦渐减光纤中非线性啁啾脉冲的传输及超连续谱的产生。上述研究中,虽然 DFF 系统特性较好,但 DFF 的色散小、其非线性效应突出,超连续谱(SC)信号的产生就是利用了 DFF 非线性突出的特性;这样,长跨距 Front-haul 系统若采用 DFF 链路传输高速率 16QAM 信号,就很难判断其传输特性优劣,必须开展相关实验研究;目前尚未有在 DFF 链路上进行长跨距 Front-haul 传输报道。

目前,正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)凭借频谱效率高和抗噪声能力强等特征在通信领域倍受关注^[10-11]。而高速率 QAM 传输实验普遍采用标准单模光纤以及脉冲控制的标准单模光纤环路仪,单跨距较小;在传输过程中需要复杂的处理,如:多次放大、色散的光补偿和电补偿、滤波整形和去噪声等^[12-14]。目前尚未发现有关 16QAM 信号在 DFF 中传输的报道;而通信业界迫切期望有比标准单模光纤(Standard Single Mode Fiber, SSMF)特性更好的传输介质以实现高速率 16QAM 信号更长单跨距 Front-haul 传输。

鉴于此,笔者提出了高速率、偏振复用(Polarization Multiplexing, PM)、正交幅度调制信号的 Front-haul DFF 传输系统,系统传输速率为 160 Gbps 和 256 Gbps,调制格式为 PM-16QAM;在较低输入光功率下,高速率、PM-16QAM 信号在该系统的传输特性要优于在 NZDSF 和 SSMF 系统

的传输特性,且速率越高效果越明显;文中重点突出光纤系统更好传输特性这个 Front-haul 传输的核心指标,为特殊应用场景下移动通信 Front-haul 长跨距传输提供了新思路 and 实验保障。

1 实验装置

图 1 为高速率 16QAM 信号实验传输系统原理图,分为三个功能模块:信号发射端(QAM transmitter),光传输链路(Fiber transmission link),接收检测端(QAM coherent receiver);具体包括比特模式发生器(BPG)、数模转换器(DAC)、电放大器(Amplifier)、激光器(Laser)、偏振分束器(PBS)、I/Q 调制器(I/Q MOD)、偏振合束器(PBC)、光放大器 EDFA(Erbium-doped fiber amplifier)、相干接收机系统(coherent receiver),以及直流偏置(DC bias)。在信号发射端,BPG 产生四路二进制数字伪随机码信号,每路 DATA 输出速率为 20 Gbps;四路 DATA 信号由 BPG 的输出端进入 DAC,经 DAC 的延迟和电平分阶处理,得到 I 路、Q 路电信号;I 路、

Q 路电信号经 Amplifier 放大后进入 I/Q MOD; Laser 发出波长 1 550 nm、功率 15 dBm 的连续激光经 PBS 分成 X 和 Y 偏振光进入 I/Q MOD;在 I/Q MOD 中,放大的 I 路、Q 路电信号分别调制到 X 和 Y 偏振光,经过 PBC 就得到 160 Gbps、PM-16QAM 调制光信号;调节 I/Q MOD 的六个偏置电压,可得到较好的 160 Gbps、PM-16QAM 调制光信号;接下来,16QAM 光信号进入传输链路传输;信号进入可调 EDFA 模块进行光放大,确保传输所需的光功率,然后分别经过 DFF、NZDSF 和 SSMF 不同类型的光纤单跨距传输;最后进入接收检测端;在接收检测端,PM-16QAM 光信号进入相干接收机进行解调处理,利用四对光电二极管(PIN)对 16QAM 和本振信号(LO)平衡相干接收,然后进行与发射端相反的变换,即模数转换;最后对调制信号序列进行数字信号处理(DSP)的预处理器(Pre-processor)、载波恢复(Carrier recovery)、滤波(Filter)和均衡器(Equalizer)解映射和解码处理,恢复出信源数据,分析 16QAM 星座图、眼图、比特误码率等各种参数变

