

4 × 100 Gbit/s 少模光纤长距离准单模双向传输的实验研究

李超, 赵健*, 王伟, 杨志群, 王震, 米瑞龙, 余丽垚

天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 针对单模光纤的容量极限问题, 利用少模光纤实现了 4 × 100 Gbit/s 的双偏振正交相移键控交叉复用的长距离准单模双向传输, 达到了 1700 km 的传输距离。对系统中多径干扰 (MPI) 和二次瑞利散射 (DRS) 分别进行了研究。利用 301 个抽头的恒模算法有效补偿了长距离传输过程中的 MPI 损伤, 使系统的传输性能提高了约 1 dB。使用波形整形器有效抑制了 DRS 导致的信号质量劣化。结果表明, 这些处理方法可将系统的传输距离从 1400 km 延长到 1700 km。

关键词 光通信; 准单模传输; 多径干扰; 二次瑞利散射; CMA 算法; 波形整形器

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0206001

4 × 100 Gbit/s Long-Distance Quasi-Single-Mode Bi-Directional Transmission with Few-Mode Fiber

Li Chao, Zhao Jian, Wang Wei, Yang Zhiqun, Wang Zhen, Mi Ruilong, Yu Liyao

Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of the Ministry of Education,

School of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Aiming at the capacity limit of single-mode fiber, a 4 × 100 Gbit/s dual polarization quadrature phase-shift keying (DP-QPSK) interleaved long-distance quasi-single-mode bi-directional transmission is achieved when we use a few-mode fiber, and the transmission distance is over 1700 km. We also study the effects of multi-path interference (MPI) and double-Rayleigh scattering (DRS) on the system. The loss caused by MPI can be effectively compensated by the constant modulus algorithm (CMA) with 301 taps, and the performance of the system increases about 1 dB. Meanwhile, a waveform shaper is used to suppress signal degradation resulting from DRS. The results show that the transmission distance can be extended from 1400 km to 1700 km by these methods.

Key words optical communications; quasi-single-mode transmission; multi-path interference; double-Rayleigh scattering; constant modulus algorithm; waveform shaper

OCIS codes 060.1660; 060.2330; 060.2360

1 引言

长距离光纤传输系统一直面临着两大挑战: 容量和距离。目前长距离光纤网络传输主要采用单芯单模光纤。从 1990 年起, 波分复用 (WDM) 技术, 尤其是密集波分复用 (DWDM) 技术的广泛使用极大地扩展了光纤传输系统的容量, 当时人们乐观地认为已铺设的光纤光缆所能承载的信息容量足够使用 50 年。然而到 2001 年后, 互联网数据通信对传输速率的需求急剧攀升, 商用单模光纤通信系统由于受到光纤放大器的带宽限制以及

收稿日期: 2016-08-31; 收到修改稿日期: 2016-10-25

基金项目: 国家 973 计划 (2014CB340104)、国家自然科学基金 (61377076, 61307085)

作者简介: 李超 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光通信系统方面的研究。E-mail: lichao5032@tju.edu.cn

导师简介: 李桂芳 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: li@creol.ucf.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: enzhaojian@tju.edu.cn

光纤中非线性噪声的影响,其传输容量无法突破 100 Tbit/s 的香农极限^[1]。采用数字后向传播法(DBP)^[2]可对光纤中的非线性效应进行补偿。但是该方法太过复杂,并且对于 DWDM 系统性能的改善十分有限。因此,人们一直在寻找新的技术来拓展单模光纤通信系统的传输容量,并抑制光纤中非线性效应的影响。

近年来,随着数字收发机技术的进步和低损耗大模场光纤工艺的提升,一种新型信道交叉复用的双向传输系统结构引起了人们的广泛关注,并成为一种实用的传输系统方案。Yaman 等^[3]实现了容量为 30.6 Tbit/s、频率效率为 6.6 bit/(s·Hz)的双向传输。Qian 等^[4]完成了容量距离积为 306 Pb/(s·km)的双向传输实验。Yaman^[5]推导了交叉复用双向传输系统中背向瑞利散射功率的理论表达式,并对其影响因素进行了分析和探究。Genevaux 等^[6]利用 1550 nm 波长下的三个模式进行了 40 km 的双向模分复用传输。Milione 等^[7]描述了一种无多输入多输出(MIMO)解复用的模分复用系统,实现了 10 Gbit/s 速率的 0.5 km 实时双向传输。