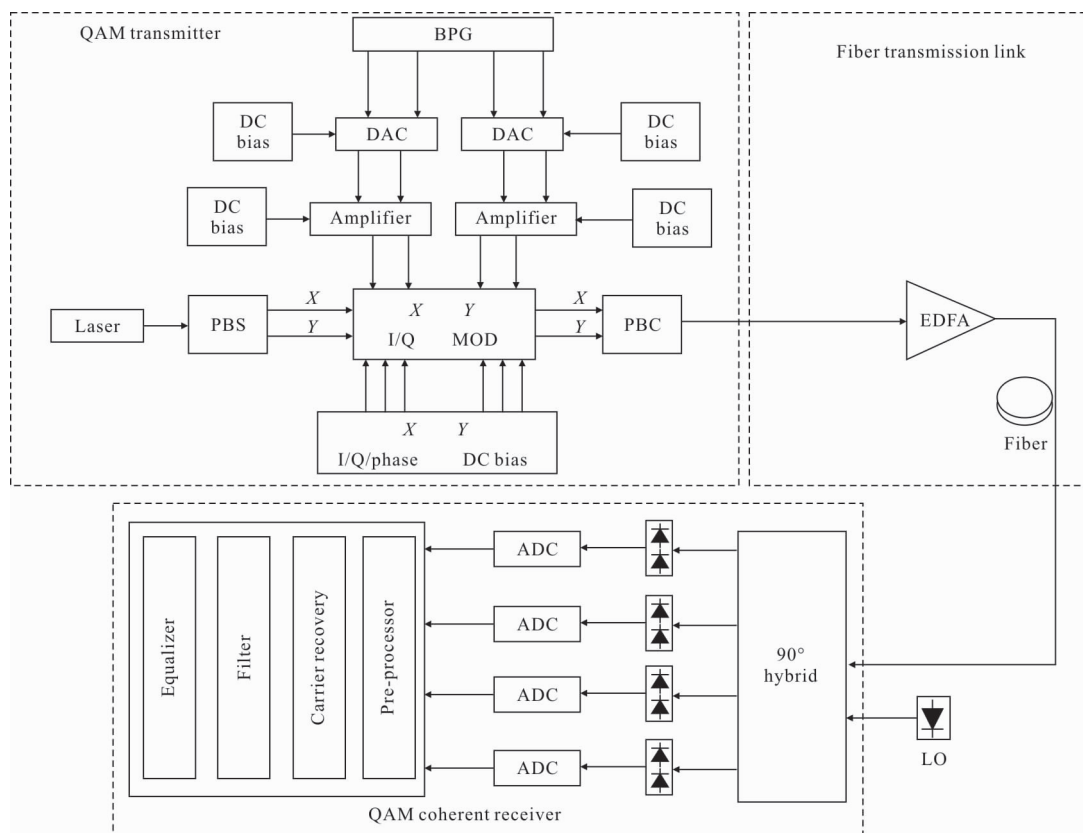


图 1 高速率 16QAM 信号实验传输系统原理图

Fig.1 High bitrate 16QAM signal experimental transmission system schematic

化情况。实验中调节 BPG 输出为 32 Gbps, 就可得到 256 Gbps、PM-16QAM 调制光信号。发射端和接收端都使用窄线宽激光器; 实验时, 调整本振信号波长与输入信号的波长均为 1 550 nm, 相位差恒定; 调整本振信号最大幅度为 15 dBm。

2 实验结果与讨论

该次实验分别研究了 160 Gbps 和 256 Gbps、PM-16QAM 信号在 DFF 中传输特性, 并与 NZDSF、SSMF 中传输特性做了比较。

2.1 160 Gbps、16QAM 信号经 50 km 光纤传输特性

2.1.1 50 km 光纤传输后信号星座图的变化

图 2 为 160 Gbps、16QAM 信号经 50 km DFF 和 50 km NZDSF 传输后 X 偏振态的星座图随输入光功率的变化。图 2(a~c) 依次为输入光功率 0、4、8 dBm 时经 50 km DFF 传输的星座图; 实验中采用凌云光技术集团有限责任公司 20 dBm EDFA 模块

调节入纤光功率。图 2(d)~(f) 为对应的光功率下经 50 km NZDSF 传输的情况。图 2(a)、(d) 输入光功率为 0 dBm, 图 2(b)、(e) 输入光功率为 4 dBm, 图 2(c)、(f) 输入光功率为 8 dBm, DFF、NZDSF 和 SSMF 的二阶色散值分别为 0.75、-6.49、-19.66 ps²/km, 色散绝对值依次增大。在较低输入光功率下, 经 DFF 传输后的星座图要比对应 NZDSF 情况的更紧密; 在较高的输入光功率下, 两种情况下的星座图均发生畸变, 且功率越大畸变情况越严重; 这种畸变现象与参考文献[15]中非线性诱导的相位旋转导致星座图畸变一致, 表明星座图的畸变由非线性造成; 输入光功率越大, 星座图畸变越严重, 非线性影响越大。Y 与 X 偏振态能量分配的比较均匀, 解调后的 Y 偏振态与 X 偏振态特征差异不大, 星座图变化特征同 X 偏振态的情况一致。而 16QAM 信号经 50 km SSMF 传输后难以解调出信号。

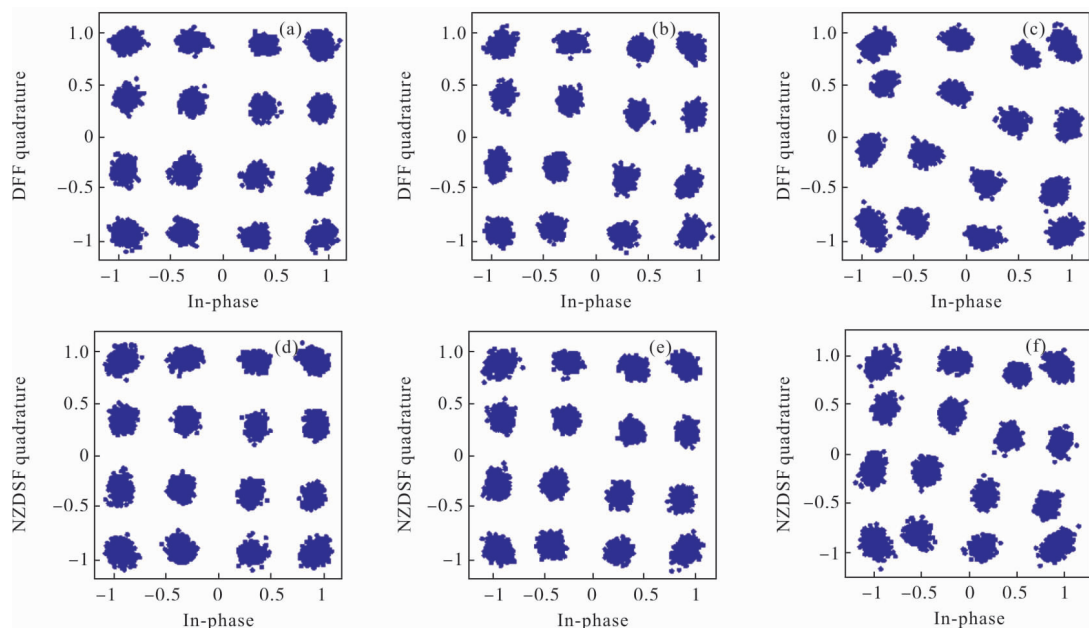


图 2 160 Gbps, 16QAM 信号经 50 km DFF 和 50 km NZDSF 传输后 X 偏振态的星座图

Fig.2 Constellation of X polarization of 160 Gbps, 16QAM signal after transmission over 50 km DFF and 50 km NZDSF