上述长距离双向传输实验中,都是以单模光纤作为传输介质。在模分复用双向传输实验中,也主要是以数据中心为应用的短距离传输为主。因此,在长距离的双向传输系统中,目前还没有使用单芯少模光纤(FMF)作为介质进行准单模(QSM)传输。与单模光纤相比,单芯少模光纤具有大模场面积以及更多空间维度的优势,可以减小非线性效应的影响,并能将通信容量扩大 N 倍(N 为少模光纤中的模式数),从而有效解决了单模光纤传输系统面临的容量极限问题。

为此,本文以少模光纤作为长距离双向传输系统中的介质,并利用少模光纤中的基模 LP_{01} 作为传输信息的载体,进行了长距离准单模双向传输实验,实现了 1700 km 4×100 Gbit/s 的双偏振(DP)正交相移键控(QPSK)交叉复用的长距离双向准单模传输,并且对双向传输系统中的二次瑞利散射(DRS)和多径干扰(MPI)等影响因素进行了研究。使用 301 个抽头的恒模算法(CMA)对 MPI 引起的损伤进行补偿,使用波形整形器有效抑制了由 DRS 导致的信号质量劣化,最终将传输距离从 1400 km 拓展到 1700 km。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。外腔激光器以 50 GHz 的信道间隔通过波分复用进入误码仪(10001 系列,SHF 公司)中,其中 QPSK 模块将信号调制成速率为 28 Gbaud 的 QPSK 格式。为了对相邻信道进行解相关,使用 50 GHz/100 GHz 的光交叉复用器将奇、偶信道分开。由偏振复用模块产生 112 Gbit/s DP-QPSK 信号。最后,所有的信道都进入双向循环的环路中。图 2 为实验系统中的发射机结构和声光调制器实物图。

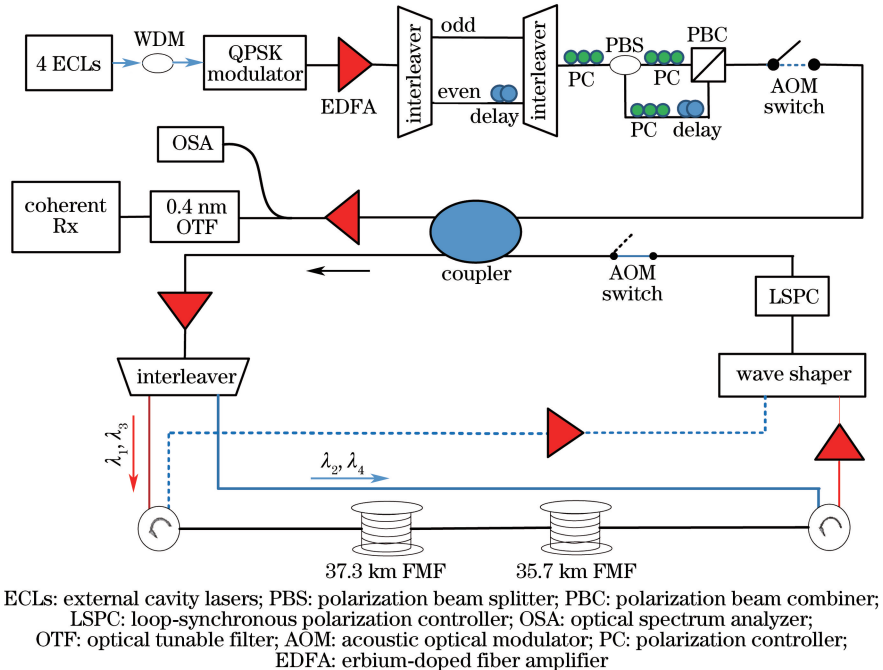


图 1 双向准单模传输实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of bi-directional quasi-single-mode transmission

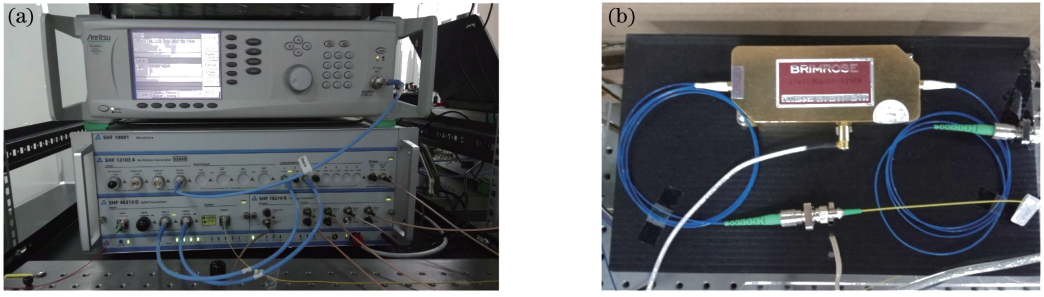


图 2 (a)发射机结构实物图;(b)声光调制器实物图

Fig. 2 (a) Picture of transmitter structure; (b) picture of acoustic optical modulator

当信号光进入环路中时,通过起始端的光交叉复用器,将 WDM 信道分成两个方向,其中波长为 λ_1 和 λ_3 的光沿红色箭头所示方向传输,波长为 λ_2 和 λ_4 的光沿蓝色箭头所示方向传输,最后用波形整形器(4000S 系列,Finisar 公司)将红色和蓝色两路传输的 4 个波长的光进行合束,并从环路中输出。实验中使用的通信光纤为总长 73 km 的 2 模阶跃型光纤(少模光纤未定型,烽火藤仓公司),该少模光纤中 LP_{01} 模的模场有效面积为 $200 \mu\text{m}^2$,损耗为 0.2 dB/km ,色度色散为 $21 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。将标准的单模跳线熔接在少模光纤的首端和末端,以确保与单模环形器兼容。偏振扰偏器(PCD 系列,General Photonics 公司)的使用主要是为了增加 X、Y 两个偏振方向之间的耦合,以减小长距离传输中偏振模色散的影响。此外,搭配使用环内和环外声光开关(AMM 型号,Brimrose 公司),可实现在实验室条件下进行长距离传输的目的。

在相干接收机模块中,所有的信道都被掺铒光纤放大器(EDFA)放大,并使用 0.4 nm 的可调谐滤波器筛选出要解调的目标信道。当目标信道进入相干接收机之后,使用采样率为 80 GSa/s 、带宽为 36 GHz 的实时示波器进行数据采样,并用数字信号处理(DSP)算法离线处理所采集到的数据。DPS 算法的步骤如下:1) 将数据采样率设为 80 GSa/s ,并进行色度色散的补偿;2) 使用 CMA 进行偏振模色散和模式色散的恢复与均衡;3) 4 次方频偏估计算法;4) Viterbi-Viterbi 相位恢复算法;5) 误码率的计算。

3 实验结果和分析

图 3 是以 1550.12 nm 为中心信道的背靠背和单个准单模跨度(73 km)条件下 Q 值与光信噪比(R_{OSN})的关系曲线,插图为 QPSK 光信号的眼图。其中信号的 Q 值由误码率(R_{BE})的测量值计算得到,计算公式为

$$Q = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(2R_{\text{BE}}), \quad (1)$$

式中 R_{BE} 为误码率,erfc 为余补误差函数。

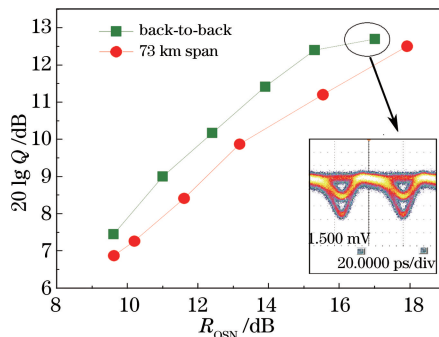


图 3 背靠背和单个准单模跨度条件下 Q 值随 R_{OSN} 的变化曲线

Fig. 3 Variation in Q with R_{OSN} under conditions of back-to-back and a QSM fiber span