2.1.2 50 km 光纤传输后信号 EVM 的变化

图 3 为 160 Gbps、16QAM 信号传输后 X 偏振态的 EVM(图 3(a))、Q-factor(图 3(b))、BER(图 3(c)) 随输入光功率的变化。带圆形、正方形的实线分别为 50 km DFF 和 50 km NZDSF 传输后的情况。在输入光功率为 0 dBm 时, 经 DFF 传输后的 EVM 为

6.34%, Q-factor 为 16.97 dB, BER 为 6.62×10^{-13} ; 经 NZDSF 传输后的 EVM 为 6.83%, Q-factor 为 16.32 dB, BER 为 2.21×10^{-11} ; 可见, 经 DFF 传输后的 EVM 优于经 NZDSF 传输情况 0.5%, Q-factor 优于经 NZDSF 传输情况的 0.65 dB, BER 优于 NZDSF 传输情况两个数量级。随着输入光功率逐渐增加到

8 dBm, 经 DFF 传输后的 EVM 逐步增加至 15.44%, Q-factor 降至 9.24 dB, BER 降至 1.42×10^{-3} ; 对应 NZDSF 的 EVM 逐步增加至 13.87%, Q-factor 和 BER 分别降至 10.17 dB 和 4.74×10^{-4} ; EVM 的增加主要是非线性的影响; EVM 变化趋势可得, 随着输入光功率的增加, 系统受非线性影响增大, EVM 增加速率加快; 而经 NZDSF 传输后 EVM 增加速率小于对应的 DFF 的 EVM 增加速率, 使得经两种光纤传输后的 EVM 产生交叉。当输入光功率为 4 dBm 时, 经两种光纤传输后的 EVM 相等, 输入光功率从 0 dBm 提高到 4 dBm, 经 DFF 传输后 EVM 优于经 NZDSF 传输后情况, 但优势逐渐缩小; 输入光功率从 4 dBm 提高到 8 dBm, 经 DFF 传输后 EVM 却劣于经 NZDSF 传输后情况, 且劣势逐渐扩大。表明较高输入光功率下, DFF 链路非线性效应比较突出。而 Q-factor 和 BER 的变化情况与 EVM 相对应。

图中眼图可得, 当输入光功率低于和等于 4 dBm 时, 经 DFF 传输后信号的眼图质量很好, 而经 NZDSF 传输后眼图交叉点两边的线迹很模糊, 表明在此功率下 DFF 系统特性优势明显; 当输入光功率超过 4 dBm 时, 由于受非线性影响较大, 眼图劣化明显, 经 DFF、NZDSF 传输后眼图的最佳抽样时间的中间两个交叉点出现明显分离、眼睛睁开度减小, 眼图斜边迹线模糊、抖动增加。Y 偏振态的性能变化规律与 X 偏振态的情况类似。

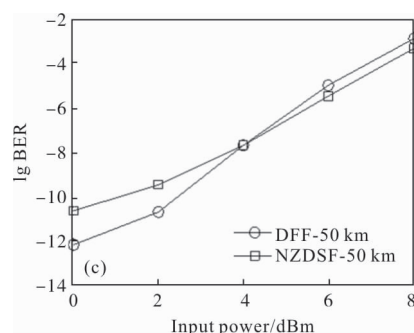
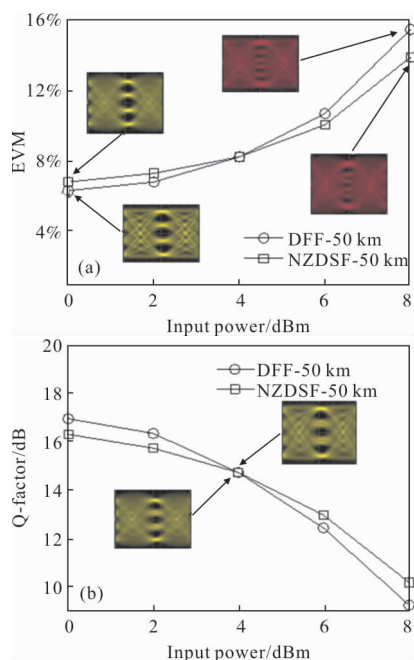