一般情况下,由于少模光纤的折射率分布不均匀以及外界环境的扰动, LP_{01} 模与 LP_{11} 模之间会发生模式耦合,具体过程如图 4 所示。当光纤中的 LP_{01} 模在传输过程中到达某一耦合点 A 时,会与高阶模 LP_{11} 耦合,在 LP_{11} 模上经过一段无耦合的传输,并到达下一耦合点 B 时, LP_{11} 模上的信息将再次耦合到 LP_{01} 模上^[8-9]。由于 LP_{11} 模的传播速度比 LP_{01} 模的传播速度慢,因此当 LP_{11} 模上的信息再次返回到 LP_{01} 模上时,

就变成了一种噪声,这就是准单模传输过程中由模式耦合所引起的 MPI 损伤。

在实际的 QSM 传输系统中,少模光纤中的耦合远超过两次,并且随机分布在光纤中的任何位置,这会严重影响传输系统的性能。针对该问题,采用自适应的 CMA 在电域上对 MPI 损伤进行处理。由于 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的模式耦合机制与偏振复用时 X、Y 两个偏振方向之间的耦合机制相同,而 CMA 对偏振复有良好的效果,因此对由模式耦合所引起的 MPI 损伤也同样会有较好的补偿效果。为了评估 MPI 对系统性能的影响,进行了一次无环路的单跨度传输实验(图 3)。为防止非线性效应对实验结果产生额外影响,实验在线性区域进行。此外,假定 MPI 会产生高斯噪声,这样 MPI 就可以被有效地估算。在单跨度中,MPI 的强度水平约为 $-19 \text{ dB}^{[10]}$ 。

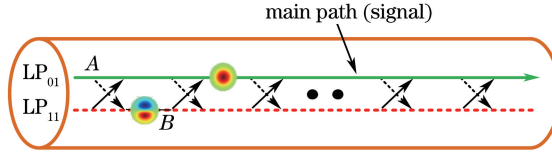


图 4 准单模传输系统中的模式耦合

Fig. 4 Mode coupling in QSM transmission system

以 1550.12 nm 信道为中心,信号光在双向准单模系统中传输了 730 km ,得到入纤功率对系统性能的影响,如图 5 所示。从图中的测量结果可见,信道的最佳入射功率在 3.3 dBm 左右。在使用 301 个抽头的 CMA 后,最佳入射功率下的 $20 \lg Q$ 比之前提高了 1 dB 。以此信道的最佳入射功率作为入纤功率,得到 Q 值随传输距离的变化曲线,如图 6 所示。由图可见,信号光在 QSM 系统长距离传输过程中受到了 MPI 的损伤。随着传输距离的增加,积累的 MPI 损伤越来越大,为延长系统的传输距离,需要对 MPI 的损伤进行补偿。使用 301 个抽头的 CMA 对长距离传输的 MPI 进行补偿,若取判决阈值为 6.25 dB ,则 QSM 系统的传输距离可从 1400 km 延长到 1700 km 。在 1700 km 处,整个系统所累积的 MPI 强度超过 -6 dB 。

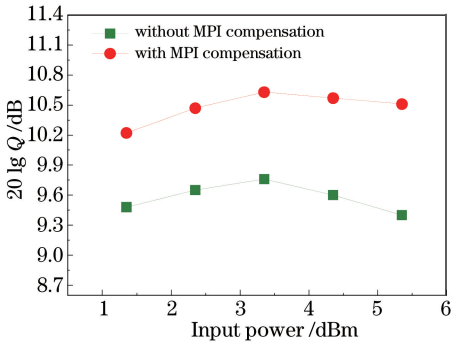


图 5 传输 730 km 后 1550.12 nm 信道中 Q 值随入射功率的变化曲线

Fig. 5 Variation in Q value with input power at 1550.12 nm after transmission of 730 km

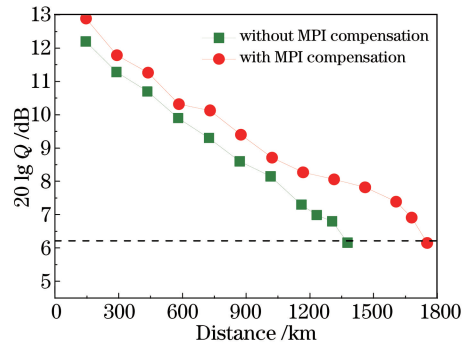


图 6 1550.12 nm 信道中 Q 值随传输距离的变化曲线

Fig. 6 Variation in Q value with transmission distance of 1550.12 nm channel

众所周知,在单向传输链路中,背向瑞利散射(RS)持续衰减,以致于最后可以忽略不计。而在双向传输链路中,背向瑞利散射会被中继放大器不断放大,从而产生很强的功率累积。DRS 就是信号光在光纤传输过程中受到两次背向瑞利散射而产生的,并被 EDFA 不断地放大。所以,RS 和 DRS 是信号光在双向传输系统中信噪比恶化的最主要影响因素^[11]。由于背向瑞利散射系数与有效模场面积成反比,因此大模场面积的少模光纤瑞利散射系数更低。经计算,传输损耗为 0.2 dB/km 、模场面积为 $200 \mu\text{m}^2$ 的少模光纤的瑞利散射系数为 $-34 \text{ dB}^{[11-12]}$ 。考虑到单跨度的典型损耗为 15 dB ,经计算,由 RS 引起的带外噪声和由 DRS 引起的带内噪声分别为 -15.7 dB 和 -33 dB ,远低于信号本身的功率。另外,波形整形器的使用滤除了大部分带外噪声,并削弱了带内噪声对系统性能的影响。

在 QSM 传输系统中,有效面积大的少模光纤和波形整形器的使用使得所有信道都实现了 1700 km 的传输距离,如图 7 所示。此外,采用关断积分法^[13]测量了 QSM 传输系统中心信道的信噪比。其中,单波长

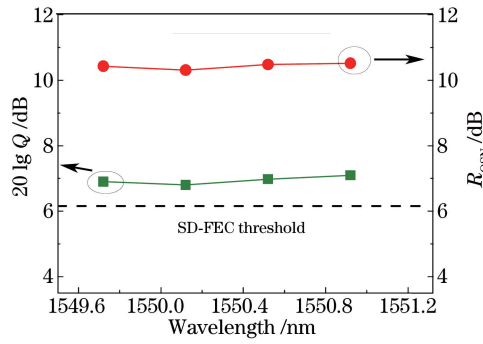


图 7 传输 1700 km 后 Q 值和 R_{OSN} 与波长的关系

Fig. 7 Variations in Q value and R_{OSN} with wavelength after transmission of 1700 km

1550.12 nm 信号光传输前后的信噪比分别为 42.42 dB 和 17.25 dB, WDM 信道中 1550.12 nm 的信号光传输前后的信噪比分别为 34.13 dB 和 10.01 dB, 光谱图如图 8 所示。