图 3 160 Gbps、16QAM 信号经光纤传输后 X 偏振态的 EVM、Q-factor、BER 随输入光功率的变化
Fig.3 Variations of X polarization EVM, Q-factor and BER of 160 Gbps, 16QAM signal with input power after transmission

2.1.3 光谱峰值和旁瓣噪声峰值功率的变化

图 4 为信号的光谱峰值功率和光谱旁瓣噪声峰值功率随输入光功率的变化。当输入光功率由 0 dBm 线性增加至 8 dBm 时, 160 Gbps、16QAM 信号经 DFF 传输后光谱峰值功率从 -37.53 dBm 逐步增至 -28.90 dBm, 旁瓣噪声峰值功率从 -66.67 dBm 逐步增至 -51.43 dBm; 经 NZDSF 传输后光谱峰值

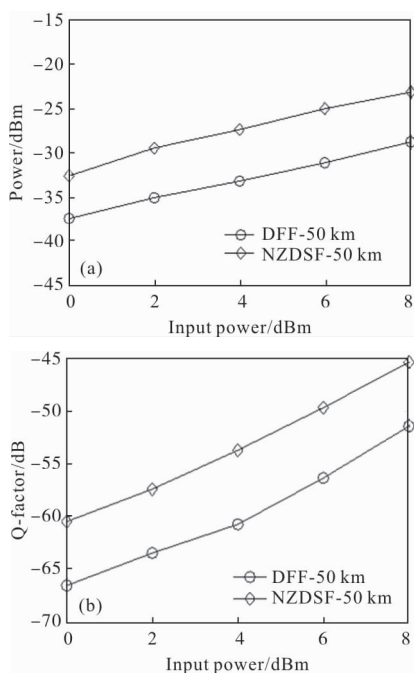


图 4 160 Gbps、16QAM 信号经 DFF 和 NZDSF 传输后光谱峰值功率(a)和旁瓣噪声峰值功率(b)随输入光功率的变化
Fig.4 Variations of spectral peak powers (a) and sidelobe noise peak powers (b) of 160 Gbps, 16QAM signal with input power after DFF and NZDSF transmission

功率从-32.67 dBm 逐步增至-23.26 dBm, 旁瓣噪声峰值功率从-60.54 dBm 逐步增至-45.31 dBm。可见,160 Gbps、16QAM 信号经 DFF 传输后的光谱峰值功率和旁瓣噪声功率要低于对应 NZDSF 情况; 信号在 DFF 和 NZDSF 传输后的光谱峰值功率差小于旁瓣噪声功率差;表明 DFF 衰减旁瓣噪声存在明显优势。研究表明,DFF 衰减比 NZDSF 和 SSMF 约大 0.1 dB/km, 虽然 DFF 链路传输使高速率 16QAM 信号功率下降, 但更有效地降低了旁瓣噪声和 EDFA 噪声等的叠加; 高速率 16QAM 信号对旁瓣噪声和 EDFA 噪声的干扰比信号功率降低导致信号劣化更敏感;DFF 低色散使得脉冲展宽影响小于 NZDSF 传输情况; 所以 DFF 链路传输特性更好、衰减旁瓣噪声更明显。

2.2 256 Gbps、16QAM 信号经 DFF 传输特性

2.2.1 50 km DFF 传输后的信号 EVM 的变化

图 5 为 256 Gbps、16QAM 信号经 50 km DFF 传输后的 EVM(图 5(a))、Q-factor(图 5(b))、BER(图 5(c))随输入光功率变化的拟合曲线。星号和叉号的曲线分别对应 X 偏振态和 Y 偏振态。由图可得, 随着输入光功率增加, 经 DFF 传输后 X 偏振态的 EVM 均呈现先减小后增大的近“U”形趋势;当输入光功率由-10 dBm 提高到-2 dBm 时,其 EVM 近似线性减小;EVM 由 10.71% 降至 8.11%, Q-factor 由 12.41 dB 提高到 14.83 dB, BER 由 1.12×10^{-5} 降至 1.31×10^{-8} ;星座图的点逐渐紧密,但未发生非线性畸变,表明在较低输入光功率下光纤损耗是影响 DFF 系统性能的主导因素;系统性能随输入光功率增加逐渐变好。当输入光功率由-2 dBm 提高到 9 dBm 过程中,EVM 由 8.11% 增至 17.46%, Q-factor 由 14.83 dB 降到 8.17 dB, BER 由 1.31×10^{-8} 增至 3.92×10^{-3} ;且 EVM 增加速率逐渐变快,星座图逐步发生畸变;表明在较高输入光功率下,光纤非线性效应是影响 DFF 系统性能的主导因素;系统性能随输入光功率增加逐步劣化;输入光功率越大,光纤非线性影响越大,性能劣化越严重。Q-factor 和 BER 的变化情况与 EVM 相对应。Y 偏振态在此过程中的变化特征与 X 偏振态类似。

X 和 Y 偏振态 EVM 的“U”形底部对应的输入光功率分别为-2 和 1 dBm;两种偏振态 EVM 低于

10.5%对应的输入光功率范围分别为 [-9.4 dBm, 3.3 dBm]和[-9.4 dBm, 5.8 dBm]。在传输过程中两种偏振态能量分配稍不均匀,使得相同输入光功率下两种偏振态传输后的 EVM 存在偏差,但总体的趋势一致。相较于 160 Gbps,256 Gbps 传输速率的 EVM 要高 2%~3%,EVM 上升速率明显要大。

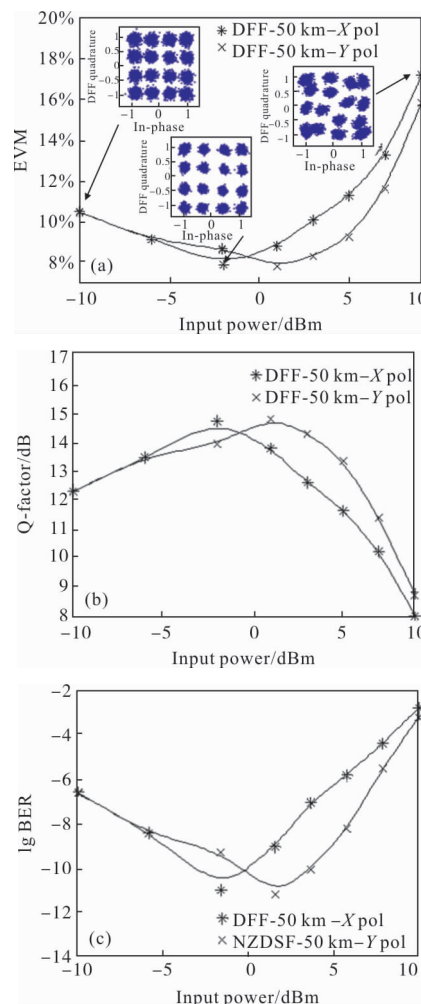


图 5 256 Gbps、16QAM 信号经 50 km DFF 传输后的 EVM、Q-factor、BER 随输入光功率的变化

Fig.5 Variations of EVM, Q-factor and BER of 256 Gbps, 16QAM signal with input power after transmission over 50 km DFF

2.2.2 75 km DFF 传输后的信号 EVM 的变化

图 6 为 256 Gbps、16 QAM 信号经 75 km DFF 传输后的 EVM(图 6(a))、Q-factor(图 6(b))、BER(图 6(c))随输入光功率的变化。星号和圆圈分别为 X 和 Y 偏振的实验数据,曲线是选取五个实验数据的中间数据拟合得到的,实线为 X 偏振,虚线为 Y 偏振。