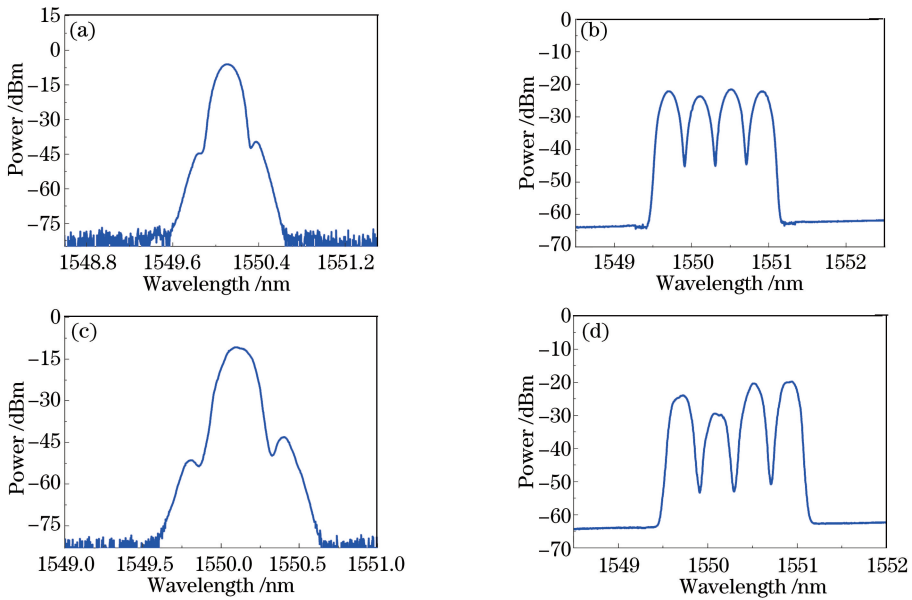


图 8 (a) 中心波长为 1550.12 nm 的信号光发射光谱; (b) WDM 信道的发射光谱; (c) 传输 1700 km 后中心波长为 1550.12 nm 的信号光接收光谱; (d) 传输 1700 km 后 WDM 信道的接收光谱

Fig. 8 (a) Launched spectrum of signal with central wavelength of 1550.12 nm; (b) launched spectrum of WDM channel; (c) received spectrum of signal with central wavelength of 1550.12 nm after transmission of 1700 km; (d) received spectrum of WDM channel after transmission of 1700 km

4 结 论

进行了 4×100 Gbit/s 的少模光纤长距离 QSM 双向传输实验, 并实现了 1700 km 的传输距离。对影响系统性能的限制因素 MPI 和 DRS 分别进行了分析。利用 301 个抽头的 CMA 有效地补偿了 MPI 损伤, 使系统性能获得了 1 dB 左右的提高。波形整形器的使用有效降低了由 DRS 导致的传输信号质量的劣化。实验结果表明, QSM 系统在长距离传输和容量升级方面较大的提升空间, 是一种具有可行性的方案。该研究为未来有望解决容量极限问题的模分复用系统的发展提供了参考。下一步的研究将包括更高阶的调制格式、正交频分复用和超信道的准单模传输。

参 考 文 献

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

- [2] Mateo E F, Zhou X, Li G. Improved digital backward propagation for the compensation of inter-channel nonlinear effects in polarization-multiplexed WDM systems[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 570-583.
- [3] Yaman F, Zhang S, Huang Y K, *et al.* 30.6 Tb/s full-duplex bidirectional transoceanic transmission over 75×90.9 -km fiber spans[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, Optical Society of America, 2014: Th5B.5.
- [4] Qian D, Huang M F, Zhang S, *et al.* 30 Tb/s C-and L-bands bidirectional transmission over 10,181 km with 121 km span length[J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14244-14250.
- [5] Yaman F. Bi-directional transmission to reduce linear and nonlinear crosstalk [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, Optical Society of America, 2015: Th4D.1.
- [6] Genevaux P, Simonneau C, Labroille G, *et al.* 6-mode spatial multiplexer with low loss and high selectivity for transmission over few mode fiber[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, Optical Society of America, 2015: W1A.5.
- [7] Milione G, Ji P N, Ip E, *et al.* Real-time bi-directional 10GbE transmission using MIMO-less space-division-multiplexing with spatial modes [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, Optical Society of America, 2016: W1F.2.
- [8] Li G, Bai N, Zhao N, *et al.* Space-division multiplexing: The next frontier in optical communication[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, 6(4): 413-487.
- [9] Sui Q, Zhang H Y, Downie J D, *et al.* Long-haul quasi-single-mode transmissions using few-mode fiber in presence of multi-path interference[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3156-3169.
- [10] Downie J D, Hurley J, Roudas I, *et al.* MPI measurements of quasi-single-mode fibers [C]. *IEEE Photonics Conference (IPC)*, 2015: 273-274.
- [11] Wang Z, Wu H, Hu X, *et al.* Rayleigh backscattering in few-mode optical fibers[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, Optical Society of America, 2016: W4F.6.
- [12] Artiglia M, Locaputo M A, Ruocchio C. Backscattering recapture factor measurements using optical continuous wave reflectometry[C]. *28th European Conference on Optical Communication*, 2002: 1-2.
- [13] Yang Lixin. The discussion of OSNR testing method in ultra high speed DWDM system [J]. *Guangdong Communication Technology*, 2015, 35(11): 58-62.
- 杨立新. 超高速率 DWDM 系统 OSNR 测试方法探讨 [J]. *广东通信技术*, 2015, 35(11): 58-62.