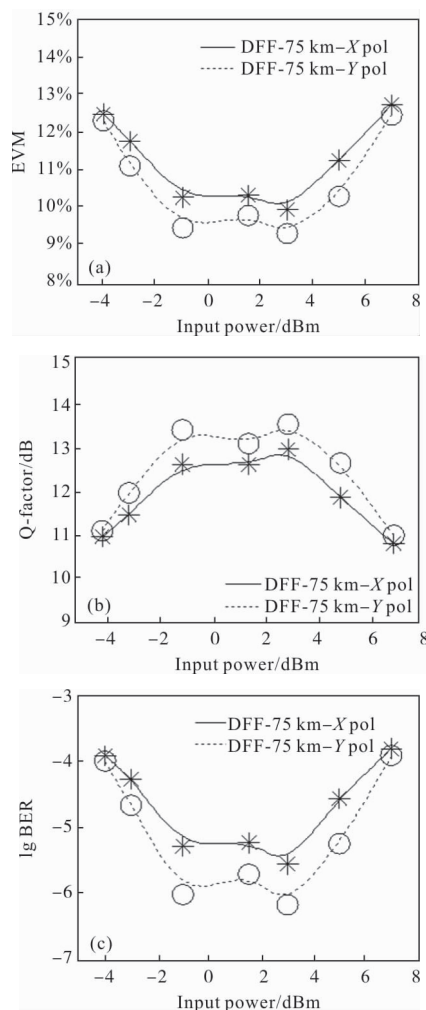


图 6 256 Gbps、16QAM 信号经 75 km DFF 传输后的 EVM、Q-factor、BER 随输入光功率的变化

Fig.6 Variations of EVM, Q-factor and BER of 256 Gbps, 16QAM signal with input power after transmission over 75 km DFF

图中,256 Gbps、16QAM 信号经 75 km DFF 传输后 EVM 随输入光功率的变化与传输 50 km 情况类似;随着输入光功率增加,经 DFF 传输后 X 偏振态的 EVM 先减小后增大近‘U’形趋势;当输入光功率由-4 dBm 提高到-1 dBm 时,由于光纤损耗的减小,其 EVM 近似线性减小;EVM 从 12.59%降至 10.37%,Q-factor 由 11.01 dB 提高到 12.63 dB, BER 由 1.43×10^{-4} 降至 6.10×10^{-6} ;当输入光功率由-1 dBm 提高到 3 dBm 时,系统性能良好、稳定,EVM 范围为[10.06%,10.45%],Q-factor 为[12.63 dB, 12.93 dB],BER 为 [3.29×10^{-6} , 7.01×10^{-6}];当输入光功率由 3 dBm 增至 7 dBm 时,受非线性影响增加,

其 EVM 快速增加,EVM 从 10.06%增至 12.82%,Q-factor 由 12.96 dB 降低到 10.85 dB,BER 由 3.29×10^{-6} 增至 1.82×10^{-4} 。Y 偏振态在此过程中的变化特征与 X 偏振态类似;由于传输过程中能量分配稍不均匀,使得两种偏振态变化特征存在较小偏差。

X 和 Y 偏振态 EVM 的“U”形底部对应的输入光功率均为 3 dBm;两种偏振态 EVM 低于 10.5%对应的输入光功率范围分别为[-0.66 dBm, 3.68 dBm]和[-2.12 dBm, 4.92 dBm];此功率范围比传输 50 km 的情况分别小 8.36 dB 和 8.16 dB。

高速率 PM-16QAM 信号长距离传输时,在 NZDSF 和 SSMF 传输后难以解调出信号,在 DFF 传输后能较好地解调出信号且传输特性较好。

3 结论

实验研究了高速率 PM-16QAM 信号在 DFF 链路系统的传输特性,并分别与 NZDSF 和 SSMF 链路传输特性做了比较。在输入光功率为 0 dBm,PM-16QAM 信号在 160 Gbps 传输 50 km 时,经 DFF 传输后 EVM 优于经 NZDSF 传输情况 0.5%,BER 优于 NZDSF 传输情况两个数量级;DFF 链路能更好地衰减旁瓣噪声;256 Gbps 传输 50 km 和 75 km 时,仅在 DFF 链路传输后可以较好地解调出信号;75 km 时 X 和 Y 偏振态保持较好特性的输入光功率范围比传输 50 km 的情况分别小 8.36 dB 和 8.16 dB。在 256 Gbps 和较高输入光功率情况下,对应 50 km 输出的 EVM 变化速率比 160 Gbps 的 EVM 情况要大。

对比 160 Gbps 和 256 Gbps 情况,较低输入光功率时,高速率 PM-16QAM 信号在 DFF 链路的传输特性优于 NZDSF 和 SSMF 链路的传输特性,传输速率越高、传输距离越长效果越明显;较高输入光功率时,传输速率越高,EVM 值越大且系统性能受非线性影响越严重。DFF 链路可作为特殊应用场景下移动通信 Front-haul 长跨距传输的优选方案。

参考文献:

[1] White paper of next generation front-haul interface [R]. Shanghai: China Mobile Research Institute, 2015.
 [2] Pfeiffer T. Next generation mobile Front-haul architectures[C]//

- Optical Fiber Communications Conference & Exhibition, 2015: 1–3.
- [3] Wu Limin, Song Peng, Wang Jing, et al. A squeezed lattice high negative dispersion and high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S120001. (in Chinese)
- [4] Liu Fuhua, Wang Ping, Feng Gang, et al. Influence of Gamma-ray radiation on optical fiber dispersion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0118001. (in Chinese)
- [5] Li Xin, Zheng Hongjun, Xia Yunjie. Supercontinuum spectrum generation in dispersion flattened fiber with concave dispersion profile [C]//SPIE, 2008, 7136: 71363A.
- [6] Taga Hidenori, Chung Weihung. Impact of dispersion map design upon transmission performance of long-haul RZDPSK system using dispersion flattened fiber [J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8332–8337.
- [7] Zheng Hongjun, Liu Shanliang, Wu Chongqing, et al. Experimental study on pulse propagation characteristics at normal dispersion region in dispersion flattened fibers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(4): 763–766.
- [8] Zheng Hongjun, Li Xin, Liu Shanliang, et al. Generation and transmission of a high-bit-rate optical millimeter wave with an unrepeated long single-span using equalization amplification [J]. *Optics Communications*, 2015, 356: 599–606.
- [9] Xu Y Z, Liu M X, Zhan G, et al. Nonlinear chirped-pulse propagation and supercontinuum generation in dispersion-flattened dispersion-decreasing fibers [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(4): 439–445.
- [10] Wang Yi, Yang Shuai, Ma Jing, et al. Performance analysis of coherent OFDM system in free space optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0722003. (in Chinese)
- [11] Ruan Xiukai, Tang Zhenzhou, Zhang Yaoju, et al. Electrical blind detection of coherent optical communication signals using feedback voltage bias type Hopfield neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 715–720. (in Chinese)
- [12] Meng Xiaobo, Zhou Weiqin, Ge Chao, et al. Long-haul 112 Gbit/s coherent polarization multiplexing QPSK transmission experiment on G.652 fiber with the improved DSP unit [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(18): 3665–3670.
- [13] Zhang Tingting, Dan Wang, Rui Ding, et al. 396.5 Gb/s, 7.93 b/s/Hz hybrid 16–32QAM transmission over 480 km SSMF [C]//Advanced Photonics for Communications, 2014, SM3E: SM3E.3.
- [14] Guiomar F P, Carena A, Bosco G, et al. Nonlinear mitigation on subcarrier-multiplexed PM-16QAM optical systems [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 4298–4311.
- [15] Darko Zibar, Ole Winther, Niccolo Franceschi, et al. Nonlinear impairment compensation using expectation maximization for dispersion managed and unmanaged PDM 16QAM transmission [J]. *Optics Express*, 2012, 20(26): 181–196.